

應用風險基準矯正行動模式探討土壤/地下水污染之 暴露風險問題

黃文彥*王才宇**王奕森***

摘 要

台灣地區近年來發生土壤/地下水遭石油碳氫化合物或其他化學物質污染之事件，有愈形普遍而嚴重之趨勢。有鑑於此，行政院環境保護署目前已積極針對此問題進行土壤/地下水污染防治等相關法案之推動。於「土壤污染整治法」及「水污染防治法地下水增修訂條文」等相關法案獲得通過並正式公告實施前，如何決定污染場址之整治決策、各污染場址進行整治之急迫性及其整治目標的訂定等，乃成為當前環保工作的重要課題之一。本文之目的主要即針對上述問題，在國內尚未建立完整之整治決策與風險管理系統之前，從健康風險評估的角度，應用美國材料及試驗協會(ASTM)於1998年所提出之「風險基準矯正行動應用於化學物質洩漏場址之評估準則(RBCA)」模式，探討污染場址對於人體健康所可能造成之風險並進行量化分析，進而評估污染場址進行整治之必要性與急迫性；同時說明如何應用該模式，以作為協助訂定整治目標之依據，及風險管理之參考

【關鍵詞】

- 1.健康風險評估(health risk assessment) 2.土壤(soil)3.地下水(groundwater)
- 4.暴露路徑(exposure pathway) 5.致癌風險(carcinogenic risk)
- 6.危害指數(hazard index) 7.整治/清除目標濃度(remediation/clean-up level)

*中鼎工程股份有限公司環境工程專案技術經理

**中鼎工程股份有限公司環境工程專案工程師

***森康工程顧問股份有限公司總工程師

Application of RBCA to Evaluate the Environmental Risk for A Contaminated Site

Wen-yen Kevin Huang*Tsai-yu Wang**I-sen Wang***

Abstract

There are many petro-chemical plants in Taiwan reported to be contaminated due to chemicals release. Prior to completion of the legislation for codes in prevention of soil and groundwater contamination and the associated clean-up standards, establishment of relevant codes and clean-up standards becomes much interested to the Taiwan environmental agencies and plant owners. This paper addresses the above concerns and makes attempt to introduce and apply Risk-based Corrective Action (RBCA) for chemical releases site to evaluate the risk to human health and the impact to sensitive ecosystems posed by the chemical releases. Calculations of the proposed clean-up standards are also made for a BTEX-contaminated plant, using a risk of 10^{-6} for carcinogen and a hazard index of 1.0 for the non-carcinogen.

【 Keywords 】

1.health risk assessment 2.soil3.groundwater 4.RBCA 5.exposure pathway
6.carcinogenic risk 7.hazard index 8.remediation/clean-up level

*Technical Manager, Environmental Engineering Group/CTCI Corporation

**Engineer, Environmental Engineering Group/CTCI Corporation

***Chief Hydrogeologist and Remediation Engineer, WFETC

一、前言

由於石化工廠的作業特性使然，在完成建廠並開始投產操作一段時間後，或多或少會因為原廢料輸送、儲存及製程等過程中之各種人為或意外因素，導致場址之土壤/地下水遭到污染，進而造成工廠及附近地區環境生態之破壞，甚至引起人體健康及公共安全之危害，如此益發凸顯進行整治清除的重要性。而評估污染場址進行整治之急迫性及訂定整治基準，即成為進行整治前最重要的關鍵要素之一。

二、風險基準矯正行動準則目的及特性

美國試驗及材料協會(American Society for Testing and Materials, 以下簡稱 ASTM)受美國環境保護署(US Environmental Protection Agency, 以下簡稱 USEPA)委託，針對土壤及地下水可能遭受污染之場址研發「風險基準矯正行動準則(Standard Guide for Risk-Based Corrective Action, 以下簡稱 RBCA)」，該風險基準矯正行動準則首先應用在石油碳氫化合物洩漏場址之風險評估；隨後並擴展至一般有害之化學物質洩漏場址之評估，本研究乃採用該協會於 1998 年所發展之「風險基準矯正行動應用於化學物質洩漏場址之準則(Standard Provisional Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Chemical Release Sites)」，就場址之土壤及地下水污染對廠區及鄰近地區之環境和人體健康影響之風險，進行量化評估。以下就其評估目的及特性加以說明。

1. 目的

該準則之主旨乃「基於保護人體健康及環境生態敏感受體，針對石油或化學物質之洩漏污染場址，進行風險評估。並依據風險基準評估結果，提出適當之矯正行動，以供各相關單位決定因應措施，及訂定清除/整治標準之決策過程參考。」

石油碳氫化合物或一般化學物質之污染場址，不論其洩漏物質之物理化學性質、水文地質條件、污染範圍等各方面，皆具有相當之複雜性，並可能對人體健康及敏感之環境生態受體造成程度不等之危害風險。有鑑於不同場址間之差異性，該準則乃採用階段性方式，針對各場址之個別特性及條件進行風險評估，並據以訂定適當之矯正方案，以降低風險。該準則一般乃針對人體暴露之健康危害，進行定量性之風險基準矯正作業評估。至於牽涉到生態性風險評估之部分，僅對環境敏感受體（非人體）所可能造成之實際性或潛在性影響，進行定性之初步評估。

2. 特性

以風險基準來評估石油碳氫化合物或化學物質洩漏污染場址，有下列特性：

- (1)所有的評估決策皆以「降低對人體或環境的負面影響風險」為最基本之考量。
- (2)場址評估之相關作業，其焦點應偏重於收集與風險相關之資訊。
- (3)各相關資料或有限的資源(如人力、時間、財力等)，其焦點應著重於「污染場址在任何時間對人體健康及環境所可能造成之最高風險」。
- (4)整治行動應持續進行，直到風險及暴露程度降低至可接受之程度為止。
- (5)可針對場址之特性選定適當之評估點，以評估整治標準。
- (6)可比目前現有的其他方法，提供更快速、更高品質、更系統化的評估過程及結果。
- (7)可提出具體的矯正行動建議，以保護人體健康與環境安全。

三、風險基準矯正行動準則評估步驟

當對於場址是否遭到石油碳氫化合物或其他化學物質污染產生疑慮，或欲進行確認時，即可運用 RBCA 準則進行評估。主要評估項目包括初始場址評估、場址分級與初始應變行動、第一及第二階段評估、整治行動及後續監測等，上述評估步驟流程如圖 1 所示。

四、案例介紹說明

以下將以某石化廠以往所進行之場址評估與調查等資料，予以彙整說明有關暴露特性、暴露路徑及受體、暴露情境、健康風險評估基準及暴露風險評估概念模式等，應用於風險基準矯正行動準則之步驟，探討污染場址對於人體健康所可能造成之風險並進行量化分析，進而評估污染場址進行整治之必要性與急迫性；同時說明如何應用該模式，以作為協助訂定整治目標之依據，及風險管理之參考。

1. 場址評估彙整分析

場址評估彙整分析之目的，在建立進行健康風險評估之暴露路徑(exposure pathways)、整體概念模式(conceptual model)，以及各相關重點所需之參數，並作為各階段評估(tiered evaluation)之參考依據。

(1) 暴露特性

暴露特性參數彙整如表 1 所示。由於國內目前尚缺乏相關暴露參數之調查研究數據，因此表 1 中之各項參數主要乃參考美國環保署所建立之調查評估數據，並考量國內狀況予以部份修正。

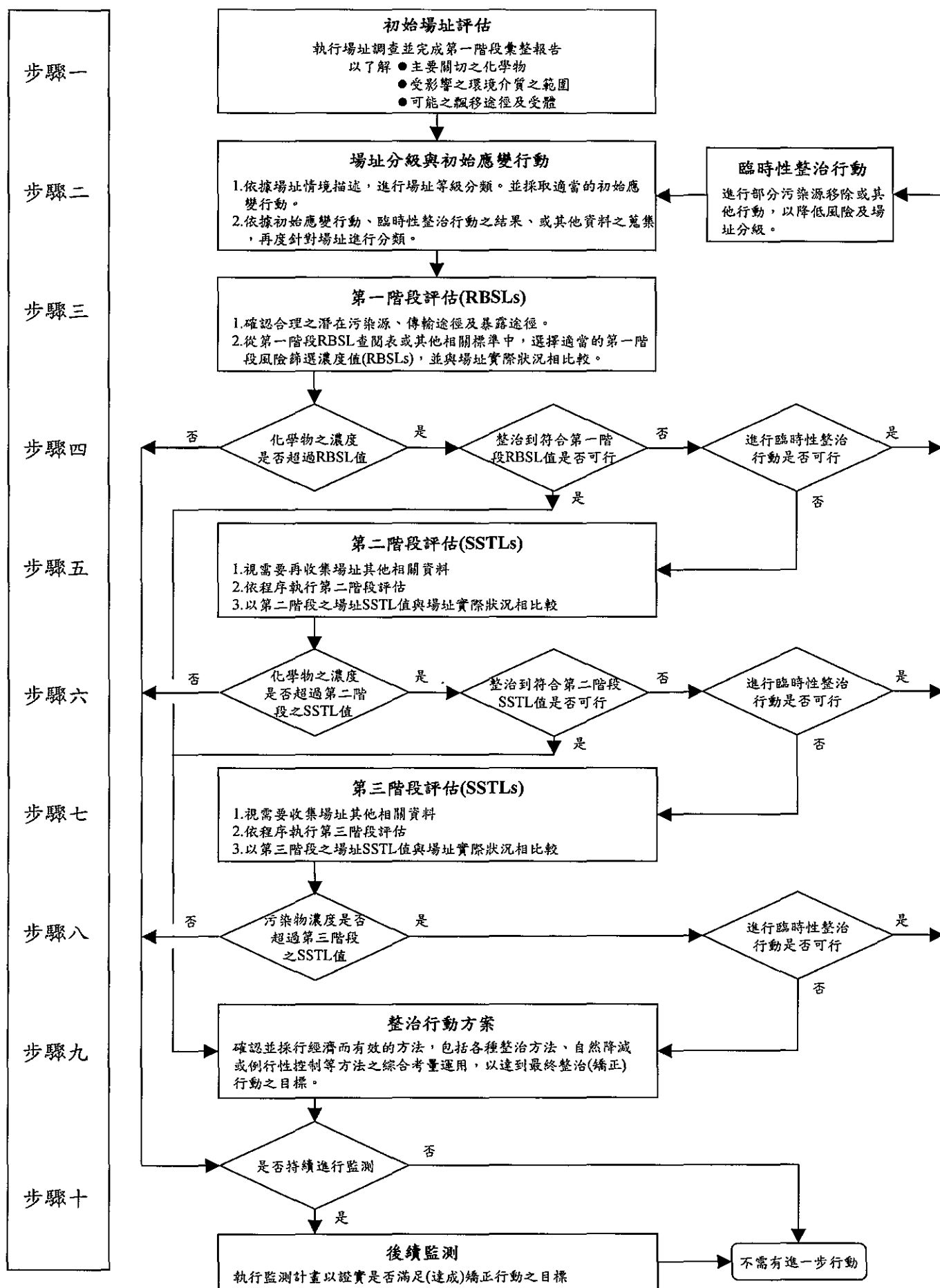


圖1 風險基準矯正行動(RBCA)評估流程圖

表 1 案例之暴露參數說明表

參數名稱	定義與單位	住宅區	商業區/工業區
AT _c	致癌之平均時間，年	70 年	70 年 ^A
AT _n	非致癌(慢性致病)之平均時間，年	30 年	25 年 ^A
BW	成人體重，公斤	60 公斤 ^C	60 公斤 ^C
ED	暴露期間，年	30 年	25 年 ^A
EF	暴露頻率，天/年	350 天/年	250 天/年 ^A
IR _{soil}	攝食土壤速率，毫克/天	100 毫克/天	50 毫克/天 ^A
IR _{air-indoor}	室內每日吸入空氣之速率，立方公尺/天	15 立方公尺/天	20 立方公尺/天 ^A
IR _{air-outdoor}	室外每日吸入空氣之速率，立方公尺/天	20 立方公尺/天	20 立方公尺/天 ^A
IR _w	每日飲水之速率，公升/天	2 公升/天	1 公升/天 ^A
LF _{sw}	淋溶因子，毫克/公升-水；毫克/公斤-土壤	依 BTEX 之特性而定	依 BTEX 之特性而定
M	土壤附著於皮膚之因子，毫克/平方公分	0.5	0.5 ^B
RAF _d	皮膚相對性吸附因子	0.5/0.05	0.5/0.05 ^B
RAF _o	口腔相對性吸附因子	1.0	1.0
RBSL _i	某環境介質(i)之風險基準篩選濃度，毫克/公升-水；毫克/公斤-土壤；微克/立方公尺-空氣	依化學物、環境介質或暴露途徑特性而定	依化學物、環境介質或暴露途徑特性而定
RfD _i	吸入之慢性致病參考劑量，毫克/公斤-天	依 BTEX 之特性而定	依 BTEX 之特性而定
RfD _o	攝食之慢性致病參考劑量，毫克/公斤-天	依 BTEX 之特性而定	依 BTEX 之特性而定
SA	皮膚表面積，平方公分/天	5122 ^C	5122 ^C
SF _i	吸入之致癌斜率因子，(毫克/公斤-天) ⁻¹	依 BTEX 之特性而定	依 BTEX 之特性而定
SF _o	攝食之致癌斜率因子，(毫克/公斤-天) ⁻¹	依 BTEX 之特性而定	依 BTEX 之特性而定
THQ	單一化學物之目標危害指數，無單位	1.0	1.0
TR	個人生命期之致癌機率，無單位	10 ⁻⁶ 或 10 ⁻⁴	10 ⁻⁶ 或 10 ⁻⁴
VF _i	揮發因子，毫克/公升-水；毫克/公斤-土壤；毫克/立方公尺-空氣	依化學物或環境介質特性而定	依化學物或環境介質特性而定

說明：

^A.參考 Exposure Factors Handbook, USEPA 600/8-89/043, Environmental Protection Agency, Washington, DC, July 1989

^B.參考 Supplemental Risk Assessment Guidance for the Superfund Program, USEPA/901/5-89/001, Environmental Protection Agency Region I, Washington, DC, 1989

^C.為我國成年人平均體重之估計值（美國國民平均體重為 70 公斤）

(2) 暴露路徑及受體

依據本場址之特性進行暴露情節評估，藉著暴露情節的評估結果以決定污染來源、傳輸機制、暴露途徑及受體的特性，從而建立本案例完整的暴露路徑，以作為提出改善之矯正行動的依據，同時藉由矯正行動之進

行，達到降低健康風險之目的。暴露情節之評估結果，詳如圖 2 所示，以下分別說明之：

A. 污染來源

(A) 原始來源

可能污染來源包括：(a)原料/產品儲槽、(b)輸送設備，如地下管線或泵浦、(c)操作工場，如熱交換器管束清洗維護場等及(d)廢棄物處理單元等。

(B) 二次來源

上述污染來源發生溢/洩漏後，造成表土、裏土之污染，甚至經由淋溶及入滲作用，污染到地下水含水層，由於洩漏油品本身之特性為不易溶於水，且其比重較水為輕，因而形成地下水面上之浮油污染團。此外，接近地表之污染，受雨污水的冲刷，亦造成二次污染來源，但廠內雨污水均經全面截流及處理，故未造成廠外地面水體之污染。

B. 傳輸機制

經評估場址特性後，可能之傳輸機制包含下列各項：

- (A) 表土經風吹蝕及大氣擴散而傳輸
- (B) 表土/裏土內之氣體從土壤逸散揮發及大氣擴散
- (C) 揮發氣體聚積於場址建築物內之封閉空間
- (D) 土壤污染經由淋溶或入滲作用而污染地下水
- (E) 地下水面上形成浮油飄移之污染團

除此之外，因廠內已全面進行雨污水截流處理，處理完之廢水並未污染到廠外之地面水體。

C. 暴露途徑

暴露途徑指污染物及介質與人體接觸之方式，經評估場址特性後，由圖 2 中勾選適當之項目，計包含下列各項：

- (A) 由口食入遭污染之土壤(微粒或灰塵)
- (B) 皮膚附著遭污染之土壤(微粒或灰塵)
- (C) 揮發氣體由污染土壤或地下水中逸散，而由鼻吸入。
- (D) 污染之地下水作為洗滌與皮膚接觸

至於地下水於目前之實際狀況中，場址及附近地區並未發現有作為飲用水之情況，而未來作為飲用水水源之可能性亦極低。

D. 受體之特性

由於場址內及廠外之鄰近地區 2 公里之範圍內，除人體以外並無其他較具敏感性或稀有保育性之環境生態，因此本案例乃以人體作為

原始來源	二次來源	傳輸機制	暴露途徑	受體之特性	改善之矯正行動
☒ 原料/產品(桶)槽 ☒ 輸送設備 (管線、泵浦等) ☒ 操作設施(管束清洗場修護場、混合槽、摻配場) ☒ 廢棄物處理單元(氧化塘、乾井、污泥棄置場) ☐ 其他(自訂)	☒ 污染之表土 (小於1m之深度) ☒ 污染之裏土 (大於1m之深度) ☒ 地下水中之溶解性 污染圈 ☒ 浮油相污染圈 ☒ 受污染之表土、 沉積物或地表水	☒ 風蝕及大氣擴散 ☒ 揮發及大氣擴散 ☒ 揮發及封閉空間 之聚積 ☒ 淋溶作用與 地下水傳輸 ☒ 可移動之浮油相 飄移 ☒ 暴雨/表面水 之傳輸	☒ 食入/皮膚附著 污染土壤 ☒ 由鼻吸入 ☐ 作為飲用水使用 由口食入 ☐ 敏感性自然生態	☒ 居民 ☒ 商業區/工業區 ☒ 現場工人 ☐ 敏感性自然生態 ☐ 其他 ☒ 居民 ☒ 商業區/工業區 ☒ 現場工人 ☐ 敏感性自然生態 ☐ 其他 ☐ 居民 ☐ 商業區/工業區 ☐ 現場工人 ☐ 敏感性自然生態 ☐ 其他 ☐ 居民 ☐ 敏感性自然生態 ☐ 其他	列出改善行動/措施之數字代號 於左列之可能附件符號旁，並予 說明之： ①將遭污染之表土開挖移除並處 理之，並鋪設混凝土地坪。 ②地下管線全面地上化。 ③油槽測漏並檢修更新。 ④將地下之有機揮發性氣體抽除。 ⑤浮油回收。 ⑥兩污水分流、暴雨截流、排水 溝更新，鋪設防漏水泥。 ⑦進行植生綠化降低揚塵，加強 通道洗掃，並要求場內操作人 員配戴口罩，開挖處或土壤蒸 氣逸散處之地表鋪設塑膠蓬罩 隔離蓋，以阻絕逸散。
場址名稱：某石化廠 地點：廠內工場區及油槽 區等。 列出可疑之污染源： 1.A9號油槽 2.MW25號井附近 3.MW32號井附近 4.MW7號井附近 5.MW6號井附近 6.MW8號井及MW68號井附近之 油槽 7.MW12號井附近 8.MW19號井附近 9.MW21號井附近					
步驟一：釐清場址之污染來源及暴露途徑 • 完成第一階段之情境描述 • 核對並勾選污染來源、洩漏機制及實際 或緊迫性暴露途徑		步驟二：確認受體為何，並以場址狀況與第一階段 標準相比較 • 確認受體 • 核對並勾選潛在受體及超過RBSL標準值者		步驟三：確認可能之矯正行動 • 完成第一階段之彙整報告 • 於各可能暴露途徑之附件符號旁，填入 矯正(改善)措施之代號，並於右邊之說 明欄位中詳細述明之	

圖2 暴露情境評估流程圖

受體之唯一考量重點。

依該廠場址之污染狀況，如關切之化學物質種類、於土壤及地下水等介質中之分佈狀況、濃度、污染團飄移擴散方向、地下水位及流向、氣象條件(如風速、風向、降雨量等)等資料，並考量場址內外及附近地區之人口稠密性與土地使用情況，本計畫除場址內為當然暴露點必須進行評估外，同時必須考慮場址外之下列地點。

A 區：土地編屬為工業區，位於廠區東側 130 公尺處，位於廠區地下水流向之下游。

B 區：距場址東側約 180 公尺，現為居民住宅區，本區亦位於廠區地下水流向之下游。

由於上述二個地點分屬工業區及住宅區，基於工安、污染團飄移、距離較短風險可能較高及地下水流向等因素綜合考量後，本計畫將以場址內污染源及場址以外之 A 區(工業區)及 B 區(住宅區)列為主要評估點，進行風險基準評估。因此本計畫之受體為場址內之工作人員、場址外 A 區之從業人員及場址外 B 區之居民。

(3)健康風險評估基準

依據場址及鄰近地區之土地使用目的及特性，廠區及場外 A 區皆為工業區，而 B 區則為住宅區。因此參考美國一般健康風險評估中工業區及住宅區的標準訂定單一(individual)及累加(cumulative)之健康風險評估基準，詳如表 2 所示。其中致癌風險之基準，將單一致癌風險定為 10^{-6} (即百萬分之一)；累加致癌風險則定為 10^{-5} (即十萬分之一)。另外，在非致癌之危害指數方面，單一及累加皆定為 1.0。上述健康風險基準，將作為本計畫進行風險評估之依據。

表 2 案例之健康風險評估基準

暴露點	土地使用現況	與污染場址之距離	致癌風險基準		慢性致病危害指數	
			單一	累加	單一	累加
廠內污染源區	工業區	0 公尺	百萬分之一的機率 (10^{-6})	十萬分之一的機率 (10^{-5})	1.0	
A 區	工業區	130 公尺				
B 區	住宅區	180 公尺				

(4)暴露風險評估概念模式之建立

為便於進行健康風險評估，場址的相關條件及狀況將予以適當地簡化，而所引用的參數則以較保守的方式篩選採用，例如土壤及地下水的濃度皆將以歷年各次檢驗之最高值進行評估、污染範圍亦以污染源之合理最大可能範圍來進行估算等。以下分別說明之。

A.土壤中最大污染源範圍

如圖 3 所示，其污染最大可能面積估計不超過 134,400 平方公尺。由於表土污染大都已挖除，因此目前之污染土壤大都屬於裏土，其分佈範圍大約從地表下 1.5 公尺至 4 公尺左右。而此土壤污染範圍內之地表綠地或裸露地依據現場實際勘查結果，約佔土壤污染最大可能面積之 20% 左右，約為 26,880 平方公尺。

B. 地下水最大污染範圍

如圖 3 所示，其地下水污染圍之平面分佈範圍不超過 672,000 平方公尺，地下水污染圍之垂直向分佈自地表下 4 公尺至 10 公尺左右。

C. 關切之化學物質

依據歷年各計畫之調查結果，在各類洩漏油品中以苯(Benzene)、甲苯(Toluene)、乙苯(Ethylbenzene)及二甲苯(Xylenes)為主要污染物質，而此四種項目之調查結果亦最為全面，也最為完整。其中苯已被證實為致癌物，其他三種物質尚未證實具致癌性，但在長期暴露下產生慢性病之機率即會大幅提高。

表 3 為歷年土壤及地下水之 BTEX 最高濃度值。表中之土壤及地下水之 BTEX 濃度將作為本計畫健康風險評估之主要依據。

表 3 案例場址歷年土壤及地下水之 BTEX 最高濃度值

成 份	Representative COC Concentration	
	地下水	土壤(1.5-4m)
	濃度(mg/L)	濃度(mg/ L)
苯	20.1694	1.5E+1
甲苯	8.3291	6.0E-1
乙苯	3.5940	4.0E+1
二甲苯	24.402	3.1E+1

D. 暴露路徑

主要暴露路徑為位於污染範圍內之儲槽、地下管線、清洗油槽及熱交換器之廢水、早期之混凝土方井暗溝等洩溢漏所致。

2. 整治標準之研議

應用案例場址評估彙整分析結果及依照風險基準矯正行動準則之步驟，分別進行第一及第二階段之評估，以探討土壤與地下水之整治標準，結果詳如表 4。

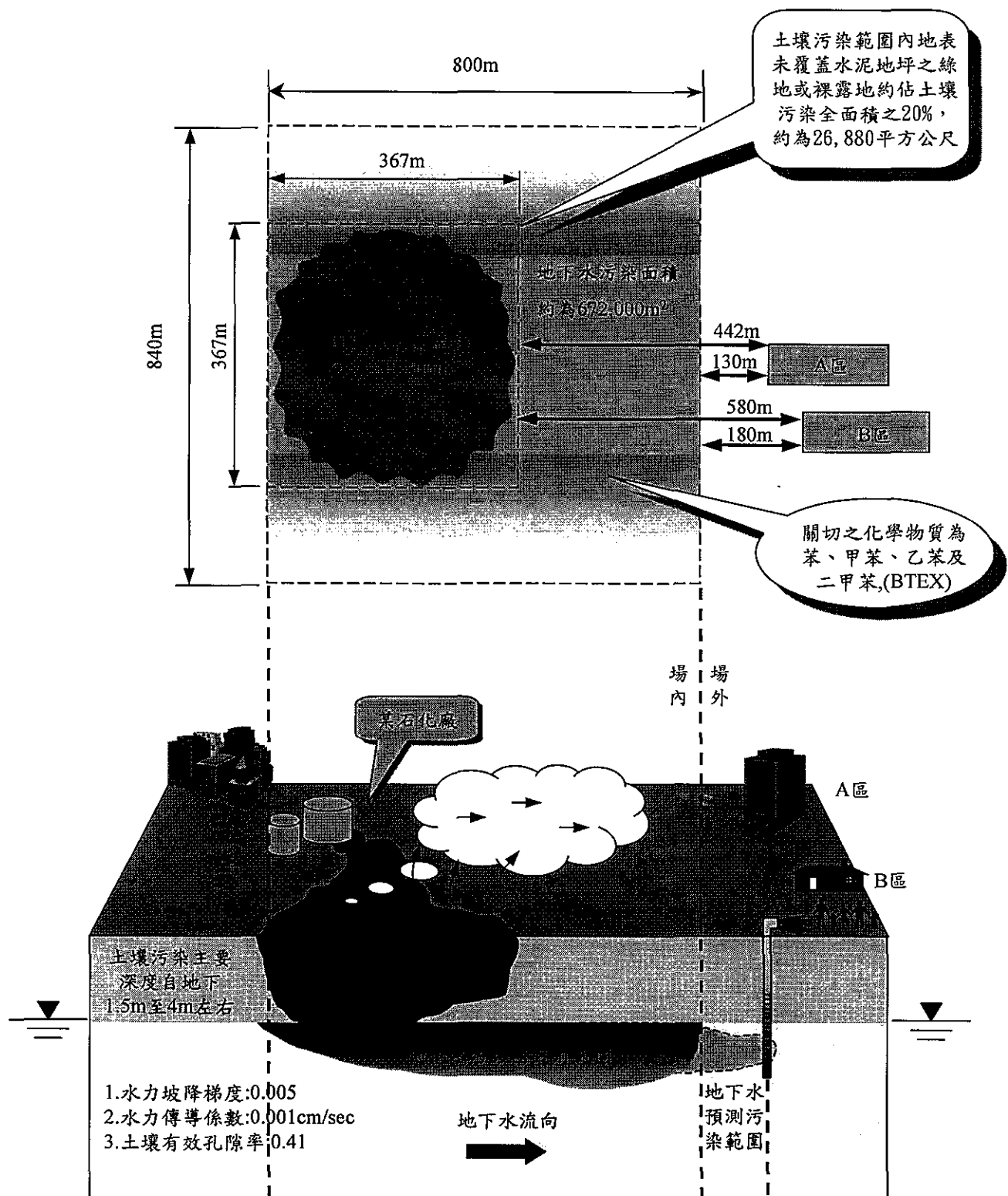


圖3 暴露風險評估概念模式示意圖

表 4 土壤及地下水污染健康風險評估結果彙整表

污 染 物 質	場址現況評估結果		整治標準評估結果	
	濃 度		濃 度	
	土 壤 (mg/kg)	地下水(mg/L)	土 壤 (mg/kg)	地下水(mg/L)
苯	15	20.169	1.7	0.31
甲 苯	0.6	8.329	-	-
乙 苯	40	3.594	-	-
二 甲 苯	31	24.402	-	-

污 染 物 質	致 癌 風 險		危 害 指 數		致 癌 風 險		危 害 指 數	
	土 壤	地下水	土 壤	地下水	土 壤	地下水	土 壤	地下水
苯	1.1×10^{-4}	NC	6.16	NC	場 址： 2.1×10^{-6} A 區： 4.2×10^{-7} B 區： 6.4×10^{-7}	NC	場 址： 0.21 A 區： 0.039 B 區： 0.05	NC
甲 苯	-							
乙 苯								
二 甲 苯								

(1)土壤

場址之最高濃度僅苯超出風險基準之場址特定目標濃度，其他三種關切之化學物質（甲苯、乙苯及二甲苯）之場址最高濃度則皆低於其場址特定目標濃度，因此建議可考慮以苯之第二階段場址特定目標濃度 1.7mg/kg 作為苯於土壤中之整治標準。

(2)地下水

僅苯超出風險基準之場址特定目標濃度，因此建議以第二階段場址特定目標濃度 0.31 mg/L 作為苯於地下水中之整治標準。其他三種關切之化學物質（甲苯、乙苯及二甲苯）之場址最高濃度則皆低於其場址特定目標濃度，無須再訂定整治標準。

(3)預期風險

就土壤而言，針對本計畫之四種關切之化學物質，依據上述之整治標準建議濃度，計算其整治後之最高暴露風險，除場址之最高致癌風險（ 2.54×10^{-6} ）尚略高於本計畫之致癌風險基準（ 1.0×10^{-6} ），其他場址內外土壤之最高致癌風險及最高危害指數皆已低於風險基準值。

由於暴露路徑沒有飲用地下水之暴露情節，故無需計算其最高致癌風險及最高危害指數。

五、結 論

在目前法令未明確規定土壤及地下水相關標準值之前，風險基準矯正行動評估模式可做為主管機關訂定整治目標之依據，也是業主評估場址污染嚴重程度及整治急迫性的重要方法，其結果可提供業者及政府環保主管機構制定風險管理決策之重要參考。

六、參考資料

1. Superfund Public Health Evaluation Manual. U.S. Environmental Protection Agency. 1986a. EPA/540/1-88/001
2. Superfund Exposure Assessment Manual. U.S. Environmental Protection Agency. 1988. EPA/640/1-88/001
3. Risk Assessment Guidance for Superfund Vol. I. Human Health Evaluation Manual (Part A). U.S. Environmental Protection Agency. 1989a. EPA/540/1-89/002
4. Exposure Factors Handbook. U.S. Environmental Protection Agency. 1989b. EPA/600/8-89/043
5. Integrated Risk Information System. U.S. Environmental Protection Agency. 1991a
6. Health Effects Assessment Summary Tables. U.S. Environmental Protection Agency. 1991b.
7. Dermal Exposure Assessment: Principles and Applications U.S. Environmental Protection Agency. 1992. EPA/600/8-91/011B.
8. Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites, ASTM E1739-95.
9. Standard Provisional Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Chemical Release Sites, ASTM PS104-98.
10. 黃文彥、盧哲明、劉博文，土壤/地下水污染健康風險評估決策支援系統之應用，第三屆地下水資源及水質保護研討會論文集，488 頁，1999/01/13。