行政院環境保護署

土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法及撰寫指引

中華民國九十五年四月

行政院環境保護署

土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法

中華民國九十五年四月

目　錄

第一章前言 1
1.1 健康風險評估簡介 1
1.2 層次性健康風險評估簡介 6
1.3 本評析方法適用範圍 7
第二章 第一層次健康風險評估 1
2.1 危害鑑定 2
2.1.1 資料蒐集 2
2.1.2 關切污染物判定 6
2.1.3 危害辨識 8
2.2 劑量反應評估 13
2.3 暴露評估 17
2.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型 17
2.3.2 暴露途徑 18
2.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量 19
2.3.3.1 土壤介質暴露途徑之暴露劑量計算 24
2.3.3.2 地下水介質暴露途徑之暴露劑量計算 25
2.3.3.3 空氣介質暴露途徑之暴露劑量計算 31
2.4 風險風險特徵描述 37
2.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算 37
2.4.2 不確定性分析 44
2.4.3 根據第一層次健康風險評估擬定之決策 44
第三章 第二層次健康風險評估 1
3.1 危害鑑定 1
3.1.1 資料蒐集 1
3.1.2 關切污染物判定 5
3.1.3 危害辨識 6
3.2 劑量反應評估 10
3.3 暴露評估 13
3.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型 14

3.3.2 暴露途徑與傳輸途徑 15
3.3.2.1 場址內受體之暴露途徑 15
3.3.2.2 場址外受體之暴露途徑及傳輸途徑 17
3.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量 20
3.3.3.1 場址內受體 20
3.3.3.2 場址外受體 36
3.3.3.3 合理最大暴露劑量之估計 45
3.4 風險特徵描述 52
3.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算 52
3.4.2 不確定性分析 57
3.4.3 根據第二層次健康風險評估擬定之決策 57
第四章 第三層次健康風險評估 1
4.1 危害鑑定 1
4.1.1 資料蒐集 2
4.1.2 關切污染物判定 5
4.1.3 危害辨識 6
4.2 劑量反應評估 9
4.3 暴露評估 13
4.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型 13
4.3.2 暴露途徑 14
4.3.2.1 住宅區與工商業區 14
4.3.2.2 休憩區 16
4.3.2.3 農漁牧區 17
4.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量 18
4.4 風險特徵描述 33
4.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算 33
4.4.2 不確定性分析 37
4.4.3 根據第三層次健康風險評估擬定之決策 37
第五章 石油碳氫化合物總風險評估 1
5.1 前言 1
5.2 石油碳氫化合物於風險評估中的碳數分類與應評估之單一物質表列 ..5-1

5.3 風險特徵描述 5-4

附錄一　專有名詞
附錄二　預設之宿命傳輸模式參數
附錄三　預設之受體暴露量計算參數
附錄四　常態分佈測試
附錄五　如何進行參數敏感性分析
附錄六　各項工作檢查清單

表目錄

表 2.3.3-1 關切污染物暴露劑量計算公式 2-20
表 3.3.3-1 關切污染物暴露劑量計算公式 3-21
表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式 3-40
表 4.3-1 各傳輸途徑的常用數值解宿命傳輸模式 4-24
表 4.3-2 常見統計分布表 4-29
表 5.2-1 TPH 中毒性較強或較明確的化學物質 5-3

圖目錄

圖 1.1-1 健康風險評估架構 1-2
圖 1.2-1 三層次健康風險評估執行之流程簡圖 1-8
圖 2.1-1 第一層次健康風險評估危害鑑定步驟 2-3
圖 2.2-1 致癌物質判定程序 2-12
圖 2.4-1 致癌風險計算流程 2-39
圖 2.4-2 非致癌風險計算流程 2-40
圖 3.3.2-1 第二層次場址外受體暴露途徑及傳輸途徑概念圖 3-16
圖 3.3.2.2-1 場址外受體暴露途徑及傳輸途徑評估程序圖 3-18
圖 3.3.3.3-1 第二層次健康風險評估合理最大暴露劑量估計程序 3-46

第一章 前言

1.1 健康風險評估簡介

健康風險評估為專指以危害鑑定(Hazard Identification)、劑量反應評估(Dose Response Assessment)、暴露評估(Exposure Assessment)與風險特徵描述(Risk Characterization)為基本架構來判定風險之專有名詞[1]。

以健康風險評估進行的基本流程如圖 1.1-1 所示。本健康風險評估評析方法(以下簡稱評析方法)適用於以土壤及地下水中污染物為標的之健康風險評估，各步驟所需執行的內容如下：

一、危害鑑定(Hazard Identification)：

危害鑑定為健康風險評估的第一個步驟，主要係以蒐集現有的場址資訊與污染物檢測資料，來確認場址關切污染物種類及其濃度、可能影響關切污染物傳輸途徑及是否有受體(receptors)可能受到該關切污染物的危害。在這個步驟，因為評估的需求，健康風險評估執行人員需以現有的概略資料建立初步的場址概念模式(Site Conceptual Model, SCM)，包括污染源位置、場址周邊水文地理的描述與判斷可能被關切污染物影響的受體。

[1] 美國國家工程學院(The National Academy of Engineering)與國家科學院(The National Academies of Sciences，NAS)於 1972 年起舉行健康風險評估研討會，並由其共同隸屬之美國國家研究院(National Research Council, NRC)出版相關之系列報告。最後於 1983 年的「紅皮書」中(全名為「健康風險評估之運用於聯邦政府相關事務」，Risk Assessment in Federal Government：Managing the Process)，正式提出以四個主要架構來執行健康風險評估的概念。

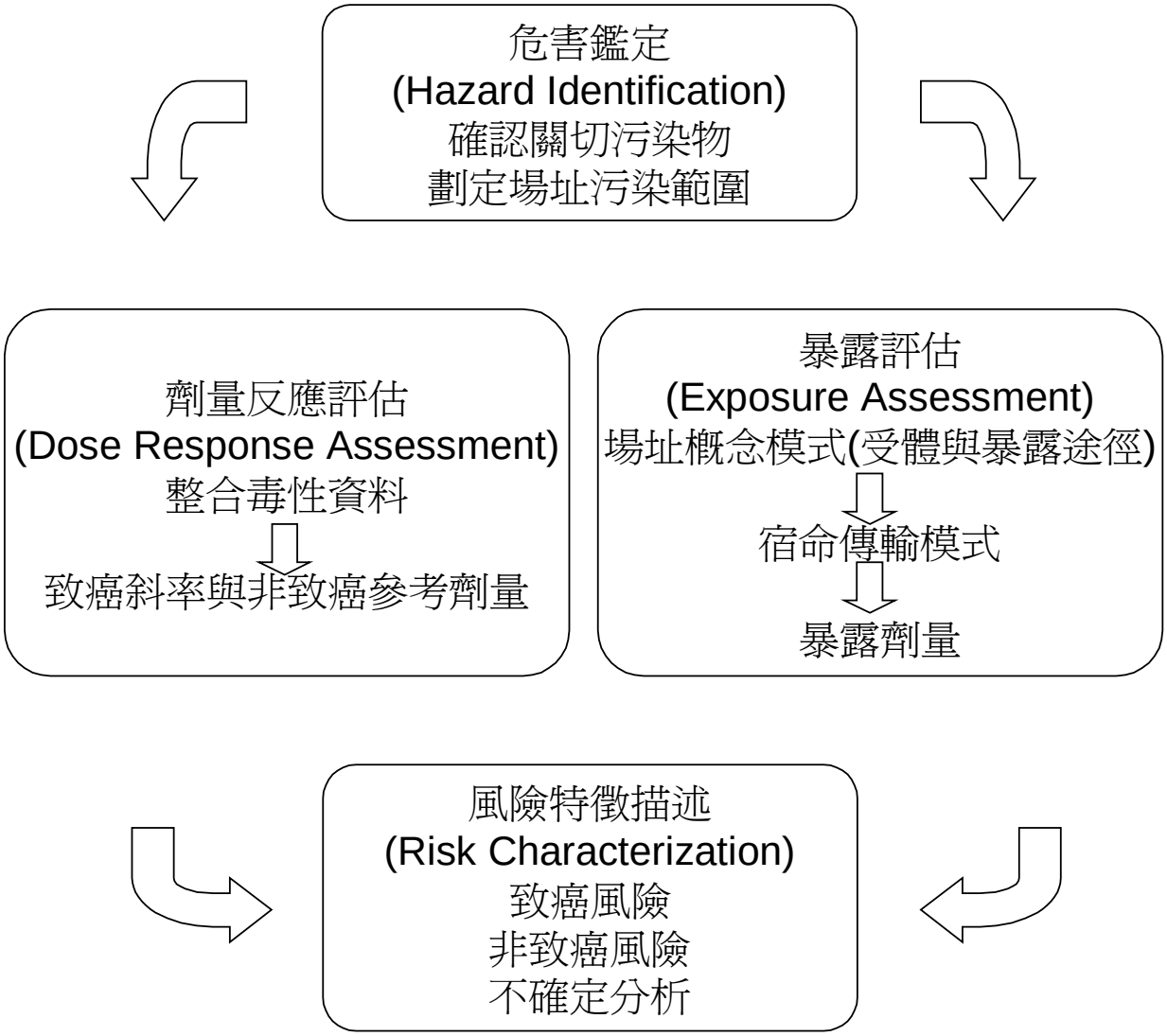


圖 1.1-1 健康風險評估架構

二、劑量反應評估(Dose Response Assessment)[2]：

劑量反應評估為探討人體暴露於污染物中程度之高低、與其產生反應之機率，或嚴重程度之間有無關連。

一般的劑量反應評估係以毒理學動物研究[3]或相關的人體流行病學研究為基礎，除討論污染物的致病機轉之外，並根據現有的實驗數據或統計結果，將暴露劑量與毒性反應程度之間的關係，量化成劑量反應曲線(dose-response curve)。以這個量化的數學模式為出發點，來計算該污染物毒性因子(toxicity factor)[4]的數值。目前在健康風險評估中，污染物的毒性被分為致癌性(carcinogenic)及非致癌性(non-carcinogenic)兩類。因此，毒性因子的計算方式也分為這兩大類。

非致癌毒性因子(non-carcinogenic toxicity factor)係以閥值方法(threshold approach)計算[5]。因此，非致癌毒性因子即為對於閥值的估計，又稱參考劑量(Reference Dose，RfD) [6]。其計算主要係依據毒性資料中，取得的無明顯不良反應劑量(No-Observed-Adverse-Effect-Level，NOAEL)[7]，或最低明顯反應劑量(Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level，LOAEL)[8]，或低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL)[9]，再考慮所使用科學研究資料的不確定性[10]，來決定不確定

---

[2] 本評析方法中所討論的劑量反應評估是以污染物所造成的慢性毒性為主。

[3] 由於劑量反應評估大多基於動物實驗所得之毒性資料來估計毒性因子，而在動物實驗中，為達顯著的實驗結果，所使用的投藥(暴露)劑量往往高於一般人體真實的環境暴露程度，因此使用動物實驗所得之毒性測試結果尚需要經過由高劑量外推至低劑量的過程。

[4]毒性因子(toxicity factor)是 USEPA 超級基金對化學物質毒性的量化指標統稱。可見於 USEPA Risk Assessment Guidance for Superfund 系列的指引中。而致癌毒性因子(carcinogenic toxicity factor)與非致癌毒性因子(noncarcinogenic factor)的用法則常見於 USEPA 的文件中，例如超級基金對於各場址的 Record of Decision(ROD)文件。

[5] 假設單一個體對於污染物的暴露量高於一個特定的濃度(稱為閥值)時，才會產生毒性反應。低於閥值時，則無可觀察之毒性反應。

[6] 吸入吸收途徑所使用的非致癌毒性因子有時會使用參考濃度(Reference Concentration, RfC)。參考劑量與參考濃度可以經由單位的換算來互相轉換。參考劑量一般所使用的單位為 mg/kg-day，而參考濃度所使用的單位為 mg/m^3。

[7] NOAEL 表示於毒性測試中，投藥後沒有觀察到不良反應的最高劑量。

[8] LOAEL 表示於毒性測試中，投藥後觀察到不良反應的最低劑量。

[9] 基準劑量(Benchmark Dose, BMD)為實驗中會引起試驗群體數中某個百分比不良反應的劑量，在健康風險評估中，一般以 5%到 10%為引起不良百分比之群體比例上限。上限若為百分之十，則基準劑量可以簡寫為 BMD_{10}，百分之五則為 BMD_5，依此類推。而所謂的低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL)，是

因子(Uncertainty Factor, UF)[11]的大小，最後計算出參考劑量。

計算致癌毒性因子(carcinogenic toxicity factor)時，則採取無閾值方法(non-threshold approach)[12]。致癌毒性的毒性因子係以斜率的概念來表示，即以劑量反應曲線估計平均每增加一個單位劑量所增加的致癌機率有多少[13]。因此，致癌毒性因子又稱為致癌斜率(Cancer Slope Factor, CSF)。

劑量反應評估大多由已知的毒性資料庫中取得，與個別場址相關性不高，故可以單獨估計。歐美的政府機關針對多種污染物已建置有健康風險評估毒理資料庫，並定時更新，關於此部分，第二章中另有詳述。

三、暴露評估(Exposure Assessment)[14]：

暴露評估為探討人體是否有暴露於土壤、地下水污染環境之機會及程度，即判斷關切污染物經由何途徑而被人體吸收，再計算進入人體的劑量。

以健康風險評估而言，暴露評估中需先以危害鑑定所得之初步場址概念模式，加入詳細的地理、地質水文資料，以進一步建立計算受體暴露劑量所使用的場址概念模式，這個較危害鑑定更詳細明確的場址概念模式為暴露評估的基礎[15]。模式中需明確指出評估的關

統計上基準劑量的低信賴區間(lower confidence interval)，同樣的，因為事先決定的群體比例上限而有 $BMDL_5$ 或 $BMDL_{10}$ 之分。目前 USEPA IRIS 若利用 BMDL 來估計毒性因子，較常選擇 $BMDL_{10}$，由於目前以 USEPA IRIS 的毒理資料庫最為完備，也是本評析方法中引用毒理資料的第一優先資料庫，因此本評析方法亦以 $BMDL_{10}$ 為基準。此外，由於估計 $BMDL_{10}$ 需要較多的實驗數據，以降低劑量反應曲線的不確定性，因此大多數的毒性物質目前因缺乏足夠的實驗數據，故無法使用此種方法。惟以 BMDL 所估計出的非致癌毒性因子，其不確定性應較 NOAEL 或 LOAEL 為小。

[10] 所謂的不確定性包含利用動物實驗結果作為人體毒性評估的不確定性、人類族群本身對毒性反應差異的不確定性、以亞慢性(sub-chronic)與急性(acute)毒性的毒理資料來估計慢性毒性因子的不確定性等。

[11] 在聯合國的相關文件中則稱為安全因子(safety factor)。

[12] 這樣的假設主要是與毒性物質致癌的機轉有關。對單一個體來說，致癌性並無閾值可言，就算僅有微量毒性物質，也有致癌的可能。只是暴露的濃度愈高，致癌的機率愈大。

[13] 一般使用的暴露劑量單位為每日每公斤所暴露的毒性物質重量(mg/kg-day)，所以致癌斜率的單位為 $(mg/kg\text{-}day)^{-1}$。

[14] 由於在暴露評估中，場址的特異性會對於暴露劑量有很大的影響，與在劑量反應評估中，一旦確定污染物種類，毒性便確定的情況有很大的不同。因此大多數健康風險評估工作，著重於暴露評估中場址資料的蒐集與各項計算公式中參數的決定，以期能得到更具場址特異性的評估結果。

[15] 暴露評估最後的結果是估算受體(Receptor)暴露劑量的多寡，而暴露劑量係依照場址概念模式作為計算的基礎，因此場址概念模式是否完整，對於暴露劑量的計算結果有決定性的影響。

切污染物、該關切污染物於土壤、地下水中污染範圍與特性、該關切污染物於環境介質中傳輸途徑、經由這些傳輸途徑有那些受體(receptor)暴露於關切污染物中，及所有可能之暴露途徑(Exposure Pathway)[16]。

依照場址概念模式中的暴露途徑與場址之地質水文特性，選擇適宜的宿命傳輸模式[17]，以估計關切污染物於環境介質中流佈的情形，及關切污染物最後與受體接觸時的濃度，再以此濃度來計算受體吸收關切污染物的劑量稱為暴露劑量，亦即暴露評估所獲致的最後結果。對於暴露劑量的估計，一般採「合理的最大暴露」(Reasonable Maximum Exposure, RME) 的原則，即在實際上有可能發生的最嚴重情況(worse case scenario)假設條件下，求得最大暴露劑量[18]。

四、風險特徵描述(Risk Characterization)

風險特徵描述為綜合上述三項步驟進行綜合性評估，將風險予以量化，以估計該污染物影響人體健康之風險程度高低與影響之方式。讓決策者瞭解在暴露評估的設定條件下，受體可能經由何種方式暴露於污染物中，進而對人體健康產生多大之影響，並依此擬定該場址的風險管理策略。

在量化風險時，將危害性區分為致癌性及非致癌性兩類，並假設危害性具有相加性(additive)[19]，即不同暴露途徑與關切污染物所產生的危害可直接相加，最後以總危害來表示場址污染對人體健康造成的風險。

---

[16] 暴露途徑包含關切污染物由污染源所在地點，經過各種不同的機制於環境中流佈(或稱宿命傳輸，Fate and Transport)，最後與受體產生接觸，並為受體吸收進入體內而產生污染物暴露的整個過程。

[17] 宿命傳輸模式(Fate and Transport Models)泛指根據污染物與環境介質產生交互作用的情況，所發展出估計污染物質在不同環境介質中分布狀態與濃度的計算方法。

[18] 於美國超級基金的案例中，根據各場址資料收集的情形，環境介質中關切污染物的最高濃度或其平均值的 95%上信賴界線(Upper Confidence Limit)為最常使用的「合理的最大暴露假設」。

[19] 在毒理學或藥理學的理論當中，若人體同時吸收兩種以上的化學物質，在人體內可能因為化學物質間，或化學物質與人體間的交互作用，使得最後人體對該物質的毒性或藥物反應程度產生改變。這些改變包括：相加性(additive)、相乘性(synergic)、拮抗性(antagonistic)與增強作用(potentication)因此。假設所有的物質均有相加作用是一種簡化的假設。但由於不同場址之關切污染物組合各不相同，目前對各污染物間之交互作用探討尚不足以直接計算其反應程度之改變，因此通常均以有相加作用較簡化的方式來進行計算。惟若有相關文獻明確指出特定物質的交互作用性質，則可以該文獻之研究結果作為計算風險時的依據。

風險特徵描述除量化的風險值之外，也應包括健康風險評估的不確定性分析 (uncertainty analysis)。所謂的不確定性分析，即說明真實的結果與計算的結果產生差異的可能性。

造成不確定性的原因包括：數據本身的變異性(variability)[20]，以及採用之模式或參數的不確定性(uncertainty)[21]。不確定性分析對於健康風險評估來說是非常重要的一環，由於進行健康風險評估時，常需根據所蒐集的資料進行一些假設，隨資料蒐集的多寡，假設的準確性亦隨之變化。而這些假設為風險計算結果的基礎之一，因此對計算結果有一定的影響。不確定性分析即藉由討論資料品質來呈現計算結果的可信度與是否為較安全的結果(對風險高估)，讓進行決策或審查的單位除可依數值的結果進行判斷外，更有資料品質上的判斷依據。

1.2 層次性健康風險評估簡介

本評析方法採層次性之步驟，由第一層次至第三層次，其暴露情境的假設與暴露參數的引用由簡單至複雜。第一層次的健康風險評估使用的多為預設之情境與數值，現地所需之調查較少，而第二層次健康風險評估的暴露情境雖為預設，但暴露參數則以現地調查之結果為主。又第一層次與第二層次的健康風險評估中所評估之暴露途徑多屬直接暴露途徑(direct exposure pathway)[22]，若污染物可能經由間接暴露途徑(indirect exposure pathway)[23]對人體或生態造成影響，則應直接進行第三層次健康風險評估(圖 1.2-1)。在第三層次的健康風險評估中，除了暴露途徑與情境較複雜外，暴露參數亦可以統計分布來代替定值，再利用蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)之方法，計算風險的分布。

[20] 變異性是指同一群體中個體的差異，如果對同一群體採樣數增加，則對於參數的變異程度就越了解。惟由於變異性是個體間與生俱來的差異，它不會因為對同一群體的採樣數增加而降低。

[21] 不確定性是因資訊的不足而對判斷結果產生的影響，例如對於水文地質的了解不足，因而選擇了錯誤的地下水模式，或者因為地下水位測量點不足，而誤判地下水流向等。不確定性可因採樣點數的增加或資訊搜集的增加而降低。

[22] 直接暴露途徑指受體與關切污染物接觸無需經由任何生物性的媒介(即食物鏈)。

[23] 間接暴露途徑指受體經由生物性的媒介(食物鏈)吸收關切污染物，於本健康風險評估評析方法中探討的間接暴露途徑僅有食入之暴露方式。

由於第一層次之健康風險評估多使用預設數值來計算，需要進行場址調查的部分較少，所需調查費用亦少，但所得之結果可能與場址之狀況差異較大。惟此結果是以較保守之參數來計算，因此所得之結果應較真實狀況更為保守。而第二層次與第三層次之健康風險評估則循序可引用較多之場址特異性參數(site specific parameters)，其中第三層次更可以利用統計分布的概念，執行蒙地卡羅模擬與機率性健康風險評估(probabilistic risk assessment)[24]。如此雖可得到更符合場址條件的結果，但於場址調查上所花之費用則相對較高。

1.3 本評析方法適用範圍

本評析方法應用於土壤與地下水污染場址之依據，主要為土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法(以下簡稱初評辦法)第六條，提供以健康風險評估結果，進一步判斷控制場址是否應公告為整治場址之依據。因此健康風險評估之執行，主要為計算污染物對人體健康所可能造成的危害。初評辦法之規定，需在控制場址有公告為整治場址之條件時，污染行為人及土地使用人、管理人或所有人方能提出以健康風險評估結果，進一步判斷控制場址是否有公告為整治場址之必要，且針對部分污染物項目，排除其適用。換言之，執行健康風險評估有其一定之限制條件，健康風險評估執行人員在執行健康風險評估前，必須先判斷污染場址屬性與法規之適用性。

土壤及地下水污染場址健康風險評估報告之撰寫，除根據報告提出之目的，依據本評析方法撰寫外，並應依照「土壤及地下水污染場址健康風險評估撰寫指引」之規定內容及格式撰寫，以利主管機關審查。

[24] 所謂的機率性健康風險評估係指在健康風險評估計算中所使用之參數為一機率性的分布，因此，所計算出的風險亦為一機率性的分布。由於自然環境與生物環境並非均勻分布，因此機率性的健康風險評估較決定性健康風險評估(deterministic risk assessment)更能反映場址的風險分布。

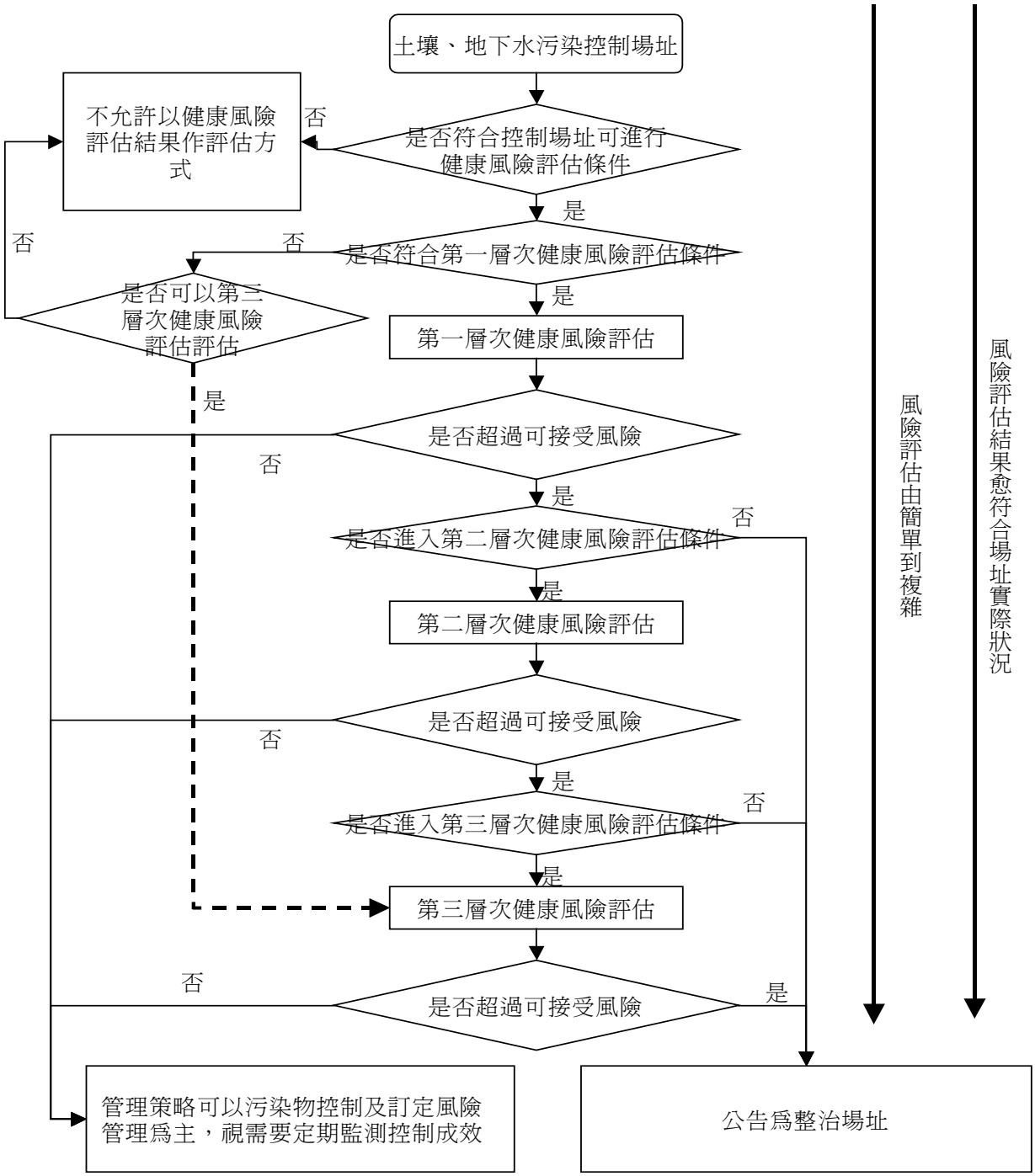


圖 1.2-1 三層次健康風險評估執行之流程簡圖

第二章 第一層次健康風險評估

是否執行第一層次之健康風險評估應由以下四項起始評估結果來決定。起始評估的內容應至少包括：

(一) 若有立即性的危害，須先進行緊急應變措施而非健康風險評估[25]，待緊急應變結束後，再重新考慮健康風險評估之必要性。

(二) 關切污染物若具生物累積性(或稱生物濃縮性)[26]，且可能發生間接暴露途徑[27]，應直接進入第三層次健康風險評估。

(三) 若場址本身或周邊環境(關切污染物可能之流佈區域)含有農地或畜牧養殖區域，且可能發生間接暴露途徑；或土地利用屬其他非工、商業區與住宅區之情形，同時非屬第一層次風險評估預設之暴露情境時，應直接進入第三層次健康風險評估。

(四) 若場址本身或周邊環境(關切污染物可能之流佈區域)與具生態保育價值之區域重疊，且可能發生間接暴露途徑，而受體可能不限於人體，須以較複雜的模式進行評估時，應直接進入第三層次健康風險評估。

若場址符合第一層次健康風險評估條件時，則以危害鑑定、劑量反應評估、暴露評估與風險特徵描述的四個步驟來進行健康風險評估，以下就第一層次健康風險評估的執行步驟進行說明：

[25] 本評析方法僅適用評估慢性毒性所造成之風險。慢性毒性通常為低劑量長時間之暴露造成，急性毒性則為高劑量短時間暴露造成。若場址的污染濃度有造成急性毒性之虞，則應先針對此高劑量的暴露進行控制，待立即性的危害消除後，再評估污染物是否造成長時間的危害。

[26] 根據行政院環保署篩選毒性化學物質作業原則建議之毒性分類原則，具生物累積性物質是指 BCF 值(Bioconcentration Factor)大於或等於 500 者，logKow 大於或等於 3 之化學物質。

[27] 見註 23。

2.1 危害鑑定

危害鑑定為健康風險評估之第一個步驟，主要係依據場址資訊與污染物檢測資料，來判定污染物是否為關切污染物，需要進行健康風險評估，及在污染區域內是否有受體(receptors)可能遭受危害。

第一層次健康風險評估之危害鑑定工作，包括(1)資料蒐集、(2)關切污染物判定與濃度資訊彙整及(3)危害辨識等三大部分，其工作流程如圖2.1-1。

2.1.1 資料蒐集[28]

健康風險評估之危害鑑定所應蒐集之資料，至少包括區域性與場址周界一公里距離內(以下簡稱場址周邊)[29]細部之水文地質資料、污染場址之土壤及地下水污染物檢測資料及場址周邊之土地使用資料等。以下為資料蒐集原則：

一、必須蒐集之資料

應蒐集可合理取得的場址環境資料、場址使用歷史等背景資料，至少必須包括官方出版或公布之場址相關資料與紀錄，若學術單位對該區域之地理、地質曾進行研究，則其研究資料亦應包含在內。以下列舉至少應蒐集之資料項目：

(一) 場址環境資料

1.公告為污染控制場址資料。

2.是否曾違反相關環保法規之紀錄。

3. 場址所在地形圖及其他相關地理、水文、地質資料[30]。

[28]資料蒐集與審閱為危害鑑定最基本的步驟，主要係藉由健康風險評估執行人員審閱場址及鄰近區域之相關紀錄資料，來研判場址潛在污染源之可能位置，有助於評估場址之污染情形。

[29]於環保署相關之場址調查參考指引中，場址調查之範圍為場址周界一公里距離內的區域。而美國材料與試驗協會的最新建議規範中(ASTM E1527-00, 2000)，依照場址特性與適用法規之差異，而有不同的搜尋距離，其範圍界於 0.8 到 1.6 公里之間，一公里的搜尋範圍亦介於兩者之間。惟健康風險評估之場址調查範圍仍應依場址不同情況而有調整的彈性，以得到更符合場狀況的評估結果。

[30]場址及其周遭區域的地質、水文地質、水文與地形方面的資料應併同蒐集分析，以協助研判土壤與地下水可能污染物是否會對場址或周遭地區造成環境與人體健康上的影響。

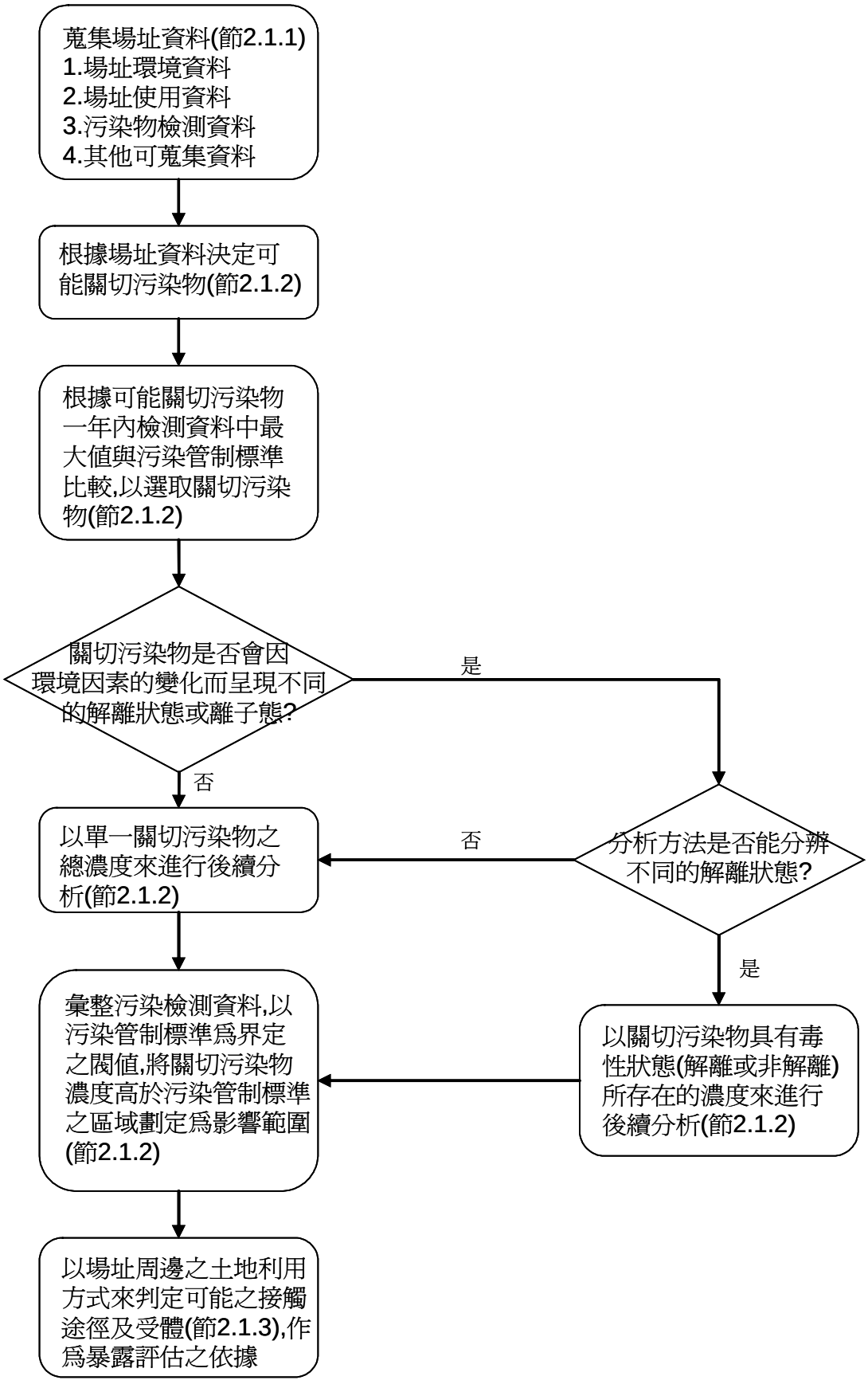


圖 2.1-1　第一層次健康風險評估危害鑑定步驟

4. 場址土地使用分區資料，包括地政機關之土地登記資料，或場址所在地之都市計畫分區示意圖[31]。

(二) 場址使用資料

1. 場址使用現況

任何涉及可能造成土壤或地下水污染之物質運作現況，皆應於健康風險評估報告書(以下簡稱評估報告書)中紀錄。包括地上建物之登記用途與現地勘查之描述，若有符合場址現況之航照圖亦應附上；而無人居住或使用的空間也應予以紀錄。

此外，應取得場址內結構物、設施或設備之相關資料[32]。例如：建築物棟數、每棟之樓層數、儲槽數量與槽齡、管線位置，及其他輔助性之結構物。

2. 場址使用歷史紀錄

包括可供辨識場址開發及活動狀況之航照圖，與其他有助於評估場址土壤與地下水潛在污染之歷史紀錄或人員訪談紀錄。

審閱場址使用歷史紀錄時，需確認其用途(例如：辦公室、廠房或儲槽等)，若為事業之製程設施或設備時，應儘可能詳細的說明生產或製造的產品及操作情形。蒐集場址之使用歷史資料，應儘可能回溯其使用年代，應以十年回溯期為基本要求。健康風險評估執行人員應至場址進行勘查及拍照存證，以了解土地使用現況。評估報告書中應描述所有可確認的使用情形，以及無法確認使用情形之原因。

3. 場址周邊土地使用情形

關於場址周邊的使用情形(例如：住宅、商店、工廠等)及可能存在之污染物質，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

4. 場址周邊使用歷史紀錄

關於毗鄰場址區域過去之使用情形或任何造成土壤與地下水污染之可能性，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

---

[31]配合都市計畫相關法令可研判場址與周邊土地未來之使用狀況。

[32]建築物資料除輔助判定土地使用情形外，亦有助於判定污染源位置，以利後續可能之採樣點判定。同時亦有助於進行暴露評估時，部分參數數值之判定。

(三) 污染物檢測資料

除場址及周邊之土地使用情形與歷史紀錄外，同時亦需蒐集場址過去關切污染物採樣檢測資料，以評估擬採用進行健康風險評估之關切污染物檢測資料。

進行評估前應將最近一次關切污染物之採樣資料，與場址公告為控制場址時所依據之該關切污染物採樣資料比較，取其最大值作為進行風險評估時該關切污染物之濃度。

若公告為控制場址之後，無該關切污染物相關採樣檢測資料時，則以公告為控制場址時所依據之該關切污染物採樣資料之最大值為評估依據。

若需進行評估前之採樣檢測作業時，風險評估執行人員須擬定採樣計畫，並依據環保署公告之土壤與地下水採樣方法進行採樣檢測作業，並需於評估報告書中詳述作業過程及結果。

二、其他可蒐集之資料

除上述應加以蒐集之資料外，有助於評估土壤與地下水健康風險影響之相關資料，均為蒐集之範疇；必要時得延伸現地資料蒐集範圍至場址周界外。

三、資料之時效性

需以最接近進行健康風險評估時間點之資料，作為評估之依據，以避免取得不正確或過時的資料。若於合理的蒐集時效與努力下均無法取得具時效性之相關資料時，則於執行健康風險評估時，應使用最保守之假設進行風險計算。

四、資料品質查核

除資料完整性外，同時亦須針對資料品質進行查核。所引述之資料同時應註明其出處來源。

2.1.2 關切污染物判定

關切污染物(Chemicals of Concern, COCs)係指健康風險評估所欲評估之污染物。關切污染物的選定係由場址中所有可能存在的污染物，又稱可能關切污染物(Potential Chemicals of Concern, PCOCs)[33]，經過評估篩選後，其中需要進一步進行健康風險評估之可能關切污染物，稱為健康風險評估的關切污染物。

本評析方法制訂之法源依據為初評辦法，因此本評析方法所規範之可能關切污染物至少應包含土壤或地下水污染管制標準(以下簡稱管制標準)中所列之管制項目之污染物。惟若因場址的特殊情況，審查之主管機關或審查委員會認為污染場址中，尚有管制標準項目外之其他可能關切污染物，且此可能關切污染物可能危害人體健康，則該項可能關切污染物亦應列入健康風險評估之關切污染物[34]。

附錄六中的表一為紀錄關切污染物的判定表。以下說明可能關切污染物與關切污染物判定之原則：

一、可能關切污染物

本評析方法中定義之可能關切污染物，包括任何能導致土壤或地下水污染之外來物質，同時有可能進一步造成健康危害風險。

由於健康風險評估假設污染物之毒性有加成的作用，故污染物種類的多寡可能造成評估結果的不同，因此應將可能關切污染物盡量列出，以達到綜合評估之目的。

二、關切污染物

(一) 凡超過土壤或地下水污染管制標準之污染物，皆應為健康風險評估之關切污染物。

(二) 除第(一)項之應納入評估之關切污染物外，其他經主管機關要求應納入健康風險評估之污染物項目亦屬之。

---

[33] 在某些文獻中則稱為 Chemicals of Potential Concern, COPC。

[34] 由於本評析方法的適用範圍係依據初評辦法所訂定，所適用的場址為公告之控制場址，而控制場址公告之污染物為管制標準之項目，因此關切污染物可用是否超過污染管制標準為判定的依據。但健康風險評估所討論之關切污染物，應包含場址因人為活動產生之污染物中，所有可能造成環境與人體健康危害者。若要將非管制項目之污染物亦一併列入健康風險評估中，歐美的做法為將場址內污染物濃度與鄰近無污染之土壤、地下水之污染物背景值比較，若高於背景值，則納入健康風險評估關切污染物中；若低於背景值，則判定場址中土壤、地下水污染物濃度並非因場址污染所造成，無需納入健康風險評估中。

(三) 若關切污染物因環境條件呈現離子態或解離態，進而造成毒性差異時，則應詳述其狀態分布，以作為詳細評估之依據。若無法區分時，則應以該關切污染物之總量來計算，以達到保守估計之原則。

(四) 「鉛」之劑量評估方式通常以人體內血鉛濃度計算，此與第一層次、第二層次之風險評估設計並不一致；故血鉛納入第三層次健康風險評估中。

三、不適用之關切污染物

(一) **地下水污染管制標準中的「總酚」[35]、「硝酸鹽氮」與「亞硝酸鹽氮」等項目，目前並不納入本評析方法之風險評估範圍內。**

(二) 具生物蓄積性或以食物鏈為其暴露途徑之關切污染物，則不適用第一層次之健康風險評估。

[35] 環檢所規範檢測總酚的方法所測得為高分子酚類混合物質，與純物質酚(phenol)並不相同；由於對此類混合物目前並沒有建立系統性毒性評估的法則(如 TCDD 類的混合物或 PAHs 類的混合物已發展出以 Toxicity Equivalent Factor，TEF 的方式進行毒性評估)，因此不列入風險評估適用的項目，若土壤或地下水中的總酚超過管制標準，建議以管制標準為場址控制整治標準。而硝酸與亞硝所產生的毒性係針對嬰幼兒, 與本評析方法中對長期暴露之慢性毒性之假設並不相同，因此亦不適用本評析方法。

2.1.3 危害辨識

危害辨識為決定某一關切污染物是否會增加某種危害健康情形之發生率；在本評析方法中，係以透過查詢國外相關毒理資料庫，來判定關切污染物之危害程度。

危害辨識主要為判定關切污染物之致癌毒性與非致癌毒性，其依據歐美各國毒理資料庫進行研判。

一、毒理資料庫介紹

目前歐美政府機關或相關研究機構，已建置各種毒理資料庫，並依據其研究結果更新，因此關切污染物健康風險評估之危害辨識及毒性因子，可由各種毒理資料庫中取得。以下介紹目前較具公信力之資料庫，包括：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)[36]：

本資料庫由美國環保署所建立並定期更新，其網址為http://www.epa.gov/iris/。目前所提供的資訊包括吸入吸收(inhalation)或口服吸收(oral)之慢性毒性因子估計值。此外，並依據現有毒性資料，將致癌性分為五大類[37]：

1. 人體致癌物質(carcinogenic to humans)；
2. 可能人體致癌物質(likely to be carcinogenic to humans)；
3. 毒理資料顯示致癌性，但無足夠資料量化對人體的致癌作用(suggestive evidence of carcinogenicity, but not sufficient to assess human carcinogenic potential)；
4. 缺乏人體致癌性毒理資料(data are inadequate for an assessment of human carcinogenic potential)
5. 對人體無致癌可能性(not likely to be carcinogenic to humans)。

上述分類原則係 1999 年更新版本之分類。之前最常使用的分類法係 1986 年所訂之分類方法，將污染物質分為 A(對人類

[36] IRIS 以較嚴謹的方式審核毒理資料，因此有時因為毒理研究的形式，數量，或品質不符合要求，量化的毒性因子無法估計。其不足之處則需由其他資料庫中查詢。

[37]以 IRIS 1999 年的指引為主。

為致癌物質)、B1(根據有限的人體毒性資料與充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、B2(根據充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、C(可能為人體致癌物)、D(尚無法分類)與 E(已證實為非人類致癌物質)等六種。

(二) 世界衛生組織簡明國際化學評估文件(WHO Concise International Chemical Assessment Document , CICAD)[38]：

主要是彙整單一化學物質或混合物對環境與人類健康的危害，並舉出各種案例與研究來討論可能的吸收途徑。CICAD 於作用評估(effect evaluation)一節對非致癌作用進行探討，並估計可接受濃度(tolerable concentration)或每日可接受劑量(Tolerable Daily Intake, TDI)。聯合國的可接受劑量與參考劑量估計法則相同, 所以在本原則亦將可接受劑量作為爰引的毒性因子之一。對於致癌毒性因子，則須引用 CICAD 中所估計之單位風險(unit risk)，其估計原理與本節所提之致癌機率相同。

(三) 國際癌症研究署（International Agency for Research on Cancer ,IARC）：

國際癌症研究署為聯合國設立之研究機構，專門進行化學物質致癌性質與機轉研究。將化學物質的致癌性分成四大類：

1. 第一類（group 1）：人類致癌性的證據充足。
2. 第二類（group 2）：人類致癌性的證據尚有限。(含 group 2A：流行病學資料有限，但是動物實驗資料充份；人類可能致癌物及 group 2B：流行病學資料不足，但動物資料充份；或流行病學資料有限，動物資料不足；也許是人類致癌物)
3. 第三類（group 3）：致癌性的證據不足。
4. 第四類（group 4）：證據顯示沒有致癌性。

因此，被歸為第一類與第二類者，均應於健康風險評估中納入致癌風險計算與討論。

(四) 美國環保署暫行毒性因子(USEPA Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)：

為美國環保署之國家暴露評估中心 (USEPA National

[38]大部分的 CICAD 是由探討相同物質之世界衛生組織環境健康準則(WHO Environmental Health Criteria, EHC)中所摘出。

Center for Environmental Assessment, NCEA)所計算出的臨時性毒性因子(Provisional Toxicity Factor)。NCEA 根據超級基金健康風險評估與整治目標的個案需要，以初步所能蒐集，但較不完整之毒理資料來估計污染物之毒性因子[39]。

(五) 毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease Registry, ATSDR)[40]之最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)：

ATSDR 計算出部分毒性物質的最小風險濃度。惟其所計算的數值多為急性與亞慢性，需要加以轉換才能應用於本評析方法之健康風險評估中[41]。此外，MRL 並無提供致癌毒性因子，所以只有在前述資料庫都無法獲得數值時，才予以利用。

(六)美國環保署健康效應摘要表格(Health Effects Assessment Summary Tables , HEAST)[42]：

為 USEPA 所出版的一本毒性因子文件，文中以表列的方式列出各污染物的亞慢性與慢性毒性因子。

二、致癌毒性及非致癌毒性判定

在本評析方法中，針對關切污染物應依據前述資料，進行致癌毒性及非致癌毒性之危害辨識程序。若屬致癌性物質，則應取得該關切污染物之致癌斜率。若同時具有非致癌性之不良反應，亦應取得其參考劑量。

(一)致癌毒性判定

本評析方法以國際癌症研究署 (International Agency for Research on Cancer ,IARC)之致癌性分類為關切污染物致癌毒性之優先判定原則。

---

[39]通常 IRIS 之毒性因子計算需等待毒理研究較完整時才進行，而 PPRTV 計算時所使用之資料則較少、較不完整，不確定性相對較高，因此美國環保署規定此數值為暫時權宜使用，時效性較短。這些文件之公布與更新，美國環保署將建置於網路上(USEPA 2003, www.epa.gov/oswer/riskassessment/pdf/hhmemo.pdf)，屆時查詢將更為便利，惟引用時應注意其時效性。

[40] ATSDR 為疾病管制局之下的一個研究單位，因疾病管制局的需要，建立可觀的毒性物質檔案(可於線上查閱者為 HazDat Database)。

[41] 本評析方法所指之健康風險評估，為慢性毒性之健康風險評估。一般假設慢性毒所需的致毒劑量為亞慢性的十分之一。

[42] HEAST 雖提供較多的毒性因子，但對於所使用的毒性資料並無太多說明，除了 2001 年更新的放射性之化學物質的毒性資料外，一般污染物質的毒性因子無法像 IRIS、CICAD、PPRTV、與 MRL 於網路上得到。

若關切污染物屬於 IARC 資料庫中的**「致癌物」(Group 1)或「可能致癌物」(Group 2A、2B)**，則屬致癌性物質，於健康風險評估中應計算其致癌風險。

若於 IARC 中列為證據不足者(Group 3)，則應參考美國環保署所建置 IRIS 資料庫之致癌分類；若於 IRIS 中列為**「人體致癌物」(A、B1、B2 類)或「可能人體致癌物」(C 類)**(按 1986 年所訂之分類代號，則為 A、B1、B2 與 C 四類)，則該關切污染物，亦應屬致癌性物質；其致癌物質判定程序如圖 2.2-1 所示。

(二)非致癌毒性鑑定

非致癌物質並沒有像致癌物質一樣具有資料庫可供分類的判定，因此非致癌物質主要以能否在毒理資料庫中查詢到參考劑量為鑑定依據。若能查得，則表示該關切污染物有可茲量化的非致癌毒性；若無法查得，則表示該關切污染物沒有非致癌毒性或非致癌毒性之毒理資料不足無法判定非致癌毒性。參考劑量的取得見 2.2 節劑量反應評估的說明。

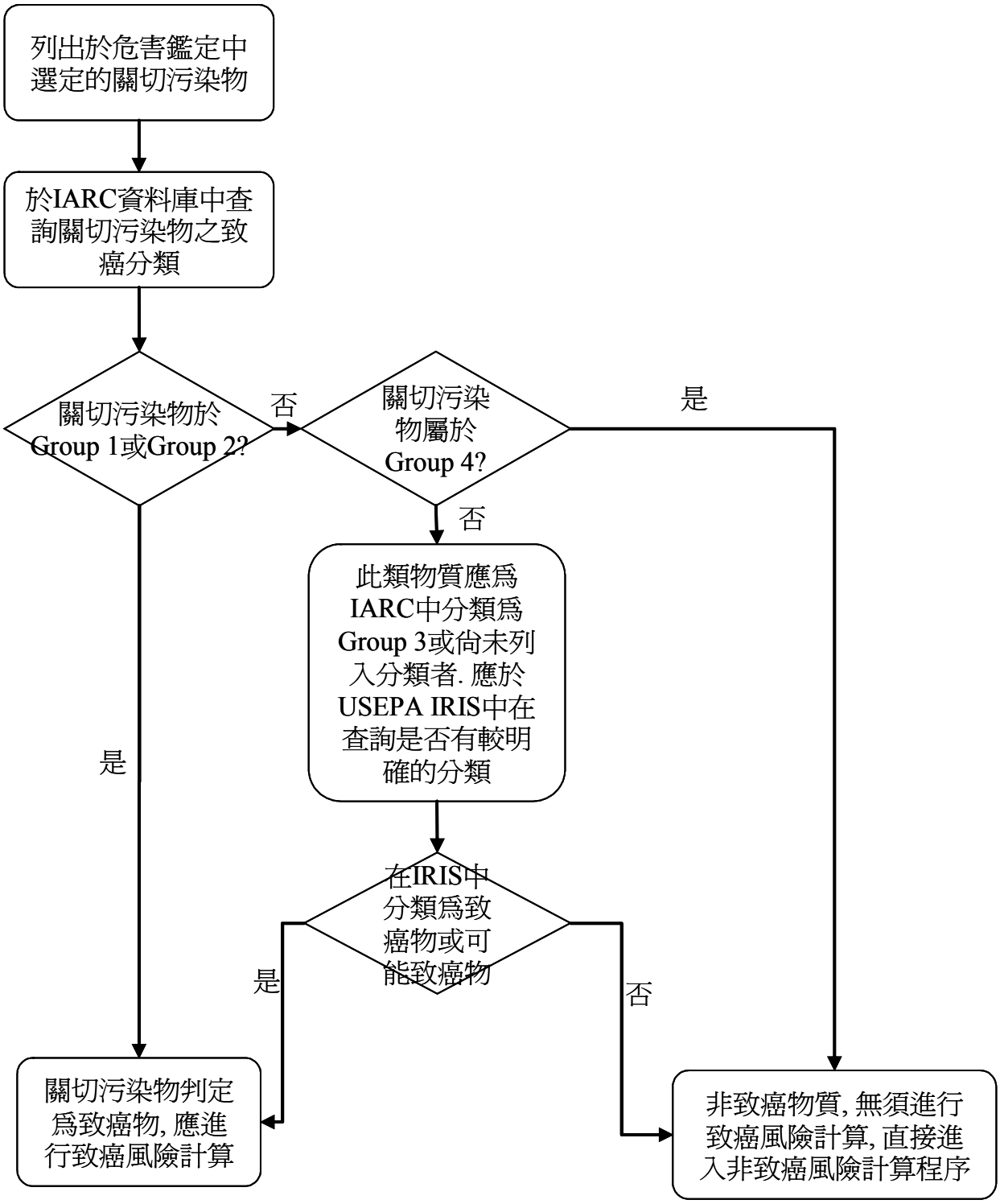


圖 2.2-1 致癌物質判定程序

2.2 劑量反應評估

劑量反應評估主要是探討人體暴露於污染物中程度之高低、與其產生不良反應之機率，或不良反應之嚴重程度之間有無關連，最後估計出其致癌毒性因子或非致癌毒性因子。在本評析方法中，係依據國外相關研究或政府機構具公信力之資料庫，來取得毒性因子之資料。

一、毒性因子的爰引

毒性因子的爰引包括致癌跟非致癌兩個部分。非致癌毒性因子(non-carcinogenic toxicity factor) 的計算是以閥值方法(threshold approach)為主。因此，非致癌毒性因子即對於閥值的估計，又稱參考劑量(Reference Dose，RfD)。其計算主要是以毒性資料中得到的無明顯不良反應劑量(No-Observed-Adverse- Effect-Level，NOAEL)、或最低明顯反應劑量(Lowest-Observed- Adverse-Effect-Level，LOAEL)、或低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL) ，再考慮所使用科學研究的不確定性來決定不確定因子(Uncertainty Factor)的大小，最後計算出參考劑量。

在危害辨識中，關切污染物判斷為致癌物質者，則應取得該關切污染物之致癌毒性因子(carcinogenic toxicity factor)，致癌毒性因子係採取無閥值方法(non-threshold approach)，以斜率概念表示，即以劑量反應曲線估計平均每增加一個單位劑量所增加的致癌機率有多少。因此，致癌毒性因子又稱為致癌斜率(Cancer Slope Factor, CSF)。另外，在危害辨識中，若查核到該關切污染物會造成非致癌性的不良反應，則應於毒理資料庫中取得非致癌不良反應所估計的毒性因子，或稱為參考劑量。本評析方法所爰引之毒理資料庫優先順序為：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)；

(二)世界衛生組織簡明國際化學評估文件與環境衛生準則(WHO Concise International Chemical Assessment Documents，WHO CICAD；WHO Environmental Health Criteria, WHO EHC)；

(三)美國環保署暫行毒性因子(Provisional Peer Reviewed Toxicity

Values, PPRTVs)；

(四)毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease Registry, ATSDR)最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)；

(五)美國環保署健康效應預警摘要表格(Health Effect Assessment Summary Table , HEAST)。

(六)美國加州環保署所建立之毒性因子[43]。

無論關切污染物是否具致癌性或非致癌性，皆須依以上順序查詢其致癌毒性因子(致癌斜率)與非致癌毒性因子(參考劑量)。

二、 毒性因子之換算

(一)不同暴露途徑之外推(extrapolation)適用條件

若有吸收途徑之毒性因子無法於毒理資料庫中取得時，同一個有機物之不同吸收途徑之毒性因子有時可以相互引用，稱為吸收途徑外推(route to route extrapolation)。其中口服吸收毒性因子，可同時於口服、吸入與皮膚接觸三種不同的吸收途徑中使用，而吸入吸收之毒性因子，可同時在口服與吸入的吸收途徑中使用。但若因已知之肝臟初次通過效應(first pass effect)[44]，或不同的吸收途徑會造成暴露劑量或致毒性之過大差異[45]時，則此外推法則並不適用。

1.口服(oral)吸收與吸入(inhalation)吸收途徑的換算

以口服吸收的毒性因子轉換成吸入吸收的毒性因子時，並不需做劑量上的換算[46]，僅需作單位上的轉換。惟若吸入吸收毒性因子單位，並非一般進行健康風險評估時所使用的每人每公斤每日的攝取量(mg/kg-day)，而是毫克每立方公尺(mg/m^3)時，則有必要進行單位的轉換。

---

[43] 加州環保署所建立之毒性因子多半比美國(中央)環保署更為嚴格，而項目也更多。但由於使用的毒性資料並非經過多方驗證(例如確認有劑量越重反應越強的關係，或是多個毒理學研究均獲致相同的結論)，而是只要有單一的實驗中某組數據顯示較高的不良反應，便以此進行毒性因子的計算。資訊確認之嚴謹程度常受到質疑，因此將其置於引用順序的最後。

[44] 食物由消化到吸收後，先由血管(肝門靜脈)被送到肝臟，經過代謝才進入全身血液循環。部分化學物質於此步驟即被代謝，並不會進入全身，引發毒性。這種代謝過程並不發生於吸入或經皮膚接觸吸收之物質。

[45] 無機物因為解離程度的不同，在不同吸收途徑的吸收程度會有很大的不同，一般來說不適用外推法則。

[46] 亦即假設口服吸收或吸入吸收相同份量的毒性物質所造成的毒性作用是相等的。

非致癌毒性因子之換算公式如下：

$$RfD_{oral}(mg/kg-day) = RfC(mg/m^3) \times \frac{IR_{inh}(m^3/day)}{BW(kg)} \quad \text{(公式 2-1)}$$

其中

RfD_{oral}：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfC：吸入吸收參考濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

致癌毒性因子之轉換公式如下：

$$SF_{oral}(\frac{1}{mg/kg-day}) = SF_{inh}(\frac{1}{mg/m^3}) \times \frac{BW(kg)}{IR_{inh}(m^3/day)} \quad \text{(公式 2-2)}$$

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{inh}：吸入吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/m^3}$)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

2.口服(oral)吸收與皮膚接觸(dermal)吸收途徑的換算

以口服吸收的毒性因子轉換成皮膚接觸吸收的毒性因子時，則需假設有劑量上的差異，即同樣的劑量經由口服或經由皮膚接觸吸收所產生的效應程度是不同的。在劑量的轉換上，以消化道吸收分率(fraction of chemicals absorbed in the gastrointestinal tract, ABS_{GI})來表示，其轉換的公式如下：

$$RfD_{dermal} = RfD_{oral} \times ABS_{GI} \quad \text{(公式 2-3)}$$

或

$$SF_{deraml} = \frac{SF_{oral}}{ABS_{GI}} \quad \text{(公式 2-4)}$$

其中，

RfD_{dermal}：皮膚接觸吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfD_{oral} ：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

SF_{dermal}：皮膚接觸吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

ABS_{GI}：消化道吸收分率(unitless)

若消化道吸收分率大於或等於 0.5 時，則可以免除轉換的過程，直接以口服吸收之毒性因子為皮膚接觸吸收之毒性因子[47]。

綜合以上所述，使用者在針對各關切污染物查詢毒性因子時，可依下列三項主要步驟進行：

(一) 查詢毒理資料庫之致癌分類，以判定關切污染物是否為致癌物質。

(二) 若為致癌物質，則需進行該關切污染物之致癌斜率與非致癌參考劑量的查詢；若判定為非致癌物質，則只需進行非致癌參考劑量的查詢。

(三) 若前述具公信力之毒理資料庫中，其相關毒性因子有所缺漏時，則需要以該關切污染物之不同吸收途徑的毒性因子進行換算。

[47] 即假設 ABS_{GI} 為 1。目前的實驗結果指出一般的有機物均符合此原則，因此可以假設 ABS_{GI} 為 1。而無機物則因為有解離態與非解離態的緣故，腸胃道的吸收效率常低於 50%(ABS_{GI}<0.5)，因此多需做劑量上的轉換。

2.3 暴露評估

暴露評估可以分為三個主要步驟：

(一) 決定暴露情境、環境介質與受體類型。

(二) 決定於暴露情境下可能發生之暴露途徑[48]。

(三) 計算各暴露途徑下，受體承受之暴露劑量。

2.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型

一、暴露情境：

本評析方法第一層次適用之暴露情境包括：

(一)住宅區

(二)工、商業區

其判定屬於何種暴露情境之原則如下：

(一) 若場址本身或鄰近區域，於目前或未來三十年內[49]多為住宅區形式的土地利用，則以住宅區的情境假設為健康風險評估之暴露情境；

(二) 若場址本身或鄰近區域，於目前或未來三十年內多為工、商業區形式的土地利用，則以工、商業區的情境假設為健康風險評估之暴露情境；

(三) 若為住、工、商混合，則以保守之住宅區估計；

(四) 若土地利用之資料不足，則以保守之住宅區估計。

二、環境介質

本評析方法中之環境介質包括土壤、地下水及空氣，需視關切污染物之分布、污染物特性及暴露情境等因素，以決定需納入評估之環境介質，以便進一步決定後續之暴露途徑。

[48] 關切污染物由污染源經由不同的傳輸方式到達各種環境介質，最後再為受體所吸收的過程(同註 25)。

[49] 健康風險評估中對住宅區受體暴露期間通常要求估計三十年的土地利用預測；工、商業區的暴露時間通常以二十五年估計，因此在本評析方法中統一要求三十年的土地利用預測。

三、受體類型

(一) 暴露情境判定為住宅區者，則受體為當地居民；包括成人(12 歲以上屬於成人)及 12 歲以下之孩童[50]。

(二) 暴露情境判定為工、商業區者，則受體僅為現場工作人員，即成人。

2.3.2 暴露途徑

依據各環境介質，本評析方法中須考量之暴露途徑包括以下數個，其同時適用於住宅區及工、商業區；

(一)土壤介質所包含之暴露途徑：

1. 誤食受污染土壤並經由口服吸收。
2. 受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收。
3. 土壤介質需考量土壤中關切污染物，經孔隙向下滲入至地下水中，而造成地下水污染；考量關切污染物性質之差異，**此傳輸途徑因關切污染物為有機物或無機物而有不同之估計方法**。

(二)地下水介質所包含之暴露途徑：

1. 飲用受污染地下水並經由口服吸收。
2. 使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收。

(三)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收。
2. 受污染表層(深度在一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染**

[50] 王根樹, 2005 土壤地下水風險評估暴露參數調查報告

物屬於有機物及汞）

3. 受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**（此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞）**
4. 受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收。**（此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞）**

健康風險評估執行人員如擬以所蒐集之資料，提出暴露途徑不存在之證明時，應填妥附錄六中的暴露情境判定表(附錄六、表四與表五)，並於評估報告書中敘明暴露途徑不存在之詳細理由，經審查之主管機關或審查委員認定後，得於健康風險評估中刪去該項暴露途徑；若無法提出不存在之證明，則判定表中所列之暴露途徑應全部納入暴露劑量計算。審查之主管機關可根據評估報告書中之敘述與依場址的情況決定是否同意，但審查之主管機關亦可依場址目前或未來的使用狀況，予以否決。

關於暴露情境與受體之選定，與暴露途徑之排除，均須總結於暴露情境判定表，並於評估報告書中敘明判定之詳細理由與結論。

2.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量

根據上述評估可能發生的暴露途徑，某些場址可能需先以宿命傳輸模式估計關切污染物由原先污染源存在的環境介質，經傳輸移動至受體所在環境界質所發生的濃度變化。獲得受體所在環境介質之關切污染物濃度後，再進行關切污染物經由各暴露途徑進入人體之劑量估計。第一層次健康風險評估中，每一暴露途徑相對之宿命傳輸模式均為固定，至於計算時所使用之參數[51]，健康風險評估執行人員於評估報告書中應檢附附錄六中相關的參數表單，並於評估報告書中敘明使用該數值之理由。各暴露途徑之關切污染物劑量計算公式如表 2.3.3-1 所示，詳細說明如下。

[51] 第一層次健康風險評估中使用參數多為預設值，若該參數為預設值，則應於評估報告書中引用本評析方法為該參數設定之預設值。

表 2.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
土壤	2-5	誤食受污染土壤並經由口服吸收之暴露劑量	$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times IR_{oral-soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \mathrm{CF}$	
	2-6	受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收之暴露劑量	$Intake_{dermal-soil} = \frac{\mathrm{DA}_{\mathrm{event}} \times EV \times ED \times EF \times SA \times \mathrm{f}_{\mathrm{sa}}}{BW \times AT}$	
	2-7		$\mathrm{DA}_{\mathrm{event}} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times \mathrm{CF}$	
地下水	2-8	土壤污染物滲入地下水之造成地下水之污染物濃度計算	$C_{soil} \times \frac{\rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} + H \times \theta\mathrm{as}] \times \left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)} = {}^{*}C_{water\text{-cal}}$	適用於有機物；其結果須再和 C_{water} 及飽和溶解度比較
	2-9		${}^{*}C_{water\text{-cal}} = C_{soil} \times \frac{1}{K_d} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)}$	適用於無機物；其結果須再和 C_{water} 及飽和溶解度比較
	2-10	飲用受污染地下水並經由口服吸收之暴露劑量	$Intake_{oral-water} = \frac{C_{water} \times IR_{oral-water} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	

表 2.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
地下水	2-11	使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water(shower)}} = \frac{([C_{a1} \times B \times t_1] + [C_{a2} \times B \times t_2]) \times EV_{shower} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	2-12		$C_{a1} = \frac{1}{2} \times \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_1)}{V_a} \times \mathrm{CF}$	
	2-13		$C_{a2} = \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_2)}{V_a} \times \mathrm{CF}$	
	2-14	使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water(wash)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	2-15		$C_{air} = \frac{WHF \times C_{water} \times f}{HV \times ER \times MC} \times CF$	

表 2.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
地下水	2-16	使用地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收之暴露劑量	$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \sqrt{6 \times \frac{\tau_{event} \times t_1}{\pi}} \times \mathrm{CF}$	適用於有機物，當 $t_1 < 2.4\tau_{event}$
	2-17		$DA_{event} = FA \times K_p \times C_{water} \times \left[\frac{t_1}{1 + B_{dermal}} + 2 \times \tau_{event} \times \left(\frac{1 + 3 \times B_{deraml} + 3 \times B_{dermal}^{\ 2}}{(1 + B_{dermal})^2} \right) \right] \times \mathrm{CF}$	適用於有機物，當 $t_1 > 2.4\tau_{event}$
	2-18		$DA_{event} = K_p \times C_{water} \times t_1 \times CF$	適用於無機物
	2-19		$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times EV_{shower} \times ED \times EF \times SA}{BW \times AT}$	
空氣	2-20	受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$C_{air} = C_{soil} \times \frac{P_e \times W}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \mathrm{CF}$	
	2-21		$Intake_{inh\text{-}soil} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	

表 2.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
空氣	2-22	受污染表層(深度一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-soil(upper)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	2-23		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{2 \times W \times \rho_s}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \sqrt{\frac{(\frac{D^{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times H}{\pi \times (\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}) \times \tau}} \times \mathrm{CF}$	比較公式 2-23 及公式 2-24 之結果，取值較低者代入公式 2-22
	2-24		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{W \times \rho_s \times d}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times \mathrm{CF}$	
	2-25	受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-soil(inner)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	2-26		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{H \times \rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}] \times \left[1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_s}{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times W}\right]} \times \mathrm{CF}$	
	2-27	受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	2-28		$C_{aur} = C_{water} \times \frac{H}{\left[1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_w \times \left(\frac{h_{cap}}{(\frac{D_{air} \times \theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{wcap}^{3.33}}{H \times \theta_T^2})} + \frac{h_v}{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2})}\right)}{(h_{cap} + h_v) \times W}\right]} \times CF$	

2.3.3.1 土壤介質暴露途徑之暴露劑量計算

一、誤食受污染土壤並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times IR_{oral-soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \mathrm{CF}$$ （公式 2-5，USEPA 1989[52]）

$Intake_{oral-soil}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

$IR_{oral-soil}$：攝食土壤速率(mg/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

二、受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{dermal-soil} = \frac{DA_{event} \times EV \times ED \times EF \times SA \times f_{sa}}{BW \times AT}$$ （公式 2-6，USEPA 2004[53]）

$Intake_{dermal-soil}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次事件發生之暴露劑量(mg/cm^2)

EV：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

---

52 「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

53 「USEPA 2004, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

f_{sa}：上臂體表面積與身體表面積比(unitless)
ED：暴露期間，暴露的總年數(year)
BW：體重(kg)
AT：暴露發生之平均時間(day)

其中　DA_{event} 可由以下公式求得：

$$DA_{event} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times \text{CF} \qquad \text{(公式 2-7)}$$

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)
AF：土壤對皮膚之吸附係數(mg/cm^2)
ABS_d：皮膚吸收分率(unitless)
CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

2.3.3.2 地下水介質暴露途徑之暴露劑量計算

於計算地下水介質暴露途徑之暴露量前，需先計算土壤中關切污染物經由孔隙向下滲入至地下水中之濃度。

若計算出滲入地下水中的濃度超過地下水中既有之關切污染物濃度時，則以滲入的濃度作為後續計算暴露劑量之依據；反之，則以地下水中既有之關切污染物濃度為依據。

一、土壤污染物滲入地下水之造成地下水之污染物濃度計算：

此傳輸途徑因關切污染物為有機物或無機物而有不同的估計方法。

土壤中關切污染物若為有機物，以公式 2-8 計算：

$$C_{water} = C_{soil} \times \frac{\rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}] \times \left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)} \quad \text{(公式 2-8, ASTM 1995[54])}$$

[54] 「ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

I：入滲率 (infiltration rate)(cm/year)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

W：污染源與地下水流平行之最大寬度(cm)[55]

U_{gw}：地下水流速(cm/year)

δ_{gw}：地下水混合層高度(cm)

土壤中關切污染物若為無機物，則以公式 2-9 計算：

$$C_{water} = C_{soil} \times \frac{1}{K_d} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)}$$ (公式 2-9, ASTM 2000[56])

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

I：入滲率(infiltration rate)(cm/year)

k_d：土壤地下水分配係數(cm^3-water/g-soil)

W：污染源與地下水流平行之最大寬度(cm)

U_{gw}：地下水流速(cm/year)

δ_{gw}：地下水混合層高度(cm)

公式 2-9 中的 K_d 值會因各重金屬特性不同而異，且相同重金屬

[55] 「W」 在本評析方法中為污染源與風向或地下水流平行之最大寬度，但是實際計算時，地下水流及風向均可能改變，因此實際計算時，應以污染源最大寬度計算。

[56] 「ASTM 2000, E2081-00 Standard Guide for Risk-Based Corrective Actio」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

於不同酸鹼度的環境中 K_d 值亦不同。在第一層次風險評估時，本評析方法所提供的參數為較保守的數值；在第二層次、第三層次則可允許以因土壤酸鹼度的不同，依文獻所記載之實驗結果，選擇符合場址特性之 K_d 值。

此外，依公式 2-8 或 2-9 所計算之地下水中關切污染物濃度需與該關切污染物之溶解度比較，若超出其溶解度，則應以溶解度為該土壤中關切污染物滲入地下水，造成地下水中該關切污染物濃度(C_{water})。

二、飲用受污染地下水並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-water} = \frac{C_{water} \times IR_{oral-water} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 2-10，USEPA 1989[57])

$Intake_{oral-water}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

$IR_{oral-water}$：飲水量(L/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

三、使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water(shower)} = \frac{([C_{a1} \times B \times t_1] + [C_{a2} \times B \times t_2]) \times EV_{shower} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 2-11)

$Intake_{inh-water(shower)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{a1}：淋浴時空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{a2}：淋浴後空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

B：呼吸速率(m^3/hour)

57 「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

t_1：每次淋浴時間(hour)

t_2：每次淋浴後仍待在浴室中的時間(hour)

EV_{shower}：淋浴次數(1/day)

BW：體重(kg)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{a1} 與 C_{a2} 的估計可依下列公式獲得：

$$C_{a1} = \frac{1}{2} \times \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_1)}{V_a} \times CF \quad \text{(公式 2-12)}$$

$$C_{a2} = \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_2)}{V_a} \times CF \quad \text{(公式 2-13)}$$

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

f：蒸散分率(unitless)

F_w：水流速率(L/hour)

V_a：浴室容積(L)

CF：單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

四、使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water(wash)} = \frac{C_{air} \times IR_{inhal} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(公式 2-14, USEPA 1989[58])}$$

$Intake_{inh\text{-}water(wash)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

[58] 「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{air} 可以下列公式計算：

$$C_{air} = \frac{WHF \times C_{water} \times f}{HV \times ER \times MC} \times CF \quad \text{(公式 2-15)}$$

C_{air}：室內空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

WHF：每天用水流量(L/day)

C_{water}：地下水中污染物的濃度(mg/L)

f：蒸散分率(unitless)

HV：室內容積(L)

ER：室內換氣率(air changes/day)

MC：為空氣混合係數(uniteless)

CF：為單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

五、使用地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收之暴露劑量計算：

針對有機物與無機物，一次皮膚接觸受污染地下水所吸收的劑量(DA_{event})[59]計算公式各有不同：

有機物的暴露劑量 DA_{event} 為(USEPA 2004)：

若 $t_1 \leqq 2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \sqrt{6 \times \frac{\tau_{event} \times t_1}{\pi}} \times \text{CF} \quad \text{(公式 2-16)}$$

[59] 由於受體與地下水的接觸與空氣不同，吸入空氣為一連續性的動作，與地下水皮膚接觸為單獨事件，因此須先估計單一事件所造成之暴露劑量。

若 $t_1>2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = FA \times K_p \times C_{water} \times \left[\frac{t_1}{1+B_{dermal}} + 2 \times \tau_{event} \left(\frac{1+3\times B_{deraml}+3\times B_{dermal}^{\ 2}}{(1+B_{dermal})^2} \right) \right] \times \mathrm{CF} \quad \text{(公式 2-17)}$$

FA：吸收分率(unitless)

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

τ_{event}：各關切污染物每次對皮膚接觸吸收的延遲時間(hour)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

B_{dermal}:關切污染物對於角質層對表皮層的相對滲透係數(unitless)

CF：為單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

使用以上兩個公式的使用，依經皮膚接觸時間的長短而定，若時間短於到達穩定狀態(Steady State)的時間(以 t*表示，一般來說，t*為τ_{event} 的 2.4 倍)，則使用公式(2-16)，反之則使用公式(2-17)。

另一方面，無機物的暴露劑量 DA_{event} 為:

$$DA_{event} = K_p \times C_{water} \times t_1 \times CF \quad \text{(公式 2-18，USEPA 2004)}$$

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

CF：單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

求得 DA_{event} 之後，再代入下列公式計算經受體皮膚吸收的關切污染物劑量：

$$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times EV_{shower} \times ED \times EF \times SA}{BW \times AT}$$ (公式 2-19，USEPA 2004[60])

$Intake_{dermal-water}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次事件發生之暴露劑量(mg/cm^2)

EV_{shower}：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

2.3.3.3 空氣介質暴露途徑之暴露劑量計算

一、受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

首先，計算出關切污染物由揚塵逸散至空氣中所造成的空氣中關切污染物濃度(C_{air})

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{P_e \times W}{U_{air} \times \delta_{air}} \times CF$$ (公式 2-20，ASTM 1995[61])

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

P_e：揚塵逸散速率(particulate emission rate)(g/cm^2-sec)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

---

60 「USEPA 2004, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

61 「ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

再計算受體因吸入污染空氣所吸收進入體內之關切污染物劑量

$$Intake_{inh\text{-}soil} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 2-21, USEPA 1989[62])

$Intake_{inh\text{-}soil}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

二、受污染表層(深度在一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

以關切污染物濃度超過管制標準樣品中，**最淺之深度**作為依據；若該最淺深度小於一公尺，則屬於受污染表層土壤。

$$Intake_{inh\text{-}soil(upper)} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 2-22, USEPA 1989[63])

$Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

62 「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

63 「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{air} 須以公式 2-23 與公式 2-24 各估計空氣中濃度，比較後採用數值**較低者**進行後續的計算

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{2 \times W \times \rho_s}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \sqrt{\frac{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times H}{\pi \times (\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}) \times \tau}} \times \mathrm{CF}$$ (公式 2-23, ASTM 1995[64])

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

τ：平均蒸氣流時間(averaging time for vapor flux)(sec)

W：污染源與風向平行之最大寬度 (cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{W \times \rho_s \times d}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times \mathrm{CF}$$ (公式 2-24, ASTM 1995[65])

64 「ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

65 「ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

d：表土深度(cm)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

τ：平均蒸氣流時間(averaging time for vapor flux) (sec)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

三、受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

以關切污染物濃度超過管制標準樣品中，**最淺之深度**作為依據；若該最淺之深度大於一公尺，則屬於受污染裡層土壤。

$$Intake_{inh\text{-}soil(inner)} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 2-25, USEPA 1989[66])

$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

Release Sites」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

[66]「USEPA 1989, Risk Assessment Guidance Vol.1 Human Health Evaluation Manual, Part A, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC」，公式相關參數代號列於附錄三當中。

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{H \times \rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}] \times \left[1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_s}{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times W}\right]} \times \text{CF} \quad \text{(公式 2-26)}$$

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

L_s：土壤污染源頂端深度(cm)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

四、受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(公式 2-27)}$$

$Intake_{inh\text{-}water}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中，關切污染物於空氣中濃度 C_{air} 可由下列公式計算

$$C_{air} = C_{water} \times \left[\frac{H}{1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_w \times \left(\frac{h_{cap}}{\left(\frac{D_{air} \times \theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{wcap}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}\right)} + \frac{h_v}{\left(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}\right)} \right)}{(h_{cap} + h_v) \times W}} \right] \times CF$$

(公式 2-28, ASTM 1995[67])

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

h_{cap}：毛細管邊緣高度(capillary fringe height)(cm)

h_v：通氣層厚度(vadose zone height)(cm)

L_w：地下水高度(cm)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{acap}：毛細管邊緣空氣含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{wcap}：毛細管邊緣水分含量(cm^3-air/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm3-water/cm3-air)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速 (cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

67 「ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites」，公式相關參數代號列於附錄二當中。

2.4 風險風險特徵描述

風險特徵描述主要包含兩大部分，一為風險計算，一為不確定性分析。而風險計算又可分為致癌風險與非致癌風險兩種，詳細計算流程分別如圖 2.4-1 及 2.4-2 所示。以下將風險的計算方式與不確定性分析所需涵蓋之項目說明如下：

2.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算

一、致癌風險：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各不同吸收途徑之暴露劑量個別相加，所得到個別吸收途徑之暴露劑量總合，再與該個別吸收途徑之致癌斜率相乘，其計算方式分別如下：

(一)口服吸收途徑之風險計算

$$R_{oral} = (Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil}) \times SF_{oral} \quad \text{(公式 2-29)}$$

R_{oral}：經由口服吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲用地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤而吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{oral}：經由口服吸收關切污染物之致癌斜率

(二)吸入吸收途徑之風險計算

$$R_{inh} = (Intake_{inh\text{-}water(total)} + Intake_{inh\text{-}soil(total)}) \times SF_{inh}$$

(公式 2-30)

R_{inh}：經由吸入吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$ 及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括 $Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及 $Intake_{inh\text{-}soil}$

SF_{inh}：經由吸入吸收關切污染物之致癌斜率

(三)皮膚接觸吸收途徑之風險計算

$$R_{dermal} = (Intake_{dermal\text{–}water} + Intake_{dermal\text{–}soil}) \times SF_{dermal} \text{(公式 2-31)}$$

R_{dermal}：經由皮膚接觸吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收地下水中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收土壤中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{dermal}：經由皮膚接觸吸收關切污染物之致癌斜率

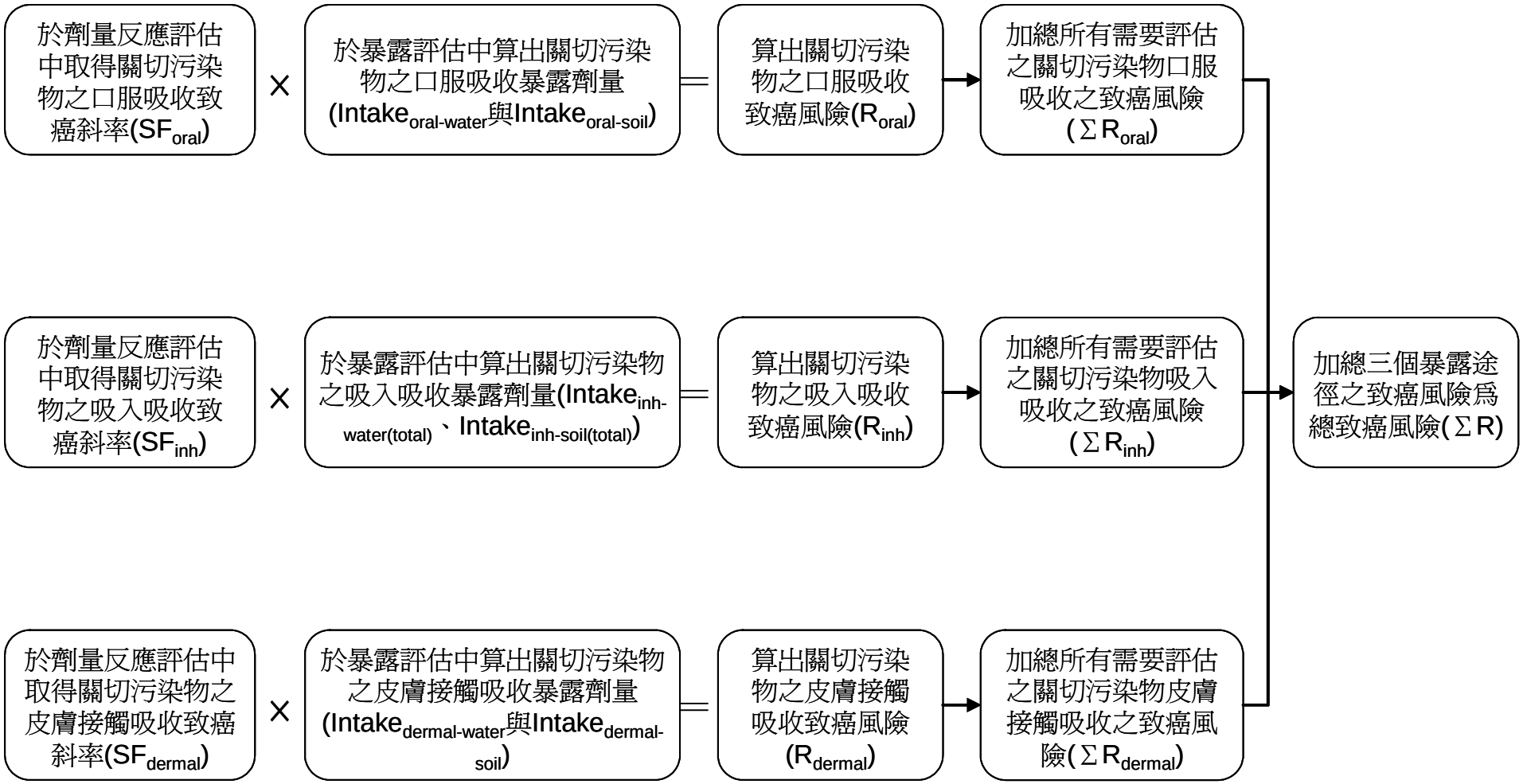


圖 2.4-1 致癌風險計算流程

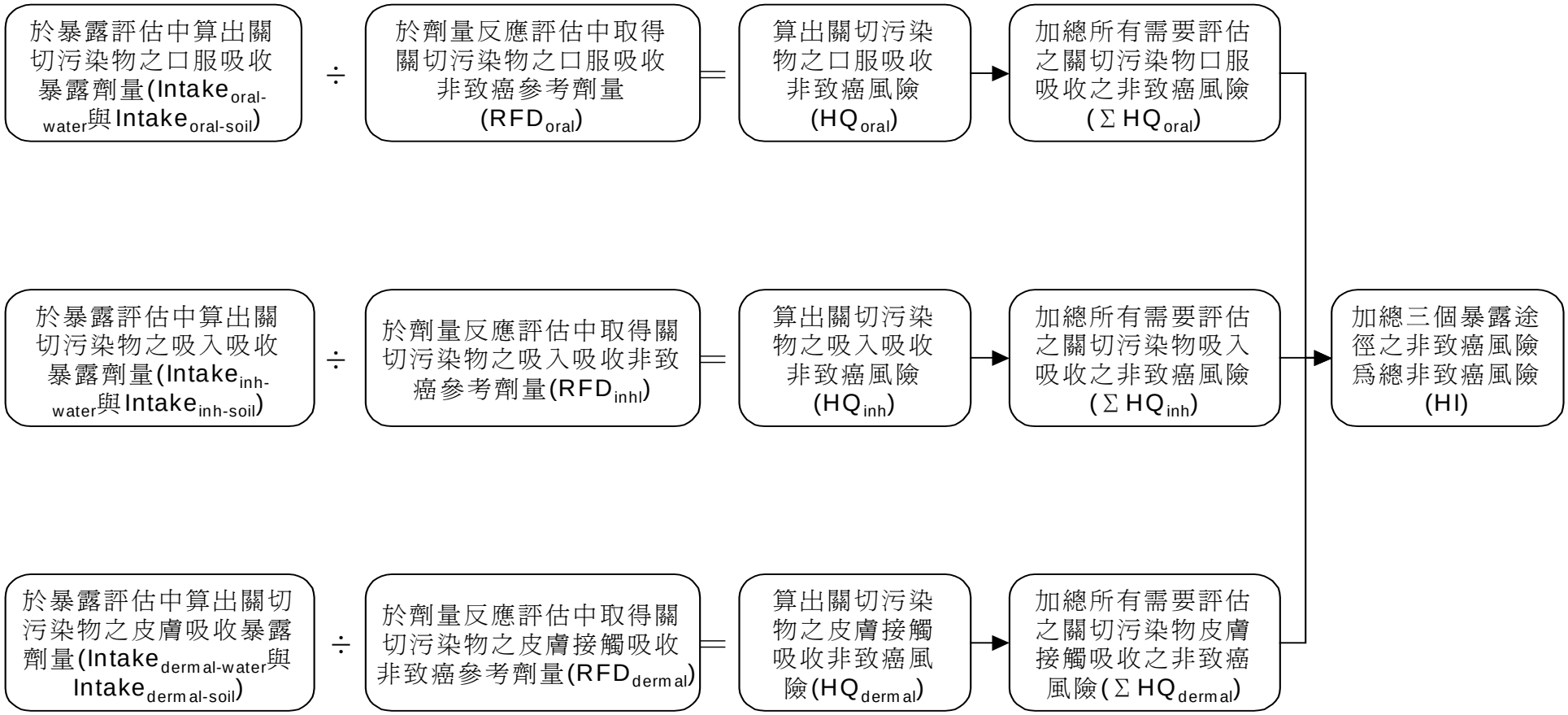


圖 2.4-2 非致癌風險計算流程

上述計算對所有的致癌性關切污染物均應執行一次，則可獲得所有致癌關切污染物於不同暴露途徑之致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核 (參考附錄六表十三)。

各關切污染物經由各暴露途徑之總致癌風險則為：

$$R_{total} = \sum R_{oral} + \sum R_{inh} + \sum R_{dermal} \quad \text{(公式 2-32)}$$

R_{total}：總致癌風險，即為受體一生中因暴露於各關切污染物中所致之致癌風險

本評析方法以總致癌風險小於或等於 10^{-6} 為可接受致癌風險的上限，若總致癌風險大於 10^{-6}，此時可進行下一層次之健康風險評估；若小於或等於 10^{-6}，則表示於評析方法所假設的情境下，受體所承受的致癌風險於可接受範圍內，應無須再做進一步的評估。

二、 非致癌風險：

非致癌風險又稱危害商數(Hazard Quotient, HQ)，其計算如下：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各不同吸收途徑之暴露劑量個別相加，所得到個別吸收途徑之暴露劑量總合再與該個別吸收途徑之參考劑量相除，其計算方式分別如下：

(一)口服吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{oral} = \frac{(Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil})}{RfD_{oral}} \quad \text{(公式 2-33)}$$

其中

HQ_{oral}：口服吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲用地下水吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily

dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{oral}：某一非致癌物之口服吸收之參考劑量

(二)吸入吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{inh} = \frac{(Intake_{inh\text{-}soil(total)} + Intake_{inh\text{-}water(total)})}{RfD_{inh}} \qquad (公式\ 2\text{-}34)$$

HQ_{inh}：吸入吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$ 及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括 $Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及 $Intake_{inh\text{-}soil}$

RfD_{inh}：某一非致癌物之吸入吸收之參考劑量

(三)皮膚接觸吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{dermal} = \frac{(Intake_{dermal-water} + Intake_{dermal-soil})}{RfD_{dermal}} \qquad (公式\ 2\text{-}35)$$

其中：

HQ_{dermal}：皮膚接觸暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸土壤吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{dermal}：某一非致癌物之皮膚接觸吸收參考劑量

上述的計算對所有的具非致癌毒性之關切污染物均應執行一次，則可獲得所有非致癌關切污染物於不同暴露途徑之非致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核(參

考附錄六表十二)。

各關切污染物經由各暴露途徑之危害指數(Hazard Index, HI)則為：

$$HI = \sum HQ_{oral} + \sum HQ_{inh} + \Sigma HQ_{dermal} \qquad \text{(公式 2-36)}$$

此危害指數(HI)即為受體一生中因暴露於各關切污染物所致的非致癌風險。

本評析方法以危害指數小於或等於 1 為可接受非致癌風險之上限，若可接受之危害指數大於 1，此時可進行下一層次之健康風險評估。若小於或等於 1，則表示於本評析方法所假設的情境下，受體所承受的非致癌風險於可接受範圍內，應無須再做進一步的評估。

健康風險評估執行人員應將風險計算的結果匯整於附錄六之表單當中。

2.4.2 不確定性分析

風險判定即估算受體暴露於關切污染物中暴露群的危險機率或危害程度，讓決策者瞭解暴露在此條件下，可能對健康產生多大之影響及影響方式。除量化的風險值之外，其內容且包括使用模式參數的不確定性分析(uncertainty analysis)。此不確定性包括：數據本身的變異性(variability)，及採用之模式或參數的不確定性 (uncertainty)。

在第一層次健康風險評估中，所需討論的不確定性應至少包括：

一、所收集之場址調查資料是否有不確定性，是否會造成風險之高估或低估。

二、討論毒性因子的取得，是否有關切污染物的毒性是無法量化的，對評估結果造成影響之程度?

三、討論第一層次中的參數與實際數值之可能偏差，與各參數的敏感度比(Sensitivity Ratio, SR, 見附錄五)。

四、討論計算結果中各暴露途徑與污染物對風險的貢獻之比例及何種暴露途徑或污染物對風險的影響較大。

五、污染物歷史檢測數據所呈現之時間趨勢，及此趨勢是否會造成風險之高估或低估。

2.4.3 根據第一層次健康風險評估擬定之決策

根據第一層次健康風險評估的計算結果，可為場址後續管理決策之依據。若風險超過可接受風險，風險評估者可在審查前即進行第二層次之風險評估；或者，由地方主管機關應公告為整治場址，並對風險所佔比例較高的途徑進行管制污染區域與周邊的活動，以減少受體暴露的頻率。

若依第一層次的假設所計算出之風險低於可接受值，則該場址應無須公告為整治場址，但可能需依所假設的情境限制土地利用或受體活動。同時視場址情況，可能亦需要持續監測關切污染物的濃度。

決策的擬定可由健康風險評估的執行單位依評估結果做出建議，但最後的決策應由審查單位、執行單位與相關利益團體(廠商、民眾等等)討論後獲致最後結論。

第三章 第二層次健康風險評估

若第一層次之健康風險評估結果顯示，關切污染物濃度所造成之人體暴露風險超過可接受範圍，則健康風險評估執行人員可依其經濟效益評估與場址狀況，決定是否選擇進行第二層次之健康風險評估。以下就第二層次健康風險評估的執行程序進行說明：

3.1 危害鑑定

危害鑑定為健康風險評估之第一個步驟，主要係依據場址資訊與污染物檢測資料，來判定污染物是否為關切污染物，需要進行健康風險評估，及在污染區域內是否有受體(receptors)可能遭受危害。

健康風險評估之危害鑑定工作，包括(1)資料蒐集、(2)關切污染物判定與濃度資訊彙整(3)影響範圍界定與分析等三大部分。

第二層次風險評估的三大部分與第一層次相似，並有許多重複之處，但是所需蒐集的資料應更為詳細；以下則就第二層次風險評估中危害鑑定加以說明。

3.1.1 資料蒐集[68]

一、必須蒐集之資料

第二層次的健康風險評估允許將受體對關切污染物的暴露點(Point of Exposure, POE)，由污染源移動至其他合理的位置[69]。但這樣的移動需要有足夠的資料，證明受體不可能直接於污染源與關切污染物質接觸[70]。但審查之主管機關或審查委員仍可依據場址與周邊環境目前或未來土地利用情況對此加以否決。

[68] 第二層次健康風險評估的資料蒐集與第一層次健康風險評估大同小異，但由於第二層次健康風險評估得引用現地調查資料為佐證來置換第一層次健康風險評估所設定之預設值，因此除了第一層次的健康風險評估所需調查的資料外，尚有其他的資料必須收集，以提供證明。

[69] 第一層次健康風險評估假設受體於污染源活動。

[70] 所以如果無法證明場址內無人活動，則仍需假設受體在場址上(也就是污染源上方)活動，至於在上方活動者為居民或工作人員，則視場址與周邊的土地利用調查而定。

由於暴露點的移動，風險評估所針對的受體可能不在場址內，因此若要估計場址外受體的暴露劑量，必須取得較第一層次健康風險評估更多之暴露參數，以進行暴露點位置環境介質中關切污染物濃度的估計[71]。因此，於危害鑑定階段，第一層次健康風險評估方法中所應蒐集資料之外，尚應蒐集下列資料以供場址特性之佐證[72]。

(一) 場址環境資料

1. 第二層次應取得之場址環境資料，包括公告為污染控制場址資料、是否曾違反相關環保法規之紀錄。
2. 以場址本身或周邊採樣取得之水文地質與氣象相關參數，常用之參數資料列於附錄二[73]。為取得相關參數所進行之土壤及地下水採樣與檢測，應以環保署與環檢所公告之相關標準方法進行。若無公告方法或公告方法無法適用於場址條件時，則可參考國際公認檢測方法來進行檢測[74]。

(二) 場址使用資料

1.場址使用現況

任何涉及可能造成土壤或地下水污染之物質運作現況，皆應記錄於評估報告書中。包括地上建物之登記用途與現地勘查之描述，若有符合場址現況之航照圖亦應附上；而無人居住或使用的空間也應予以紀錄。

此外，應取得場址內結構物、設施或設備之相關資料。例如：建築物棟數、每棟之樓層數、儲槽數量與槽齡、管線位置，及其他輔助性之結構物。

2. 場址使用歷史紀錄

包括可供辨識場址開發及活動狀況之航照圖，與其他有助於評估場址土壤與地下水潛在污染之歷史或人員訪談紀錄。

[71] 惟由於估計暴露點所在介質濃度之宿命傳輸模式(fate and transport models)有許多種選擇，所需要的參數種類各異，本節討論之場址環境資料蒐集並不涵蓋所有可能之參數。

[72] 若無法提具相關資料佐證，則依健康風險評估之保守估計原則，應維持原預設值之使用。

[73] 附錄二表中的土壤分類是作為參數不足或無法取得時，以公認土壤分類為基準來設定較具土壤特異性的參數。

[74] 例如美國材料與試驗學會 America Society of Testing Materials, ASTM 所訂定的法則。

審閱場址使用歷史紀錄時，需確認其用途(例如：辦公室、廠房或儲槽等)，若為事業之製程設施或設備時，應儘可能詳細的說明生產或製造的產品及操作情形。蒐集場址之使用歷史資料，應儘可能回溯其使用年代，如有可能，以十年回溯期為基本要求。健康風險評估執行人員應至場址進行勘查及拍照存證，以了解土地使用現況。評估報告書中應該描述所有可確認的使用情形，以及無法確認使用情形之原因。

3. 場址周邊土地使用情形

關於場址周邊的使用情形(例如：住宅、商店、工廠等)及可能存在之污染物質，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

4. 場址周邊使用歷史紀錄

關於毗鄰場址區域過去之使用情形或任何造成土壤與地下水污染之可能性，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

5.變更暴露情境假設的資料，資料來源可以分為三大類：官方之統計資料、調查報告或紀錄、現地調查結果、學術期刊之論文，均可成為變更暴露情境假設之佐證資料之一。

(三) 污染物檢測資料

於第二層次的健康風險評估中，其檢測資料引用上與第一層次評估有所不同：

1.受體之暴露劑量可依據場址內關切污染物之採樣濃度，**平均值之百分之九十五的上信賴界限(95% upper confidence limit, 95% UCL)估計。關切污染物檢測資料之採樣點有其數量要求，以符合統計之基本假設與保守估計原則**[75]。因此，於第二層次評估所需之環境採樣分析點數可能較第一層次評估時增加。關於此補充採樣點數增加之估計，可參考 3.3 節之公式 3-31。

2.若受體位於場址外時，不可直接以該處土壤與地下水採樣檢測濃度進行評估，仍必須使用場址內之採樣檢測資料進行推

[75] 詳細之統計估計於暴露評估一節將有說明。

估[76]，取其模式推估 POE 處於暴露期間污染物濃度較高者作為風險計算之濃度。

若需進行評估前之採樣檢測作業時，風險評估執行人員須擬定採樣計畫，並依據環保署公告之土壤與地下水採樣方法進行採樣檢測作業，並需於評估報告書中詳述作業過程及結果。

二、第二層次必要收集之參數資料

由於第二層次健康風險評估是以更符合場址特性之資料進行，可以蒐集場址中下列參數[77]。無法蒐集到之參數，則仍應以第一層次風險評估之預設值進行計算。

其中，參數值可採用多點採樣檢測結果之平均值；除下述各項參數外，若宿命傳輸模式有其他必要參數時，其採樣位置及數量應依據各模式相關需求辦理。

(一)不飽和層土壤性質參數

1.土壤密度

2.孔隙度

3.水分含量

4.有機碳含量

5.毛細邊緣高度

6.場址土壤污染源頂端深度

其中，有機碳含量之採樣位置應位於污染範圍外不含關切污染物之背景土壤。

(二)地下水參數

1.水力傳導係數

2.入滲量

3.地下水流速

[76] 場址外受體所在之土壤與地下水中關切污染物濃度，可代入宿命傳輸模式中進行校正(calibration)與模擬(simulation)使用，但並不能直接以此濃度來估計受體之暴露劑量。依據本評析方法之假設，其評估受體由現在到未來三十年(住宅區)或二十五年(工商業區)暴露於污染物所承受的風險。雖然目前場址外受體所在之關切污染物濃度較低，但考量場址中污染團之移動，可能使受體暴露濃度升高，故仍需以模式來推估。

[77] 此處所列之參數僅為供環保署電腦程式使用所需，若要使用其他的宿命傳輸模式，則可能必須調查其他參數的數值。

4.地下水混合區高度

5.地下水位高度

(三)氣象參數

1.污染源與風向平行之最大寬度

2.污染源上方風速

3.污染源上方空氣混合區高度

4.揚塵逸散係數

三、其他可蒐集之資料

除上述應加以蒐集之資料外，有助於評估土壤與地下水健康風險影響之相關資料，均為蒐集之範疇；若受體位於場址外，則必須延伸現地資料蒐集範圍至場址周界外。

除第一層次健康風險評估中所設定的場址外圍至少一公里之搜尋範圍外，在第二層次健康風險評估的資料搜尋範圍需至少涵蓋所假設之暴露點。

四、資料之時效性

需以最接近進行健康風險評估時間點之資料，作為評估之依據，以避免取得不正確或過時的資料。若於合理的蒐集時效與努力下均無法取得具時效性之相關資料時，則於執行健康風險評估時，應使用最保守之假設進行風險計算。

五、資料品質查核

除資料完整性外，同時亦須針對資料品質進行查核。所引述之資料同時應註明其出處來源。

3.1.2 關切污染物判定

除非有新的資料或檢測結果顯示場址中有第一層次健康風險評估中未包含之關切污染物，否則第二層次之健康風險評估關切污染物項目應與第一層次相同(見附錄六、關切污染物判定表格)。

一、可能關切污染物

本評析方法中定義之可能關切污染物，包括任何能導致土壤或地下水污染之外來物質，同時有可能進一步造成健康危害風險。

由於健康風險評估中的風險計算假設污染物之毒性有加成的作用，污染物種類的多寡可能造成評估結果的不同，因此應將可能的污染物質盡量列出，以達到綜合評估之目的。

二、關切污染物

(一) 凡超過土壤或地下水污染管制標準之污染物，皆應納入為評估項目中。

(二) 除第(一)項之應納入評估之關切污染物外，其他經主管機關要求應納入評估之項目亦屬之。

(三) 若關切污染物因環境條件呈現離子態或解離態，進而造成毒性差異時，則應詳述其狀態分布，以作為詳細評估之依據。若無法區分時，則應以該關切污染物之總量來計算，以達到保守估計之原則。

(四) 「鉛」之劑量評估方式通常以人體內血鉛濃度計算，此與第一層次、第二層次之風險評估設計並不一致；故血鉛納入第三層次健康風險評估中。

三、不適用之關切污染物

(一) **地下水污染管制標準中的「總酚」、「硝酸鹽氮」與「亞硝酸鹽氮」等項目，目前並不納入本風險評估評析方法之範圍內。**

(二) 具生物蓄積性或以食物鏈為其暴露途徑之關切污染物，則不適用第二層次之健康風險評估。

3.1.3 危害辨識

危害辨識為決定某一關切污染物是否會增加某種危害健康情形之發生率；在本評析方法中，係以透過查詢國外相關毒理資料庫，來判定關切污染物之危害程度。

危害辨識主要為判定關切污染物之致癌毒性與非致癌毒性，其依據歐美各國毒理資料庫進行研判。

一、毒理資料庫介紹

目前歐美政府機關或相關研究機構，已建置各種毒理資料庫，

並依據其研究結果更新，因此關切污染物健康風險評估之危害辨識及毒性因子，可由各種毒理資料庫中取得。以下介紹目前較具公信力之資料庫，包括：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)：

本資料庫由美國環保署所建立並定期更新，其網址為http://www.epa.gov/iris/。目前所提供的資訊包括吸入吸收(inhalation)或口服吸收(oral)之慢性毒性因子估計值。此外，並依據現有毒性資料，將致癌性分為五大類：

1. 人體致癌物質(carcinogenic to humans)；
2. 可能人體致癌物質(likely to be carcinogenic to humans)；
3. 毒理資料顯示致癌性，但無足夠資料量化對人體的致癌作用(suggestive evidence of carcinogenicity, but not sufficient to assess human carcinogenic potential)；
4. 缺乏人體致癌性毒理資料(data are inadequate for an assessment of human carcinogenic potential)
5. 對人體無致癌可能性(not likely to be carcinogenic to humans)。

上述分類原則係 1999 年更新版本之分類。之前最常使用的分類法係 1986 年所訂之分類方法，將污染物質分為 A(對人類為致癌物質)、B1(根據有限的人體毒性資料與充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、B2(根據充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、C(可能為人體致癌物)、D(尚無法分類)與 E(已證實為非人類致癌物質)等六種。

(二)世界衛生組織簡明國際化學評估文件(WHO Concise International Chemical Assessment Document , CICAD)：

主要是彙整單一化學物質或混合物對環境與人類健康的危害，並舉出各種案例與研究來討論可能的吸收途徑。但 CICAD 於作用評估(effect evaluation)一節對非致癌作用進行探討，並估計可接受濃度(tolerable concentration)或每日可接受劑量(Tolerable Daily Intake, TDI)。聯合國的可接受劑量與參考劑量

估計法則相同, 所以在本評析方法亦將可接受劑量作為爰引的毒性因子之一。對於致癌毒性因子，則須引用 CICAD 中所估計之單位風險(unit risk)，其估計原理與本節所提之致癌機率相同。

(三) 國際癌症研究署（International Agency for Research on Cancer ,IARC）：

國際癌症研究署為聯合國設立之研究機構，專門進行化學物質致癌性質與機轉研究。將化學物質的致癌性分成四大類

1. 第一類(group 1)：人類致癌性的證據充足。
2. 第二類(group 2)：人類致癌性的證據尚有限。(含 group 2A：流行病學資料有限，但是動物實驗資料充份；人類可能致癌物及 group 2B：流行病學資料不足，但動物資料充份；或流行病學資料有限，動物資料不足；也許是人類致癌物)
3. 第三類(group 3)：致癌性的證據不足。
4. 第四類(group 4)：證據顯示沒有致癌性。

因此，被歸為第一類與第二類者，均應於健康風險評估中納入致癌風險計算與討論。

(四) 美國環保署暫行毒性因子(USEPA Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)：

為美國環保署之國家暴露評估中心 (USEPA National Center for Environmental Assessment, NCEA)所計算出的臨時性毒性因子(Provisional Toxicity Factor)。NCEA 根據超級基金健康風險評估與整治目標的個案需要，以初步所能蒐集得到，但較不完整之毒理資料來估計污染物之毒性因子。

(五) 毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease Registry, ATSDR)之最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)：

ATSDR 計算出部分毒性物質的最小風險濃度。惟其所計算的數值多為急性與亞慢性，需要加以轉換才能應用於本評析方法之健康風險評估中。此外，MRL 並無提供致癌毒性因子，所以只有在前述資料庫都無法獲得數值時，才予以利用。

(六) 美國環保署健康效應摘要表格(Health Effects Assessment

Summary Tables , HEAST)：

為 USEPA 所出版的一本毒性因子文件，文中以表列方式列出各污染物的亞慢性與慢性毒性因子。

二、致癌性及非致癌性判定

在本評析方法依據前述資料庫，進行關切污染物致癌性及非致癌性之危害辨識程序。若屬致癌性物質，則應取得該關切污染物之致癌斜率。若同時具有非致癌性之不良反應，亦應取得其參考劑量。

(一)致癌毒性判定

本評析方法以國際癌症研究署 (International Agency for Research on Cancer ,IARC)之致癌性分類為關切污染物致癌性之優先判定原則。

若關切污染物屬於 IARC 資料庫中的**「致癌物」(Group 1)或「可能致癌物」(Group 2A、2B)**，則屬致癌性物質，於健康風險評估中應計算其致癌風險。

若於 IARC 中列為證據不足者(Group 3)，則應參考美國環保署所建置 IRIS 資料庫之致癌分類；若於 IRIS 中列為**「人體致癌物」(A、B1、B2 類)或「可能人體致癌物」(C 類)**(按 1986 年所訂之分類代號，則為 A、B1、B2 與 C 四類)，則該關切污染物，亦應屬致癌性物質。

(二)非致癌毒性鑑定

非致癌物質並沒有像致癌物質一樣具有資料庫可供分類的判定，因此非致癌物質主要以能否在毒理資料庫中查詢到參考劑量為鑑定依據。若能查得，則表示該關切污染物有可資量化的非致癌毒性；若無法查得，則表示該關切污染物沒有非致癌毒性或非致癌毒性之毒理資料不足無法判定非致癌毒性。參考劑量的取得見 3.2 節劑量反應評估的說明。

3.2 劑量反應評估

劑量反應評估主要是探討人體暴露於污染物中程度之高低、與其產生不良反應之機率，或不良反應之嚴重程度之間有無關連，最後估計出其致癌毒性因子或非致癌毒性因子。在本評析方法中，係依據國外相關研究或政府機構具公信力之資料庫，來取得毒性因子之資料。

一、毒性因子的爰引

非致癌毒性因子(non-carcinogenic toxicity factor) 的計算是以閥值方法(threshold approach)為主。因此，非致癌毒性因子即對於閥值的估計，又稱參考劑量(Reference Dose，RfD)。其計算主要是以毒性資料中得到的無明顯不良反應劑量(No-Observed-Adverse-Effect-Level，NOAEL)、或最低明顯反應劑量(Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level，LOAEL)、或低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL) ，再考慮所使用科學研究的不確定性來決定不確定因子(Uncertainty Factor)的大小，最後計算出參考劑量。

計算致癌毒性因子(Carcinogenic Toxicity Factor)時，採取無閥值方法(Non-Threshold Approach)，以斜率概念表示；即以劑量反應曲線估計平均每增加一個單位劑量所增加的致癌機率有多少。因此，致癌毒性因子又稱為致癌斜率(Cancer Slope Factor, CSF)。

依據前述具公信力之資料庫，本評析方法所爰引之優先順序為：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)；

(二)世界衛生組織簡明國際化學評估文件與環境衛生準則(WHO Concise International Chemical Assessment Documents，WHO CICAD；WHO Environmental Health Criteria, WHO EHC)；

(三)美國環保署暫行毒性因子(Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)；

(四)毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease

Registry, ATSDR)最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)；

(五)美國環保署健康效應預警摘要表格(Health Effect Assessment Summary Table , HEAST)。

(六)美國加州環保署所建立之毒性因子。

無論關切污染物是否具致癌性或非致癌性，皆須依以上順序查詢其致癌毒性因子與非致癌毒性因子。

二、 毒性因子之換算

(一)不同暴露途徑之外推(extrapolation)適用條件

若有吸收途徑之毒性因子無法於毒理資料庫中取得時，同一個有機物之不同吸收途徑之毒性因子有時可以相互引用，稱為吸收途徑外推(route to route extrapolation)。其中口服吸收毒性因子，可同時於口服、吸入與皮膚接觸三種不同的吸收途徑中使用，而吸入吸收之毒性因子，可同時在口服與吸入的吸收途徑中使用。但若因已知之肝臟初次通過效應(first pass effect)，或不同的吸收途徑會造成暴露劑量或致毒性之過大差異時，則此外推法則並不適用。

1.口服(oral)吸收與吸入(inhalation)吸收途徑的換算

以口服吸收的毒性因子轉換成吸入吸收的毒性因子時，並不需做劑量上的換算，僅需作單位上的轉換。惟若吸入吸收毒性因子單位，並非一般進行健康風險評估時所使用的每人每公斤每日的攝取量(mg/kg-day)，而是毫克每立方公尺(mg/m^3)時，則有必要進行單位的轉換。

非致癌毒性因子之換算公式如下：

$$RfD_{oral}(mg/kg-day) = RfC(mg/m^3) \times \frac{IR_{inh}(m^3/day)}{BW(kg)} \quad \text{(公式 3-1)}$$

其中

RfD_{oral}：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfC：吸入吸收參考濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

致癌毒性因子之轉換公式如下：

$$SF_{oral}(\frac{1}{mg/kg-day}) = SF_{inh}(\frac{1}{mg/m^3}) \times \frac{BW(kg)}{IR_{inh}(m^3/day)} \quad \text{(公式 3-2)}$$

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{inh}：吸入吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/m^3}$)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

2.口服(oral)吸收與皮膚接觸(dermal)吸收途徑的換算

以口服吸收的毒性因子轉換成皮膚接觸吸收的毒性因子時，則需假設有劑量上的差異，即同樣的劑量經由口服或經由皮膚接觸吸收所產生的效應程度是不同的。在劑量的轉換上，以消化道吸收分率(fraction of chemicals absorbed in the gastrointestinal tract, ABS_{GI})來表示，其轉換的公式如下：

$$RfD_{dermal} = RfD_{oral} \times ABS_{GI} \quad \text{(公式 3-3)}$$

或

$$SF_{deraml} = \frac{SF_{oral}}{ABS_{GI}} \quad \text{(公式 3-4)}$$

其中，

RfD_{dermal}：皮膚接觸吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfD_{oral} ：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

SF_{dermal}：皮膚接觸吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

ABS_{GI}：消化道吸收分率(unitless)

若消化道吸收分率大於或等於 0.5 時，則可以免除轉換的過程，直接以口服吸收之毒性因子為皮膚接觸吸收之毒性因子。

綜合以上所述，使用者在針對各關切污染物查詢毒性因子時，可依下列三項主要步驟進行：

(一) 查詢毒理資料庫之致癌分類以判定關切污染物是否為致癌物質。

(二) 若為致癌物質，則需進行該關切污染物之致癌斜率與非致癌參考劑量的查詢；若判定為非致癌物質，則只需進行非致癌參考劑量的查詢。

(三) 若前述具公信力之毒理資料庫中，其相關毒性因子有所缺漏時，則需要以該關切污染物之不同吸收途徑的毒性因子進行換算。

3.3 暴露評估

第二層次之健康風險評估與第一層次之健康風險評估相同，有三個主要步驟。

(一) 決定暴露情境、環境介質與受體類型

第二層次之健康風險評估中，若場址經調查並無受體長期於該場址土地上活動，且未來該場址之土地利用不會有受體長期於該場址之土地上活動，則允許將暴露點(POE)移至場址外；否則需假設暴露點在場址土地上，不允許將暴露點移至場址外之評估。

(二) 決定於暴露情境下可能發生之暴露途徑。

(三) 計算各暴露途徑下，受體承受之暴露劑量。

3.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型

一、暴露情境：

本評析方法第二層次適用之暴露情境包括：

(一)場址內

1.住宅區

2.工、商業區

(二)場址外

1.住宅區

2.工、商業區

暴露情境之判定原則如下：

(一) 若場址本身或鄰近區域，於目前或未來三十年內多為住宅區形式的土地利用，則以住宅區的情境假設為健康風險評估之暴露情境。

(二) 若場址本身或鄰近區域，於目前或未來三十年內多為工、商業區形式的土地利用，則以工、商業區的情境假設為健康風險評估之暴露情境。

(三) 若為住、工、商混合，則以保守之住宅區估計。

(四) 若土地利用之資料不足，則以保守之住宅區估計。

二、環境介質

本評析方法中之環境介質包括土壤、地下水及空氣，需視關切污染物之分布、污染物特性及暴露情境等因素，以決定需納入評估之環境介質，以便進一步決定後續之暴露途徑。

其場址內及場址外之適用環境介質亦有所差異，說明如下：

(一)場址內適用之環境介質為土壤、地下水及空氣。

(二)因土壤中之關切污染物，無法直接經藉由土壤本身為介質傳輸至場址外，故污染物傳輸至場址外所適用之環境介質為地下水及空氣。

三、受體類型

(一) 暴露情境判定為住宅區者，則受體為當地居民；包括成人(12 歲以上屬於成人)及 12 歲以下之孩童。

(二) 暴露情境判定為工、商業區者，則受體僅為現場工作人員，即

成人。

3.3.2 暴露途徑與傳輸途徑

第二層次之暴露途徑與第一層次有所不同，場址內之暴露途徑與第一層次相同，唯場址外需考量傳輸途徑對關切污染物濃度之影響，其暴露途徑及傳輸途徑之概念如圖 3.3.2-1 所示。

3.3.2.1 場址內受體之暴露途徑

依據各環境介質，本評析方法中須考量之暴露途徑包括以下數個，其同時適用於住宅區及工、商業區；

(一)土壤介質所包含之暴露途徑：

1. 誤食受污染土壤並經由口服吸收。
2. 受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收。
3. 土壤介質需考量土壤中關切污染物，經孔隙向下滲入至地下水中，而造成地下水污染；考量關切污染物性質之差異，**此傳輸途徑因關切污染物為有機物或無機物而有不同之估計方法**。

(二)地下水介質所包含之暴露途徑：

1. 飲用受污染地下水並經由口服吸收。
2. 使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收。

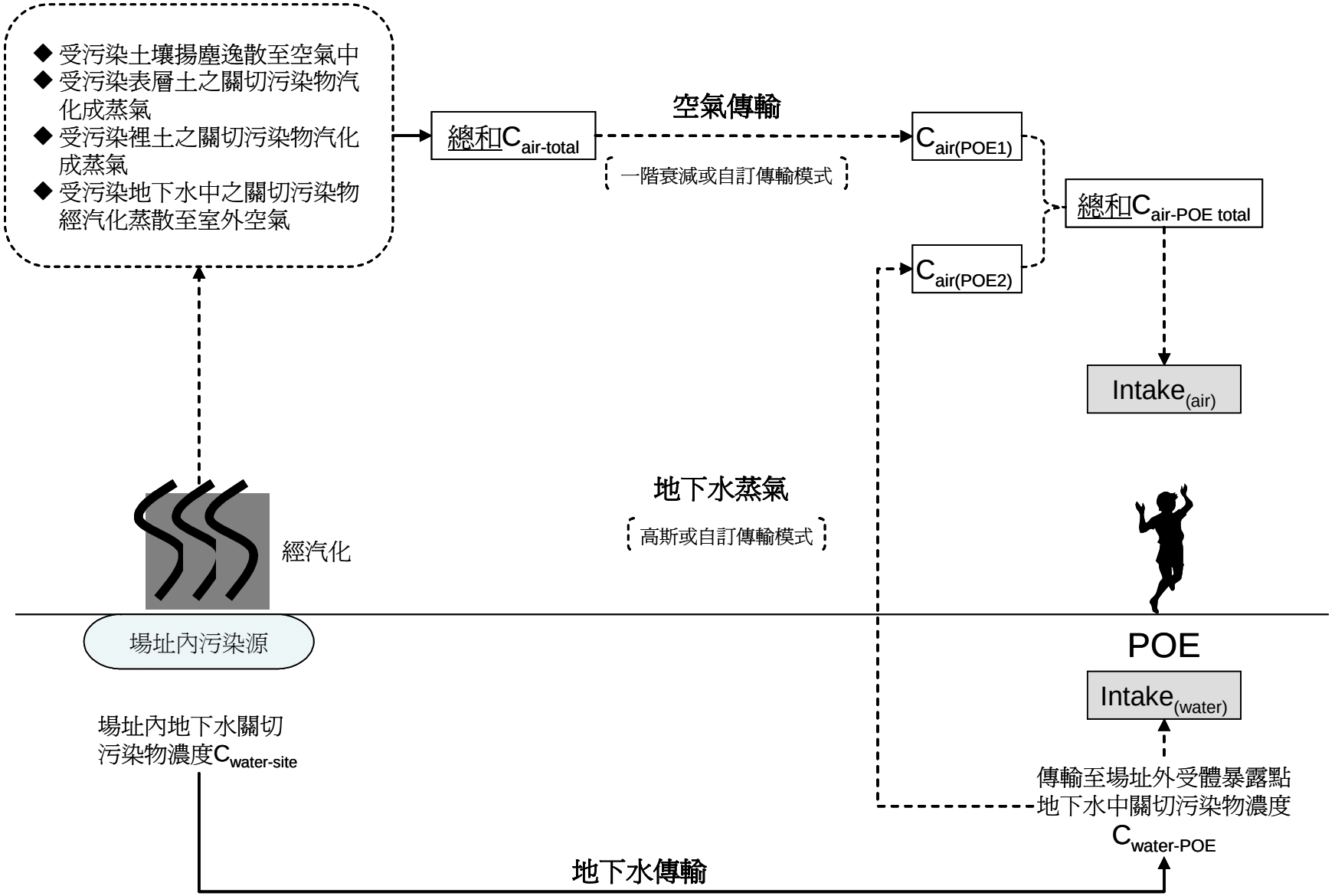


圖 3.3.2-1 第二層次場址外受體暴露途徑及傳輸途徑概念圖

(三)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收。
2. 受污染表層(深度在一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

3.3.2.2 場址外受體之暴露途徑及傳輸途徑

由於場址內土壤中之關切污染物無法藉由傳輸途徑移動至場址外受體處，故場址外受體只需評估經由地下水及空氣等暴露途徑所進入人體之暴露劑量。

但是由於場址內土壤及地下水中之關切污染物會經汽化成為蒸氣，再經空氣傳輸至場址外受體處，故需先行推估場址內由土壤及地下水汽化成蒸氣之濃度，再以空氣傳輸模式進行場址外濃度推估，其程序如圖 3.3.2.2-1 所示。

而場址內地下水中關切污染物，亦會藉由地下水傳輸至場址外，場址外受體再經由口服、吸入及皮膚接觸等暴露途徑吸收。其同時適用於住宅區及工、商業區之暴露途徑及傳輸途徑如下：

(一)地下水介質所包含之暴露途徑：

1. 飲用受污染地下水並經由口服吸收。
2. 使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

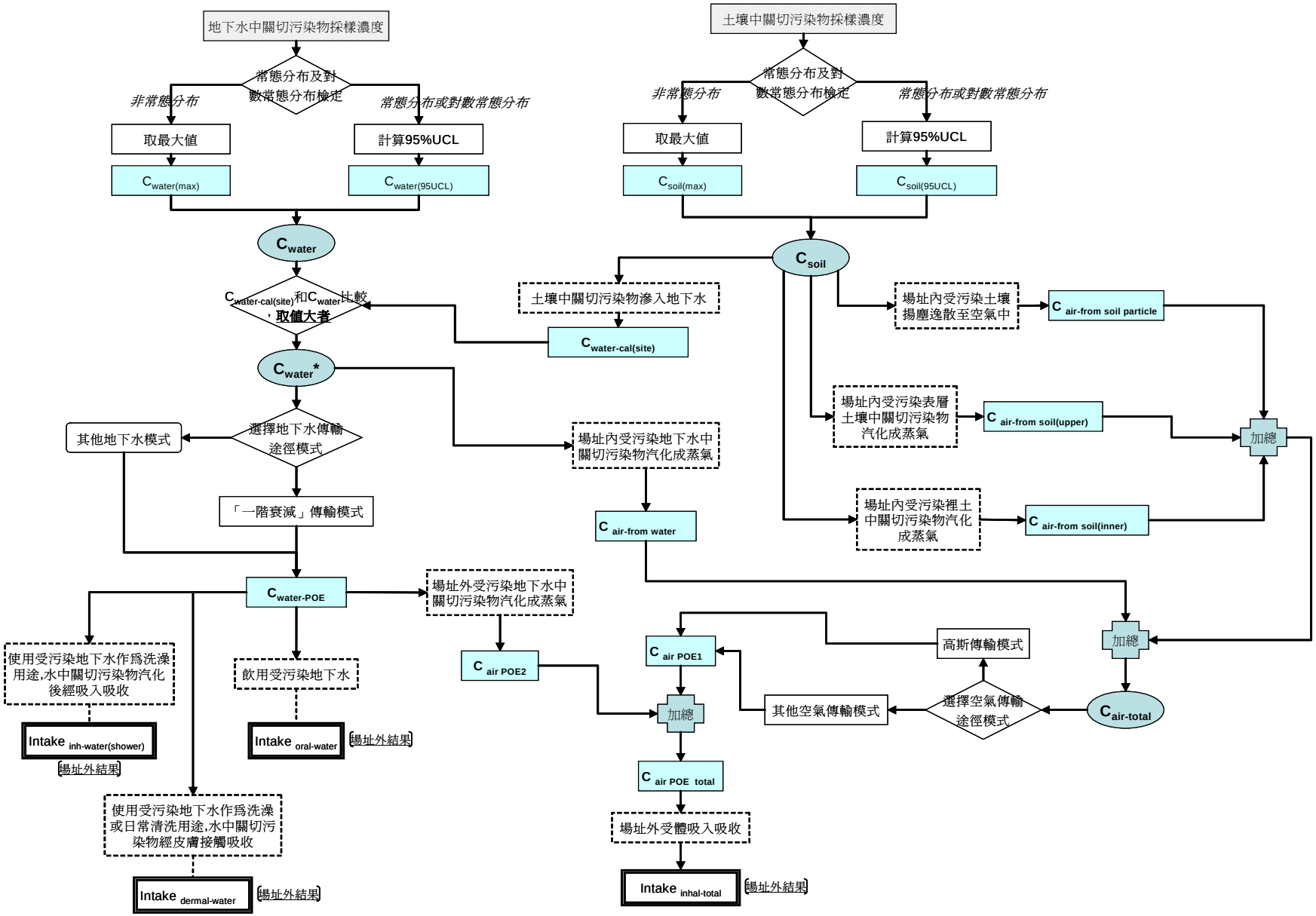


圖 3.3.2.2-1 場址外受體暴露途徑及傳輸途徑評估程序圖

4. 使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收。

(二)地下水傳輸途徑：

1.一階傳輸模式(First Order Decay)

2.其他地下水解析解傳輸模式，其他地下水相關模式可參考表3.3.3.2-1 所示。

(三)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 受污染土壤揚塵逸散至空氣中，經傳輸後為受體所吸入吸收。

2. 受污染表層(深度一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

3. 受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

4. 受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

(四)空氣傳輸途徑：

1.高斯空氣擴散傳輸模式

2.其他空氣解析解傳輸模式

健康風險評估執行人員如擬以所蒐集之資料提出暴露途徑不存在之證明時，應填妥附錄六中的暴露情境判定表(附錄六、表四與表五)，並於評估報告書中敘明暴露途徑不存在之詳細理由，經審查之主管機關或審查委員認定後，得於健康風險評估中刪去該項暴露途徑；若無法提出不存在之證明，則判定表中所列之暴露途徑應全部納入暴露劑量計算。審查之主管機關或審查委員可根據評估報告書中之敘述與依場址的情況決定是否同意，但審查之主管機關亦可依場址目前或未來的使用狀況，予以否決。

關於暴露情境與受體之選定，與暴露途徑之排除，均須總結於暴露情境判定表，並於健康風險評估報告中敘明判定之詳細理由與結論。

3.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量

受體暴露劑量(intake)相關計算公式如第一層次健康風險評估所示。但參數之數值可依所檢附之場址調查或檢測之資料，並由審查主管機關認可後而變更。

若評估場址外受體健康風險時，則需先行以宿命傳輸模式推估場址外之關切污染物濃度，再計算受體之暴露劑量；以下即分述場址內受體及場址外受體所使用之暴露劑量計算公式及宿命傳輸模式；各暴露途徑之關切污染物劑量計算公式如表 3.3.3-1 所示，其詳細說明如下。

3.3.3.1 場址內受體

場址內受體之暴露劑量計算方式與第一層次相同，但第二層次要求以更多實測值代入公式中進行推估，而非以一般暴露情境之參數值推估。

進行暴露劑量推估前，需先針對場址內土壤及地下水之採樣檢測結果進行常態分布檢核，其檢核方法請參照 3.3.3.3 節。依檢核結果選擇以「最大值」或「95%信賴區間上限值」，進行後續暴露劑量評估程序。

一、土壤介質暴露途徑之暴露劑量計算

(一)誤食受污染土壤並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times IR_{oral-soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \mathrm{CF}$$ (公式 3-5，USEPA 1989)

$Intake_{oral-soil}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

$IR_{oral-soil}$：攝食土壤速率(mg/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

表 3.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
土壤	3-5	誤食受污染土壤並經由口服吸收之暴露劑量	$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times IR_{oral-soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \mathrm{CF}$	
	3-6	受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收之暴露劑量	$Intake_{dermal-soil} = \frac{\mathrm{DA}_{\mathrm{event}} \times EV \times ED \times EF \times SA \times \mathrm{f}_{\mathrm{sa}}}{BW \times AT}$	
	3-7		$\mathrm{DA}_{\mathrm{event}} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times \mathrm{CF}$	
地下水	3-8	土壤污染物滲入地下水之造成地下水之污染物濃度計算	$C_{soil} \times \frac{\rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} + H \times \theta_{\mathrm{as}}] \times \left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)} = {}^{*}C_{water\text{-cal}}$	適用於有機物；其結果須再和 C_{water} 及飽和溶解度比較
	3-9		${}^{*}C_{water\text{-cal}} = C_{soil} \times \frac{1}{K_d} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)}$	適用於無機物；其結果須再和 C_{water} 及飽和溶解度比較
	3-10	飲用受污染地下水並經由口服吸收之暴露劑量	$Intake_{oral-water} = \frac{C_{water} \times IR_{oral-water} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	

表 3.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
地下水	3-11	使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water(shower)}} = \frac{([C_{a1} \times B \times t_1] + [C_{a2} \times B \times t_2]) \times EV_{shower} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	3-12		$C_{a1} = \frac{1}{2} \times \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_1)}{V_a} \times \mathrm{CF}$	
	3-13		$C_{a2} = \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_2)}{V_a} \times \mathrm{CF}$	
	3-14	使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water(wash)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	3-15		$C_{air} = \frac{WHF \times C_{water} \times f}{HV \times ER \times MC} \times CF$	

表 3.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
地下水	3-16	使用地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收之暴露劑量	$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \sqrt{6 \times \frac{\tau_{event} \times t_1}{\pi}} \times \mathrm{CF}$	適用於有機物，當 $t_1 < 2.4\tau_{event}$
	3-17		$DA_{event} = FA \times K_p \times C_{water} \times \left[\frac{t_1}{1 + B_{dermal}} + 2 \times \tau_{event} \times \left(\frac{1 + 3 \times B_{deraml} + 3 \times B_{dermal}^{\ 2}}{(1 + B_{dermal})^2} \right) \right] \times \mathrm{CF}$	適用於有機物，當 $t_1 > 2.4\tau_{event}$
	3-18		$DA_{event} = K_p \times C_{water} \times t_1 \times CF$	適用於無機物
	3-19		$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times EV_{shower} \times ED \times EF \times SA}{BW \times AT}$	
空氣	3-20	受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$C_{air} = C_{soil} \times \frac{P_e \times W}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \mathrm{CF}$	
	3-21		$Intake_{inh\text{-}soil} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	

表 3.3.3-1、關切污染物暴露劑量計算公式(續)

介質	編號	暴露途徑	公式	備註
空氣	3-22	受污染表層(深度一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-soil(upper)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	3-23		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{2 \times W \times \rho_s}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \sqrt{\frac{(\frac{D^{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times H}{\pi \times (\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as})\tau}} \times \mathrm{CF}$	比較公式 3-23 及公式 3-24 之結果，取值較低者代入公式 3-22
	3-24		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{W \times \rho_s \times d}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times \mathrm{CF}$	
	3-25	受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-soil(inner)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	3-26		$C_{air} = C_{soil} \times \frac{H \times \rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}] \times \left[1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_s}{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times W}\right]} \times \mathrm{CF}$	
	3-27	受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量	$Intake_{inh\text{-water}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$	
	3-28		$C_{aur} = C_{water} \times \frac{H}{\left[1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_w \times \left(\frac{h_{cap}}{(\frac{D_{air} \times \theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{wcap}^{3.33}}{H \times \theta_T^2})} + \frac{h_v}{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2})}\right)}{(h_{cap} + h_v) \times W}\right]} \times CF$	

(二)受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{dermal-soil} = \frac{DA_{event} \times EV \times ED \times EF \times SA \times f_{sa}}{BW \times AT}$$ (公式 3-6，USEPA 2004)

$Intake_{dermal-soil}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次暴露劑量(mg/cm^2)

EV：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

f_{sa}：上臂體表面積與身體表面積比(unitless)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中　DA_{event} 可由以下公式求得：

$$DA_{event} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times CF$$ (公式 3-7)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

AF：土壤對皮膚之吸附係數(mg/cm^2)

ABS_d：皮膚吸收分率(unitless)

CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

二、地下水介質暴露途徑之暴露劑量計算

若場址土壤中有存在關切污染物時，於計算地下水介質暴露途徑之暴露量計算前，需先計算土壤中關切污染物經由孔隙向下滲入至地下水中之濃度。此傳輸途徑因關切污染物為有機物或無機物而有不同的估計方法(詳見公式 3-8 與 3-9 說明)。

若計算出滲入地下水中的濃度超過地下水中原本關切污染物濃度，則以滲入的濃度作為後續計算暴露劑量之依據；反之，則以地下水中既有之關切污染物濃度為依據。

(一)土壤污染物滲入地下水之造成地下水之污染物濃度計算：

此傳輸途徑因關切污染物為有機物或無機物而有不同的估計方法。

土壤關切污染物若為有機物，以公式 3-8 計算：

$$C_{water} = C_{soil} \times \frac{\rho_s}{[\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}] \times \left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)}$$ (公式 3-8, ASTM 1995)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

I：入滲率 (infiltration rate)(cm/year)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

W：污染源與地下水平行之最大寬度(cm)

U_{gw}：地下水流速(cm/year)

δ_{gw}：地下水混合層高度(cm)

若土壤中關切污染物為無機物，則以公式 3-9 計算：

$$C_{water} = C_{soil} \times \frac{1}{K_d} \times \frac{1}{\left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I \times W}\right)}$$ (公式 3-9, ASTM 2000)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

I：入滲率(infiltration rate)(cm/year)

k_d：土壤地下水分配係數(cm^3-water/g-soil)

W：污染源與地下水平行之最大寬度(cm)

U_{gw}：地下水流速(cm/year)

δ_{gw}：地下水混合層高度(cm)

公式 3-9 中的 K_d 值會因各重金屬特性不同而異，且相同重金屬於不同酸鹼度的環境中 K_d 值亦不同。在第一層次風險評估時，本健康風險評估評析方法所提供的參數為較保守的數值；在第二、三層次則可允許以因土壤酸鹼度的不同依文獻所記載之實驗結果選擇符合場址性之 K_d 值。

此外，依公式 3-8 或 3-9 所計算之地下水關切污染物濃度需與該關切污染物之溶解度比較，若超出其溶解度，則應以溶解度為該土壤中關切污染物滲入地下水，造成地下水中該關切污染物濃度(C_{water})。

(二)飲用受污染地下水並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-water} = \frac{C_{water} \times IR_{oral-water} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 3-10，USEPA 1989)

$Intake_{oral\text{-}water}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

$IR_{oral\text{-}water}$：飲水量(L/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

(三)使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water(shower)} = \frac{([C_{a1} \times B \times t_1] + [C_{a2} \times B \times t_2]) \times EV_{shower} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 3-11)

$Intake_{inh\text{-}water(shower)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{a1}：淋浴時空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{a2}：淋浴後空氣中關切污染物濃度(mg/ m^3)

B：呼吸速率(m^3/hour)

t_1：每次淋浴時間(hour)

t_2：每次淋浴後仍待在浴室中的時間(hour)

EV_{shower}：淋浴次數(1/day)

BW：體重(kg)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{a1} 與 C_{a2} 的估計可依下列公式獲得：

$$C_{a1} = \frac{1}{2} \times \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_1)}{V_a} \times \mathrm{CF} \quad \text{(公式 3-12)}$$

$$C_{a2} = \frac{(C_{water} \times f \times F_w \times t_2)}{V_a} \times \mathrm{CF} \quad \text{(公式 3-13)}$$

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

f：蒸散分率(unitless)

F_w：水流速率(L/hour)

V_a：浴室容積(L)

CF：單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

(四)使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water(wash)} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(公式 3-14, USEPA 1989)}$$

$Intake_{inh\text{-}water(wash)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{air} 可以下列公式計算：

$$C_{air} = \frac{WHF \times C_{water} \times f}{HV \times ER \times MC} \times CF \quad \text{(公式 3-15)}$$

C_{air}：室內空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

WHF：每天用水流量(L/day)

C_{water}：地下水中污染物的濃度(mg/L)

f：蒸散分率(unitless)

HV：室內容積(L)

ER：室內換氣率(air changes/day)

MC：為空氣混合係數(uniteless)

CF：為單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

(五)使用地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收之暴露劑量計算：

針對有機物與無機物，一次皮膚接觸受污染水所吸收的劑量(DA_{event})計算公式各有不同：

有機物的暴露劑量 DA_{event} 為(USEPA 2004)：

若 $t_1 \leqq 2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \sqrt{6 \times \frac{\tau_{event} \times t_1}{\pi}} \times \mathrm{CF} \quad \text{(公式 3-16)}$$

若 $t_1 > 2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = FA \times K_p \times C_{water} \times \left[\frac{t_1}{1 + B_{dermal}} + 2 \times \tau_{event} \times \left(\frac{1 + 3 \times B_{deraml} + 3 \times B_{dermal}^{\ 2}}{(1 + B_{dermal})^2} \right) \right] \times \mathrm{CF} \quad \text{(公式 3-17)}$$

FA：吸收分率(unitless)

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

τ_{event}：各關切污染物每次對皮膚吸收的延遲時間(hour)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

B_{dermal}:關切污染物對於角質層對表皮層的相對滲透係數(unitless)

CF：為單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

使用以上兩個公式的哪一種視經皮膚接觸時間的長短而定，若時間短於到達穩定狀態(Steady State)的時間(以 t*表示，一般來說，t*為τ_{event}的 2.4 倍)，則使用公式(3-16)，反之則使用(3-17)。

另一方面，無機物的暴露劑量 DA_{event} 為:

$$DA_{event} = K_p \times C_{water} \times t_1 \times CF \quad \text{(公式 3-18，USEPA 2004)}$$

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

CF：單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

求得 DA_{event} 之後，再代入下列公式計算經受體皮膚吸收的污染物劑量：

$$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times EV_{shower} \times ED \times EF \times SA}{BW \times AT} \text{(公式 3-19，USEPA 2004)}$$

$Intake_{dermal\text{-}water}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次暴露劑量(mg/cm^2)

EVshower：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

三、空氣介質暴露途徑之暴露劑量計算

(一)受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

首先，計算出污染物由揚塵逸散至空氣中所造成的空氣濃度(C_{air})

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{P_e \times W}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \mathrm{CF}$$ (公式 3-20，ASTM 1995)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

P_e：揚塵逸散速率(particulate emission rate)(g/cm^2-sec)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

再計算受體因吸入污染空氣所吸收進入體內之關切污染物劑量

$$Intake_{inh\text{-}soil} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 3-21, USEPA 1989)

$Intake_{inh\text{-}soil}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

(二)受污染表層(深度一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

以關切污染物濃度超過管制標準樣品中，最淺之深度作為依據；若該最淺之深度小於一公尺，則屬於受污染表層土壤。

$$Intake_{inh\text{-}soil(upper)} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 3-22, USEPA 1989)

$Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 C_{air} 須以公式 3-23 與公式 3-24 各估計空氣中濃度，比較後採用數值**較低者**進行後續的計算

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{2 \times W \times \rho_s}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \sqrt{\frac{(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}) \times H}{\pi \times (\theta_{ws} + f_{oc} \times k_{oc} \times \rho_s + H \times \theta_{as}) \times \tau}} \times \mathrm{CF}$$ (公式 3-23, ASTM 1995)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

τ：平均蒸氣流時間(averaging time for vapor flux)(sec)

W：污染源與風向平行之最大寬度 (cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

$$C_{air} = C_{soil} \times \frac{W \times \rho_s \times d}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times \mathrm{CF}$$ (公式 3-24, ASTM 1995)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

d：表土深度(cm)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

τ：平均蒸氣流時間(averaging time for vapor flux) (sec)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

(三)受污染裡層(深度大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收之暴露劑量計算：

以關切污染物濃度超過管制標準樣品中，最淺之深度作為依據；若該最淺之深度大於一公尺，則屬於受污染裡層土壤。

$$Intake_{inh\text{-soil(inner)}} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT}$$ (公式 3-25, USEPA 1989)

$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

$$C_{air}=C_{soil}\times\frac{H\times\rho_s}{\left[\theta_{ws}+f_{oc}\times k_{oc}\times\rho_s+H\times\theta_{as}\right]\times\left[1+\frac{U_{air}\times\delta_{air}\times L_s}{\left(\frac{D_{air}\times\theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2}+\frac{D_{wat}\times\theta_{ws}^{3.33}}{H\times\theta_T^2}\right)\times W}\right]}\times CF \quad \text{(公式 3-26)}$$

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

ρ_s：土壤密度(bulk density)(g/cm^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

L_s：土壤污染源頂端深度(cm)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

f_{oc}：土壤中有機碳含量(g-carbon/g-soil)

k_{oc}：碳水吸收係數(cm^3-water/g-carbon)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(cm^3-kg/m^3-g)，數值為 10^3

(四)受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受

體所吸入吸收之暴露量計算：

$$Intake_{inh\text{-}water} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(公式 3-27)}$$

$Intake_{inh\text{-}water}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中，關切污染物於空氣中濃度 C_{air} 可由下列公式計算

$$C_{air} = C_{water} \times \left[\frac{H}{1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_w \times \left(\frac{h_{cap}}{\left(\frac{D_{air} \times \theta_{acap}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{wcap}^{3.33}}{H\theta_T^2}\right)} + \frac{h_v}{\left(\frac{D_{air} \times \theta_{as}^{3.33}}{\theta_T^2} + \frac{D_{wat} \times \theta_{ws}^{3.33}}{H \times \theta_T^2}\right)} \right)}{(h_{cap} + h_v) \times W}} \right] \times CF$$

(公式 3-28, ASTM 1995)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

D_{air}：關切污染物於空氣中逸散係數(cm^2/sec)

D_{wat}：關切污染物於水中逸散係數(cm^2/sec)

h_{cap}：毛細管邊緣高度(capillary fringe height)(cm)

h_v：通氣層厚度(vadose zone height)(cm)

L_w：地下水高度(cm)

θ_T：孔隙度(cm^3/cm^3-soil)

θ_{acap}：毛細管邊緣空氣含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{wcap}：毛細管邊緣水分含量(cm^3-air/cm^3-soil)

θ_{ws}：土壤中水分含量(cm^3-water/cm^3-soil)

θ_{as}：土壤中空氣含量(cm^3-air/cm^3-soil)

H：亨利係數(cm^3-water/cm^3-air)

W：污染源與風向平行之最大寬度(cm)

U_{air}：污染源上方風速 (cm/sec)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

CF：單位轉換因子(L/m^3)，數值為 10^3

3.3.3.2 場址外受體

進行暴露劑量推估前，需先針對場址內土壤及地下水之採樣結果進行常態分布檢核，其檢核方法請參照 3.3.3.3 節。依檢核結果選擇以「最大值」或「95%信賴區間上限值」，進行後續暴露劑量評估程序。

一、暴露劑量計算

場址外受體暴露劑量推估程序如下，同時可參照圖 3.3.2.2-1：

(一) 若場址內土壤中之關切污染物會滲入至地下水中，則須先行以公式 3-8 或公式 3-9 計算地下水中關切污染物濃度，先與既有地下水中濃度比較，取數值大者；再將該數值與飽和溶解度比較，該數值以不大於溶解度為原則，超過溶解度時則以溶解度取替該濃度；最後得一濃度值「C_{water}*」，以代入後續步驟及公式中。

(二) 推估場址外受體經地下水介質暴露途徑所吸收之暴露劑量：

1. 將前述程序(一)所求得之濃度值「C_{water}*」，代入公式 3-29 或其他所選擇之地下水傳輸模式中，得「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)。若使用之地下水模式較為複雜，需要輸入場址上各點不同的濃度來進行設定，則可以場址與周邊各點的採樣數據輸入模式中，得「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)。
2. 將「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)代入公式 3-10 中，計算飲用受污染地下水並經口服吸收之暴露劑量。

3. 將「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)代入公式 3-11 中，計算使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收之暴露劑量。
4. 將「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)代入公式 3-16 至公式 3-19 中，計算使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收之暴露劑量。

(三) 推估場址外受體經空氣介質暴露途徑所吸收之暴露劑量：

1. 將前述程序(一)所求得之濃度值「C_{water}*」代入公式 3-28，計算「場址內受污染地下水中關切污染物汽化成蒸氣之濃度值」($C_{air\text{-}from\ water}$)。
2. 將「土壤中關切污染物濃度」(C_{soil})代入公式 3-20，計算「受污染土壤揚塵逸散至空氣中濃度」($C_{air\text{-}from\ soil\ particle}$)。
3. 將「土壤中關切污染物濃度」(C_{soil})代入公式 3-23 至 3-24，計算「受污染表層土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣濃度」($C_{air\text{-}from\ soil(upper)}$)。
4. 將「土壤中關切污染物濃度」(C_{soil})代入公式 3-26，計算「受污染裡層土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣濃度」($C_{air\text{-}from\ soil(inner)}$)。
5. 將第 1 至第 4 項之濃度加總，得「場址內空氣中單一關切污染物總濃度」($C_{air\text{-}total}$)。
6. 再將「場址內空氣中單一關切污染物總濃度」($C_{air\text{-}total}$)代入公式 3-30 或其他自訂空氣擴散模式中，推估出「擴散至場址外受體處上方空氣中關切污染物之濃度」($C_{air\ POE1}$)。
7. 將程序(二)-1 所得「場址外受體所在之地下水中關切污染物濃度值」($C_{water\text{-}POE}$)代入公式 3-28 中，計算「場址外受體處關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中之濃度」($C_{air\ POE2}$)。
8. 再將「$C_{air\ POE1}$」與「$C_{air\ POE2}$」加總後，求得「場址外受體處上方空氣中單一關切污染物總濃度」($C_{air\ POE\ total}$)。
9. 將「場址外受體處上方空氣中單一關切污染物總濃度」($C_{air\ POE\ total}$)代入公式 3-21 中，以計算場址外受體經吸入吸收關切

污染物之暴露劑量。

二、傳輸模式

由於傳輸模式之種類繁多，於第二層次健康風險評估中模式之選用應依循下列之原則：

(一) 以解析解模式(Analytical Model)為宜。

(二) 以方便取得(例如可由網路上免費下載)之模式為優先。

(三) 以沿用時間較久，並於相關領域多所討論之模式為優先。

(四) 模式之假設符合場址狀況。

以下提供兩個 ASTM 建議使用，且適合於本評析方法架構下使用的第二層次模式，並將目前常用之宿命傳輸模式列於表 3.3.3.2-1 以供計畫執行人員作為選用的參考。

(一)地下水傳輸模式

假設降解速率為一階傳輸模式(First Order Decay)

$$C(x)_i = C_{water} \times \left\{ \exp\left(\frac{x}{2\times\alpha_x} \left[1 - \sqrt{1 + \frac{4\times\lambda_i\times\alpha_x\times R_i}{\left(\frac{K\times i}{\theta_e}\right)}} \right] \right) erf\left(\frac{S_w}{4\sqrt{\alpha_y \times x}} \right) erf\left(\frac{S_d}{4\sqrt{\alpha_z \times x}} \right) \right\} \quad \text{(公式 3-29)}$$

其中

$C(x)_i$：單一關切污染物距離污染源 x 公分之地下水中濃度(mg/L)

C_{water}：單一關切污染物地下水中濃度(mg/L)

x：單一關切污染物移動至地下水下游的距離(cm)

α_x：軸向地下水延散係數(longitudinal groundwater dispersivity)(cm)

α_y：橫向地下水延散係數(transverse groundwater dispersivity)(cm)

α_z：縱向地下水延散係數(vertical groundwater dispersivity)(cm)

θ_e：有效孔隙率(effective soil porosity)

λ_i：單一關切污染物之一階分解速率(first order degradation

rate)(1/day)

K：水力傳導係數(hydraulic conductivity)(cm/day)

R_i：延滯係數(constituent retardation factor)

i：水力梯度(cm/cm)

S_w：地下水污染源寬度(cm)

S_d：污染源深度(cm)

(二)空氣傳輸模式

$$C(x)_i = C_{air} \times \left(\frac{\left(\frac{U_{air} \times \delta_{air} \times A}{L} \right)}{2 \times \pi \times U_{air} \times \sigma_y \times \sigma_z} \right) \exp\left(-\frac{y^2}{2 \times \sigma_y^2} \right) \left(\exp\left(-\frac{(z-\delta_{air})^2}{2 \times \sigma_z^2} \right) + \exp\left(-\frac{(z+\delta_{air})^2}{2 \times \sigma_z^2} \right) \right)$$

(公式 3-30)

其中

$C(x)_i$：單一關切污染物距離污染源 x 公分之空氣中濃度(mg/m^3)

C_{air}：單一關切污染物空氣中濃度(mg/L)

δ_{air}：污染源上方空氣混合區高度(cm)

U_{air}：污染源上方風速(cm/sec)

σ_y：橫向空氣延散係數(transverse air dispersivity)(cm)

σ_z：縱向空氣延散係數(vertical air dispersivity)(cm)

y：受體距離污染源之橫向距離(cm)

z：受體吸入區空氣距地面之高度(假設與δ_{air}相同)(cm)

A：空氣中污染物逸散源的橫切面積(cm^2)

L：空氣污染源與風向平行的長度(cm)

表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
土壤	吸入由污染土壤所揮發出之空氣(僅考慮揮發性物質)	Jury-Infinite Source	估計污染物由表土揮發至空氣中的速度,但假設污染物於土中存在的深度為由表土至無限大
		Jury-finite Source	估計污染物由表土揮發至空氣中的速度,假設污染物於土中存在的深度為由表土至有限的深度，適用於已知範圍之油品污染.
		Farmer	估計污染物由裡土揮發至空氣中的速度,也就是假設於污染土壤與大氣層之間有一層沒有污染的土層，並且假設污染物濃度為定值.
		Thibodeaux-Huang	估計污染物由裡土揮發至空氣中的速度,但假設於污染土壤十分接近表土，適用於生物分解性低之污染物
		Box	估計土壤中污染物揮發至空氣中的平均濃度，不考慮生物分解
		Screen 3	估計土壤中污染物揮發至空氣中的一小時平均濃度,可以估計多個污染源所造成之最嚴重大氣污染,並可估計污染源下風處之污染物空氣濃度，本模式所需之環境參數較多

表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式(續一)

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
土壤	吸入由污染土壤所揮發出之空氣(僅考慮揮發性物質)	ISCST 3	估計土壤中污染物揮發至空氣中的數日之平均濃度，適用於多個污染源的場址與受體不在污染源而在他處的情況，並考慮場址與周邊環境之地形對於污染物空氣濃度所造成的影響，本模式所需之環境參數較多
	土壤滲入地下水	LEACH	計算土壤污染物滲入地下水因子(leaching factor)，假設無生物分解的現象且污染物於地下水中充分均勻混合
		SAM	為 LEACH模式的改良版，可以加入更多土壤與地下水之環境參數，例如水的蒸發作用(evapotranspiration)，土壤吸附作用，生物分解，最後可計算出考慮時間因素後的土壤滲入地下水因子(time-averaged factor)
		VADSAT	分層考慮污染土層上方與下方之非飽和層(vadose zone)與地下水層，同時估計汽化與溶解至地下水之污染物量，本模式假設污染物濃度為一定值，不考慮地下水位之波動.

表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式(地下水流動將污染物由污染源帶至他處)(續二)

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
土壤	土壤滲入地下水	Jury-Unsaturated	可預測地下水濃度或是估計地下水在一定時間內的負荷量(mass loading)，污染物於不同深度之濃度，本模式考慮毛細現象、擴散現象、滲透現象、雨水補注、吸附作用與分解作用，假設土壤質地均一且污染物濃度固定.
		SESOIL	可預測地下水濃度或是估計地下水在一定時間內的負荷量(mass loading)，污染物於不同深度之濃度，本模式考慮擴散現象, 滲透現象，吸附作用，汽化現象與生物分解作用.，假設污染物質量為一定值，但不考慮污染物溶解至地下水後的流佈.
		HELP	模擬水分於飽和與非飽和土壤中的平衡，計算出滲透率。在模式中並考慮植被，地形高低，與不同土壤層性質對水分滲透的影響, 且可計算非飽和水層的水力傳導係數.

表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式(續三)

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
地下水	家庭用水為污染地下水造成污染物揮發入室內空氣中	Little	
		Andelman	
	污染地下水中污染物揮發至室外空氣	Farmer	估計污染物由地下水揮發至空氣中的速度，並且假設污染物濃度為定值而非隨時間有所改變。
	地下水流動將污染物由污染源帶至他處	Disperse	估計甲基第三丁基醚(methyl-tert butyl ether, MTBE)或三丁醇(tert-butyl alcohol, TBA)地下水污染區域的變化，假設地下含水層惟一均質的狀態,地下水流速固定.
		Solute	模擬地下水污染範圍的變化情形，包含一維，二維與三維的解析解模式計算。
		AT123D	模擬地下水污染範圍的變化情形，假設地下水流速穩定且為一定值， 且為一維的單一方向，且地下水位不會變動，但污染物排入地下水的模式則可用以是一次釋放，連續釋放與多次釋放。

表 3.3.3.2-1 各傳輸途徑的常用解析解宿命傳輸模式(續四)

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
地下水	地下水流動將污染物由污染源帶至他處	Domenico	特定位置的地下水污染物濃度，假設污染物團沿著中線移動，而移動的過程中污染物會因擴散的作用而被稀釋，若有足夠的數據，則亦可考慮生物分解對污染團所造成的影響.
		FATE5	特定位置的地下水污染物濃度，為以Domenico模式為基礎再加以變化的模式， 並可以估計到達穩定狀態的時間。
		MULTIMED	由土壤層所滲出之污染物於地下水之流速,特別為掩埋場所設計的地下水模式
		Summers	估計地下水下游之污染物濃度，模擬在無延散(non-dispersive)假設下單一土層與穩定流速下溶解相與吸附相的平衡。不考慮生物分解，所得的結果多半較為保守。
		Bioscreen	估計地下水下游之污染物濃度，為一二維的分析模式，需要假設地下水流場為一平面。
		VADSAT	估計污染團於地下水中最大濃度，與最大濃度到達暴露點之時間，可以模擬地下水中的擴散作用與有氧或厭氧之生物分解作用。其基本假設維地下水為單一流向，流速固定。

*資料來源RBCA Faet and Transport Models: Compendium and Selection Guidance, ASTM 1998

3.3.3.3 合理最大暴露劑量之估計

合理最大暴露劑量(RME)的定義是「受體經由設定的暴露途徑所可能暴露於關切污染物最大量之合理估計」。當進行估計時，暴露劑量的變異性與不確定性亦應考慮進去。

關切污染物於場址中土壤或地下水濃度平均值之百分之九十五的上信賴界限(95% upper confidence limit, 95% UCL)，是 RME 可行估計值之一[78]。但 95% UCL 的估計有其限制性，若不能符合其計算的條件，則仍應以關切污染物最大濃度為估計暴露劑量之輸入值。關切污染物於土壤與地下水中分布與傳輸的性質不同，此差異會造成計算 95%UCL 時不同的限制。茲將分項將計算之限制條件列舉於下，詳細流程詳見圖 3.3.3.3-2 所示：

[78] 使用上信賴區間的理由可於 USEPA 文獻 USEPA 1992, Supplemental Guidance to RADs: Calculating the Concentration Term. http://www.deq.state.ms.us/MDEQ.nsf/pdf/GARD_uclmean/$File/uclmean.pdf?OpenElement. Publication 9285.7-081. Office of Solid Waste and Emergency Response, USEPA Washington, D. C.

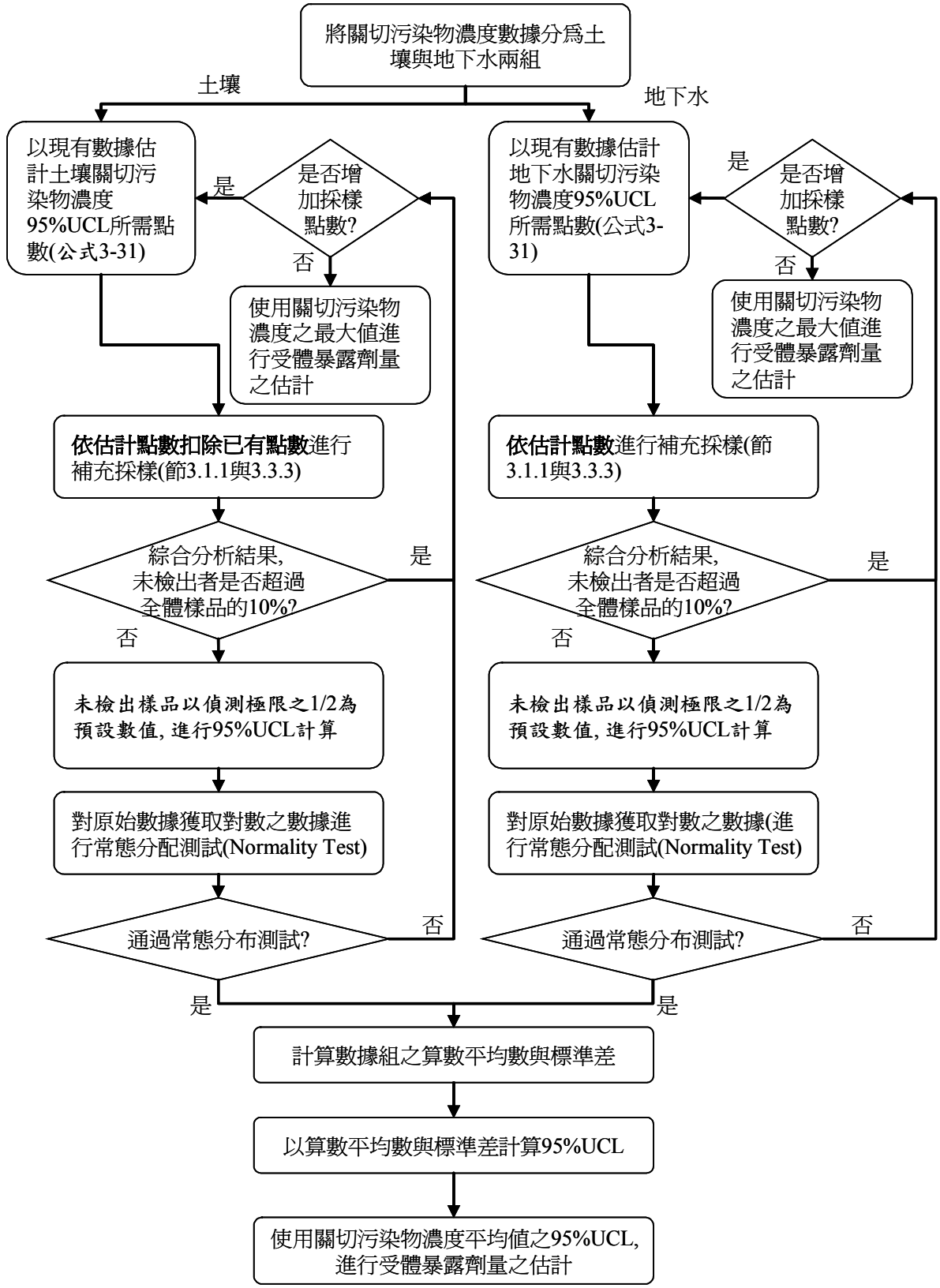


圖 3.3.3.3-1 第二層次健康風險評估合理最大暴露劑量估計程序

一、評估土壤採樣檢測資料數量受否具統計代表性

1.評估土壤採樣檢測資料數量是否足夠

可依據第一層次健康風險評估所使用之土壤採樣檢測資料，以下列公式進行數量需求之規劃，惟此一規劃點數方法僅作參考之用並非唯一規劃點數的方式[79]：

$$n=\left(\frac{z_{(1-\frac{\alpha}{2})}\times S}{d}\right)^2 \quad \text{(公式 3-31}^{[80]}\text{)}$$

其中：

n：採樣點數目

z：z 值可以依常態分配的雙尾分布機率(又稱 confidence coefficient，常簡寫為α, 通常設為 0.10)查詢統計參考書籍求得，在α=0.10 的設定下 $Z_{1-\alpha/2}$ 即為 $Z_{0.95}$，查表可得 $Z_{0.95}$=1.645。

S：由場址之前調查(歷史數據)或先驅調查(pilot study)[81]所得之標準偏差(standard deviation)。

d： 採樣所求得平均值與真實狀況所可能產生的誤差，在本評析方法中，可接受的 d 值與平均值的誤

---

[79] 此一估計方式僅供參考之用的原因如下：理想上，所使用的歷史數據應該是在場址上隨機採樣來取得，如果以第一層次風險評估的數據可能儘量由污染濃度高的區域向污染濃度低的區域採樣之原則來看，採樣的客觀性較為缺乏，其標準差也會受到影響。當標準差偏低時(採樣點集中於高濃度的位置)，容易造成點數的低估；當標準差偏高時，則會使點數高估。採樣點數的高估與低估對於負責場址整治與調查者會有以下的影響：當樣品數量高估時，在調查採樣的部分會花費較多的成本，但是在計算 95%信賴區間時有降低估計數值的優勢，進而後續計算出的風險便會降低；反之，若樣品數量低時，在調查採樣的部分會花費較低的成本，但是在計算 95%信賴區估計數值可能會偏高而造成風險的高估。而無論採樣的點數是多或少，採樣結果都需進行下一步的常態分布測試來判定數據是否具有常態分布或對數常態分布的性質。

[80] Gilbert, R.O., 1987, Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring, John Wiley & Sons, Inc., New York. 。

[81] 本評析方法中之標準差估計適用以下的公式估計：$s^2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(x_i-\bar{x}\right)^2$，其中 n 為用來估計標準差的樣品數目，$x_i$ 為各樣品濃度值，$\overline{X}$ 為樣品濃度之平均值(公式參考 Gilbert 1987)；除前述方法可計算標準差外，亦可以最大值與最小值差異的六分之一作為估計之標準差(公式參考 USEPA 2002, Guidance on Choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection, Chapter 5 SIMPLE RANDOM SAMPLING)。

差應不大於 10%，此誤差可以用第一層次健康風險評估所使用之影響範圍所採得之土壤關切污染物數據資料求得。

若場址有多個關切污染物，則可依據第一層次健康風險評估所得之採樣檢測結果，分別計算各項關切污染物所需之採樣數目，再比較各採樣數目後取最大值；則此一最大值為進行第二層次評估時，場址中所有關切污染物之採樣數目。

2. 所決定的點次數目 n，扣除第一層次健康風險評估所使用的數據點次後，即為第二層次至少所需要的採樣點數。應於第二層次健康風險評估報告完成時間內，於同一調查期程採樣完畢。
3. 若第一層次健康風險評估所使用之土壤數據可能不符目前場址的狀況，則應於原採樣點附近重新採樣，並於報告中敘明重新採樣之原因。
4. 為避免所使用的土壤數據中含有過多的數據為低於偵測極限，數據分布偏向低濃度之數值，造成污染源濃度的低估，因此規定未檢出之數據不得超過全體之 10%[82]。
5. 對於包含於統計計算之未檢出數據，於接下來的數值計算中，皆以偵測極限之二分之一為該採樣點之估計值[83]。

二、評估地下水採樣檢測資料數量受否具統計代表性[84]：

1. 採樣點次估計應同前述方式，估計地下水之污染物暴露濃度 95% UCL 適用條件之第 1 項說明。
2. 各採樣水井之地下水樣必須於同一調查期程[85]採樣取得。
3. 為避免所使用的地下水數據中含有過多的數據為低於偵測

[82] 此項限制見 USEPA 於 Method for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards. Vol 1 第七章 Determining Whether a Proportion or Percentile of The Site is Less than a Cleanup Standard 中之討論，原文為「…thid method may be biased if more than 10% of the observations are below the detection limit.」。又根據 Ohio Bureau of Underground Storage Tank Regulations 之規定，則不得有 15%以上低於偵測極限之樣品。

[83] 此為目前 USEPA 常用的法則，在早期的文獻中，亦有建議以偵測極限為計算依據者。

[84] 由於地下水具有流動性，因此地下水污染物濃度，除以 95%UCL 估計外，亦可以適合場址的宿命傳輸模式來估計，或能更接近真實狀況。

[85] 此處所指之同一期程為一季內(三個月內)所進行之連續工作天的採樣工作。因為地下水之流動性質與地下水位之波動性質，因此對於採樣期程之規定較土壤為嚴格。

極限，數據分布偏向低濃度之數值，造成污染源濃度的低估，因此規定未檢出之數據不得超過全體之 10%[86]。

4. 對於包含於統計計算之未檢出數據，於接下來的數值計算中，皆以偵測極限之二分之一為該採樣點之估計值[87]。

三、採樣檢測結果之合理最大暴露劑量估計

1.常態分配測試

在正式進行 95% UCL 計算之前，所使用的檢測結果必須經過常態分配測試(normality test)，即測試資料的分布是否接近常態分配。有數個測試可以用來做這樣的判定，其中 USEPA 建議針對資料筆數不大於 50 者，使用 W 測試(w-test, Shapiro, 1965)；而資料筆數大於 50 者，則可使用 D'Agostino 測試(D'Agostino, 1971)[88]。執行健康風險評估者可依其需要選用測試方法，其常態分配測試方法請參照附錄四。

若未通過常態分配測試，則可進一步以對數常態分配(log-normal distribution)測試進行判定。對數常態分配即將原檢測數值(x_i)取對數得一群新的數值，而此組數值(y_i)呈一常態分配。

$$y_i = \ln(x_i) \qquad \text{(公式 3-32)}$$

資料的常態分配或對數常態分配性質確定之後，則可進行以下步驟進行計算。若資料不符合常態分配或對數常態分配性質，則於第二層次健康風險評估中只能利用土壤或地下水中關切污染物濃度之最大值來進行暴露濃度的計算。若要使用其他的統計假設進行合理最大暴露量的估計，則需進行第三層次之健康風險評估。

2.計算算數平均數

---

[86] 此項限制見 USEPA 於 Method for Evaluating the Attainment of Cleanup Standards. Vol 1 第七章 Determining Whether a Proportion or Percentile of The Site is Less than a Cleanup Standard 中之討論，原文為「…thid method may be biased if more than 10% of the observations are below the detection limit.」。又根據 Ohio Bureau of Underground Storage Tank Regulations 之規定，則規定不得有 15%以上低於偵測極限之樣品。

[87] 此為目前 USEPA 常用的法則，在早期的文獻中，亦有建議以偵測極限為計算依據者。

[88] 兩種測試的執行方式詳見附錄四。

計算原始資料或取對數後之數值(公式 3-32 中的 y_i)的算術平均數：

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} \frac{x_i}{n} \quad \text{(公式 3-33)}$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} \frac{y_i}{n} \quad \text{(公式 3-34)}$$

3.計算資料之標準偏差

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})}{n-1}} \quad \text{(常態分配)} \quad \text{(公式 3-35)}$$

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})}{n-1}} \quad \text{(對數常態分配)} \quad \text{(公式 3-36)}$$

4.計算 95%上信賴區間

$$95\%UCL = \bar{x} + t_{0.95,n-1}\left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad \text{(常態分配}^{89}\text{)} \quad \text{(公式 3-37)}$$

其中 $t_{0.95,n-1}$ 可於許多統計教科書籍中查得，例如 Gilbert 1987 附錄中的表 A2。

$$95\%UCL = e^{\left(\bar{y} + 0.5s^2 + \frac{sH_{0.95}}{\sqrt{n-1}}\right)} \quad \text{(對數常態分配}^{90}\text{)} \quad \text{(公式 3-38)}$$

[89] t 統計對數值分布的假設並非完全的常態分布，但隨著樣本數(在此即為土壤或地下水採樣點數)增加，會趨近於常態分布，約 20 點以上後，差異幾乎可以忽略。在此使用 t 統計而來估計 95%UCL 是考量了採樣點數較少時，對於土壤或地下水中關切污染物濃度的不確定性較大，而 t 統計所算出來的 95%UCL 會較真實得常態分布大些(樣品數越少，差異越大)，所以在較少樣品數時，可以得到較保守的結果。

[90] 此方法又稱 Land Method，與 t 統計相同，在樣品數較少時(小於 30)，會高估 95%UCL，得到較保守的結果(USEPA 2002, Calcaulting Upper Confidence Limits for Exposure Point Concentrations at Hazardous Waste Sites, USEPA Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C.)。

其中 $H_{0.95}$ 可於許多統計教科書籍中查得，例如 Gilbert 1997 附錄中的表 A12。

所計算出之 95%UCL 即土壤中污染物濃度之 95%信賴區間上限。於暴露濃度計算或是宿命模式計算時，可引用此數值為污染源污染土壤或地下水之濃度。

3.4 風險特徵描述

對於致癌健康風險評估之可接受風險仍為 10^{-6}。非致癌風險之可接受風險亦與第一層次健康風險評估的原則相同。

3.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算

一、致癌風險：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各吸收途徑之暴露劑量個別相加，所得到個別暴露劑量總合再與致癌斜率相乘：

(一)口服吸收途徑之風險計算

$$R_{oral} = (Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil}) \times SF_{oral} \quad \text{(公式 3-39)}$$

R_{oral}：經由口服吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲用地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤而吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{oral}：經由口服吸收關切污染物之致癌斜率

(二)吸入吸收途徑之風險計算

$$R_{inh} = (Intake_{inh\text{-}water(total)} + Intake_{inh\text{-}soil(total)}) \times SF_{inh}$$

(公式 3-40)

R_{inh}：經由吸入吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量

(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$ 及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括 $Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及 $Intake_{inh\text{-}soil}$

SF_{inh}：經由吸入吸收關切污染物之致癌斜率

(三)皮膚接觸吸收途徑之風險計算

$$R_{dermal} = (Intake_{dermal\text{–}water} + Intake_{dermal\text{–}soil}) \times SF_{dermal} \quad (公式\ 3\text{-}41)$$

R_{dermal}：經由皮膚接觸吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收地下水中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收土壤中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{dermal}：經由皮膚接觸吸收關切污染物之致癌斜率

上述的計算對所有致癌性關切污染物均應執行一次，則可獲得所有致癌關切污染物於不同暴露途徑之致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核 (參考附錄六表十三)。

各關切污染物經由各暴露途徑之總致癌風險則為：

$$R_{total} = \sum R_{oral} + \sum R_{inh} + \sum R_{dermal} \quad (公式\ 3\text{-}42)$$

R_{total}：總致癌風險，即為受體一生中因暴露於污染物中所致

之致癌風險

二、 非致癌風險：

非致癌風險又稱危害商數(Hazard Quotient, HQ)，其計算如下：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各吸收途徑[91]之暴露劑量個別相加，所得到的暴露劑量總合再與參考劑量相除：

(一)口服吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{oral} = \frac{(Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil})}{RfD_{oral}} \qquad \text{(公式 3-43)}$$

其中

HQ_{oral}：口服吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲地下水吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{oral}：某一非致癌物之口服吸收之參考劑量

(二)吸入吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{inh} = \frac{(Intake_{inh\text{-}soil(total)} + Intake_{inh\text{-}water(total)})}{RfD_{inh}} \qquad \text{(公式 3-44)}$$

HQ_{inh}：吸入吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$ 及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵

[91] 吸入、口服或經皮膚吸收。

及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括$Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及$Intake_{inh\text{-}soil}$

RfD_{inh}：某一非致癌物之吸入吸收之參考劑量

(三)皮膚接觸吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{dermal} = \frac{(Intake_{dermal-water} + Intake_{dermal-soil})}{RfD_{dermal}} \qquad \text{(公式 3-45)}$$

其中：

HQ_{dermal}：皮膚接觸暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸土壤吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{dermal}：某一非致癌物之皮膚接觸吸收參考劑量

上述的計算對所有的具非致癌毒性之關切污染物均應執行一次，則可獲得所有非致癌關切污染物於不同暴露途徑之非致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核之用(參考附錄六表十二)。

各關切污染物經由各暴露途徑之危害指數(Hazard Index, HI)則為：

$$HI = \sum HQ_{oral} + \sum HQ_{inh} + \Sigma HQ_{dermal} \qquad \text{(公式 3-46)}$$

此危害指數(HI)即為受體一生中因暴露於各關切污染物所致的非致癌風險。

可接受之危害指數為 1，若大於此值則表示風險超出可接受之上限，可進行下一層次之健康風險評估。若小於或等於 1，則表示於本健康風險評估所假設的情境下，受體所承受的非致癌風險於可接受範圍之內，無須做進一步的評估。

健康風險評估執行人員應將風險計算的結果匯整於附錄六之表

單當中。

3.4.2 不確定性分析

在第二層次健康風險評估中，所需討論的健康風險評估不確定性應至少包括：

(一) 所收集之場址調查資料是否有不確定性，是否會造成風險之高估或低估。

(二) 討論毒性因子的取得，是否有關切污染物的毒性是無法量化的，對評估結果的影響程度有多大?

(三) 第二層次中的參數與實際數值之可能偏差，與各參數的敏感度比(Sensitivity Ratio, SR, 見附錄五)。

(四) 討論計算結果中各暴露途徑與污染物對風險的貢獻比例，何種暴露途徑或污染物對風險的影響較大。

(五) 所使用之宿命傳輸模式於現地狀況是否有差異，此差異對於暴露量的估計造成何種影響。

(六) 污染物歷史檢測數據所呈現之時間趨勢，以及此趨勢是否會造成風險之高估或低估。

3.4.3 根據第二層次健康風險評估擬定之決策

根據第二層次健康風險評估的計算結果，可為場址後續管理決策之依據。若風險超過可接受風險，風險評估者可在審查前即進行第三層次之風險評估；或者，由地方主管機關應公告為整治場址，並對風險所佔比例較高的途徑進行管制污染區域與周邊的活動，以減少受體暴露的頻率。

若依第二層次的假設所計算出之風險低於可接受值，則該場址應無須公告為整治場址，但可能需依所假設的情境限制土地利用或受體活動。同時視場址情況，可能亦需要持續監測關切污染物的濃度。

決策的擬定可由健康風險評估的執行單位依評估結果做出建議，但最後的決策應由審查單位、執行單位與相關利益團體(廠商、民眾等等)討論後獲致最後結論。

第四章 第三層次健康風險評估

執行第三層次之健康風險評估之可能情況有兩種，一為第二層次的健康風險評估保守計算下，污染物所造成的風險超過可接受的數值，且於成本效益的考量下，決定繼續進行第三層次的健康風險評估(參考 1.2 節)；一為經過適用性的評估後，直接進行第三層次健康風險評估(圖 2-1)。

健康風險評估執行人員應直接進入第三層次健康風險評估，而不執行第一與第二層次健康風險評估的情形包括：

(一)關切污染物包含生物累積性物質(又稱生物濃縮性物質)，此類物質以「行政院環境保護署篩選毒性化學物質作業原則」毒性分類第一類之生物濃縮性物質為主，即生物濃縮因子（Bioconcentration Factor, BCF）大於或等於 500；或辛醇-水分布係數之對數值（log Kow）大於或等於 3 者。

(二) 污染源有可能或已經影響到附近用以農耕之土壤，或污染之地下水被用於灌溉農地、養殖漁業水源，或畜牧動物飲用之用途上，則需進行第一及第二層次設定暴露情境之外的人體食用農作物之健康風險評估。

此外污染源有危害附近重要生態資源之虞，則亦不適用第一與第二層次健康風險評估，而須直接進行較複雜的生態健康風險評估，惟本健康風險評估評析方法並不包含生態風險評估。

以下就第三層次健康風險評估的執行程序進行說明。

4.1 危害鑑定

危害鑑定為健康風險評估之起始階段，主要係依據現有場址資訊與污染物之檢測資料，來判定污染物是否需要進行健康風險評估，及在污染區域內是否有受體(Receptors)可能遭受危害。

健康風險評估之危害鑑定工作，包括(1)資料蒐集、(2)關切污染物判定與濃度資訊彙整(3)影響範圍界定與分析等三大部分。

第三層次風險評估與第一層次、第二層次不盡相同，並有許多重複之

處，所需蒐集的資料應更為詳細。以下則就第三層次風險評估中危害鑑定加以說明如下：

4.1.1 資料蒐集[92]

一、必須蒐集之資料

第三層次評估允許利用蒙地卡羅模擬方法，同時亦可以使用數值解之宿命傳輸模式。使用蒙地卡羅模擬所需參數並非只有一個定值，而為一統計分布；使用數值解模式所需的參數項目可能更多，因此除第二層次健康風險評估中所敘述的資料蒐集原則與應蒐集資料外，尚有下列資料應蒐集，以提供使用場址特異數值之佐證[93]

(一) 場址環境資料

1. 第一層次應取得之場址環境資料，包括公告為污染控制場址資料、是否曾違反相關環保法規之紀錄。
2. 第二層次應取得之場址環境資料，例如以場址本身或周邊採樣取得之水文地質與氣象相關參數，常用之參數資料列於附錄二[94]。為取得相關參數所進行之土壤及地下水採樣與檢測，應以環保署與環檢所公告之相關標準方法進行。若無公告方法或公告方法無法適用於場址條件時，則可參考國際公認檢測方法來進行檢測[95]。

3.若要進行蒙地卡羅模擬，則同一參數須取得多個數值[96]，或其數值統計分布之資訊。

(二)場址使用資料

1.場址使用現況

---

[92] 視所欲使用的暴露評估方法，第三層次所需蒐集的資料無論是在種類與數量上，都較第二層次多出許多，但由於所需蒐集的資料場址特異性高，且與所能使用的模式選擇性亦多，所需蒐集的資料無法於此一一詳述。

[93] 若無法提具下列相關資料，則依健康風險評估之保守估計原則，應維持原預設值之使用。

[94] 附錄二表中的土壤分類是作為參數不足或無法取得時，以公認土壤分類為基準來設定較具土壤特異性的參數。

[95] 例如美國材料與試驗學會 America Society of Testing Materials, ASTM 所訂定的法則。

[96] 蒙地卡羅模擬需要參數的統計分布性質，單一數值並無法用來估計參數的分布，關於蒙地卡羅分布的使用方法，將於暴露評估一節說明。

任何涉及可能造成土壤或地下水污染之物質運作現況，皆應紀錄於評估報告書中。包括地上建物之登記用途與現地勘查之描述，若有符合場址現況之航照圖亦應附上；而無人居住或使用的空間也應予以紀錄。

可能變更暴露情境假設的資料，資料來源可以分為三大類：官方之統計資料、調查報告或紀錄、現地調查結果、學術期刊之論文。

2. 場址使用歷史紀錄

包括可供辨識場址開發及活動狀況之航照圖，與其他有助於評估場址土壤與地下水潛在污染之歷史紀錄或人員訪談紀錄。

審閱場址使用歷史紀錄時，需確認其用途(例如：辦公室、廠房或儲槽等)，若為事業之製程設施或設備時，應儘可能詳細的說明生產或製造的產品及操作情形。蒐集場址之使用歷史資料，應儘可能回溯其使用年代，以十年回溯期為基本要求。又健康風險評估執行人員應至場址進行勘查及拍照存證，以了解土地使用現況。評估報告書中應該描述所有可確認的使用情形，以及無法確認使用情形之原因。

3. 場址周邊土地使用情形

關於場址周邊的使用情形(例如：住宅、商店、工廠等)及可能存在之污染物質，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

4. 場址周邊使用歷史紀錄

關於毗鄰場址區域過去之使用情形或任何造成土壤與地下水污染之可能性，皆應詳盡紀錄於評估報告書中。

5.變更暴露情境假設的資料

資料來源可以分為三大類：官方之統計資料、調查報告或紀錄、現地調查結果、學術期刊之論文，均可成為更動暴露情境假設之佐證資料之一。

(三) 污染物檢測資料

於第三層次的健康風險評估中，可以蒙地卡羅分布的方式計算受體之暴露劑量，而非採樣所得之最大濃度計算。蒙地卡

羅之估計需要參數的統計分布型態作為模擬的依據，而不能以單一的數值來進行模擬[97]，因此，於第三層次之環境採樣分析點數可能增加。若污染物濃度之資訊不足以使用蒙地卡羅模擬，則可以第二層次健康風險評估的方式進行：

1.受體之暴露劑量可依據場址內關切污染物之採樣濃度，**平均值之百分之九十五的上信賴界限(95% upper confidence limit, 95% UCL)估計。**

2.**關切污染物檢測資料之採樣點有其數量上的要求，以符合統計上之基本假設與保守估計的原則**[98]。因此，於第二層次評估所需之環境採樣分析點數可能較第一層次評估時增加。關於此補充採樣點數增加之估計，可參考 3.3 節之公式 3-31。

3.若受體位於場址外時，則該處土壤與地下水中關切污染物濃度，不可直接進行健康風險評估，仍必須使用場址內之採樣結果進行推估[99]。

若需進行評估前之採樣檢測作業，則須擬定採樣計畫並依據環保署公告之土壤與地下水採樣方法進行採樣作業。同時需於於評估報告書中詳述。

二、其他可蒐集之資料

(一) 受體暴露參數調查

可增加進行場址周邊受體的行為模式與生理參數之問卷調查，此問卷調查結果可作為暴露評估中受體參數改變之憑據。

(二) 除上述應蒐集之資料外，有助於評估土壤與地下水健康風險影響之相關資料，均為蒐集之範疇；若受體位於場址外，則必須延伸現地資料蒐集範圍至場址周界外。除第一層次健康風險評估中所設定的場址外圍至少一公里之搜尋範圍外，在第三層次

[97] 詳細之統計估計於暴露評估一節將有說明。

[98] 詳細之統計估計於暴露評估一節將有說明。

[99] 場址外受體所在之土壤與地下水中關切污染物濃度，可代入宿命傳輸模式中進行校正(calibration)與模擬(simulation)，但不可直接以此濃度來估計受體吸收之暴露劑量。依據本健康風險評析方法之假設，其評估受體由現在到未來三十年(住宅區)或二十五年(工商業區)暴露於污染物所承受的風險。雖然目前場址外受體所在之關切污染物濃度較低，但考量場址中污染團之移動，可能使受體暴露濃度升高，故仍需以模式來推估。

健康風險評估的資料搜尋範圍需至少涵蓋所假設之暴露點。

四、資料之時效性

需以最接近進行健康風險評估時間點之資料，作為評估之依據，以避免取得不正確或過時的資料。

五、資料品質查核

除資料完整性外，同時亦須針對資料品質進行查核。所引述之資料同時應註明其出處來源。

4.1.2 關切污染物判定

若為已執行過第二層次健康風險評估之場址，除非有新的資料或檢測結果顯示場址中有第二層次健康風險評估中沒有包含之污染物質，否則第三層次之健康風險評估關切污染物與第二層次相同。

一、可能關切污染物

本評析方法中定義之可能關切污染物，包括任何能導致土壤或地下水污染之外來物質，同時有可能進一步造成健康風險危害。

由於健康風險評估中的風險計算假設污染物之毒性有加成的作用，污染物種類的多寡可能造成評估結果的不同，因此應將可能的污染物質盡量列出，以達到綜合評估之目的。

二、關切污染物

(一) 凡超過土壤或地下水污染管制標準之污染物，皆應納入為評估項目中。

(二) 除第(一)項之應納入評估之關切污染物外，其他經主管機關要求應納入評估之項目亦屬之。

(三) 若關切污染物因環境條件呈現離子態或解離態，進而造成毒性差異時，以作為詳細評估之依據。若無法區分，則進行風險之計算時，應以該關切污染物之總量來計算，以達到保守估計之原則。

(四) 針對鉛對於人體健康的危害，第三層次風險評估可以應用受體檢測資料，進行利用血鉛模式進行第三層次健康風險評估。

三、不適用之關切污染物

(一) **地下水污染管制標準中的「總酚」、「硝酸鹽氮」與「亞硝酸鹽氮」等項目，目前並不納入本風險評估評析方法之範圍內。**

若為直接進行第三層次健康風險評估之場址，除依第一層次健康風險評估中對於關切污染物判定的法則進行關切污染物的認定外，在第三層次健康風險評估中必須一併考慮任何具有生物累積性的污染物質所造成的健康風險。此處所定義之具有生物累積性物質為 BCF 大於等於 500 或辛醇-水分布係數之對數值($\log K_{ow}$)大於或等於 3 者，即應歸類為具有生物累積性之虞物質[100,101]。

4.1.3 危害辨識

危害辨識為決定關切污染物是否會增加某種危害健康情形之發生率；而在本評析方法中，係透過查詢國外相關毒理資料庫，來判定關切污染物之危害程度。

一、毒理資料庫介紹

目前歐美政府機關或相關研究機構，已建置各種毒理資料庫，並依據其研究結果定時更新，因此關切污染物健康風險評估之危害鑑定及毒性因子，可由各種毒理資料庫中取得。以下介紹具有公信力資料庫：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)：

本資料庫由美國環保署所建立並定期更新，其網址為

[100] 此類物質以「行政院環境保護署篩選毒性化學物質作業原則」毒性分類第一類之生物濃縮性物質為主，即生物濃縮因子（Bioconcentration Factor, BCF）大於或等於 500；或辛醇-水分布係數之對數值（log Kow）大於或等於 3 者。

[101] 化學物質的性質具有生物累積性並不一定代表在他依定會累積在人體。是否真正產生累積的可能性尚須靠於暴露評估中討論是否可能有暴露途徑使得該關切物質有進入人體的機會。以下為列舉三個可能產生生物累積性暴露途徑的暴露情境作為參考:
(1)居民自行耕種的菜園；
(2).農畜牧業用地或養殖漁業用地；
(3)種植養殖動物食用之農作物之場地。

http://www.epa.gov/iris/。目前所提供的資訊包括吸入吸收(inhalation)或口服吸收(oral)之慢性毒性係數估計值。此外，並依據現有毒性資料，將致癌性分為五大類：

1. 人體致癌物質(carcinogenic to humans)；
2. 可能人體致癌物質(likely to be carcinogenic to humans)；
3. 毒理資料顯示致癌性，但無足夠資料量化對人體的致癌作用(suggestive evidence of carcinogenicity, but not sufficient to assess human carcinogenic potential)；
4. 缺乏人體致癌性毒理資料(data are inadequate for an assessment of human carcinogenic potential)
5. 對人體無致癌可能性(not likely to be carcinogenic to humans)。

上述分類原則是 1999 年更新的版本。之前最常使用的分類法是 1986 年所訂之分類方法，通常這些物質會被分為 A(對人類為致癌物質)、B1(根據有限的人體毒性資料與充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、B2(根據充分的動物實驗資料，極可能為人類致癌物質)、C(可能為人體致癌物)、D(尚無法分類)與 E(已證實為非人類致癌物質)等六種。

(二) 世界衛生組織簡明國際化學評估文件(WHO Concise International Chemical Assessment Document , CICAD)：

主要是彙整單一化學物質或混合物對環境與人類健康的危害，並舉出各種案例與研究來討論可能的吸收途徑。但 CICAD 於作用評估(effect evaluation)一節對非致癌作用探討，並估計可接受濃度(tolerable concentration)或每日可接受劑量(Tolerable Daily Intake, TDI)。聯合國的可接受劑量與參考劑量估計法則相同, 所以在本原則亦將可接受劑量作為爰引的毒性因子之一。對於致癌毒性因子，則須引用 CICAD 中所估計之單位風險(unit risk)，其估計原理與本節所提之致癌機率相同。

(三) 國際癌症研究署（International Agency for Research on Cancer ,IARC）：

為聯合國設立之研究機構，專門進行化學物質致癌性質與

機轉研究。將化學物質的致癌性分成四大類

1.第一類(group 1)：人類致癌性的證據充足。

2. 第二類(group 2)：人類致癌性的證據尚有限。(含 group 2A：流行病資料有限，但是動物實驗資料充份；人類可能致癌物及 group 2B：流病資料不足，但動物資料充份；或流病資料有限，動物資料不足；也許是人類致癌物)

3. 第三類(group 3)：致癌性的證據不足。

4. 第四類(group 4)：證據顯示沒有致癌性。

因此，被歸為第一類與第二類者，均應於健康風險評估中納入致癌風險計算與討論。

(四) 美國環保署暫行毒性因子(USEPA Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)：

為美國環保署之國家暴露評估中心 (USEPA National Center for Environmental Assessment, NCEA)所計算出的臨時性毒性因子(Provisional Toxicity Factor)。NCEA 根據超級基金健康風險評估與整治目標的個案需要，以初步所能蒐集得到，但較不完整之毒理資料來估計污染物之毒性因子。

(五) 毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease Registry, ATSDR)之最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)：

ATSDR 計算出部分毒性物質的最小風險濃度。惟其所計算的數值多為急性與亞慢性，需要加以轉換才能應用於本評析方法之健康風險評估中。此外，MRL 並無提供致癌毒性因子，所以只有在前述資料庫都無法獲得數值時，才予以利用。

(六)美國環保署健康效應摘要表格(Health Effects Assessment Summary Tables , HEAST)：

為 USEPA 所出版的一本毒性係數文件，文中以表列的方式列出各污染物的亞慢性與慢性毒性係數。

二、致癌毒性及非致癌毒性判定

在本評析方法中，應依據前述資料庫進行關切污染物致癌毒性及非致癌毒性之危害鑑定程序。若屬致癌性物質，則應取得該關切污染物之致癌斜率。若同時具有非致癌性之不良反應，亦應取得其

參考劑量。

(一)致癌毒性判定

本評析方法以國際癌症研究署 (International Agency for Research on Cancer ,IARC)之致癌性分類為關切污染物致癌性之優先判定原則。

若關切污染物屬於 IARC 資料庫中的**「致癌物」(Group 1)或「可能致癌物」(Group 2A、2B)**，則屬致癌性物質，於健康風險評估中應計算其致癌風險。

若於 IARC 中列為證據不足者(Group 3)，則應參考美國環保署所建置 IRIS 資料庫之致癌分類；若於 IRIS 中列為**「人體致癌物」(A、B1、B2 類)或「可能人體致癌物」(C 類)**(按 1986 年所訂之分類代號，則為 A、B1、B2 與 C 四類)，則該關切污染物，亦應屬致癌性物質。

(二)非致癌毒性鑑定

非致癌物質並沒有致癌物質具有資料庫可供分類的判定，因此非致癌物質是以是否能查詢到參考劑量為準。若能查得，則表示該物質有可資量化的非致癌毒性；若無法得到，則表示該物質沒有非致癌毒性或是非致癌毒性之毒理資料不足。參考劑量的取得見 4.2 節劑量反應評估的說明。

關於影響範圍(Area of Concern, AOC)的界定，見第一層次健康風險評估影響範圍界定與環境資訊彙整分析一節(見 2.1.3 節)。

受體與暴露途徑的評估與判定，不限於第一層次或第二層次中所設定者。應儘量將可能的暴露情境與暴露途徑列出，再決定暴露劑量可能較大，或受體較敏感者為評估的主要標的。

4.2 劑量反應評估

劑量反應評估主要是探討人體暴露於污染物中程度之高低、與其產生不良反應之機率，或不良反應之嚴重程度之間有無關連，最後估計出其致癌毒性因子或非致癌毒性因子。在本評析方法中，係依據國外相關研究或政府機構具公信力之資料庫，來取得毒性因子

之資料。

一、毒性因子的爰引

非致癌毒性因子(non-carcinogenic toxicity factor) 的計算是以閥值方法(threshold approach)為主。因此，非致癌毒性因子即對於閥值的估計，又稱參考劑量(Reference Dose，RfD)。其計算主要是以毒性資料中得到的無明顯不良反應劑量(No-Observed-Adverse-Effect-Level，NOAEL)，最低明顯反應劑量(Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level，LOAEL)，或是低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL) ，再考慮所使用科學研究的不確定性來決定不確定因子(Uncertainty Factor)的大小，最後計算出參考劑量。

計算致癌毒性因子(Carcinogenic Toxicity Factor)時，採取無閥值方法(Non-Threshold Approach)，以斜率概念表示：即以劑量反應曲線估計平均每增加一個單位劑量所增加的致癌機率有多少。因此，致癌毒性因子又稱為致癌斜率(Cancer Slope Factor, CSF)。

依據前述具公信力之資料庫，本評析方法所爰引之優先順序為：

(一)美國環保署綜合風險資訊系統(Integrated Risk Information System，IRIS)；

(二)世界衛生組織簡明國際化學評估文件與環境衛生準則(WHO Concise International Chemical Assessment Documents，WHO CICAD；WHO Environmental Health Criteria, WHO EHC)；

(三)美國環保署暫行毒性因子(Provisional Peer Reviewed Toxicity Values, PPRTVs)；

(四)毒性物質與疾病登錄署(Agency for Toxic Substance and Disease Registry, ATSDR)最小風險濃度(Minimal Risk Level, MRL)；

(五)美國環保署健康效應預警摘要表格(Health Effect Assessment Summary Table , HEAST)。

(六)美國加州環保署所建立之毒性因子。

無論關切污染物是否具致癌性或非致癌性，皆依此順序查詢其致癌毒性因子與非致癌毒性因子。

二、 毒性因子之換算

(一)不同暴露途徑之外推(extrapolation)適用條件

若有吸收途徑之毒性因子無法於資料庫中取得時，同種有機物質之不同吸收途徑之毒性因子有時可以相互引用，稱為吸收途徑外推(route to route extrapolation)。口服吸收毒性因子可同時用於口服、吸入與皮膚接觸三種不同的吸收途徑，而吸入吸收之毒性因子可同時用在口服與吸入的吸收途徑中使用。但若因已知之肝臟初次通過效應(first pass effect)，或不同的吸收途徑會造成暴露劑量或致毒性之過大差異時，則此外推法則並不適用。

1.口服(oral)吸收與吸入(inhalation)吸收途徑的換算

在做口服與吸入吸收的毒性因子轉換時，並無劑量上的換算，唯一要注意的是單位上的轉換。若吸入吸收毒性因子單位並非一般進行健康風險評估時所使用的每人每公斤每日的攝取量(mg/kg-day)，而是毫克每立方公尺(mg/m^3)時，則有必要進行單位的轉換。

非致癌毒性因子之公式如下：

$$RfD_{oral}(mg/kg-day) = RfC(mg/m^3) \times \frac{IR_{inh}(m^3/day)}{BW(kg)} \quad \text{(公式 4-1)}$$

其中

RfD_{oral}：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfC ：吸入吸收參考濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

致癌毒性因子之轉換公式如下：

$$SF_{oral}\left(\frac{1}{mg/kg-day}\right) = SF_{inh}\left(\frac{1}{mg/m^3}\right) \times \frac{BW(kg)}{IR_{inh}(m^3/day)} \quad \text{(公式 4-2)}$$

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{inh}：吸入吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/m^3}$)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

BW：體重(kg)

2.口服(oral)吸收與皮膚接觸(dermal)吸收途徑的換算

口服與皮膚接觸而吸收的毒性因子換算則假設有劑量上的差異，即同樣的劑量經由口服或經由皮膚吸收所產生的效應程度是不同的。在劑量的轉換上，以消化道吸收分率(fraction of chemicals absorbed in the gastrointestinal tract, ABS_{GI})來表示，其轉換的公式如下：

$$RfD_{dermal} = RfD_{oral} \times ABS_{GI} \quad \text{(公式 4-3)}$$

或

$$SF_{deraml} = \frac{SF_{oral}}{ABS_{GI}} \quad \text{(公式 4-4)}$$

其中，

RfD_{dermal}：皮膚接觸吸收參考劑量(mg/kg-day)

RfD_{oral} ：口服吸收參考劑量(mg/kg-day)

SF_{dermal}：皮膚接觸吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

SF_{oral}：口服吸收致癌斜率($\frac{1}{mg/kg-day}$)

ABS_{GI}：消化道吸收分率(unitless)

若消化道吸收分率大於或等於 0.5 時，則可以免除轉換的過程，直接以口服吸收之毒性因子來估計皮膚接觸吸收之風險。

綜合以上所述，使用者在針對各關切污染物查詢毒性因子時，可依下列三項主要步驟進行：

(一)查詢毒理資料庫之致癌分類以判定關切污染物是否為致癌物質。

(二)若為致癌物質，則需進行該關切污染物之致癌斜率與非致癌參考劑量的查詢；若判定為非致癌物，則只需進行非致癌參考劑量的查詢。

(三)若前述具公信力之資料庫中，其相關毒性因子有所缺漏時，則需要以不同吸收途徑的毒性因子進行換算。

4.3 暴露評估

第二層次之健康風險評估與第一層次之健康風險評估相同，有三個主要步驟[102]。但暴露情境與途徑則不限於工商區與住宅區，應以場址本身與周邊的情形作最適宜的考量。以下就第三層次健康風險評估執行暴露評估的部份作原則性的說明。

4.3.1 決定暴露情境、環境介質與受體類型

第三層次所需考量的暴露情境並不限於住宅區與工商業區，評估者應詳細調查場址與場址附近之土地利用情況，對暴露情境進行最接近現況的假設。以下列舉可能發生的暴露情境，風險評估執行者應至少評估關切污染物是否經下列的暴露情境影響受體：

一、在附近休憩區(例如沿岸遊憩區或海水浴場等等)活動之受體直接暴露於關切污染物之下。

二、食用附近農漁牧區中作物或養殖動物的受體，間接以食入方式暴露於關切污染物中，並經口服吸收。

三、若因場址之特殊情況而有其他可能之暴露途徑，亦應一併列入考量。

在考量所有的可能性之後，決定一個或多個可能造成較大風險的暴露情境來進行評估。

二、環境介質

以關切污染物存在於土壤或地下水為出發點，考量之環境介質包括土壤、地下水及空氣，同時需視關切污染物之分布、特性及暴

[102] 參考節 2.3。

露情境等因素，決定需納入評估之環境介質，以便進一步決定後續之暴露途徑。

三、受體類型

在第三層次風險評估中，對於受體的設定有兩種方式:

(一)若有針對場址與附近受體進行詳細調查並取得暴露參數之分佈者(例如體重、暴露時間、暴露頻率、年齡分布等等)，則無需引用成人或孩童受體的定義[103]，直接將參數的分布設定代入暴露劑量計算的公式中。

(二)如果在風險評估中使用的受體參數仍使用單一數值估計的方式，成人之定義仍為十二歲以上，孩童之定義為十二歲以下[104]。除住宅區的暴露情境之外，其他暴露情境則可以視場址調查結果來設定，但是對於受體型態及參數數值之設定，均需通過審查之主管機關或審查委員核定。

4.3.2 暴露途徑

依不同的暴露情境，茲將暴露途徑之判斷分述如下：

4.3.2.1 住宅區與工商業區

依據各環境介質，本評析方法中須考量之暴露途徑包括以下數個，其同時適用於住宅區及工、商業區；

一、場址內受體之暴露途徑

(一)土壤介質所包含之暴露途徑：

1. 誤食受污染土壤並經由口服吸收。
2. 受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收。

土壤介質需考量土壤中關切污染物，經孔隙向下滲入至地下水中，而造成地下水污染。

(二)地下水介質所包含之暴露途徑：

[103] 十二歲以上為成人，以下為孩童。成人的體重設定為 70 公斤，孩童為 17 公斤等等預設的參數。

[104] 但是其他的參數可以視受體調查的結果取代預設數值。

1. 飲用受污染地下水並經由口服吸收。
2. 使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收。

(三)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 受污染土壤揚塵逸散至空氣中，並為受體所吸入吸收。
2. 受污染表層(一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 受污染裡層(大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，並為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**。

二、場址外受體之暴露途徑

由於土壤中之關切污染物無法藉由傳輸途徑移動至場址外受體處，故場址外受體只評估地下水及空氣暴露途徑。

但是由於場址內土壤及地下水中之關切污染物會經汽化成為蒸氣，再經空氣傳輸至場址外受體處，故需先行推估場址內由土壤及地下水汽化成蒸氣之濃度，再以空氣傳輸模式進行場址外濃度推估，其程序如圖 3.3.2.2-1 所示。

而場址內地下水中關切污染物，亦會藉由地下水傳輸至場址外，受體再經由口服、吸入及皮膚接觸等暴露途徑吸收。其同時適用於住宅區及工、商業區之暴露途徑及傳輸途徑如下：

(一)地下水介質所包含之暴露途徑：

1. 飲用受污染地下水並經由口服吸收。
2. 使用受污染地下水作為洗澡用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 使用受污染地下水作為日常清洗用途，水中關切污染物汽化後經吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 使用受污染地下水作為洗澡或日常清洗用途，水中關切污染物經皮膚接觸吸收。

(二)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 受污染土壤揚塵逸散至空氣中，經傳輸後為受體所吸入吸收。
2. 受污染表層(一公尺內)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
3. 受污染裡層(大於一公尺)土壤中之關切污染物經汽化成蒸氣，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**
4. 受污染地下水中之關切污染物經汽化蒸散至室外空氣中，經傳輸後為受體所吸入吸收。**(此暴露途徑僅適用於關切污染物屬於有機物及汞)**

4.3.2.2 休憩區[105]

此處所指之休憩區包含湖泊沿岸、海洋沿岸、森林或草原等區域，其共同特性為受體活動區域之表土通常沒有完全以水泥或柏油人工鋪面覆蓋，受體與土壤的接觸可能性增加，而地下水中的污染物質也可能經由汽化移動至污染源的上方而為受體所吸入。於此情境假設下，所需探討的暴露途徑至少包括：

[105] 由於此情境的變化性較大，因此此處並未詳列所有應評估的暴露途徑，而僅列舉較常見的暴露途徑，風險評估執行者應視場址調查的情況列舉場址內外所有可能發生之暴露途徑。

(一)土壤介質所包含之暴露途徑

1.受體與污染表土[106]直接接觸(dermal contact with soil)。

2.受體誤食污染表土(incidental ingestion of soil)。

(二)空氣介質所包含之暴露途徑

1.受體吸入污染土壤揚塵(inhalation of soil particles)。

2.受體吸入由受污染之表土或裡土汽化之污染空氣(inhalation of vapors from contaminated soil)，唯對於汞以外之重金屬物質，本暴露途徑應該予以排除；

3.受體吸入由受污染之地下水汽化出之污染空氣(inhalation of vapors from contaminated groundwater) ，唯對於汞以外之重金屬物質，本暴露途徑應該予以排除。

健康風險評估執行人員需**至少**針對這五類暴露途徑是否存在、可能的受體為何做出評估與討論，若於場址調查過程中發現其他可能發生的暴露途徑，則應一併列入風險評估的暴露途徑當中。

4.3.2.3 農漁牧區[107]

在農漁牧區的土地利用中，至少有現場工作者與用農漁牧產品之消費者兩種不同受體應加以探討：

一、農漁牧場工作者

農漁牧場工作者多半於戶外的自然環境中工作，因此可能暴露於污染物的途徑也較多，所需探討的暴露途徑至少包括：

(一)土壤介質所包含之暴露途徑：

1. 農牧工作者可能直接與污染的表土產生皮膚接觸。

2. 農牧工作者可能直接與污染的表土接觸而誤食污染土壤。

(二)空氣介質所包含之暴露途徑：

1. 農牧工作者可能吸入土壤或地下水中汽化之污染氣體，或含關切污

[106] 雖然在湖泊或海洋沿岸休憩區，受體可能經由皮膚與底泥的接觸而吸收污染物(見圖 4.3-1)，但基於土污法對於土壤之定義：「指陸上生物生長或生活之地殼岩石表面之疏鬆天然介質。」此處指的表土並不包含底泥。

[107] 由於此情境可能變化較大，因此並未詳列所有應評估的暴露途徑，而僅列舉較常見的暴露途徑，風險評估執行者應視場址調查的情況列舉場址內外所有可能發生之暴露途徑。

染物之揚塵；唯對於汞以外之重金屬物質，本暴露途徑應該於以排除。

(三)地下水介質所包含之暴露途徑：

1. 若農漁牧業者抽取地下水作為灌溉養殖之用，則可能接觸地下水中之關切污染物。

健康風險評估執行者需至少針對這四類暴露途徑是否存在、可能受體為何，做出評估與討論。

二、食用農漁牧產品之消費者

於污染土地上所種植或養殖之農牧產品，其關切污染物可能經由食用農漁牧產品被消費者所吸收，茲將可能的途徑敘述於下：

1. 農作物吸收污染表土中之關切污染物，再由消費者食入後經口服吸收。
2. 植物吸收污染表土中之關切污染物，再由所養殖之動物食入，最後消費者食入受污染之畜產品，經口服吸收關切污染物。
3. 灌溉用水為受污染之地下水，而地下水中之關切污染物又為農作物吸收。
4. 養殖漁畜產品用水為受污染地下水，因此漁畜產品遭受污染，最後又為消費者所食用。

健康風險評估執行者需至少針對這四類暴露途徑是否存在、可能的受體為何做出評估與討論。

4.3.3 計算各暴露途徑造成受體的暴露劑量[108]

於計算受體暴露劑量前，通常需先行以宿命傳輸模式推估環境介質中(土壤、空氣或水)關切污染物濃度，再計算受體之暴露劑量；少數之暴露情境無須進行宿命傳輸模式的推估，則可以直接進行暴露劑量之評估。以下將介紹第三層次宿命傳輸模式型態、暴露劑量計算及蒙地卡羅模擬概念。

一、宿命傳輸模式

[108] 含蒙地卡羅計算與數值解模式之選擇。

第三層次健康風險評估中模式之選用應依循下列之原則：

(一)以方便取得之模式為優先。

(二)以沿用時間較久，並於相關領域多所討論之模式為優先。

(三)模式之假設符合場址狀況。

(四)在第三層次健康風險評估中不限制使用解析解模式，亦可進行數值解模式的宿命傳輸模擬，茲將目前常用之數值解宿命傳輸模式列於表 4.3-1 以供計畫執行者作為選用的參考。

二、暴露劑量計算

與食物鏈無關之暴露途徑，受體吸收污染物的方式包括口服吸收、吸入吸收、皮膚接觸吸收，在估計出受體可能暴露之環境介質中關切污染物的濃度(土壤中關切污染物濃度以 C_{soil}、地下水中之關切污染物濃度以 C_{water}、空氣中關切污染物濃度以 C_{air} 表示)之後，再按下列公式進行計算：

(一)土壤介質暴露途徑之暴露劑量計算：

1.誤食受污染土壤並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times IR_{oral-soil} \times EF \times ED}{BW \times AT} \times \mathrm{CF}$$ (公式 4-5，USEPA 1989)

$Intake_{oral-soil}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

$IR_{oral-soil}$：攝食土壤速率(mg/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

2.受污染土壤經皮膚接觸並為受體吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{dermal-soil} = \frac{DA_{event} \times EV \times ED \times EF \times SA \times f_{sa}}{BW \times AT}$$ (公式 4-6，USEPA 2004)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次暴露劑量(mg/cm^2)

EV：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

f_{sa}：上臂體表面積與身體表面積比(unitless)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

其中 DA_{event} 可由以下公式求得：

$$DA_{event} = C_{soil} \times AF \times ABS_d \times \mathrm{CF} \qquad \text{(公式 4-7)}$$

C_{soil}：土壤中關切污染物濃度(mg/kg)

AF：土壤對皮膚之吸附係數(mg/cm^2)

ABS_d：皮膚吸收分率(unitless)

CF：單位轉換因子(kg/mg)，數值為 10^{-6}

(二)地下水介質暴露途徑之暴露劑量計算:

1.飲用受污染地下水並經由口服吸收之暴露劑量計算：

$$Intake_{oral-water} = \frac{C_{water} \times IR_{oral-water} \times EF \times ED}{BW \times AT} \qquad \text{(公式 4-8，USEPA 1989)}$$

$Intake_{oral\text{-}water}$：口服吸收暴露劑量(mg/kg-day)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

$IR_{oral\text{-}water}$：飲水量(L/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

2.受污染地下水與受體皮膚接觸，再經由皮膚吸收之暴露劑量計算：

針對有機物與無機物，一次皮膚接觸受污染地下水所吸收的劑量(DA_{event})計算公式各有不同：

有機物的暴露劑量 DA_{event} 為(USEPA 2004)：

若 $t_1 \leqq 2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \sqrt{6 \times \frac{\tau_{event} \times t_1}{\pi}} \times \mathrm{CF} \qquad \text{(公式 4-9)}$$

若 $t_1 > 2.4\tau_{event}$

$$DA_{event} = 2 \times FA \times K_p \times C_{water} \times \left[\frac{t_1}{1 + B_{dermal}} + 2 \times \tau_{event} \times \left(\frac{1 + 3 \times B_{deraml} + 3 \times B_{dermal}^{\ 2}}{(1 + B_{dermal})^2} \right) \right] \times \mathrm{CF} \qquad \text{(公式 4-10)}$$

FA：吸收分率(unitless)

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

τ_{event}：各關切污染物每次對皮膚吸收的延遲時間(hour)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

B_{dermal}:關切污染物對於角質層對表皮層的相對滲透係數(unitless)

CF：為單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

使用以上兩個公式的哪一種視經皮膚接觸時間的長短而定，若時間短於到達穩定狀態(Steady State)的時間(以 t*表示，一般來說，t*為τ_{event} 的 2.4 倍)，則使用公式(4-9)，反之則使用(4-10)。

另一方面，無機物的暴露劑量 DA_{event} 為:

$$DA_{event} = K_p \times C_{water} \times t_1 \times CF \quad \text{(公式 4-11，USEPA 2004)}$$

K_p：滲透係數(cm/hour)

C_{water}：地下水中關切污染物濃度(mg/L)

t_1：一次經皮膚接觸的時間(hour)

CF：單位轉換因子(L/cm^3)，數值為 10^{-3}

求得 DA_{event} 之後，再代入下列公式計算經受體皮膚吸收的污染物劑量：

$$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times EV_{shower} \times ED \times EF \times SA}{BW \times AT} \text{(公式 4-12，USEPA 2004}^{109}\text{)}$$

$Intake_{dermal-water}$：皮膚接觸吸收暴露劑量(mg/kg-day)

DA_{event}：每次暴露劑量(mg/cm^2)

EV_{shower}：事件發生頻率(1/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

SA：身體表面積(cm^2)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

(三)空氣介質暴露途徑之暴露劑量計算:

1.關切污染物由土壤或地下水經由宿命傳輸機制移至空氣中，含有污染物的空氣為受體所吸入暴露劑量估計:

$$Intake_{inh} = \frac{C_{air} \times IR_{inh} \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{(公式 4-13)}$$

$Intake_{inh}$：吸入吸收暴露劑量(mg/kg-day)

[109] 公式相關參數代號列於附錄三當中。

C_{air}：空氣中關切污染物濃度(mg/m^3)

IR_{inh}：呼吸速率(m^3/day)

EF：暴露頻率，一年暴露的天數(day/year)

ED：暴露期間，暴露的總年數(year)

BW：體重(kg)

AT：暴露發生之平均時間(day)

(四)食物鏈:

本評析方法的食物鏈吸收將僅討論土壤及地下水中之關切污染物，經農作物或漁牧產品，為受體食入後經口服吸收。由於食物鏈會因場址水文地質條件及活動生物之不同，而對關切污染物產生不同的累積效果；且受體食用農作物或漁牧產品之模式亦因種類不同而有所差異。因此對於暴露劑量的估計，應依照場址的調查結果，研擬或引用合適的估計公式，並經由審查之主管機關或審查委員核定。

表 4.3-1、各傳輸途徑的常用數值解宿命傳輸模式

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
土壤	土壤滲入地下水	VLEACH	模擬平衡狀態下土壤，地下水與孔隙中氣體三項中污染物的分布。假設未飽和土層已到達穩定狀態，而土壤的溼度亦均勻。假設污染物不會被分解，而污染源沒有自由相(free product)存在。
		SUTRA	估計壓強水頭與不同時間的污染物濃度。模式中考慮毛細現象、對流現象、延散現象與擴散作用。使用者也可以設定不同時間點的源頭與沉積點(Source and Sink)，邊界條件(boundary condition)。此模式同時考慮不飽和層的污染物滲出與飽和層地下水流動的狀態，是較為複雜的地下水模式。
		MOFAT	可模擬污染物濃度分布狀態。模式中考慮污染物在水中的平流、延散、擴散與土壤對污染物之吸收、污染物的降解。有能力估計至多五種污染物於四相(土、水、空氣、油)中的傳輸情形。而土層的分層可以仔細到十層，但是使用上較為困難，不如SESOIL的使用來的廣泛。

表 4.3-1、各傳輸途徑的常用數值解宿命傳輸模式

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
土壤	土壤滲入地下水	VS2DT	模擬壓強水頭與總水頭過去之時間與空間分布，計算土壤的溼度、飽和度、地下水流速、溶解相的濃度。模式中考慮蒸發、入滲、植物吸收等因子。考慮非線性的儲水、傳導性質、沉積點與邊界條件，雖為較高層次的模式，但被廣泛地使用。
地下水	—	MODFLOW	計算出壓力水頭，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的，而含水層則可以是受壓的或非受壓式的，但僅能估計地下水流向。
		PLASM	計算出壓力水頭，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的，而含水層則可以是受壓的或非受壓式的，但僅能估計地下水流向，不考慮平流、擴散與延散現象
		MOC	計算出污染物濃度分布，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的，而含水層則假設是受壓式的。

表 4.3-1、各傳輸途徑的常用數值解宿命傳輸模式

污染之初始介質	由污染源至受體之可能傳輸途徑	可用模式	備註
地下水		BIOPLUME	計算出污染物濃度分布，速度向量與使用者設定點的歷史數據的波動>模擬平流、延散、吸附、耗氧與非耗氧生物分解和反應。
		Random Walk	計算出壓力水頭與污染物濃度的分布，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的、而含水層則可以是受壓的或非受壓式的.
		MT3D	模擬污染物的濃度，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的.能處理多種不同的離散模式(discretization)與邊界條件。
		MODPATH	模擬立體流向路線，模式中的飽和水層可以是不均勻的或有異向性的，而含水層則可以是受壓的或非受壓式的，可以處理多次污染，並繪製土壤切面圖，並將污染物流動路線與其他模式所模擬出之水流領域套圖。

*資料來源RB－CA Faet and Transport Models: Compendium and Selection Guidance, ASTM 1998

三、暴露評估與蒙地卡羅分析(Monte Carlo analysis)

在健康風險評估的範疇內，蒙地卡羅分析可以用於許多不同的部分，暴露評估僅為其中的一項。以下的敘述為針對蒙地卡羅用於本評析方法的暴露評估中的程序。關於不確定性分析與敏感度分析部分，請參考各相關的附錄與章節(附錄四及 4.4.3 節)。

(一)確認評估的執行之適宜性

使用蒙地卡羅分析方法可分析暴露劑量之分布機率，並於風險特徵描述時進一步分析風險之機率分布，以決定更符合實際狀況之狀況，而非僅用保守之單點估計結果來判斷。

然而，若蒙地卡羅分析無法達成前述目的，或所能獲得之資料無法符合蒙地卡羅分析之需求，則不考慮進行蒙地卡羅分析。

(二) 事先排除較不重要的因子

不一定要對所有的暴露途徑都進行蒙地卡羅分析的計算。對於暴露劑量分析計算則可以選擇對風險有較大影響之暴露途徑進行分析[110]。

而在分析各暴露途徑時，進行其中模式或公式之計算，可以選擇對計算結果影響較大的參數來執行蒙地卡羅分析，其餘的參數則維持原來的保守單點估計值。至於如何進行參數篩選，可參考附錄五的敏感度分析方法。

(三)選擇參數的分布

於決定以蒙地卡羅分析暴露途徑與參數後，亦需設定參數的分布型態。市售之商用軟體可設定分布型態與描述統計分布所需參數[111]，以模擬參數之分布情形。於選擇分布型態時，至少應考慮下列因素並於評估報告中詳敘理由：

1.是否有任何機制來選擇此數學分布，是否以取代性數值資料(surrogate data)來判定參數的分布?

2.此分布是否由任何物理或生物性之機制所造成?

[110] 即單一暴露途徑所得之風險值佔總風險值比例較高之暴露途徑。

[111] 一般來說可能有，平均值、最大值、最小值、位置參數、尺度參數、與形狀參數。

3.此分布為連續性分布或非連續性分布?

4.此分布是否有極值(邊界)?

5.是否為對稱分布?

6.若為非對稱分布，則為向左或向右偏移?

7.針對此參數是否有其他分布型態可選擇，如何選擇?

茲將選擇參數分布的簡要原則敘述於下：

1. 已知參數之分布範圍，但並不清楚範圍中的分布的機率為何，則可選擇均一分布(uniform distribution)；
2. 已知分布範圍與最可能分布的數值，則可以使用三角形分布(triangle distribution)；
3. 貝它(beta)，三角(triangle)與均一(uniform)分布並沒有分布機制的解釋，因為一般自然界中的物化反應或是生物反應較不可能以此種形式存在；但是前述之分布型態可反應現階段該參數之情形。□

表 4.3-2 中列出常見之統計分布性質，可依所得之資料選擇適用之分布。

分布選定後，則以現有的資料計算出表 4.3-2 所列對該分布所需要的數值。並於報告中敘明分布設定的計算程序與相關參考文獻與調查資料。

表 4.3-2、常見統計分布表

分布名稱	公式	說明	範例	需具備之參數條件
貝它	$f(x)=\frac{(x-\alpha)^{p-1}(b-x)^{q-1}}{B(p,q)(b-a)^{p+q-1}}$ $B(p,q)=\int_0^1 t^{p-1}(1-t)^{q-1}dt$ $p \le x \le q$；$p, q > 0$	是一個連續但有上下界線的含數，因為係數的不同，函數圖形的變化也很大	吸收分率: 以0與100%(1)為上下界，吸收型態則因化學物質與受體而有不同	公式中的a、b與分布上下限(p, q)值
二項	$P(x,p,n)=\frac{n!}{x!(n-x)!}(p)^x(1-p)^{(n-x)}$ x為非負整數	二項分布是由N個連續測試結果的數據所組成，而測試的結果只有兩個選擇(例如成功與失敗，有與無，感染與無感染). 二項分布的函數適用以描述N個測試中發生其中一個結果的比率(比如說感染比例)單一測試獲得此結果的機率關係	例如動物之致癌數量(或其他量化的結果)，與致癌率的關係.	成功(或失敗)事件發生之機率(p)，事件發生的次數(n)
指數	$f(x)=\frac{1}{\beta}e^{-(x-\mu)/\beta}$ $x \ge \mu$；$\beta > 0$	參數以單純一項指數型態存在，通常用來描物質特性於不同時間點的改變	放射性物質在兩個測試點間隨時間的衰變	位置參數(μ)，尺度參數(β)

表 4.3-2、常見統計分布表(續)

分布名稱	公式	說明	範例	需具備之參數條件
伽馬	$f(x)=\frac{(\frac{x-\mu}{\beta})^{\gamma-1}\exp(-\frac{x-\mu}{\beta})}{\beta\Gamma(\gamma)}$ $\Gamma(\gamma)=\int_0^\infty t^{\gamma-1}e^{-t}dt$ $x\geq\mu;\ \gamma,\ \beta>0$	參數同時在基數項與對數項，一般來說，適用於敘述對於物質特性由開始測試(第0次)至第N次測試結果所花費的時間	放射線物質衰變至第N次測試時之放射線強度與時間的關係	位置參數(μ)，尺度參數(β)，與形狀參數(γ)。
對數常態	$f(x)=\frac{e^{-((\ln((x-\theta)/m))^2/(2\sigma^2))}}{(x-\theta)\sigma\sqrt{2\pi}}$ $x\geq\theta;\ \sigma>0$	測試結果(x)取對數之後呈縣常態分布的狀態	一般污染物於環境中的濃度與對數常態分布較為契合	位置參數(θ)，尺度參數(m)，與形狀參數(δ)。
常態	$f(x)=\frac{e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)}}{\sigma\sqrt{2\pi}}$	以機率學中的中央極限定理(central limit theory)所發展出之分布圖形	生物群中可以量化的特徵，例如身高，體重，多為常態分布	參數平均值(μ)；參數標準差(σ)；(最大值與最小值)
波松	$p(x,\lambda)=\frac{e^{-\lambda}\lambda^x}{x!}$ x為非負整數	觀察單一獨立事件發生的頻率，時間分布與空間分布，常會呈現波松分布	颱風於一個月內發生數量的機率	形狀參數(λ)
三角形	$f(x)=\frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}$ $a\leq x\leq c$ $f(x)=\frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)}$ $c\leq x\leq b$	機率分布圖呈現一個三角形的形狀，這是一個基於所知有限而設計的粗略分布圖形，只須知道最大值,最小值與中間值的分布機率		最大值(b)；最小值(a)；最可能出現值(c)

表 4.3-2、常見統計分布表(續)

分布名稱	公式	說明	範例	需具備之參數條件
均勻	$f(x)=\frac{1}{b-a}$ $a \le x \le b$ $f(x)=0$ $x < a, x > b$	參數在其在最大最小值範圍內呈現一均勻的分布，是一個基於所知有限而設計的粗略分布圖形		最大值(b)與最小值(a)
韋伯	$f(x)=\frac{\gamma}{\alpha}(\frac{x-\mu}{\alpha})^{(\gamma-1)}\exp(-((x-\mu)/\alpha)^{\gamma})$ $x \ge 0; \gamma, \alpha > 0$	為描述產品品質隨時間改變所發展的參數；因為各係數的不同，所發展出的機率分布圖形也不盡相同,是十分有彈性的一種分布模式	產品壽命，種子發芽率,數目直徑與數齡的關係	
自定	-	以實際數據來訂定參數的數值與機率關係，而此關係不能以一般的統計分布公式來描述	人口年齡分布，居住時間	參數數值與對等之機率

(四)進行蒙地卡羅計算

選定分布後，則交由商業軟體來進行蒙地卡羅模擬，為使模擬結果更具代表性，不能少於一千個抽樣模擬。

此外，於進行參數分布設定時，也需要注意到各參數間的相關性，以避免不切實際的運算[112]。若執行電腦蒙地卡羅模擬運算前有進行參數相關性的設定，則應於報告中敘明設定的原因及設定關係式。

(五)選取暴露劑量

如果只以蒙地卡羅方式進行暴露評估，則以蒙地卡羅模擬暴露劑量之分布結果中，95%百分位(95% percentile)值為暴露劑量之估計值。

然而，若只以蒙地卡羅模擬進行評估時，通常會結合暴露劑量分布與毒性反應評估(一般為單點估計之定值)劑量相結合，計算出風險值之分布。

[112] 例如人體身高與體重有一定之相關性，因此在進行參數設定時，除單獨設定對於身高與體重之分布外，亦須設定兩者之相關性，以避免電腦隨機選取較高之體重數值卻又隨機選取過低的身高，造成不符合真實狀況之情形發生。這樣的設定功能，在現有執行蒙地卡羅的商用軟體中均具備。

4.4 風險特徵描述

對於致癌健康風險評估之可接受風險仍為 10^{-6}。非致癌風險亦與第一層次健康風險評估的原則相同。

4.4.1 致癌風險與非致癌風險之計算

致癌風險與非致癌風險的計算公式與第一層次及第二層次健康風險評估計算方式相同:

一、致癌風險：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各吸收途徑之暴露劑量個別相加，所得到個別暴露劑量總合再與致癌斜率相乘：

(一)口服吸收途徑之風險計算

$$R_{oral} = (Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil}) \times SF_{oral} \quad \text{(公式 4-14)}$$

R_{oral}：經由口服吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲用地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤而吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{oral}：經由口服吸收關切污染物之致癌斜率

(二)吸入吸收途徑之風險計算

$$R_{inh} = (Intake_{inh\text{-}water(total)} + Intake_{inh\text{-}soil(total)}) \times SF_{inh} \quad \text{(公式 4-15)}$$

R_{inh}：經由吸入吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸

收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括 $Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及 $Intake_{inh\text{-}soil}$

SF_{inh}：經由吸入吸收關切污染物之致癌斜率

(三)皮膚接觸吸收途徑之風險計算

$$R_{dermal} = (Intake_{dermal\text{–}water} + Intake_{dermal\text{–}soil}) \times SF_{dermal} \quad \text{(公式 4-16)}$$

R_{dermal}：經由皮膚接觸吸收暴露途徑之致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收地下水中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸吸收土壤中關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

SF_{dermal}：經由皮膚接觸吸收關切污染物之致癌斜率

上述的計算對所有的致癌性之關切污染物均應執行一次，則可獲得所有致癌關切污染物於不同暴露途徑之致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核 (參考附錄六表十三)。

各關切污染物經由各暴露途徑之總致癌風險則為：

$$R_{total} = \sum R_{oral} + \sum R_{inh} + \sum R_{dermal} \quad \text{(公式 4-17)}$$

R_{total}：總致癌風險，即為受體一生中因暴露於污染物中所致之致癌風險

二、 非致癌風險：

非致癌風險又稱危害商數(Hazard Quotient, HQ)，其計算如下：

首先，將某一關切污染物其屬於口服、吸入及皮膚接觸各吸收途徑[113]之暴露劑量個別相加，所得到的暴露劑量總合再與參考劑量相除：

(一)口服吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{oral} = \frac{(Intake_{oral-water} + Intake_{oral-soil})}{RfD_{oral}} \qquad \text{(公式 4-18)}$$

其中

HQ_{oral}：口服吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{oral\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由飲地下水吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{oral\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由誤食土壤吸收關切污染物暴露途徑之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{oral}：某一非致癌物之口服吸收之參考劑量

(二)吸入吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{inh} = \frac{(Intake_{inh\text{-}soil(total)} + Intake_{inh\text{-}water(total)})}{RfD_{inh}} \qquad \text{(公式 4-19)}$$

HQ_{inh}：吸入吸收暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{inh\text{-}water(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收地下水蒸氣之關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)，包括 $Intake_{inh\text{-}water(shower)}$、$Intake_{inh\text{-}water}$ 及 $Intake_{inh\text{-}water(wash)}$

[113] 吸入、口服或經皮膚吸收。

$Intake_{inh\text{-}soil(total)}$：一生中平均每人每天每公斤經由吸入吸收土壤揚塵及蒸汽之關切污染物之暴露劑量，包括 $Intake_{inh\text{-}soil(upper)}$、$Intake_{inh\text{-}soil(inner)}$及 $Intake_{inh\text{-}soil}$

RfD_{inh}：某一非致癌物之吸入吸收之參考劑量

(三)皮膚接觸吸收途徑之危害商數計算

$$HQ_{dermal} = \frac{(Intake_{dermal-water} + Intake_{dermal-soil})}{RfD_{dermal}} \qquad \text{(公式 4-20)}$$

其中：

HQ_{dermal}：皮膚接觸暴露途徑之非致癌風險

$Intake_{dermal\text{-}water}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸地下水吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

$Intake_{dermal\text{-}soil}$：一生中平均每人每天每公斤經由皮膚接觸土壤吸收關切污染物之暴露劑量(lifetime average daily dose)

RfD_{dermal}：某一非致癌物之皮膚接觸吸收參考劑量

上述的計算對所有的具非致癌毒性之關切污染物均應執行一次，則可獲得所有非致癌關切污染物於不同暴露途徑之非致癌風險。所有關切污染物於不同途徑的致癌風險結果需分項列表以供審核之用(參考附錄六表十二)。

各關切污染物經由各暴露途徑之危害指數(Hazard Index, HI)則為：

$$HI = \sum HQ_{oral} + \sum HQ_{inh} + \Sigma HQ_{dermal} \qquad \text{(公式 4-21)}$$

此危害指數(HI)即為受體一生中因暴露於各關切污染物所致的非致癌風險。

可接受之危害指數為 1，若大於此值則表示風險超出可接受之上限，應公告為整治場址。若小於或等於 1，則表示於本健康風險評估所假設的情境下，受體所承受的非致癌風險於可接受範圍之內，無須做進一步的評估。

健康風險評估執行人員應將風險計算的結果匯整於附錄六之表單當中。

但若在第三層次健康風險評估中套用蒙地卡羅模擬的方法，則須將暴露評估中所算出的暴露劑量數值分布套入公式中暴露劑量的部分，則所得的數值即為風險的分布值。而判定是否超出可接受風險的原則則為：若致癌風險分布的第九十五百分位的數值大於可接受風險[114]，或非致癌風險分佈的第九十五分為數值大於可接受之非致癌風險[115]，則應公告為整治場址。

4.4.2 不確定性分析

第三層次評估之不確定性分析，主要以蒙地卡羅方法來測試各種暴露途徑或關切污染物對最終風險之影響。如何利用蒙地卡羅方法來評估各參數對風險結果的影響，則可參考附錄五。

4.4.3 根據第三層次健康風險評估擬定之決策

根據第三層次健康風險評估之計算結果，可對場址之後續管理進行決策。若風險超過可接受範圍，則應公告為整治場址；而對風險比例較高之暴露途徑，則可採行工程阻絕或行政管制方式限制活動範圍，以減少受體暴露之情形發生。

若風險低於可接受範圍，則該場址無須公告為整治場址，但可能需限制部分土地利用或受體活動。同時視場址情況，對關切污染物進行持續監測。

雖可由評估結果提出決策建議，然而尚需審查之主管機關、審查委員、執行單位與相關利益團體(廠商、民眾等等)討論後獲致最後結論。

[114] 可接受之致癌風險為 10^{-6}。
[115] 可接受之非致癌風險為 1。

第五章 石油碳氫化合物總風險評估

5.1 前言

總石油碳氫化合物(Total Petroleum Hydrocarbon, TPH)為石油中所存在之混合物碳氫化合物質，混合物中化學物質各有不同的物化性質與對生物的毒性。而且，不同產地與煉製方法所產生油品中碳氫化合物的組成也各有不同。針對目前以單一物質毒性作為評估標的所設計之風險評估程序來說，以單一的 TPH 濃度來評估健康風險困難度甚高。

但有鑒於近年來石化工業之污染問題為各界關注的焦點，美國數州亦已設計出 TPH 的風險評估流程，對此，雖然美國(聯邦)環保署並不為這樣的風險評估方式背書，但也不反對使用。這顯示了對於 TPH 納入風險評估於石化業來說，的確有其需求，不過於使用時應對其計算之不確定性有所認知。

以下簡述以 TPH 為關切污染物之風險評估流程，除需依照前述風險評估之四大步驟及層次性風險評估計算風險外，需要考慮其不確定性，評估方式主要採用不同碳數群評估方式，視情況輔以單一化學物質評估。

5.2 石油碳氫化合物於風險評估中的碳數分類與應評估之單一物質表列

TPH 之評估，應依照美國「TPH Working Group 1997, Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentrations (RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbons (TPH)」所提供 TPH 之分類方式，該方法為先將混合碳氫化合物分為芳香烴(Aromatic Hydrocarbon)與脂族烴(Apliphatic Hydrocarbon)兩大類，再於兩類中依碳數各分為七類及五類。並依照分類之各碳氫化合物之分類引用相關物理化學性質之參數，進行風險評估時，應將各參數代入宿命傳輸模式或風險計算的公式當中，最後並將各碳數群於各暴露途徑所產生的風險相加，得到 TPH 所可能造成之

人體健康風險。目前以碳數為分類依據的毒性僅有非致癌毒性，因此計算時也僅能得到非致癌風險。

詳細之健康風險步驟，應依照 Total Petroleum Hydrocarbon Criteria Working Group Series 提供之方式(見 Human Health Risk-Based Evaluation of Petroleum Release Sites:Implementing the Working Group Approach (Volume 5))，該報告可由下列網站取得：http://www.aehs.com/publications/catalog/content /tph.htm，至於其他與健康風險評估相關的資料，如分析、傳輸等資料均可由該網站取得，包括：

1. Analysis of Petroleum Hydrocarbons in Environmental Media (Volume 1).
2. Composition of Petroleum Mixtures (Volume 2)
3. Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations (Volume 3).
4. Development of Fraction Specific Reference Doses (RfDs) and Reference Concentration(RfCs) for Total Petroleum Hydrocarbon(TPH) (Volume 4)

另一方面，考量致癌風險可能為油品類重要之考量因素，如發現造成該場址之污染油品成分中，含有毒性較強的化學物質而宜增加致癌風險之評估時，審查單位可依照現況，另行要求針對 TPH 毒性較強或較明確的化學物質個別進行風險評估，其評估之方法可以參照評析方法中針對屬於純物質之污染物進行風險評估的方式進行。最後並將各污染物於各暴露途徑的致癌毒性與非致癌毒性分別加總，則得到總致癌風險與總非致癌風險。表 5.2-1 為提供參考之污染物。

表 5.2-1 TPH 中毒性較強或較明確的化學物質

名稱	CAS Number
Benzene	71-43-2
Toluene	108-88-3
Ethylbenzene	100-41-4
Xylenes	1330-20-7
Total Naphthalene	91-20-3
n-Hexane	110-54-3
MTBE	1634-04-4
Ethylene Dibroide (EDB)	
1,2 Dichloroethane (EDC)	107-06-2
Benzo(a)anthracene	56-55-3
Benzo(b)fluorancthene	205-99-2
Benzo(k)fluoranthene	207-08-9
Benzo(a)pyrene	50-32-8
Chrysene	218-01-9
Dibenzo(a,h)anthracene	53-70-3
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	193-39-5

5.3 風險特徵描述

將以 TPH 碳數計算所得之非致癌風險與可接受非致癌風險比較。若超過可接受非致癌風險，則表示場址應公告為整治場址。

另若需進一步評估 TPH 中毒性較強或較明確的化學物質時，可將計算所得之致癌風險以及非致癌風險與可接受風險比較，若任一超過可接受風險，則表示場址應公告為整治場址。

附錄一　專有名詞

英文名稱	中文譯名	簡 述
Additive	相加性	指各種不同污染物所可能造成的生物效應或健康危害的程度是可以相加的。假設所有的物質均有相加作用是一種簡化的假設。但由於不同場址之污染物組合各不相同，目前對各種物質之交互作用探討並不足以應付，因此以此種較簡化的方式來進行計算。若是有相關文獻明確指出特定物質的交互作用性質，則應以該文獻之研究結果作為計算風險時的依據。
Area of Concern	影響範圍	污染物於土壤或地下水中影響的範圍，以管制標準作為劃定的標準。
Background Level	背景值濃度	化學物質於自然環境中原來的濃度，而非由場址污染所造成的濃度。部分非自然產生之污染物(如戴奧辛、PCB 等等)因為已於環境中存在且無法被分解，在自然環境中，也會檢測出背景值的存在。
Benchmark Dose Low, BMDL	低基準劑量	BMDL 依照劑量反應曲線所找出的造成某一特定百分比的群體發生不良反應的劑量。例如 $BMDL_{10}$ 為依照劑量反應曲線所找出的造成 10%群體發生不良反應的劑量。由於估計 BMDL 需要較多的實驗數據以降低劑量反應曲線的不確定性，因此大多數的毒性物質目前無法使用此種方法。
Bio-accumulation	生物蓄積性	化學物質有殘留於生物體不易被代謝性質者即稱為有生物蓄積性。
Cancer Slope Factor, CSF	致癌斜率	因暴露劑量增加而造成致癌風險增加的程度，可用以下的公式來表達： $$致癌斜率 = \frac{致癌風險}{暴露劑量}$$ 在實際上估計致癌斜率時，是以劑量反應曲線的 95%上信賴區間來決定的。致癌斜率的單位為(1/(mg/kg-day))。
Carcinogenic	致癌性	指(某物質或情境)有導致癌症發生的性質。
Chemicals of Concern, COCs	關切污染物	風險評估中所鑑定出應進行風險計算之的污染物。
Chemicals of Potential Concern	可能關切污染物	可能存在污染場址的污染物。
Confidence Coefficient	信賴係數	信賴區間蓋括母數參數在內可能性的大小。信賴係數所在範圍為(0,1)，例如，0.95 意指有 95%的樣本其所建立的信賴區間蓋括母體參數在內，有 5%的樣本其所建立的信賴區間不概括母體

英文名稱	中文譯名	簡 述
		參數在內。
Dermal	皮膚的	為生物或與醫學領域中使用的辭彙，是「皮膚」的形容詞。例如 Dermal Absorption 即為經由皮膚吸收(醫藥領域中則簡稱「經皮吸收」)的意思。
Direct Exposure Pathway	直接暴露途徑	受體因直接與被污染之環境介質接觸，因而暴露於污染物中。此過程為直接暴露途徑。
Dose Response Assessment	劑量反應評估	探討人體暴露於污染物中程度之高低、與其產生反應之機率或嚴重程度之間有無關連。在美國超級基金又將劑量反應評估稱為毒性評估(Toxicity Assessment)。
Dose-response curve	劑量-反應曲線	以橫座標為暴露劑量縱座標微生物反應程度繪製的線性關係圖。此曲線可反應出暴露劑量對生物造成的影響程度與變化關係。
Exposure Assessment	暴露評估	暴露評估探討人體是否有暴露於此污染環境之機會及程度，即判斷污染物質經由何種途徑被人體吸收，與計算暴露劑量。
Exposure Pathway	暴露途徑	污染物由污染源經過各種路徑移動，最後與受體產生接觸而被吸收的整個過程。對於暴露途徑的描述應包括污染源、傳輸途徑、暴露點(受體與污染物產生接觸的地方)與受體。
Exposure Route	吸收途徑	污染物為受體所吸收的方式，在本風險評估中有食入、吸入與經由皮膚吸收三種途徑。
Exposure Scenario	暴露情境	對於整個污染情況與受體關係的描述，包括場址的狀況、污染物的特性或何種受體會被污染物所影響等等。
Extrapolation	外推法	以現有的資料為基礎，預測推估資料涵蓋範圍之外的趨勢或結果。
First Order Decay	一階遞減	此處的一階遞減是指污染物於固定時間中於自然環境中分解或稀釋的比例為一個定值。也就是說，污染物濃度降解的半衰期是固定的。
First Pass Effect	初次通過效應	食物由消化到吸收後會先被送到肝臟，經過代謝才進入全身血液循環。部分化學物質於此步驟即被代謝，並不會進入全身，因此不會引發毒性。但另一方面，也可能有較不劇毒性的物質因為肝臟的代謝，反而成為毒物。
Fraction of Chemicals Absorbed in the Gastrointestinal Tract, ABS_{GI}	消化道吸收分率	口服進入人體的物質不一定會全部被消化道吸收，有些未經吸收就被排泄掉了。消化道吸收分率是指單一物質經由口服進入消化道後，會被吸收的比例。

英文名稱	中文譯名	簡 述
Hazard Index, HI	危害指數	受體經由多重暴露途徑，暴露於污染場址中多種化學物質所造成非致癌健康風險之指標。
Hazard Identification	危害鑑定	危害鑑定是健康風險評估的起始階段，主要是蒐集現有的場址資訊與污染物的歷史檢驗數據，來判定污染物是否超出標準，污染範圍為何，以及是否有受體(Receptors)可能受到該污染物的危害。
Hazard Quotient, HQ	危害商數	受體經由單一暴露途徑，或暴露於污染場址中單一化學物質所造成非致癌健康風險指標。
Human Health Risk Assessment	健康風險評估	為一種評估程序，評估污染物對人體健康造成不良影響之風險。
Indirect Exposure Pathway	非直接暴露途徑	一般非直接暴露途徑是指受體與污染物接觸而造成暴露的介質，並非最初被污染的介質，而是污染物經由不同的傳輸途徑所移動到其他的介質。本評析方法中的非直接暴露途徑則是指受體經由生物性的介質(食物鏈)攝取到污染物，所產生的暴露。
Inhalation	吸入	由鼻腔吸氣的動作。
Intake	暴露劑量	暴露劑量為受體吸收污染物的劑量，在本評析方法中，單位為 mg/kg-day。
Intake Factor	吸收因子	暴露劑量與污染源濃度的比值。
Lifetime Average Daily Dose	終身平均攝取劑量	為暴露劑量或攝取量的一種表示方法，表示受體於一生中平均每日所攝取的污染物劑量。
Log-normal Distribution	對數常態分佈	隨機變數 X, 若滿足 log X 有為常態分佈的性質, 便稱有對數常態分佈。
Lowest Observed Adverse Effect Level, LOAEL	最低明顯反應劑量	毒性測試或與毒性反應相關的觀察研究中，與對照組比較，觀察到受體不良反應所使用之毒性物質最低劑量，或受體所暴露之最低污染物濃度或劑量。
Monte Carlo Simulation	蒙地卡羅模擬	是一種使用統計採樣技術來獲得數學公式解的機率性分佈的方法。
Non-carcinogenic	非致癌性	指暴露於某物質所產生的生物效應並非致癌效應而是其他的生理或病理反應。
Non-carcinogenic toxicity factor	非致癌性毒性因子	又稱參考劑量(Reference Dose，RfD)。它的計算主要是以毒性資料中得到的無明顯不良反應劑量(No-Observed-Adverse-Effect-Level，NOAEL)，最低明顯反應劑量(Lowest-Observed-Adverse-Effect-Level，LOAEL)，或是低基準劑量(Benchmark Dose Low, BMDL)，再考慮所使用科學研究的不確定性 來決定不確定因子

英文名稱	中文譯名	簡　　述
		(Uncertainty Factor)的大小，最後計算出參考劑量(Reference Dose, RfD)。
Non-Observed Adverse Effect Level, NOAEL	無明顯不良反應劑量	於毒性試驗或與毒性反應相關的觀察研究中，與對照組比較，受體沒有發生不良反應所使用之毒性物質的最高劑量，或受體所暴露之最高污染物濃度或劑量。
Non-threshold approach	無閥值方法	指假設導致發生生物效應的機率與暴露劑量成正比增加，但嚴重程度與暴露劑量大小則無關係。這種假設在本健康風險評估評析方法終只用在致癌作用的評估當中。
Normality Test	常態分配測試	測試數據資料的分布是否接近常態分配的數學方法。
Oral	口服	為生物或與醫學領域中使用的辭彙，是表示「經由口腔攝入」的形容詞。
Pilot Study	先驅調查	在進行大規模環境調查之前，先以少量的採樣調查來概略地了解大環境的情況以利進一步進行調查的規劃。
Point of Exposure (Exposure Point)	暴露點	受體與污染物發生接觸的地點。
Potential Chemicals of Concern, PCOCs	可能關切污染物	依照場址的使用歷史與目前運作情況，在場址中所可能存在的污染物。
Probabilistic Risk Assessment	機率性健康風險評估	在風險評估的計算程序中，有引入機率計算與統計的概念者，則稱為機率性風險評估。
Reasonable Maximum Exposure, RME	合理最大暴露量	以合理推測所得受體可能暴露之污染物最大濃度。
Receptors	受體	因暴露於污染物而可能受到不良影響的生物個體。
Reference Dose, RfD	參考劑量	用來評估造成非致癌性不良反應之污染物濃度或毒性劑量。
Risk Based Corrective Action	風險基準矯正行動	以風險概念為基礎的場址整治行動或管理手段。
Risk Characterization	風險特徵描述	綜合暴露評估與劑量反應評估的結果，進行風險的量化的計算過程，除了量化風險之外，並討論評估中所使用的假設、參數與模式不確定性。
Route to Route Extrapolation	吸收途徑外推	將毒性物質於某一吸收途徑所造成的不良反應程度用來預測同一物質於另一吸收途徑所造成的不良反應程度。
Saturation Concentration	飽和濃度	在本評析方法中飽和濃度有兩種意義，一為污染物在水中的溶解度；一為污染物為土壤吸附

英文名稱	中文譯名	簡 述
		或吸收之濃度上限。
Sensitivity	敏感度	參數對於計算結果的影響程度
Sensitivity Analysis	敏感性度析	以數學的觀點來說, 敏感度分析是指模式中參數的改變對於計算結果的影響。若以較廣義的角度來看， 敏感度也可以是模式、資料或評估時所使用的假設的改變對評估結論所產生的影響.
Sensitivity Ratio, SR	敏感度比	SR 可以下列公式計算： $SR = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R_1}100\%}{\frac{P_2 - P_1}{P_1}100\%}$ 其中 R_1 為原風險評估中所計算出的結果(致癌風險或非致癌風險)，R_2 則為參數變更後的風險計算結果(致癌風險或非致癌風險)。P_1 為原風險評估中所使用參數，P_2 則為參數變更後的數值。這樣的計算節果可以告訴我們參數值每變動百分之一，風險值的相對變動程度為何。SR 的值越大，表示風險變動的程度越大，而該參數對於風險計算的影響也越大。
Simulation	模擬	綜合現有資訊與假設對可能發生的結果進行機率性的探討。
Site Conceptual Model	場址概念模式	根據現場調查與文獻蒐集將場址的污染狀況、週邊環境與地質水文狀況利用文字、表格或地圖做一整合性的說明。
Site Specific Parameters	場址特異性參數	以個別場址調查結果或該區域調查資料為依據所決定之風險計算使用參數，相對於場址特異性參數者即為風險評估之預設參數。
Solubility	溶解度	定溫下，定量溶劑所能溶解溶質之最大量稱為溶解度，飽和溶液之濃度即為溶解度。
Source Area	污染源	場址中土壤與地下水污染濃度最高之處，或非水相液存在之處。
Standard Deviation	標準偏差	度量統計數據數值相對於平均值之分散或變異程度的參數，標準偏差可以下列公式計算： $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})}{n}}$ 其中 x_i 為各數據之數值, $\bar{x}$ 為數據的平均值，n

英文名稱	中文譯名	簡　　述
		則為數據的個數。
Threshold approach	閥值方法	假設暴露劑量超過一個定值，則受體產生生物效應(或不良健康反應)且反應的程度與暴露劑量成正相關。
Tier 1 Evaluation	第一層次風險評估	以健康風險評估法則為基礎，利用大多為預設數值之參數來進行風險計算。使用的預設數值通常較為保守，且假設受體於污染源所在區域與污染物發生接觸。
Tier 2 Evaluation	第二層次風險評估	以健康風險評估法則為基礎，利用場址調查所得之參數來進行風險計算。對於環境介質中污染物濃度的估計可採用統計的法則，而不一定要使用測得之最大濃度，而根據實際的狀況，亦能將暴露點的設定移至污染源之外。
Tier 3 Evaluation	第三層次風險評估	以健康風險評估法則為基礎，利用較為先進的評估與計算工具，來進行風險計算。第三層次風險評估所計算之風險較前兩個層次更符合場址的狀況。但相對的，第三層次所需的場址參數調查較第一、第二層次更多更仔細，需要耗費的時間與經費亦可觀。
Toxicity Factor	毒性因子	以毒性物質之毒理實驗結果配合不確定因子的使用，以數值的方式表示該物質的毒性，毒性因子通常為劑量反應評估最後獲致的結果。毒性因子的估計以其致癌性分為致癌毒性因子(致癌斜率)與非致癌毒性因子(非致癌參考劑量)。
Try and Error	試誤法	試誤法的概念是使用在整治目標的建立上，將不同之假設關切污染物濃度代入模式中重新進行評估計算，輸入之濃度可以上下調整，以求得不超過整治目標的最大污染物濃度，即可為該關切污染物之整治目標。
Uncertainty	不確定性	為評估中因為資訊的不充足所無法預測的變化。
Uncertainty Analysis	不確定性分析	討論評估結果不確定性與變異性的方法
Variability	變異性	群體中存在的差異性，這樣的差異性不會因為採樣的數目或資料的數量增加而造成差異。

附錄二　預設之宿命傳輸模式參數

本附錄中索引用之地質水文參數為第一層次風險評估中的預設數值，其設定或爰引的原則與考量，可以參考「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法參數使用指引」。若該參數指引更新時，亦以新版指引所提供之參數為引用之第一優先。

參數代號	參數名稱	數值	單位	參考資料
d	表土深度	100	cm	ASTM 1995
δ_{air}	污染源上方空氣混合區高度	200	cm	ASTM 1995
δ_{gw}	地下水混合層高度	200	cm	ASTM 1995, ASTM 2000
f_{oc}	土壤中有機碳含量	依土壤性質而不同	g-carbon/g-soil	附錄六表九
h_{cap}	毛細管邊緣高度 (Capillary Fringe Height)	5	cm	ASTM 1995
h_v	通氣層厚度 (Vadose Zone Height)	L_s-h_{cap}	cm	ASTM 1995
I	入滲率 (Infiltration Rate)	依土壤性質而不同	cm/year	附錄六表十
L_s	土壤污染源頂端深度	視場址情況而定	cm	場區土壤污染源深度
L_w	地下水高度	300/或視場址情況而定	cm	地下水位高度
P_e	揚塵逸散速率 (particulate emission rate)	6.9×10^{-14}	g/cm^2-sec	ASTM 1995
θ_{acap}	毛細管邊緣空氣含量	θ_T-θ_{wcap}	cm^3-water/cm^3-soil	ASTM 1995
θ_{as}	土壤中空氣含量	θ_T-θ_{WS}	cm^3-air/cm^3-soil	ASTM 1995
θ_T	孔隙度	依土壤性質而不同	Cm^3/cm^3-soil	附錄六表九
θ_{wcap}	毛細管邊緣水分含量	$0.9\theta_T$	cm^3-air/cm^3-soil	ASTM 1995
θ_{ws}	土壤中水分含量	依土壤性質而不同	cm^3-water/cm^3-soil	附錄六表九之體積水分含量
ρ_s	土壤密度(Bulk Density)	依土壤性質而不同	g/cm^3	附錄六表九
τ	平均蒸氣流時間(Averaging time for vapor flux)	7.88×10^8	sec	ASTM 1995
U_{air}	污染源上方風速	200	cm/sec	申雍[a]
U_{gw}	地下水流速	2500/或視場址情況而定	cm/year	ASTM 1995, ASTM 2000/附錄六表十
W	污染源與風向或地下水流平行之最大寬度	1500/或視場址情況而定	cm	現地測量

參考資料

1. ASTM 1995, ASTM, E1739-95 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites.
2. ASTM 2000, E2081-00 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action.
3. 申雍, 台灣地區氣候與氣象環境之變遷與因應對策, 近代作物科學研討會.

附錄三　預設之受體暴露量計算參數

本附錄中索引用之受體暴露參數為第一層次風險評估中的預設數值，其設定或爰引的原則與考量，可以參考「土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法參數使用指引」。若該參數指引更新時，亦以新版指引所提供之參數為引用之第一優先。

表一、第一層次與第二層次受體之暴露參數設定

參數代號	參數名稱	數值	單位	參考資料
AF	土壤對皮膚之吸附係數	成人 0.07/孩童 0.2	mg/cm^2	USEPA 2004
AT	暴露發生之平均時間(致癌)	27,375(365 天×75 年)	day	中鼎公司與衛適密 1992
	暴露發生之平均時間(非致癌)	ED×EF	day	國人平均壽命統計
B	呼吸速率	成人 1/孩童 0.58 (洗澡時，呼吸速率較高)	$m^3/hour$	Andelman 1990/衛適密 1990 (經單位轉換)
BW	體重	成人 61.67/孩童 17[a]	kg	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005
ED	暴露期間，暴露的總年數	成人住宅區 24/成人工作區 25/孩童住宅區 6[b]	year	中鼎公司與衛適密 1992 土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005
EF	暴露頻率，一年暴露的天數	住宅區 350/工商業區 250	day/year	中鼎公司與衛適密 1992
EV_{shower}	淋浴次數	1[c]	1/day	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005
EV	事件發生頻率(誤食土壤)	1[g]	1/day	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005
f_{sa}	上臂體表面積與身體表面積比	0.2	無單位	USEPA 1997 Exposure handbook
IR_{inh}	呼吸速率	成人 17.14/孩童 13.95	m^3/day	衛適密 1990
$IR_{oral-soil}$	攝食土壤速率	成人 100/孩童 200	mg/day	USEPA 1991
$IR_{oral-water}$	飲水量	成人 3/孩童 1.3[d]	L/day	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005/ 中鼎公司與衛適密 1992
SA	身體表面積	成人住宅區 17300 /孩童住宅區 11400[e]	cm^2	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005

表一、第一層次與第二層次受體之暴露參數設定(續)

參數代號	參數名稱	數值	單位	參考資料
t_1	每次淋浴時間(一次經皮膚接觸的時間)	0.5[f]	hour	土壤地下水風險評估暴露參數調查報告 2005
t_2	每次淋浴後仍待在浴室中的時間	0.2[f]	hour	Andelman 1990

[*]由於致癌之機制為一但吸收至癌物質，終生都有致癌的可能性(暴露量大則可能性大)，因此於計算時以終生平均暴露劑量為準，致癌平均時間即為預估之壽命。

[a.]成人的體重為調查平均值，但兒童則為體重分布的第 5%百分位值。通常較低體重會造成吸收劑量的高估，因此在兒童(敏感受體)的部分，以較低的值為預設參數。

[b.]對於住宅區的居住時間，依 2005 年的調查結果所計算出的上信賴區間(30.27 年)與 1992 年的調查結果建議值(30 年)相近，因此沿用 30 年為預設數值。對於工作時間，1992 年的建議值(25 年)則較調查結果的 95%百分位(12.47)長許多。但由於所調查的是「從事目前工作幾年」，其最後停留於同一工作的時間長度可能更長，不能確定，所以仍沿用 1992 年之建議值。

[c.]每天洗一次澡是一般風險評估的設定，也接近 2005 年調查結果之平均值。若希望以較保守的 95%百分位來估計，則洗澡的次數將大於一次(1.58)。

d2005 年調查結果.成人飲水量的 95%百分位為每日 2.9 公升。

[e]成人的體表面積與 USEPA 之估計值 18000 相近(USEPA 2004)，但兒童則較 USEPA 建議值大許多(6600, USEPA 2004)。但由於較大體表面積會造成較大的吸收量，因此預設值暫以 11400 為設定值。

[f].t1 預設數值為 2005 年調查數值分布的第 95 百分位， t2 為國外文獻的預設值，應於獲得本土數據後更改。

[g].2005 年調查結果，「兒童一星期接觸泥土或草皮次數」數值分布中第 95%百分位為 8.39。已超過一週七日的上限，因此以一週七日為估計基礎，預設數值為 1event/day。

表二、各化學物質的皮膚吸收分率

關切物質	皮膚吸收分率 (ABS_d)	參考資料
砷(Arsenic)	0.03	Wester, et al. 1993b
鎘(Cadmium)	0.001	Wester, et al. 1992a, USEPA 1992
克氯丹 (Chlordane)	0.04	Wester, et al. 1992b
2,4-二氯苯氧醋酸（2,4-Dichlorophenoxyacetic acid, 簡稱2,4-D）	0.05	Wester, et al. 1996
雙氯-雙苯-三氯乙醛 」(Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane, DDT）	0.03	Wester, et al. 1990
2,3,7,8-四氯聯苯戴奧辛與其他戴奧辛類物質 (土壤有機質含量不大於0.1)	0.03	USEPA 1992
2,3,7,8-四氯聯苯戴奧辛與其他戴奧辛類物質 (土壤有機質含量大於於0.1)	0.001	USEPA 1992
靈丹(Lindane)	0.04	Duff and Kissel, 1996
苯甲基苯駢菲焦油腦(benzo(a)pyrene)與其它多環芳香族碳氫化合物(PAHs)	0.13	Wester, et al. 1990
多氯聯苯混合物(Aroclors)	0.14	Wester, et al. 1993b
五氯酚(Pentachlorophenol)	0.25	Wester, et al. 1993c
其他半揮發性有機化合物（Semi-Volatile Organic Compounds，SVOCs)	0.1	USEPA 2004
其他揮發性有機化合物（Volatile Organic Compounds，VOCs)	0.1	Environmental Agency, 2004

表三、建築物室內參數

參數代號	參數名稱	數值	單位	參考資料
C_{soil}	土壤中關切污染物濃度	視場址情況而定	mg/kg	現地土壤污染物分析結果
W	污染源與風向或地下水流平行之最大寬度	視場址情況而定	meter	現地分析結果
L_s	土壤污染源頂端深度	視場址情況而定	cm	現地分析結果
F_w	水流速率	300	Liter/hour	Lee et al, 2002
V_a	浴室容積	3,000	Liter	自行估計*
WHF	每天用水流量	1,000	Liter/day	黃金山等 2003**
HV	室內容積	307,937	Liter	內政部營建署**
MC	空氣混合係數	0.15	Unitless	USEPA 1987
ER	室內換氣率	21.6	Air changes/day	ASHEAE 1985

* Lee, et al, 2002 估計為 1200Liter，惟以一般半套衛浴設備所需空間，1M×1.5M×2M=3M^3 估計，該值過於保守故以 3,000 Liter 作為基準；另 Chpapter 20 Total Exposure to Volatile Organic Compounds In Potable Water 針對澳洲的調查，浴室空間約為 10M^3，本手冊所建議參數應為可接受保守建議

**本研究之調查結果住宅區用水每人每日為 251 公升，以每戶四人計，則每日水流量約為 1000 公升。

***根據內政部營建署台閩地區住宅概況網頁，(www.cpami.gov.tw/pws/pws1_qq8.php)由民國八十年至九十年間對住宅使用執照登記情形的統計表可以得知，十年平均每戶住宅樓地板面積為 146.63 平方公尺，假設公共設施佔總樓地板面積的 30%，則住宅實際使用私人空間為 102.64 平方公尺。若以每層樓高為 3 米計算，則屋內容積為 307.94 立方公尺(合 307,937 公升)。

表四、化學物質特異性參數

參數代號	參數名稱	數值	單位	參考資料
ABS_d	皮膚吸收分率	依化學物特性而有不同	Unitless	註一
ABS_{GI}	消化道吸收分率	視化學物質而定	m^3/day	註一
孙B_{dermal}	關切污染物對於角質層對表皮層的相對滲透係數	依化學物特性而有不同	Unitless	註一
D_{air}	空氣中逸散係數	視化學物質而定	cm^2/sec	註二
D_{wat}	水中逸散係數	視化學物質而定	cm^2/sec	註二
FA	吸收分率	依化學物特性而有不同	Unitless	註一
H	亨利係數	視化學物質而定	cm^3-water/cm^3-air	註二
K_d	土壤地下水分布係數	視化學物質而定	L/Kg	註三
k_{oc}	碳水吸收係數	視化學物質而定	cm^3-water/g-carbon	註二
K_p	滲透係數	依化學物特性而有不同	cm/hour	註一
f	蒸散分率	0.75	無單位	Andelmen 1990
闪τ_{event}	各關切污染物對皮膚吸收的延遲時間	依化學物特性而有不同	hour	註一

註一：USEPA, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC, 2004

註二：USEPA, Preliminary Remediation Goal PRG Intercalc Tables: Physical Chemical Data, USEPA Region 9 Office, 2004

註三：對有機物質來說，Kd 值為土壤中有機碳含量(f_{oc})與碳水吸收係數(K_{oc})的乘積，金屬物質的 Kd 值則可參考以下文獻：

USEPA, Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities Volume Two, Office of Solid Waste and Emergency Response and USEPA Region 6 Office, 1998

參考資料

USEPA 1992, Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications, Office of Health and Environmental Assessment, Washington, D.C. 1992

USEPA 2004, Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington DC

Wester, R.C., Maibach, H.I., Bucks, D.A.W., Sedik, L., Melendres, J., Laio, C.L., and DeZio, S. (1990) Percutaneous Absorption of [14C]DDT and [14C]Benzo(a)pyrene from Soil. Fund. Appl. Toxicol. 15:510-516.

Wester, R.C., Maibach, H.I., Sedik, L., Melendres, J., and Wade, M. 1993a In-vivo and In-vitro Percutaneous Absorption and Skin Decontamination of Arsenic from Water and Soil. Fund. Appl. Toxicol. 20:336-340.

Wester, R.C., Maibach, H.I., Sedik, L., Melendres, J., and Wade, M. 1993b Percutaneous Absorption of PCBs from Soil: In-vivo Rhesus Monkey, In-vitro Human Skin, and Binding to Powered Human Stratum Corneum. J. Toxicol. Environ. Health 39:375-382.

Wester, R.C., Maibach, H.I., Sedik, L., Melendres, J., DeZio, S., and Wade, M. 1992a In-vitro Percutaneous Absorption of Cadmium from Water and Soil into Human Skin. Fund. Appl. Toxicol. 19:1-5.

Wester, R.C., Maibach, H.I., Sedik, L., Melendres, J., Laio, C.L., and DeZio, S. 1992b Percutaneous Absorption of [14C]Chlordane from Soil. J. Toxicol. Environ. Health 35:269-277.

Wester, R.C., Maibach, H.I., Sedik, L., Melendres, J., Wade, M, and DeZio, S. 1993c Percutaneous Absorption of Pentachlorophenol from Soil. Fund. Appl.

Toxicology 20: 68-71.

Wester, R.C., Melendres, J., Logan, F., Hui, X. , and Maibach, H.I. 1996 Percutaneous Absorption of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid from Soil with Respect to the Soil Load and Skin Contact Time: In-vivo Absorption in Rhesus Monkey and in Vitro Absorption in Human Skin. J. Toxicol. Environ. Health 47:335-344.

Duff, R.M. and Kissel, J.C. 1996 Effect of Soil Loading on Dermal Absorption Efficiency from Contaminated Soils. J. Tox. and Environ. Health 48:93-106.

附錄四　常態分佈測試

以下將介紹兩種常態分佈測試方法：W Test 與 D'Agostino Test。這兩種方法主要是為了評估所得數據是否符合或接近常態分佈的假設。前者適用於資料筆數小於五十者，後者則適用於資料筆數大於等於五十者。

1. W Test

W Test 是 Shaprio 與 Wilk 兩位統計學家於 1965 年所發表的統計學方法，長於歐美環境資料分析中使用。以下將本分析方法的數學計算部分分步驟簡述於下：

步驟一、將資料依數值由小至大排列，假設有 n 筆資料，每筆以 y_i(i=1~n)來表示，則資料的排列可以用以下的數學式子來表示：

$$y_1 \leq y_2 \leq \ldots\ldots \leq y_n$$

步驟二、計算變異係數(S^2)

$$S^2 = \sum_1^n (yi - \bar{y})^2$$

步驟三、計算 k 值

若 n 為奇數，則 k=(n-1)/2，若為偶數，則 k=n/2。

步驟四、計算 W 值

$$W = \frac{1}{S^2}(\sum_1^k a_i (y_{(n-i+1)} - y_i))^2$$

其中 a_i 值可以根據資料筆數(n)與序數(i)在許多統計教科書中找到(例如 Gilbert 1987)，或是直接由 Shapiro 與 Wilk 所發表的論文中得到(Shaprio and Wilk, 1965)。

步驟五、比較實際 W 值與理想值($W_{0.05}$)的差異

同樣的，根據資料筆數(n)可以在上述統計參考資料中找到 W 的臨界值 $W_{0.05}$(以 α=0.05 來判定)。若 W≥ $W_{0.05}$ 則表示數值分佈呈現常態分佈，反之則否。

2. D'Agostino Test

D'Agostino Test 是為了補足 W Test 在資料筆數上的限制(小於五十筆)所產生的統計方法，於 1971 年由 D'Agostino 提出。以下將本分析方法的數學計算部分分步驟簡述於下：

步驟一、將資料依數值由小至大排列，假設有 n 筆資料，每筆以 y_i(i=1~n)來表示，則資料的排列可以用以下的數學式子來表示：

$$y_1 \le y_2 \le \ldots\ldots \le y_n$$

步驟二、計算標準差(S)

$$S = \left[\frac{1}{n} \sum_{1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \right]^{1/2}$$

步驟三、計算 D 值(數值需算至小數五位以後)

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[i - \frac{1}{2}(n+1) \right] y_i}{n^2 s}$$

步驟四、將 D 值換算成統計指標 Y

$$Y = \frac{D - 0.28209479}{0.02998598/\sqrt{n}}$$

根據資料筆數(n)可以在上述統計參考資料中找到 Y 的臨界值 Y0.025(以雙尾的 α=0.05 來判定)。若 Y≤Y0.05 則表示數值分佈呈現常態分佈，反之則否。

參考資料

Gilbert, Robert O. 1987. Statistical Method for Environmental Pollution Monitoring. Van Nostrand Reinhold Co., New York.

Shapiro, S. S. and Wilk, M. B. 1965. An Analysis of Variance Test for Normality. Biometrika 52, 591-611.

D'Agostino, Ralph B. 1971. An Omnibus Test of Normality for Moderate and Large Size Samples. Biometrika 58, 341-348.

附錄五　如何進行參數敏感性分析
(Sensitivity Analysis)

一、敏感性分析於風險評估中之目的

敏感性分析於風險評估中可分為兩大類，一是評析風險評估中各暴露途徑所造成之風險對總風險的比例；一是評析於風險評估計算中所使用的參數對風險計算的影響。這兩項分析結果有助於後續對於場址進行風險管理的決策制定，若是需要進行第二或第三層次的風險評估，依據敏感性分析的結果，亦可以將資源利用於調查對風險有較大影響的參數或暴露途徑上，有效率地降低不確定性以提升風險評估結果的品質。

二、決定性風險評估(Deterministic Risk Assessment)中之敏感性分析 (Sensitivity Ratio and Sensitivity Score)

依據各層次風險評估數據品質的不同，所能執行的敏感性分析也有所不同。由於第一第二層次的風險評估所使用的為單點估計(point estimation)的決定性風險評估(Deterministic Risk Assessment)方法，各參數的統計分佈資訊可能較不齊備，因此建議使用敏感性比(Sensitivity Ratio, SR)來作為評估單一參數的指標，而各暴露途徑或單一污染物所占總風險的比例則為評估各暴露途徑的一個指標。以下就這兩類敏感性分析進行說明：

1)暴露途徑或污染物所佔風險百分比：

各暴露途徑或污染物所佔總風險的百分比可以以下的公式計算出來：

$$\text{風險百分比} = \frac{R_i}{R_{total}} \times 100\%$$

(公式附錄 5-1)

其中 R_i 為各暴露途徑或各污染物的風險值(致癌或非致癌)，R_{total} 則為風險評估的總風險值。

以此計算方式所獲得之百分比越大者，表示此暴露途徑對於總風險值的影響越大，因此在後續的風險管理或是下一層次的風險評估中也越為重要。

2)以下就 SR 的計算與判別做一說明：

$$SR = \frac{\frac{R_2 - R_1}{R_1}100\%}{\frac{P_2 - P_1}{P_1}100\%}$$

(公式附錄 5-2)

其中 R_1 為原風險評估中所計算出的結果(致癌風險或非致癌風險)，R_2 則為參數變更後的風險計算結果(致癌風險或非致癌風險)。P_1 為原風險評估中所使用參數，P_2 則為參數變更後的數值。這樣的計算節果可以告訴我們參數值每變動百分之一，風險值的相對變動程度為何。SR 的值越大，表示風險變動的程度越大，而該參數對於風險計算的影響也越大。對於風險影響較大參數，亦為後續風險管理或下一層次風險評估調查時所應著重的方向。

因為參數與風險間的相關性不一定為線性，針對同一個參數來說，SR 值又分為兩種，一為小範圍 SR(Local SR)，一為大範圍 SR(Range SR)。小範圍 SR 的計算方式為將參數變動±5%，來評估風險值的變化，而大範圍的 SR 計算方式則為將變動參數變動±50%或是其最大與最小可能數值來看風險在參數變動範圍中的變化。在進行各參數敏感性分析時，這兩種敏感性分析都應該執行。

由於 SR 所代表的為數值變化比例對於最終風險的影響，但在其計算的設計中並不包含真實情況下，參數可能的變化範圍。若有足夠的資訊來計算參數的平均質與標準差，則可以增加計算敏感性積分(Sensitivity Score, SS)：

$$SS = SR \times \frac{\sigma}{\mu} \quad 或 \quad SS = SR \times \frac{(Max - Min)}{\mu} \qquad (公式附錄 5-3)$$

其中 SS 為敏感性積分，SR 為敏感性比值，σ為參數分佈的標準差，μ為參數的平均值，Max 為參數分佈的最大值，Min 為參數分佈的最小值。這樣的計算除了考慮參數每變化百分之一對風險的影響之外，更利用參數的實際分佈情況將 SR 加以權重。如果兩個參數具有相同的 SR 但是其中一參數實際分佈範圍較廣(σ/μ值較大)，則所得之 SS 值會較實際分佈範圍較窄的參數來得高。則風險管理或下一層次風險評估的資源應著重於 SS 值教高者。唯在決定性風險評估中，礙於參數統計資料取得的困難，SS 值較難計算出來，因此 SS 的計算在這裡並非必要。

三、機率性風險評估(Probabilistic Risk Assessment)中的敏感性分析(Correlation Coefficient)

第三層次的風險評估所使用的為機率性風險評估(Probabilistic Risk Assessment)方法，各參數的統計分佈資訊可能較齊備，因此可用來進行敏感性分析。

1)暴露途徑或污染物所佔風險百分比：

就暴露途徑與污染物所佔風險的比例來說，敏感性分析仍是以公式 5-1 的方式來計算，但是由於機率性風險評估中的風險是一個分部，而非定值，因此，在計算風險比例時建議使用風險值的中位數與第九十五百分位數(95% Percentile)，來分別進行比例的計算。兩種不同的計算結果可以提供各暴露途徑或污染物在風險管理上一個更全面性的參考。

2)相關係數

相關係數(Correlation Coefficient)是指變數與應變數相互關聯的程度，在風險評估的計算中，變數即為計算中不同的參數，而應變數則為最後計算中的風險值。

在本附錄中，提供兩種相關係數的計算方式：斯皮爾曼等級相關係數(Spearman Rank Correlation Coefficient)與皮爾遜積差相關係數(Pearson's Correlation Coefficient)的計算方式。

a. 斯皮爾曼等級相關係數(Spearman Rank Correlation Coefficient, $r_{spearman}$)：

$$r_{spearman} = 1 - 6\sum \frac{d^2}{N(N^2-1)} \quad \text{(公式附錄 5-4)}$$

其中 d 參數實際的大小排列與以此參數所計算出的風險排列之差異，N 是樣品個數。斯皮爾曼等級相關係數主要是探討當參數與風險的關係不必然為線性時，兩者的相關性。相關係數越高，表示參數與風險的關係越高(但不必然是直線形)。

b. 皮爾遜積差相關係數(Pearson's Correlation Coefficient, $r_{pearson}$)

$$r_{pearson} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\left[\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})\right]^{0.5}} \quad \text{(公式附錄 5-5)}$$

其中 X_i 為單一參數的值，$\overline{X}$ 為參數的平均值，Y_i 為以 X_i 所計算出的風險值，$\overline{Y}$ 為風險的平均值。皮爾遜積差相關係數所評估的則為風險與參數的線性相關性，若係數為負值，則為負相關，若係數為正值，則為正相關。另一方面，相關係數的絕對值(或平方)越高，表示的線性相關性越高。

參考資料

USEPA Risk Assessment Guidance Part 3 Part A, Process for Conducting Probabilistic Risk Assessment, Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC 20460.

附錄六 各項工作檢查清單

表一、關切污染物判定表

可能關切污染物		一年內檢出最大值*			管制標準	是否列為關切污染物
名稱	CAS 編號	環境界質	日期	濃度		

*其他歷史檢測數據報告應以附件方式列於評估報告後

表二、致癌毒性因子判定與援引

可能關切污染物		致癌物判定			致癌斜率					
					口服		吸入		皮膚吸收	
名稱	CAS 編號	IRIS 致癌分類	IARC 致癌分類	是否為致癌物	數值	援引之資料庫*	數值	援引之資料庫*	數值	援引之資料庫*

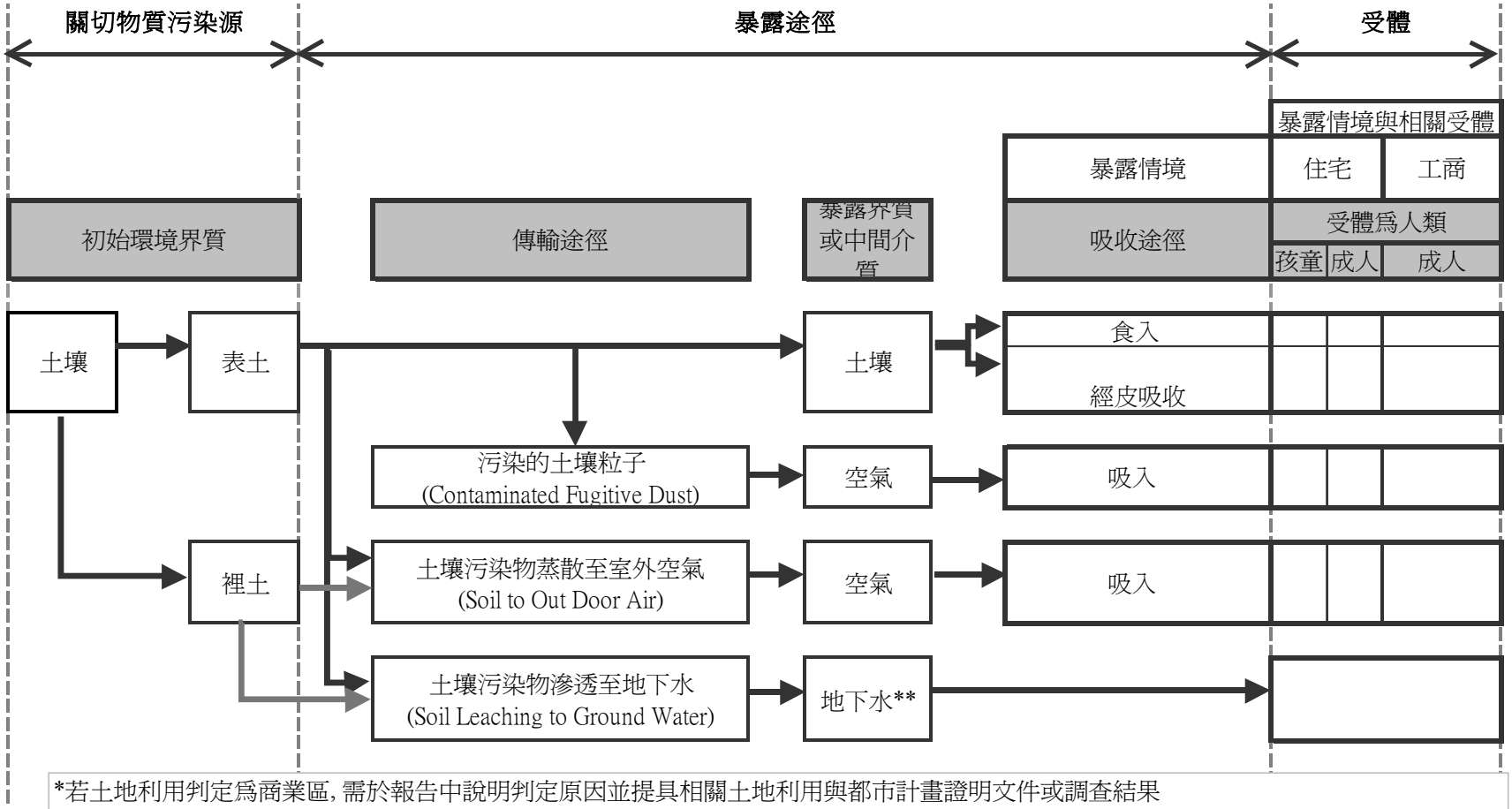
*若數值係以其他暴露途徑毒性因子求得，則須注明評估報告中敘述計算過程之頁數

表三、非致癌毒性因子判定與援引

可能關切污染物		非致癌參考劑量					
名稱	CAS 編號	口服	援引之資料庫*	吸入	援引之資料庫*	皮膚吸收	援引之資料庫*

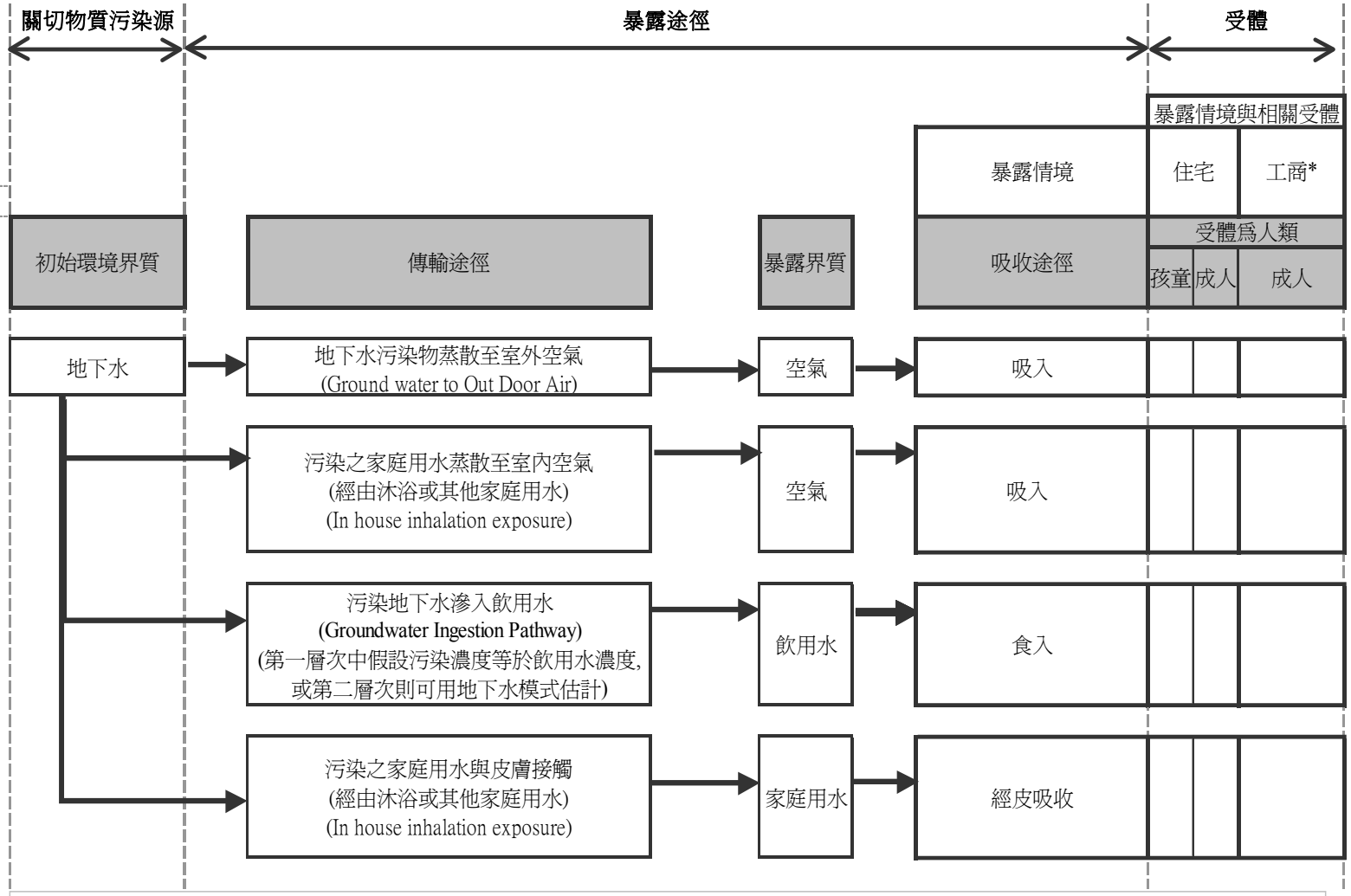
*若數值係以其他暴露途徑毒性因子求得，則須注明評估報告中敘述計算過程之頁數

表四、第一與第二層次暴露情境判定表(土壤)



*若土地利用判定爲商業區, 需於報告中說明判定原因並提具相關土地利用與都市計畫證明文件或調查結果
**若此途徑可能發生, 於箭號後空隔打勾並填寫地下水暴露情境判別表
∨爲受體於設定暴露情境下接觸關切物質的可能暴露途徑
x 則爲判定不發生之暴露途徑

表五、第一與第二層次暴露情境判定表(地下水)



*若土地利用判定爲商業區, 需於報告中說明判定原因並提具相關土地利用與都市計畫證明文件或調查結果
∨爲受體於設定暴露情境下接觸關切物質的可能暴露途徑
x 則爲判定不發生之暴露途徑

表六、受體參數設定(住宅區)

參數類型	定義	住宅			
		成人		兒童	
		數值	參考資料	數值	參考資料
一般暴露參數	ED, 暴露期間 (年)				
	EF, 暴露頻率 (日/年)				
	ET, 暴露時間 (小時)				
	BW, 體重 (公斤)[c]				
	AT, 致癌平均時間 (天)				
	AT, 非致癌平均時間 (天)				
吸入暴露	IR_{inhal}, 呼吸速率 (立方公尺/天)				
	B, 呼吸速率 (立方公尺/小時)				
食入暴露	$IR_{oral\text{-}soil}$, 攝食土壤速率 (毫克/天)				
	$IR_{oral\text{-}water}$, 飲水量 (升/天)				
皮膚接觸	SA, 身體表面積 (平方公分)				
	AF, 土壤對皮膚之吸附係數 (毫克/平方公分)				
	EV, 土壤接觸次數				
	f_{sa}, 上臂體表面積與身體表面積比				
	t_1, 淋浴時間 (小時)[d]				
	t_2, 沐浴後仍停留浴室時間(小時)				
	EV_{shower}, 淋浴次數				

表七、受體參數設定(工商業區)

參數類型	定義	工商業區	
		成人(區內工作者)	
		數值	參考資料
一般暴露參數	ED, 暴露期間 (年)		
	EF, 暴露頻率 (日/年)		
	ET, 暴露時間 (小時)		
	BW, 體重 (公斤)[c]		
	AT, 致癌平均時間 (天)		
	AT, 非致癌平均時間 (天)		
吸入暴露	IR_{inhal}, 呼吸速率 (立方公尺/天)		
	B, 呼吸速率 (立方公尺/小時)		
食入暴露	$IR_{oral\text{-}soil}$, 攝食土壤速率 (毫克/天)		
	$IR_{oral\text{-}water}$, 飲水量 (升/天)		
皮膚接觸	SA, 身體表面積 (平方公分)		
	AF, 土壤對皮膚之吸附係數 (毫克/平方公分)		
	EV, 土壤接觸次數		
	f_{sa}, 上臂體表面積與身體表面積比		
	t_1, 淋浴時間 (小時)[d]		
	t_2, 沐浴後仍停留浴室時間(小時)		
	EV_{shower}, 淋浴次數		

表八、土壤分類

統一土壤分類法(United Soil Classification System)									
土壤名稱與特性							分類符號	特性	簡易土壤分類
特性	實驗室過篩標	特性	實驗室過篩標準		徑粒分佈判斷	可使用之預設值分類			
粗粒土壤 (Coarse)	50%以上的土粒大於200號篩 (No. 200 US Sieve Size)	石礫 (Gravel)	砂礫[a]成分大於沙土[b]	細砂成分不大於5%	C_U[c]>4, 和 1<Cc[d]<3	無說明	GW	徑粒分佈良好礫石與砂礫, 極少細砂存在	A. 砂石質土壤與石礫
					Cu[c] < 4 或 1>C_C[d]>3		GP	徑粒分佈不佳礫石與砂礫, 極少細砂存在	
				細砂成分大於12%	無說明	I_p[e] < 4	GM	泥礫與泥質砂礫	
						I_p[e] >7	GC	黏土礫或黏土質砂礫	
		砂土 (Sand)	砂礫[a]成分小於沙土[b]	細砂成分不大於5%	CU[c]> 6, 和 1<Cc[d]<3	無說明	SW	徑粒分佈良好礫石與砂礫, 極少細砂存在	
					不符SW之標準		SP	徑粒分佈不佳礫石與砂礫, 極少細砂存在	
				細砂成分大於12%	無說明	I_p[e] < 4	SM	泥質沙土	
						I_p[e] >7	SC	黏土質沙土	B. 坋質黏土或砂質黏土
細礫 (Fine Grained)	大於50%的土粒小於200號篩 (No. 200 US Sieve Size)	坋土與黏土 (Silts and clays)	液性限度 (Liquid Limit, LL) < 50	-	-	I_p[e] < 4	ML	無機泥土, 具輕微塑性之泥質或黏土質細沙	
				-	-	I_p[e] >7	CL	無機黏土, 低塑性之泥質黏土或砂質黏土	
				-	-	(烘箱乾燥後之LL)/(未乾燥之LL)<0.75	OL	低塑性有機泥土或泥質黏土	
		坋土與黏土 (Silts and clays)	液性限度 (Liquid Limit, LL) >= 50	-	-	I_p[e] < 4	MH	高塑性之無機泥土	
				-	-	I_p[e] >7	CH	高塑性之無機黏土	C. 坋質土或黏土
				-	-	(烘箱乾燥後之LL)/(未乾燥之LL)<0.75	OH	高塑性之有機黏土	
富含有機質之土壤						含大量有機質(如腐質土)	Pt	泥煤與其他高有機質土壤	

[a]砂礫(sand)爲能通過3英吋(75毫米)孔徑的細篩但無法通過四號篩(孔徑4.75毫米)之土壤顆粒(ASTM 2000)

[b]砂土(sand)爲可以通過四號篩(4.75毫米孔徑)但無法通過二百號篩(75微米孔徑)

[c]$C_u=D_{60}/D_{10}$, D_{60}爲過篩時超過60%的土壤顆粒無法通過篩孔的篩面孔徑, D_{10}爲過篩時超過10%的土壤顆粒無法通過篩孔的篩面孔徑

[d]$Cc=(D_{30})^2/(D_{10}xD_{60})$, D_{30}爲過篩時超過30%的土壤顆粒無法通過篩孔的篩面孔徑, D_{10}爲過篩時超過10%的土壤顆粒無法通過篩孔的篩面孔徑, D_{60}爲過篩時超過60%的土壤顆粒無法通過篩孔的篩面孔徑.

[e]Ip爲塑性指數(Plasticity index)之代號

表九、地質與土壤特性與參數表

相關參數定義	相關參數簡稱	簡易土壤分類之預設值*			風險評估模式中使用數值		場址數據檢測方式	
		A. 砂石質土壤與石礫	B. 坋質黏土或砂質黏土	C. 坋質土或黏土	數值	資料來源	方法	資料來源
土壤密度 (bulk density)	ρ_s	1.4	1.6	1.8			ASTM D2937-00	ASTM 2000a
土粒密度 (specific gravity, particle density)	p	2.65	2.65	2.65			ASTM D 854-00	ASTM 2000b
孔隙度 (porosity)	θ_T	0.43	0.43	0.43				
土壤中水分含量(体積含水量) (volumetric water content)	θ_{ws}	0.12	0.15	0.25				
重量含水量 (gravametric water content)	w_{sg}	-	-	-			NIEA S280.61C	環檢所91年公告方法
土壤中有機碳含量(有機碳濃度分率) (organic carbon fraction)	f_{oc}	0.002	0.0025	0.003			ASTM F1647-99	ASTM 1999a
毛細邊緣深度 (depth to the capillary firnge)	h_{cap}	5cm	5cm	5cm				ASTM, 1995, ASTM, 2000c
地下水位(地下水深度) (depth to the groundwater level)	h_w						設井或採樣記錄	環保署91年行政規則
土壤分類	-	A	B	C			見表3.3.3-5D	ASTM D2488-00

*三大分類見表2, 分析方法參考 ASTM D2488-00

表十、水文(地下水)特性與參數表

相關參數定義	相關參數簡稱	簡易土壤分類之預設值*			風險評估模式中使用數值		場址數據檢測方式	
		A. 砂石質土壤與石礫	B. 坋質黏土或砂質黏土	C. 坋質土	數值	資料來源	方法	資料來源
水力傳導係數 (Hydraulic conductivity)	k	5.83e-3(cm/sec)	4.17e-5(cm/sec)	1.67e-5(cm/sec)			ASTM 5084-00	ASTM 2000
達西地下水流速 (Darcy Ground Water Velocity)	U_{gw}	$U_{gw} = \frac{k}{n \times \theta_T}$ n：水力梯度						
入滲量 (Ground Water Infiltration Rate)	I	31.75	20.32	6.35			ASTM 3385-03	ASTM 2003

*三大分類見表2, 分析方法參考 ASTM D2488-00

表十一、受體暴露量計算結果總表

受體暴露濃度 (mg/kg-day)		受體類型_____.							
		土壤				地下水			各關切污染物為受體吸收之總量
		吸入		食入	皮膚接觸	吸入	食入	皮膚接觸	
關切污染物	CAS編號	土壤揚塵	污染空氣	污染土壤	污染土壤	污染空氣	污染地下水	污染地下水	

表十二、非致癌風險計算摘要表格

非致癌風險		受體類型								
		土壤				地下水			各化學物質所造成之風險總合 ($HQ_{chemical\ i}$)	各化學物質所造成之風險比例 ($HQ_{chemical\ i}/HI$)(%)
		吸入		食入	皮膚接觸	吸入	食入	皮膚接觸		
關切污染物	CAS編號	土壤揚塵	污染空氣	污染土壤	污染土壤	污染空氣	污染地下水	污染地下水		
各暴露途徑之風險 ($HQ_{pathway\ i}$)										
各暴露途徑之風險比例($HQ_{pathway\ i}/HI$)(%)										
各污染環境介質之風險 ($HQ_{media\ i}$)										
各污染環境介質之風險比例($HQ_{media\ i}/HI$)(%)										
受體之總暴露風險(HI)										

表十三、致癌風險計算摘要表格

致癌風險		受體類型_____.								
		土壤				地下水			各關切污染物所造成之風險總合 ($R_{chemical\ i}$)	各關切污染物所造成之風險比例
		吸入		食入	皮膚接觸	吸入	食入	皮膚接觸		
關切污染物	CAS編號	土壤揚塵	污染空氣	污染土壤	污染土壤	污染空氣	污染地下水	污染地下水		
各暴露途徑之風險 ($R_{pathway\ i}$)										
各暴露途徑之風險比例										
各污染環境介質之風險(R_{media})										
各污染環境介質之風險比例										
受體之總暴露風險(R_{total})										

行政院環境保護署

土壤及地下水污染場址健康風險評估撰寫指引

九十五年四月

土壤及地下水污染場址健康風險評估撰寫指引

目　　錄

一、執行摘要 1
二、場址基本資料 3
三、場址現況及污染情形 5
五、污染物毒性分析 7
六、暴露量分析 8
七、風險特徵描述 10
八、管理方法 11
九、其他經主管機關指定之事項 11
十、參考資料 11

附錄：

附錄一、土壤及地下水污健康風險評估報告檢核表
附錄二、適用範圍

一、執行摘要

執行摘要應至少包含以下五個部分：

1. 評估報告提出者

依照土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法，評估報告提出者可為控制場址污染行為人、土地使用人、管理人或所有人。於摘要中需敘明評估報告提出者，與報告提出原因。

2. 計畫撰寫者

可由計畫提出者自行撰寫或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)負責撰寫。若委由他人負責撰寫者，應提出與撰寫人之委辦證明文件及其基本資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。

3. 計畫執行者

可由計畫提出者自行執行或委由他人(技師事務所、顧問公司、工程公司及其他國內外相關單位或機構)執行。若委由他人負責執行者，應提出與執行人之委辦證明文件及其相關資料(公司證照、負責人資料、營業項目、相關經驗與實績等)。若計畫撰寫者與計畫執行者相同時，則此項略以同上述計畫撰寫者即可。

4. 健康風險評估之層次性執行介紹

健康風險評估之執行可以有三種不同的層次，因此於摘要中應說明本評估報告所執行者為三層次中的哪一層次，並敘明理由。

5. 簡述評估結果

簡述本次健康風險評估之結果與結論。

二、場址基本資料

1. 場址公告資料

說明該場址之公告日期、文號及公告內容。

2. 場址名稱及地址、地號或位置及污染行為人資料

(1) 名稱：以主管機關公告控制場址之場址名稱為準。

(2) 地址、地號或位置：以主管機關公告控制場址之場址地址、地號或位置為準，並得以事業地址、地號、地標或其他適當方式表示補充說明之。

(3) 污染行為人資料：姓名、出生年月日、性別、住(居所)及其他足資辨別之特徵。若為法人或非法人團體，需提供資料名稱、地址、負責人(代表人或管理人)姓名。

3. 場址所有人及目前使用狀況

(1) 場址所有人資料：姓名、出生年月日、性別、住(居所)及其他足茲辨別之特徵。若為法人或非法人團體，需提供資料名稱、地址、負責人(代表人或管理人)姓名。

(2) 使用狀況：至少說明:

1) 污染場址目前營運狀況：如是否為停工、停業、歇業、部分停工、停業或正常營運或其他。

2) 是否有可能導致污染持續發生的製程、原物料、產品或其他化學品、廢水及廢棄物貯存、清除、處理狀況等狀況。

3) 場區配置：除文字說明外，需檢附場址平面圖，標明廠(場)址設施與建築物，或任何可供辨識之地標。較佳解析度的場址空照圖亦可代替繪製之平面圖，唯空照圖拍攝日期之地貌需與目前(健康風險評估執行時期)之地貌相符。過於老舊的空照徒不宜替代場址平面圖。

(3)場址內污染來源：以文字說明此次評估之污染物來源與可能污染之原因，並說明污染源是否已經移除。應於場區配置圖中標示可疑污染源所在位置。

4. 目前及完整的場址使用資料

(1)場址利用變遷

描述污染場址為目前使用狀況前至少十年使用情形：如曾在此設置的各公私場所及其營運年份、可能導致污染發生的原物料、製程或產品、廢水及廢棄物貯存、清除、處理狀況、過去之廠區配置等。

(2)相關環境調查資訊

說明場址內曾實施之調查與措施工作等相關資料，例如：1)指定公告之事業所使用的土地移轉時之調查：依本法第八條規定，中央主管機關指定公告之事業所使用之土地移轉時，讓與人應提供土壤污染檢測資料；2)指定公告之事業於設立、停業或歇業前之調查：依本法第九條規定，中央主管機關指定公告之事業於設立、停業或歇業前，應檢具用地之土壤污染檢測資料；3)場址曾辦理之土壤或地下水相關調查資料或緊急應變資料，如環境場址評估（ESA Phase I、Phase II）、農地作物調查資料、測漏管氣體、土壤氣體、防蝕電位、電連通、存量分析、自動量油器測漏、管線/油槽密閉測試、管線/油槽測漏、地球物理探測及土壤/地下水檢測資料等；4)場址曾經執行之控制計畫執行方式與結果；5)其他學術單位或公私立機關調查資料(包含曾違反環保法規之相關文件或資料)或其它文獻中記錄的調查資料。

三、場址現況及污染情形

1. 場址現況

現況描述中至少包含以下內容：1)污染場址面積大小；2)地理位置簡述， 除文字描述外，並應檢附場址位置圖(大範圍位置可標示於俗稱拓撲圖(Topography Map)的地形圖或大尺度的空照圖上，主要的目的為標明場址與所在區域之地形關係，以及週邊之自然環境與人大型公設施)；3)環境敏感區位說明(例如是否位於國家公園、生態保護區、古蹟保存區、公告飲用水水源水質保護區或其他特殊區域等)；4)場址污染範圍周圍距離一公里內居民分佈與地表水及地下水使用狀況，除文字描述外，並應檢附目前週邊土地利用或地下水井、表面水體分布圖；5)其他現況說明（如地上物及地下構造物等）。

2. 場址過去洩漏資料及可能污染區域

概述十年內場址內發生的污染事件，或疑似污染事件。

3. 檢測數據彙整

彙整相關的歷史檢測資料，若本次調查亦有增加採樣檢測資料，應一併彙整。污染之歷史數據應依日期與採樣點標明於地圖上。本次相關採樣之程序、實驗室檢測紀錄、品保與品管紀錄與工地安全衛生管理等資料，則應附於評估報告後以附錄的形式一併送審。

四、污染物、污染範圍及污染程度

1. 關切污染物質的判定

說明本評估報告所評估之關切污染物質，選定關切污染物質之原則應依照健康風險評估評析方法所規定，或主管機關、審查單位依各案需求所提出。報告中並應檢附土壤及地下水污染場址健康風險評估評析方法(以下簡稱評析方法)附錄六表一。

除關切污染物項目外，並應討論各關切污染物之致毒性質，及依照健康風險評估評析方法中之資料庫爰引順序，對各關切物質的致癌性作出判別(見評析方法附錄六中表二「致癌物判定」所列項目)。

2. 污染範圍的畫定

根據場址現有分析數據估計關切物質污染範圍，並將污染範圍估計與程度土壤或地下水污染物濃度，以等濃度線的方式呈現於地圖上。

3. 簡述污染物可能影響之生物受體

討論土壤與地下水中之關切物質所有可能影響到的受體，與受體和關切物質可能的接觸途徑。

五、污染物毒性分析

1. 毒性因子之引用

依健康風險評估評析方法中所列之援引順序，進行毒性因子的選定。計畫撰寫人應列表說明 1)關切污染物質是否為致癌物質；2)各關切污染物質之致癌斜率或非致癌毒性因子之數值與資料來源(見評析方法附錄六中表二『致癌斜率』項目與表三「非致癌參考劑量」項目下所列)。

2. 毒性因子之換算

若因暴露途徑之需求，必須進行不同途徑毒性因子相互引用，則應於報告中敘明毒性因子轉換的計算方式，並於前段所述表格中註明計算於評估報告中的出處。

六、暴露量分析

1. 場址區域水文地質資料

應至少檢附場址大範圍的水文與地質資料，並以此估計說明大範圍地下水流向、含水層之地質狀況、大範圍水力梯度與地下水流速等等。

2. 場址特定水文地質資料(健康風險評估參數使用該等資料時檢附)

應檢附場址環境調查與檢測的資料，以此估計說明場址局部地下水流向、含水層之地質狀況、場址局部水力梯度與地下水流速等等。此部分應至少檢附 1)地下水位等高線圖，並標明預測之地下水流；2)場址地質剖面圖。若場址本身之水文地質與大範圍區域資料有顯著差異，應加以討論並說明可能原因。

3. 場址土地利用情形

說明場址本身及週邊土地利用情形(至少涵蓋場址外一公里區域範圍)，包括目前土地利用與未來土地利用兩類。

目前之土地利用型態需以現場調查與訪視為判定的依據，而未來土地利用則以地方政府都市計畫為主要依據。若地方政府可提供都市計畫圖，則應檢附場址附近都市計畫圖。若已知附近有開發計畫將會執行，則亦可成為未來土地利用判斷依據。若本項資料缺乏，則應於報告中敘明原因，並於風險計算時使用較為保守的假設。

4. 場址概念模式、暴露途徑分析

根據彙整之關切污染物質污染範圍資訊說明場址週邊地質水文調查結果與土地利用情形，說明關切污染物質如何於環境中流佈，最後與受體接觸並為受體所吸收。在第一層次與第二層次之健康風險評估，至少應檢附如評析方法之附錄六中表四與表五的圖示說明，並敘明用於計算暴露劑量的暴露途徑有哪些。

5. 宿命傳輸模式的使用

若於評估中使用模式來進行關切污染物質於環境介質中的傳輸估計預測，則應檢附關於該模式的簡述，包括：1)模式之特性、基本假設與使用原因；2)若需有校正的動作，則應檢附以歷史數據進行校正之執行過程與結果；3)模式所使用之參數與數值列表；4)模式計算結果。

6. 受體暴露量的估計

進行受體暴露量的估計，各種吸收途徑之計算公式已列於評估原則中。關於受體暴露量之計算，健康風險評估報告中應檢附 1)公式中所需參數之數值與資料來源(見評析方法之附錄六中表六或表七)；2)將各受體於各暴露途徑的暴露劑量列表(見評析方法之附錄六中表十一)。

七、風險特徵描述

1. 風險計算

根據關切污染物質之毒性因子與受體之暴露濃度，計算受體因吸收關切物質而導致的健康風險。以關切污染物質致癌與非致癌的特性，分開估計致癌風險與非致癌風險，並列表整理(評析方法附錄六表十二與表十三)。

2. 不確定性分析

討論健康風險評估計算中所進行之假設是否造成評估結果的偏差，並按照各層次風險評估數據品質的不同，提供各種定性與定量的分析，至少應包括下列項目

1) 所收集之場址調查資料是否有不確定性，是否會造成風險之高估或低估；

2)參數與實際數值之可能偏差，與各參數對於計算結果之的敏感度分析(見評析方法之附錄五)；

3) 討論計算結果中各暴露途徑與污染物對風險的貢獻比例，討論何種暴露途徑或污染物對風險的影響較大；

4)根據校正結果，討論使用之宿命傳輸模式假設是否符合現地狀況，差異為何。此差異對於暴露量的估計造成何種影響；

5)污染物歷史檢測數據所呈現之時間趨勢，以及此趨勢是否會造成風險之高估或低估。

八、管理方法

依風險計算之結果，建議管理方法，並說明後續可能之管理方案。為此處之建議管理方法並不能取代實際土壤及地下水整治工作。

九、其他經主管機關指定之事項

十、參考資料

此部分包含所有參考文獻及相關重要資料說明。

附錄一　土壤及地下水污染場址健康風險評估報告檢核表

項次	主要項目	撰寫內容	檢附圖表
一	執行摘要	□(1)評估報告提出者	
		□(2)評估報告撰寫者	
		□(3)評估計畫執行者	
		□(4)健康風險評估之層次性執行介紹	
		□(5)簡述評估結果	
二	場址基本資料	□(1)場址公告資料	
		□(2)場址名稱及地址、地號或位置及污染行為人資料	
		□(3)場址所有人及目前使用狀況	□場區配置圖(注明污染源位置)
		□(4)完整的場址使用資料	
三	場址現況及污染情形	□(1)場址現況	□場址位置圖 □週邊土地利用分佈圖 □地下水井與表面水體分佈圖
		□(2)場址過去洩漏資料及可能污染區域	
		□(3)檢測數據彙整	□污染物檢測數據分佈圖
四	污染物、污染範圍及污染程度	□(1) 關切污染物質的判定	□關切物質判定表
		□(2) 污染範圍的畫定	□污染物濃度分佈圖
		□(3) 簡述污染物可能影響之生物受體	
五	污染物毒性分析	□(1) 毒性因子之引用	□致癌毒性因子判定與援引表 □非致癌毒性因子判定與援引表
		□(2) 毒性因子之換算	
六	暴露量分析	□(1) 場址區域水文地質資料	
		□(2) 場址特定水文地質資料	□地下水位等高線圖 □場址地質剖面圖
		□(3) 場址土地利用情形	□都市計畫圖
		□(4) 場址概念模式介紹、暴露途徑分析	□第一或第二層次暴露情境判定表(土壤) □第一或第二層次暴露情境判定表(地下水)
		□(5) 宿命傳輸模式的使用	
		□(6) 受體暴露量的估計	□受體參數設定表 □受體暴露量計算結果總表
七	風險特徵描述	□(1) 風險計算	□非致癌風險計算摘要表格 □致癌風險計算摘要表格
		□(2) 不確定性分析	
八	污染管理方法	□ 建議管理方法	
九	其他經主管機關指定之事項		
十	參考資料		

附錄二　適用範圍

本撰寫指引適用於依土壤及地下水污染控制場址初步評估辦法之健康風險評估使用。