

廢水處理

“天然衰減法”整治土壤及地下水污染 之技術內涵與案例研究

阮國棟*、陳啟仁**

摘要

天然衰減法(Natural Attenuation, NA)或稱自然整治法(Intrinsic Remediation, IR)在美國境內已引起工業界對發展其應用模式持廣泛興趣。而此舉也促使美國國家研究院(National Research Council, NRC)，特別組織“自然整治法研究委員會”，並擬定為期二年的研究計畫。有別於一般工程技術削減污染的方法，此方法乃利用自然的處理程序，如吸附、分解等物理、化學、生物作用，降低污染物之污染性。

此一方法在美國、加拿大等污染防治先進國家中，已逐漸被重視，亦有實際運用之案例。但是，許多人對天然衰減法的運用時機、運用方法、如何運用及其效果仍不甚瞭解。本文即針對該法的重要觀念提出二十個問答型式的資訊，以及現有的二十四個實例，加以引介說明，以提供國內污染防治另一思考角度。

【關鍵字】

1.天然衰減法(natural attenuation, NA)

2.自然整治法(intrinsic remediation, IR)

*行政院環境保護署水質保護處處長

**行政院環保署水質保護處助理環境工程師

一、有關“天然衰減法”的二十項重要觀念問答

1. 何謂“天然衰減法”(Natural Attenuation, NA)?

天然衰減法亦稱自然整治法(Intrinsic Remediation, IR)或天然復育法(Natural Restoration, NR)，依據美國環境保護署(USEPA)固體廢棄物及緊急應變辦公室(OSWER)的定義如下：“天然衰減法為在土壤及地下水環境中，無人為干預而自然發生的衰變程序，可以減少土壤及地下水中污染物的質量、毒性、移動性、體積或濃度。這些現場程序(in-situ processes)包括：生物分解、擴散、稀釋、吸附、揮發、污染物的化學性或生物性的穩定或破壞。”

簡單的說，當地下之物理、化學或生物程序能減少污染物質量、毒性及污染物的移動性，而降低對人體健康及環境的風險程度時，天然衰減法即為一種可被接受的復育方法。

在美國，其國家緊急應變小組已允許一些超級基金廠址(Superfund Site)，使用天然衰減法為整治復育的方法。另外，紐澤西州、南卡羅來那州、威斯康辛州等亦已立法或制定指導綱要以管理天然衰減法的運用評估及執行。

2. 天然衰減法是不是“什麼都不必做”(do-nothing)的方法？

天然衰減法不是一種“什麼都不必做”的方法，因為它仍必須做下列調查、監測及評估等工作：

- 了解含氯溶劑的分解(Fate)及傳輸(Transport)特性，以評估天然衰竭程序的自然因子及發生程序。
- 確定這些程序減少的污染物質量、毒性及污染物於地下的移動性，及能降低人類健康及環境風險程度。
- 評估影響天然衰減法長期績效的環境因子。
- 自然衰減過程的長期監測，以確定天然衰減法維持在持續有效的分解過程中。

3. 天然衰減法的有效機率有多大？

美國環保署專家(J. Wilson)曾預估約有 20%受含氯溶劑污染的場址，可以只採行天然衰減法來整治。杜邦公司的生物科技專家(D. Ellis)則預估除上述污染場址之外，約有 50%的污染場址可配合採天然衰減法作為整治方法的一部分。

4.為何要評估天然衰減法？

對於受含氯溶劑污染的場址，可評估/考慮採用天然衰減法。因其可視為：

- 為保護生態環境的一種簡而易懂的方法。
- 為一有經濟效益的整治方法，可單獨使用或配合其他復育的方法。
- 僅需要少量的工程，與其他大部分的整治方法相比較，此方法通常對於建築物及設備的需求，可減到最低。
- 對任何的整治方法而言，事前對地質化學的了解皆非常重要。

5.為何要針對含氯溶劑？

某些氯化合物及其分解過程中產生之中間產物是有毒性的且可致癌的。含氯溶劑屬於氯化合物，包含四氯乙烯(Tetrachloroethene, PCE)、三氯乙烯(Trichlorethene, TCE)、三氯乙烷(Trichlorethane, TCA)和四氯化碳(Carbon Tetrachloride, CT)等，其常被工廠用來維修及保養機組時的去漬劑，故最常在受污染的土壤及地下水中發現。

然而，以往的研究中均忽略了一個基本觀念，即含氯溶劑是一種可自然分解的化合物，而導致立法機關及業者忽略此一自然衰減機制。

6.對於含氯溶劑及其自然分解的特性，最常見的錯誤觀念是什麼？

- 含氯溶劑容易被發現並清除。
- 只有生物程序是重要的且須被考量的。
- 會累積更多有毒的中間產物。

(問題(7)~(10)將解釋第一點錯誤觀念，問題(15)和(17)則將解釋第二、三點錯誤觀念。)

7.有關受含氯溶劑污染的廠址其技術上的挑戰為何？

含氯溶劑可因其被排放的方式及廠區的地質狀況而以不同形態(如下所述)存在於地表下，再加上其特有的物理性質，使得含氯溶劑難於被發現、抽取及處理。

- 以氣態存在於不飽和土壤中。
- 以溶解形態存在於地下水中。
- 以液態存在於地下(如圖 1)，此種形態的溶劑又稱為非水相液體(Non-Aqueous Phase Liquids，NAPLs)，並不溶於水中。若此溶劑之密度比水輕則稱為比水輕非水相液體(Light Non-Aqueous Phase Liquids, LNAPLs)反之稱為比水重非水相液體(Dense Non-Aqueous Phase Liquids, DNAPLs)。大多數的含氯溶劑(例如：PCE, TCE 等)是為 DNAPLs。

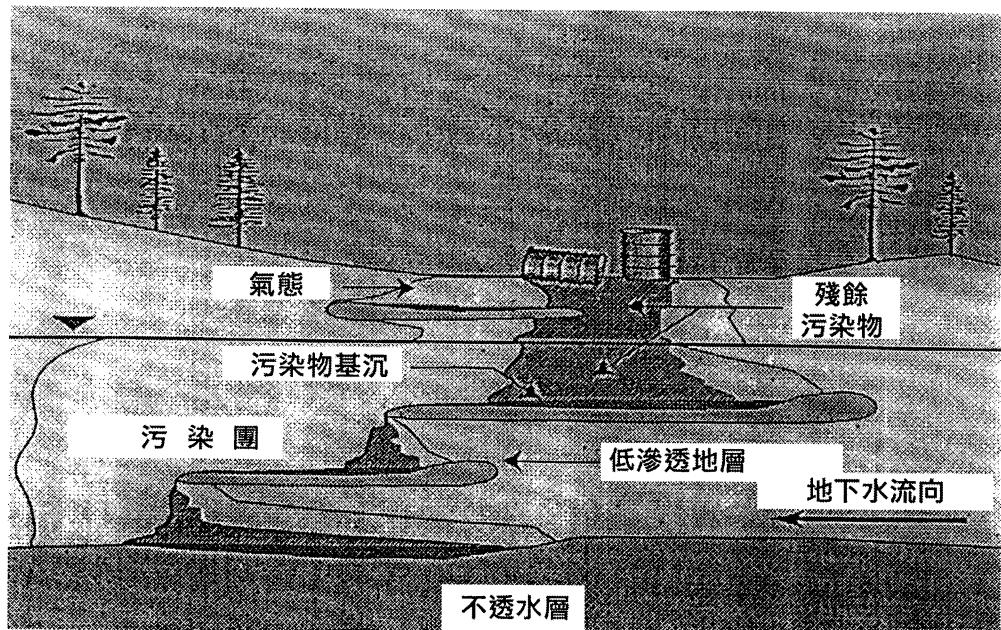


圖 1 含氯溶劑(DNAPLs)可能的滲透分佈情形

8. 整治 DNAPLs 污染物質時技術上的挑戰？

由於 DNAPLs 的物理特性(如圖 1 所示)，不僅增加調查及整治的困難，在某些廠址更影響其進行復育工作時，工程技術的可行性，例如：

(1)複雜的分佈性：

在污染的場址中，即使是些微的地質差異，也會影響到 DNAPLs 的分佈。此特性導致 DNAPLs 的蹤跡不易被預測、模擬〔如被釋放到地下的 DNAPLs 污染物質，將會滲透地下含水層而直到達不透水層(岩床或黏土層)〕，且地下水水流動方向未必代表 DNAPLs 的移動方向。此特性使得位在地表下的污染物質(DNAPLs)不易被現有的科技所偵測到，而正確的界定污染源是有效去除污染物的先決條件。再者，因滲透而蓄存於地下裂縫或空隙的 DNAPLs，更增加了整治的困難度。Pankow 和 Cherry 在 1996 年的調查報告中指出，大多數受 DNAPLs 污染的廠址，須去除約 99%的污染物質，才可使地下水質達到可飲用的標準。

(2)低溶解度 DNAPLs 的低溶解度物理特性，常需要數十年到數百年的時間，才可使污染物質完全溶解於地下水。而這也限制了傳統處理方式(抽取—處理地下水方法)對 DNAPLs 的去除效果。

(3)低擴散作用

從地質岩層擴散出去的 DNAPLs 污染物質遠小於因吸附作用而附著在地質岩層上的速率。此物理特性造成即使去除自由狀態下的 DNAPLs，地下水質仍會長期受到自地質岩層擴散出來的 DNAPLs 所污染。

(4)事前的調查、處理行為，可能惡化污染的情況

發生在 DNAPLs 污染源附近不恰當的鑽孔技術，會導致地下不透水層的破裂，使得 DNAPLs 有向下移動的新路徑。而抽取地下水，也會減低 DNAPLs 的浮力，此舉也會造成類似上述的情形產生。

9. 如何界定“比水重非水相液體，DNAPLs” 的存在？

通常被設計用來調查受 DNAPLs 污染廠址的技術是不切實際且不合乎效益的。任一場址，只要曾使用、堆棄過含氯溶劑皆有可能受 DNAPLs 的污染，除非有正式文件記載其處理量約等於使用量。大致說來，若地下水中偵測到含氯溶劑的濃度超過其溶解度的百分之一，則可懷疑此場址已受 DNAPLs 的污染。

10.DNAPLs 的存在，會如何影響到廠址的整治策略？

至今針對 DNAPLs 仍無一安全、有經濟效益的整治方法。傳統上對於 DNAPLs 的整治方法是採用“抽取—處理地下水”的處理方式，來去除污染物質。此方式不僅耗費時日，更須花費大量金錢，且處理效果不顯著。就像前面所述，少量的剩餘污染物(DNAPLs)，便會使地下水再次受到污染。因此，美國環保署了解到某些受 DNAPLs 污染的區域，以現有之工程技術整治方法為“技術上不可行(Technical Impracticability, TI)”。故對多數受污染的區域而言，其整治/管理的策略應該專注於整合較先進及有效率的技術，且可長時期的操作，以減低污染物質對生態環境的破壞。所以，自然整治法是去除地下水中的含氯溶劑的一個適當且可長期操作的復育方法。

11. 含氯溶劑的自然整治過程牽涉那些物理、化學反應？

(1) 生物分解(Biodegradation)

地下水中含氯溶劑的自然分解，主要是由微生物的氧化、還原所造成(問題(十二)至(十四)將會詳述此機制)。少部分的含氯溶劑將與金屬產生化學反應而分解，與水產生水解反應而產生自然分解。

(2) 對流、分散、稀釋作用(Advection, Dispersion, Dilution)

對流作用就是傳送水中溶解的分子。在對流過程中，分子將會隨著地下水流向散播，此現象則稱為分散作用。前述二種物理現象合稱為稀釋作用。

(3) 擴散作用(Diffusion)

濃度的差異，造成分子的分散作用(從高濃度到低濃度)，此現象稱為擴散作用。

(4) 吸附/脫附作用(Sorption/Desorption)

溶解於水中的分子，會因地質岩層表面未達平衡或飽和狀態，而附著於其上，此現象稱為吸附作用。反之被吸附物質脫離地質岩層的現象，則稱之為脫附作用。

(5) 挥發作用(Volatilization)

分子從液態轉變為氣態的現象稱為揮發作用。揮發性有機化合物“VOC”(如含氯溶劑)便可藉由此物理特性，而在其排放時，揮發至大氣層中。

(6) 穩定作用(Stabilization)

分子經由化學作用與穩定的因子(如：黏土、腐植物質)結合，而降低其活動性。

12. 含氯溶劑的自然分解過程為何？

其分解過程示如圖 2 含氯溶劑的分解途徑所示。

13. 含氯溶劑自然分解後其產物為何？

含氯溶劑經一連串的厭氣反應後其最終產物可為乙烷、乙烯、甲烷或二氧化碳。然而，因其各個中間反應之反應速率並不相近，造成中間產物可能有累積的情形產生。

14. 各污染場址是否皆存有適合的微生物？

大致上，各污染場址皆存有各種形態的微生物，然而並非所有參與含氯溶劑自然分解過程中所需要的微生物，皆會存在於污染場址中。例如，科學家們相信約有 90% 的污染場址，可發現使 PCE/TCE 轉變成 DCE 所需要的微生物；約有 75% 的污染場址，有可使 PCE/TCE 轉變成乙烯所需要的微生物。

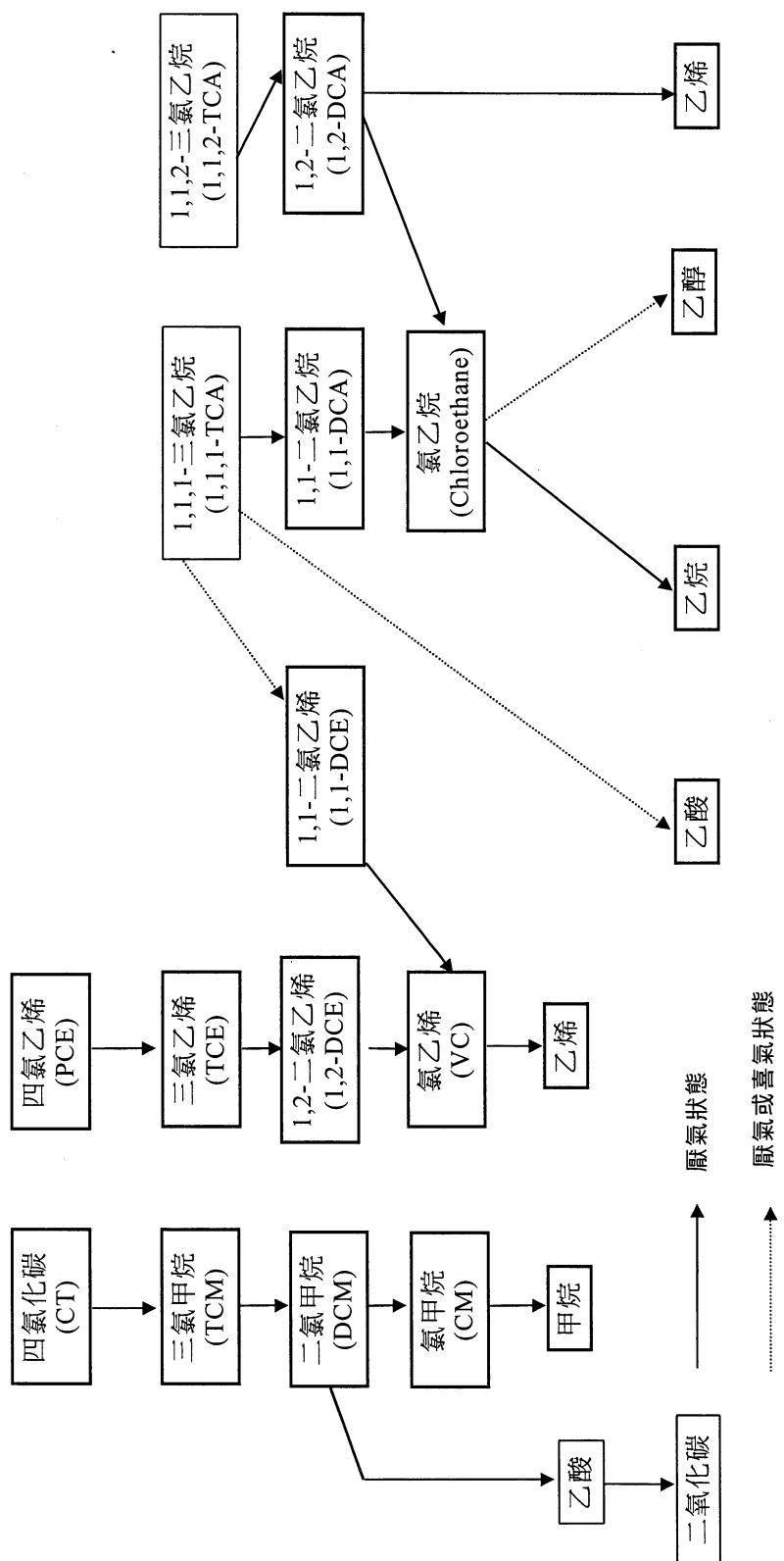


圖 2 含氯溶劑之分解途徑

15.何時需考慮/評估自然整治法？

所有的場址皆可評估自然整治法的可行性，特別是在早期的場址調查過程中。因在執行實施任何整治措施之前，了解自然整治的過程是非常重要的。若考慮使用自然整治法為單獨或部分復育措施，對自然整治過程完整而詳細的認知是必要的條件。下列時機為評估是否採用自然整治法的適當時機：

- 已觀察到自然衰減的最終產物或中間產物或強烈的預期其會發生。
- 在受污染的區域內，環境生態不會受到污染物影響或能夠被保護著。

除此之外，也可參考下列幾點以考慮自然整治法的可行性：

- 自然整治法是可保護人體健康及環境品質的復育方法。
- 存在有連續的污染源，無法在短時間以有效益的方法去除，而需要長時期的努力。
- 替代的整治方法，是無效益或技術不可行時。
- 替代的整治方法，可能增加更大的風險時(如：擴大污染區域、破壞鄰近的生態系統)。

16.何種情況之下不需考慮自然整治法？

- 無法對人體健康及環境安全提供保護時。
- 替代的整治方法可提供更穩定及更有效益的技術以去除污染物質時。

17.在評估、實行自然整治法之前，是否需要任何實際證據？

評估或採行自然整治法至少需具備下列三個基本條件：

- 對該廠區以往污染物質的去除量，需有書面的記載。
- 地質化學及生物化學的指標參數顯示該區域適合生物自然分解。
- 直接的微生物證明(微生物種或微生物反應)。

18.如何才能符合此三個基本條件？

- 觀察已往的資料，並比對污染物濃度、分佈範圍與現場地質、水文的關係，顯示總污染量有減少的趨勢。因為含氯溶劑的自然分解速率與地質環境（氧化還原電位、可釋放電子的濃度....）有關。因此，利用現場的地質數據，以預估生物分解的速率是非常重要的。

- 觀察地質化學及生物化學指標參數的濃度變化，是否與自然分解過程有特別關聯。
- 若現場的資料無法令人相信含氯溶劑有自然分解的現象及其分解速率之快慢，此時實驗室的研究證明便有其必要性。

19.針對此三種基本條件，需提供何種資料？

資料的需要，依各污染場址的不同而有所差異。表 1 列出幾種常見含氯溶劑的污染物及其在地下水中的分布狀況及自然整治法的主要機制。

表 1 常見含氯溶劑的存在形式

| 項目 | VOC 的型態 | VOC 的分佈情形 | 分解的機制 | 範例 |
|----|---|---------------------------|-------------------------------|--|
| 一 | 只有主要污染物(PCE, TCE, TCA, CT 等) | 根據地下水傳輸計算模式觀測的分佈狀況與預期結果相符 | 只有物理反應(分散、稀釋、吸附、固化、揮發等作用) | 含氯溶劑污染物滲透至地下水層 原始地下水層含低濃度的天然有機物及中間產物 |
| 二 | 只有主要污染物(PCE, TCE, TCA, CT 等) | 根據地下水傳輸計算模式觀測的分佈狀況與預期結果相符 | 除物理反應外可能有生物或化學反應產生，但無法偵測其中間產物 | 1. 主要為物理反應 含氯溶劑可直接轉變為中間產物(如:DCM) 含氯溶劑與其他共同代謝物(cometabolite, 如甲苯)同時滲透 |
| 三 | 存在主要污染物及分解之中間產物 高分解速率(>10 : 1) | 根據地下水傳輸計算模式觀測的分佈狀況與預期結果相符 | 包含物理、生物、化學等反應 | 1. 含氯溶劑滲透至地下水層 2. 原始地下水層含高濃度的天然有機物 3. 僅有少量共同代謝物同時滲透至地下水層 |
| 四 | 1. 存在主要污染物及分解之中間產物 2. 低分解速率(<10 : 1) | 根據地下水傳輸計算模式觀測的分佈狀況與預期結果相符 | 包含物理、生物、化學等反應 | 滲透至地下水層之廢水中除含氯溶劑外，尚混有其他污染物(如:甲醇，石油碳氫化合物) |

20. 實行自然整治法的步驟？

步驟一：審查現有資料

重新審查現有的污染區資料，並判定可能曝露在污染區內的承受體。每個污染區域皆有其特殊性，故依現有可得之資料，區分各污染區遭受污染的現況是採行自然整治法非常重要的一環。

步驟二：發展初步的污染場址整治模式

依據現有的資料，發展初步的整治模式，其主要為地下水的流向及傳輸系統。此模式通常使用在：

- 藉由地下水流向及傳輸系統，以解釋化學物質的分布狀況。
- 加強驗證風險評估中的曝露分析(如：污染源釋放的機制，傳輸途徑，污染範圍等)。

而整治調查報告應根據調查所得之地質、水文及化學的資料而來，並應說明：

- 化學物質的減少與地下水水流及傳輸系統的關係。
- 可判定在任一選擇的區域，是否需要收集額外的資料。

步驟三：篩選資料以驗證自然分解的現象

1. 現有的資料是否足以顯示化學物質的減少與自然分解相關。如含氯溶劑的濃度是否隨著時間而降低，或隨著水流的方向所量測到的含氯溶劑濃度是否與模式預測值相符。

2. 現有的資料是否可說明地質化學、生物化學等指標參數傾向自然分解。例如地下水中是否可發現分解的產物或中間產物(氯乙烯，乙烯等)，碳源的消耗/產生或無機化合物的產生是否可與已知的生物分解反應相符。

步驟四：確認是否需要額外的數據

參考點的選擇與判定是依各場址的特性來決定。基本上，參考點應包括污染源附近及污染區地下水的上下游地區，至少應有一個參考點位在下游的污染區外。須特別注意的是在污染物質集中區域內設置參考點時，應注意工程進行時，所可能造成污染情況的改變。

步驟五：額外數據的收集

數據的收集應採用適當的模式(如：採樣的方法、微生物及化學參數的分析、QA/QC 的步驟等)以增強其可信度。

步驟六：修改初步的模式

在取得新數據後，應將其與初步的模式融合，並且重新說明場址的現況。例如：

- 地下水位的高低及地下水的平面流向。
- 地下水的垂直流向。
- 以圖形方式表現出地下水中化學參數的濃度對時間及距離的變化情形。
- 預測污染物質的質量平衡情形（應包含中間產物）。
- 預測污染物質及其產物的流動方向。
- 預測被吸附及殘餘的化學物質。
- 預測地下水對長時期自然分解的涵容能力。
- 比較模式中使用生物分解動力常數(如：半衰期、分解常數等)，污染物質濃度對時間的變化。
- 視情況的需要，執行更精密的分析，以取得地質或水力地質的常數。

步驟七：利用新模式來驗證自然分解的現象

比較由步驟三所得之現勘數據及步驟六所得之模式，所模擬出之數據是否相符。若是，則應實行曝露途徑分析。反之，則應用現有最新之資料或收集更多的數據以重新評估步驟三之正確性。

步驟八：曝露途徑分析

更新後的模式應該用已知相關的污染承受體及生態風險來驗證。驗證自然分解的速率是否能夠降低污染物質的濃度以達到環境生態可接受之程度。若是，則可將自然分解法併入長期的整治策略之中。反之，則須考慮是否能再使用工程技術的控制，以降低污染物質的濃度，使自然整治更具效率。

然而，若工程上的整治屬於技術上不可行(TI)，則自然整治法或許可為長期使用的主要復育方法。

步驟九：使用自然分解為長期的整治策略

考慮此策略之前，需先確定促成生物自然分解的各項地質化學指標參數，是否能長期的存在或須於何時再以人工的方式補充。

若答案是肯定的，則可發展長期的整治策略，並配合監測系統，以確定符合環保法令。反之，則可評估，何時是使用自然整治法的最佳時機、最佳策略。

二、有關“天然衰減法”的二十四個重要案例研究

近幾年，美國與加拿大已逐漸認可自然整治法對含氯溶劑的處理效能，且已針對某些特定場址做實際的應用。以下是針對天然衰減法去除含氯溶劑污染性實場分析，就二十四個實際應用天然衰減法之個案、分析其反應、主要污染源、污染物、產物及微生物反應做一簡述。

二十四個案例中，化工廠或化學品相關工廠有八個、軍事單位(如空軍基地、軍火庫)六個、掩埋場三個，其他七個，各場場址之土質多為砂質土壤，少部分為破碎的岩盤。百分之八十三的場址主要污染物為四氯乙烯(PCE)和三氯乙烯(TCE)，少部分參雜有氯乙烯(VC)、二氯乙烯(DCE)及1,2-二氯乙烷(1,2-DCA)等。各場之主要反應產物則為乙烯(ethene)、乙烷(ethane)、二氧化碳及水等。

二十四場中除一個軍事基地場為喜氣反應外，其他的二十三個場均含厭氣反應，但只有四個化工廠場址為純厭氣反應，其他場址則喜氣及厭氣反應均包括。至於微生物的反應機制，各場差異不大，其主要參與反應的微生物為甲烷生成化(Methanogenesis)，乙酸化(Acetogenesis)，而硫酸鹽的還原反應及鐵的還原反應則為主要的氧化還原反應。

為能使讀者能更詳細的比較各污染廠址的地質、化學情形，僅以表2列出。

表 2 各污染場址的地質、化學狀況

| 場址/工廠型態 | 地質狀況 | 主導的氧化還原反應 | 主要/中間化學物質 | 微生物反應 | 現況 |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------|---|--------------------|--------------------------|
| 多倫多，安大略省/化學物品運輸工廠 | 低滲透率粉土質 冰磧岩地表下 30 呎以上 | 厭氣 | PCE->乙烯 | 甲烷生成化，醋酸化，硫酸鹽的還原反應 | 調查中，實驗室研究及 8 個現場研究實驗 |
| 薩加緬度, 加州/工業設施 | 未固結河川沉積物，粉土質砂，礫石，深層，地表下 70 呎 | 喜氣及厭氣 | TCE->乙烯 TCA->乙烷 VC->CO ₂ | 甲烷生成化，喜氣氧化 | 調查中及實驗室研究 |
| Auburn, 紐約州/工業設施 | 過載之破碎岩盤 | 厭氣 | TCE->乙烯 | 甲烷生成化，醋酸化，硫酸鹽的還原反應 | 調查中實驗室研究 |
| 波特蘭, 奧勒岡州/化學物品運輸工廠 | 砂及填充物，深層，地表下 30 呎以上 粉土不透水層 | 厭氣 | PCE/TCE-> 乙 烯 甲苯，二甲苯，二氯甲烷 | 甲烷生成化，醋酸化，硫酸鹽的還原反應 | 調查中(地下水)及實驗室研究 |
| Kitchener, 安大略省/工業設施 | 粉土質砂，淺層，地表下 30 呎以上 粘土不透水層 | 喜氣及厭氣 | TCE->乙烯 | 甲烷生成化，醋酸化，硫酸鹽的還原反應 | 調查中(地下水)及實驗室研究 |
| Farmington, 新罕布爾州/掩埋場 | 掩埋場，橡膠質襯底，粉土質砂至地表下 65 呎之岩盤 | 喜氣及厭氣 | TCE,DCE,VC-> 乙 烯，二氯甲烷 | 甲烷生成化，醋酸化，共代謝氧化 | 調查中(地下水)及實驗室研究 |
| St.Joseph, 密西根州/工業設施 | 細至中砂 地表下 60-95 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙 烯，乙烯 | 甲烷生成化，硫酸鹽及鐵的還原反應 | 調查中(地下水)及實驗室研究 (新陳代謝) |
| Plattsburgh, 紐約州/空軍基地 | 細至中砂 地表下 0-90 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙 烯，乙烯 | 甲烷生成化，硫酸鹽及鐵的還原反應 | 調查中(地下水) |
| 紐澤西州/軍火庫 | 細至粗砂 不連續分佈的粉土/粘土至地表下 50-70 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙 烯，乙烯 | 甲烷生成化，硫酸鹽及鐵的還原反應 | 調查中(地下水) |
| Dover, 德瓦拉州/空軍基地 | 細至粗砂，夾少許 粉土至地表下 30-60 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙 烯，乙烯 | 甲烷生成化，喜氣氧化 | 調查中(地下水)及實驗室研究 |
| 阿拉斯加州/空軍基地 | 粗砂及礫石 至地表下 180-300 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙 烯，乙烯 | 甲烷生成化，硫酸鹽及鐵的還原反應 | 調查中(地下水) |
| Oscoda, 密西根州/空軍基地 | 中至細砂 粗石及礫石 至地表下 60-90 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | PCE,TCE->二 氯乙烯，氯乙 烯 | 甲烷生成化，硫酸鹽及鐵的還原反應 | 調查中(地下水) |
| Richmond, 加州/化學工廠 | 粒土、粉土及砂組成之河口沈積物 至地表下 130 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | PCE,TCE->氯 乙烯乙烯 | 硫酸鹽還原反應等 | 調查中(地下水) |

表 2 各污染場址的地質、化學狀況(續)

| 場址/工廠型態 | 地質狀況 | 主導的氧化 還原反應 | 主要/中間 化學物質 | 微生物反應 | 現況 |
|---------------------------------|--|-------------------|---|--------------------------------------|--------------------|
| 尼加拉瓜,紐約 州/掩埋場 | 過載之破碎岩盤 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | PCE/TCE->氯 甲烷氯乙烯, 乙烯,乙烷 | 甲烷生成化,硫 酸鹽的還原反應 | 調查中(地下水) |
| 尼加拉瓜,紐約 州/化學工廠 | 過載之破碎岩盤 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | PCE/TCE->氯 乙烯二氯甲 烷,三氯乙烷 | 甲烷生成化,硫 酸鹽的還原反應 | 調查中(地下水) |
| Hawkesbury, 安 大略省/地毯製 造工廠 | 冰磧岩,再沈積之 砂及粉土及覆蓋 於未風化的砂質 粉土及破碎之岩 盤 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | PCE/TCE->氯 乙烯,乙烯, 乙烷 | 甲烷生成化,醋 酸化,硫酸鹽及 鐵的還原反應 | 調查中(地下水) 及實驗室研究 |
| Gulf Coast/化學 工廠 | 泥媒、粒土及粉土 層 | 喜氣及厭氣 | 1,2-DCA, 甲 醇, 乙烯, 乙 烷 | 硫酸鹽及鐵的還 原反應 | 調查中(地下水) 及實驗室研究 |
| 荷蘭/氯乙烯工 廠 | 自然物質上填充 4m 厚的砂 | 喜氣及厭氣 | 1,2-DCA, 氯乙 烯, 乙烯, 乙 烷 | 硫酸鹽類還原反 應 | 調查中(地下水) |
| Louisiana/氯乙 烯工廠 | 極細至深 20 呎之 粘土阻水層 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | 氯乙烯, 乙烯 | 甲烷生成化,硫 酸鹽及鐵的還原 反應, 喜氣氧化 | 調查中(地下水) |
| Cecil County, 馬 里蘭州/掩埋場 | 砂及填充物覆蓋 於破碎的岩盤 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | 氯乙烯 | 喜氣氧化 | 調查中(地下水) |
| Pinellas,佛羅里 達州/DOE 工廠 | 海相沈積物細砂 夾少許粉土、粘土 地表下 30 呎以上 | 厭氣 | TCE->氯乙烯 DCM->氯甲烷 | 無法確認 | 模場試驗 |
| Canoga Park,加 州/工業設施 | 淺層過載於破碎 之岩盤之上 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙烯 TCA->DCA, CT, DCM | 甲烷生成化,硝 酸鹽類還原反 應, 喜氣分解 | 調查中(地下水) |
| 薩加緬度,加州/ 工業設施 | 未固結之河川沈 積物 粉質砂,礫石,深 層, 地表下 70 呎 | 厭氣(污染帶) 喜氣(背景) | TCE->氯乙烯 1,2-DCA->乙 烯 1,2-DCA-> CO_2 | 甲烷生成化,硝 酸鹽及硫酸鹽類 還原反應, 喜氣 分解 | 調查中(地下水) |
| Ogden,猶他州/ 空軍基地 | 粘土、粉土、砂及 礫石之互層地表 下 15-110 呎。 | 喜氣 | PCE/TCE->二 氯乙烯 | 無法確認 | 調查中(地下 水及不飽和水層) |

結 語

天然衰減整治法經近十年的逐漸發展，工業界面臨一些自身攸關的污染問題，尋求經濟有效的處理及解決方法時，亦逐漸領先政府法規部門的制定進程，而發展出許多各自暫時應用的作業準則(Protocol)，這些作業準則雖有歧異，但亦有共通之部分。美國國家研究院(NRC)最近(1998 年)特別組成委員會，由西北大學教授 Dr.Bruce Rittman 領軍，希望以這些準則為依據能再整合成更好的版本，本文暫時先引介目前各準則(美、加等國)的內涵，同時等待 NRC 最後整合完成的版本，做為國內處理類似事件的參考。

參考文獻

- 1.Industrial Members of the Bioremediation of Chlorinated Solvents Consortium of the Remediation Technologies Development Forum (RTDF), *Natural Attenuation of Chlorinated Solvents in Groundwater: Principles and Practices*, Aug. 1997, Version 3.0.
- 2.Renner, R., “Intrinsic Remediation Under the Microscope”, *Journal of American Chemical Society*, April 1998, p.180-182.
- 3.Pankow, J. K. and J. A. Cherry, “Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater”, *Waterloo Press*, Portland Oregon, pp.522.
- 4.Chevron Research and Technology Company, Health Environment and Safety Group, Protocol for Monitoring Natural Attenuation of Chlorinated Solvent in Groundwater, February 1997.
- 5.Chevron Research and Technology Company, Health Environment and Safety Group, Protocol for Monitoring Natural Attenuation of Monitoring Natural Attenuation of Chlorinated Solvent in Groundwater, March 1997.