

防治技術

土壤污染之微生物復育法

張萬權*

摘要

土壤污染之微生物復育法是藉由人為的環境改變，使受污染區域成為生物活化區，提高微生物分解有機污染物的速率，達到破壞和去毒的效果。本文簡介現地微生物復育法之原理、適用範圍與考慮因素，最後並提供一種簡易型評估模式來決定微生物復育法的適用程度，作為早期土壤復育方式選用的指標。

【關鍵詞】

- 1.微生物復育法(bioremediation)
- 2.土壤復育(soil remediation)
- 3.被污染土壤(contaminated soil)
- 4.含水層(aquifer)

一、前言

微生物復育法(bioremediation)是利用自然界存在的土壤微生物或人為馴養的微生物來分解受污染土壤中有機性污染物，達到土壤復育之目的。這項技術的基本觀念包括改變環境狀況以提高微生物新陳代謝速率，加速分解有機物，使這些污染物破壞和去毒。

美國環保署在1986年超級基金(Superfund)中甚至鼓勵環工界採行微生物復育法來清除土壤中有害性事業廢棄物。這樣建議的理由是基於微生物復育法

*金屬工業研究發展中心副工程師

是使用當地土壤內自然的微生物群來進行污染物的分解工作，例如將多氯酚(PCP)分解成碳、氫、氯、氧等，較不致有引起危害公眾安全的後遺症；同時，微生物復育法可視為永久性的處理方法，不需要其他後續處理來收拾殘局。因此，本技術近幾年發展快速，其中現地微生物復育法(*in-situ biore-mediation*)被視為最有希望的現地處理技術之一。

有害性事業廢棄物未經適當控制或處理，而排放至土壤中後會傳播到地下水中，隨著地下水的流動而擴大其污染範圍，破壞生態環境。因此，環保先進國家近年來為了還給下一代一個乾淨的地球，無不投入巨額經費與大量人力積極發展各種土壤復育技術。但是由於土壤及地下水污染在先天環境上具高難度處理特性，處理成效難以掌握而且有限。然而這是一件今天不做，明天就會後悔的環境保育工作。

二、現地土壤復育法之種類

現地土壤復育(*in-situ remediation*)技術依處理機制的不同可區分成三大類：

1.化學法

通常是將特定化學物注入地表下層，使土壤及地下水中污染物破壞或進行化學改變；常見的方法有中和、沉澱、固定及沖洗等。

2.物理法

包括使用熱、冰、氣提(*air stripping*)、電動力法(*electrokinetics*)或其他物理性操作來固定或移除有機及無機性污染物。

3.生物法

是利用土壤中微生物族群自然分解污染物，通常對有機物較有效；分解過程的最終產物對環境無害。生物法對環境變數較敏感，主要因子包括溫度、水分、含氧量及有機物濃度等。有時為加速微生物的分解代謝過程必須調整環境條件，以獲取最佳效率。

現地處理法到目前雖有一些成功的實地示範，但大部份方法乃基於常見的廢棄物處理觀念予以應用，在實際工程中仍待仔細評估與設計才易發揮預期功效。

圖 1 即為現地微生物復育法的簡單示意圖，基本上包含營養物／氧氣供給單元及注入井／抽出井單元，有時抽出之地下水會先送污水處理單元後，再添加營養物回注至地表下層；氧氣供給可採就地曝氣或加入 H_2O_2 水溶液為之。

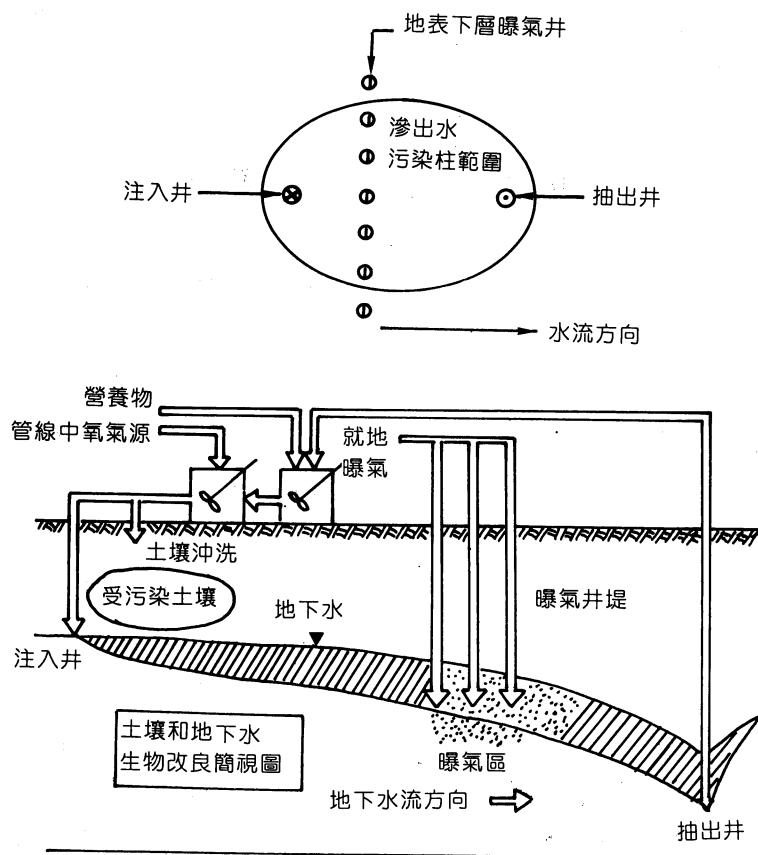


圖 1 現地微生物復育系統示意圖⁽²⁾⁽⁶⁾

三、微生物復育法原理

3.1 生物轉換過程(biotransformation process)

生物轉換在環工界的應用相當普遍，例如二級污水處理廠及垃圾掩埋場都是利用的自然界與經人工馴養的微生物來分解破壞污染物。這些微生物以污染物質中的有機或無機成份做為食物來源。分解的過程可以是喜氣性(aerobic)或是厭氣性(anaerobic)，以獲得能量來維持微生物的新陳代謝與成長。當微生物在喜氣環境下，氧氣成為電子最終接受者(electron acceptor)；在厭氣環境中，硝酸鹽(nitrate)、硫酸鹽(sulfate)、CO₂、甚至有機物本身都可成為電子最終接受者。（視菌種而定）。

表1列出不同有機物在被微生物分解時所扮演的食物角色，其型態有二種，分別為一次基質(primary substrate)及二次基質(secondary substrate)。微生物可直接分解利用並做為主要食物來源的有機物，稱為一次基質。二次基質亦稱共新陳代謝基質(cometabolism)，其定義是當一次基質被分解時所附帶分解之有機物；微生物通常無法將二次基質當做主要的食物來源來製造新陳代謝所需之所量。

表1 土壤中有機物分解時所扮演的食物角色⁽³⁾

有機物角色	分解條件	有機物種類
一次基質	喜氣或厭氣	葡萄糖、丙酮、異丙醇、酚、醋酸
	喜氣為主	烷類、苯、甲苯、二甲苯、氯乙烯、二氯乙烷、氯苯
二次基質	氧化	三氯乙烯、二氯乙烯、二氧化乙烷、氯仿、氯乙烯
	還原	三氯乙烷、三氯乙烯、四氯乙烯、二氯乙烷、二氯乙烷、四氯化碳、氯仿、DDT、多氯聯苯、丙體666

3.2 土壤中有機物分解動力學

正如同活性污泥法中細菌分解污水中有機物之過程，土壤中有機物（指一次基質）被微生物分解速率亦可用Monod equation來表示如下：

$$-\frac{dS}{dt} = KX \frac{S}{S + K_s} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

其中， S ：一次基質濃度(mg/L)

X : 微生物濃度(mg/L)

t : 時間(days)

K : 最大基質利用速率(day^{-1})

K_s ：反應速率最大值的一半時的基質濃度(mg/L)

當一次基質濃度極高時($S \gg K_s$)，式(1)變成

當一次基質濃度極低時($S \ll K_s$)，式(1)變成

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{K}{K_s} XS \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

K/K_s 的比值通常又稱為二次速率常數(second-order rate constant)，這項比值的大小在考慮低污染物濃度時的土壤復育程序相當重要。

很明顯地由方程式(1)及(3)可看出，為了增加有機污染物的利用速率，微生物濃度必須增加。微生物生長速率與基質濃度之間的關係變成下列方程式：

$$\frac{dX}{dt} = Y \left(-\frac{dS}{dt} \right) - bX \quad \dots \dots \dots \quad (4a)$$

$$\text{或 } -\frac{dX}{dt} = YKX \frac{S}{S+K_s} - bX \quad \dots \dots \dots \quad (4b)$$

當微生物淨成長率為零時($dX/dt = 0$)，我們可從(4)b得知最小基質濃度(S_{min})應為：

$$S_{\min} = \frac{bK_s}{YK - b}$$

假如某一單獨有機物進入土壤，但它的濃度卻低於 S_{min} ，此時這個有機物只能做為二次基質，而且微生物淨成長率將等於零。不過，當有機物濃度大於 S_{min} ，土壤中微生物即可利用此有機物做為新陳代謝活動之主要食物來源，微生物因此隨時間繁殖擴增，更加速有機物分解之過程。

舉一個典型例子來說，在溫度20°C的有氧環境下，當 $K = 10 \text{ day}^{-1}$, $K_s = 10 \text{ mg/L}$, $Y = 0.5$, $b = 0.1 \text{ day}^{-1}$ 時， S_{min} 將至少維持0.2mg/L方可。當溫度下降時， K 、 b 值會隨之下降， K_s 就會增加；然而溫度對 S_{min} 的影響就不太明顯確定，升降皆有可能，主要得視微生物菌種、有機物種類及其他環境條件而定。

通常地下水污染物濃度是在 $\mu\text{g/L}$ 的範圍，可能遠低於 S_{min} ，因此必須添加一些無害之有機物（如醋酸）做為一次基質，然後在分解過程中能附帶去除那些低濃度污染物（當做二次基質被分解）。

四、適用範圍與考慮因素

地表下層土壤孕涵著許許多不同種類的微生物；有機物的分解即是藉由這些微生物所產生的酵素來促進完成。由於酵素大部分僅在細胞體內作用，因此有機物必須接觸或進入細胞體內才有機會被破壞分解。有時，這些受基因控制產生的酵素，為了適應環境發生突變，而提升了消耗分解有機物的能力。土壤環境條件好壞在實施土壤復育工程時幾乎決定了成敗與否。表2即累積了前人經驗之所得，指出一般適於微生物生長繁殖的土壤環境條件。

一份詳盡的場址特性調查是獲致成功的現地微生物復育的基礎。這些調查通常包含三大範圍，分別是土壤特性、地表下水文特性及微生物特性。場地的限制往往會影響復育速率及處理區域的範圍大小。表3詳列出一些會影響有機物被微生物分解的重要場地考量因素。明確地說，決定現地微生物復育可行性的因素是由下列三項所構成：

- 有機污染物的生物分解性
- 影響微生物活動的環境條件
- 場地的水文地理狀態

表2 適合土壤微生物生長的環境條件⁽⁴⁾

土壤環境因子	最 佳 條 件
自由含水量	保水能力在25~85%之間
氧氣	喜氣性分解：溶氧量>0.2mg/L孔隙氣體含量：10%（體積比）厭氣性分解：氧氣濃度<1%（體積比）
氧化還原電位	喜氣及兼氣厭氧菌：>50mv 厭氣菌：<50mv；pH 5.5~8.5
養分	足夠之氮、磷等養分 一般建議 C:N:P=120:10:1
溫度	中溫菌：15~45°C

表3 採用現地生物復育法須考量之土壤及場地因素⁽⁴⁾

分 類	考 量 因 素
場地位置及地形地勢	距污染源遠近、地表坡度、設施安裝空間、水系特徵
土壤特性	土壤種類及成份、界限特性(boundary characteristics)、深度組織構造(texture)、粒度分布、黏土含量、黏土型式、斑紋程度(degree of mottling)、體密度(bulk density)、陽離子交換能力、有機物質含量、pH值、Eh值、天然氣曝情形
水力特性與狀態	土壤水分特性曲線、田間保水量與永久凋萎點(field capacity/permanent wilting point)、保水能力、透水係數(permeability)、入滲率、至不透水層(岩床)之深度、至地下水深度、洪水頻率、逕流位勢(runoff potential)
地理及水文	地表下層地理結構、地下水流特性
氣象及氣候	風速及風向、溫度、降雨量

如同一般有機體，微生物需要特定的無機養分（例如氮、磷酸鹽、微量金屬）和碳及能源來維持。若無機或有機污染物濃度太高，反而對微生物族群有毒，必須考慮微生物族群的耐藥性。

經由人為操作使現地環境狀況最佳化是可行的，營養物及氧氣（通常為 H_2O_2 ）可利用鑽井送至地表下層。 pH 值可藉稀釋酸或碱的添加來調整。甚至可經由一套地表加熱單元使地下水再循環而達到提高受污染區的地下水溫度。

有某些因素是無法修正，如捕食者的出現、微生物族群之間競爭，或地下水的鹽分等。

決定現地復育系統成功與否的因素之一是確保注入和回收系統設計以完成下列各項目標：

- (1) 提供處理劑和受污染土壤或地下水之間的充分接觸；
- (2) 提供處理劑和污染物的水文控制以防止其外移出處理區域；
- (3) 必要時能將已消耗之處理溶液或污染物完全回收。

為使天然微生物族群活潑化，傳送營養物和氧氣至地表下層常是必須採行的措施。氧氣經由空氣、純氧、過氧化氫，甚至臭氧的使用提供至地表下層，表 4 摘要不同氧氣供應方案的優缺點比較。

表 4 各種氧氣供應方案的優缺點比較^(2,6)

物 質	應 用 方 法	優 點	缺 點
空氣	管線中 就地井	<ul style="list-style-type: none"> • 最經濟 • 可持續供氧 	<ul style="list-style-type: none"> • 除供微量污染 COD < 10mg/L 使用外尚無實績 • 井易爆炸
氧含量高之空氣或純氧	管線中	<ul style="list-style-type: none"> • 比曝氣提供相當高的O₂溶解性 	<ul style="list-style-type: none"> • 除了供低程度污染 COD < 25mg/L 外尚無實績
過氧化氫	管線中	<ul style="list-style-type: none"> • 中等費用 • 密切與地下水混合 • 可供應較大O₂濃度至地表下層 (100mg/L), H₂O₂提供50mg/L O₂) • 幫助保持井無嚴重之生物生長 	<ul style="list-style-type: none"> • 接觸土壤H₂O₂快速分解，除非妥善穩定，否則氧氣可能過早逸出
臭氧	管線中	<ul style="list-style-type: none"> • 會發生化學氧化導致化合物較易生物分解 	<ul style="list-style-type: none"> • 臭氧產生昂貴 • 除在低濃度外對微生物有毒 • 可能需要額外曝氣

五、現地微生物復育法之簡易可行性篩選模式

本節將提供一個簡易的評分系統，來協助環境工程師利用一些場地調查所得之資訊，能事前評估微生物復育法的可行性，詳見表 5。要提醒的是，本表旨在提供一套先期準則，最後的決定仍有賴資深工程師豐富的經驗及詳細的研究評估。

表5a 現地微生物復育法適用性評估模式⁽¹⁾

項 目	給 分
有機污染物特性	
1.化學結構	
• 簡單有機物(C1~C5)	0
• C12~C20	-1
• >C20	-2
• 醇、酚、胺	0
• 酸、酯、胺	0
• 醣、單氯有機物、有機氮	-1
• 多氯有機物	-2
• 殺蟲劑	-2
2.來源	
• 固定點污染源	+1
• 非固定污染源	-1
水文狀態	
1.含水層透水係數(cm/sec)	
> 10^{-3}	0
$10^{-3} \sim 10^{-4}$	-1
$10^{-4} \sim 10^{-5}$	-2
2.含水層厚度(ft)	
20	+1
10	0
5	-1
>2	-2
3.地表至含水層深度(ft)	
20	+1
10	0
5	-1
>2	-2
4.地理結構	
• 均質性佳	+1
• 均質性差	-1

表5b 現地微生物復育法適用性評估模式⁽¹⁾

土壤及地下水化學	
1.地下水pH	
>10	-2
8.0~10	-1
6.5~8.0	0
4.5~6.5	-1
<4.5	-2
2.地下水化學	
• Fe,S,Ca,Mn,Cu,Ni濃度高	-0.5
• NH ₄ ,Cl濃度高	-0.5
• 含重金屬(As,Cd,Hg)	-0.5
總分	評估結果
>0	• 適於實施
-1 ~ -2	• 需少許考量
-2 ~ -4	• 需慎重考量
<-4	• 不適於實施

六、結論

現地微生物復育法實作時常必須將微生物所需之養分（例如氯或正磷酸鹽）、電子接受者（例如H₂O₂水溶液中氧氣）注入到地表下的受污染含水層。上述添加物都是以液體型式注入土壤，在流通路徑區域可促使形成生物活化區(bioactive zone)，提高有機污染物的分解效率。通常同時在復育區也會挖井抽取地下水，一方面作為水力圍隔(hydraulic containment)，另方面形成適當水力梯度以引導注入液之流動方向。抽來的地下水會經過污水處理單元予以去除其中污染成分，處理過的地下水在添加養分後再回注至地表下層。

就理論而言，現地微生物復育法比一般典型的單純水力抽取法(pump and treat)更能有效地清除土壤中污染物。水力抽取藉由傳導只能移除溶解性有機物，而微生物的存在能分解吸附在土壤上的殘留污染物。不過由於土壤構造的不均質性，可能會使微生物接觸污染物的機會降低，而影響處理效果。

由於金屬成分通常不會隨著地下水移動，而且微生物新陳代謝過程對金屬離子的需求量極低，有關這方面的微生物復育法的研究很少發表。

過去數十年的重要研究確認微生物能夠分解在洩溢場地及非控制有害廢棄物場地中對環境或健康有害之有機污染物。實驗室、模型廠和現場研究已顯示可以利用當地土壤微生物加上人為的刺激去復育污染土壤及地下水。綜觀目前台灣對廢棄物的管理處置措施尚未臻嚴密，工廠有害事業廢棄物暗地任意傾棄仍偶有所聞，因此未來這些行爲的後遺症將陸續顯現，土壤復育的工作必將受到全面的重視。

參考資料

- 1.Brubaker,G.R., Screening Criteria for In-situ Bioremediation of Contaminated Aquifers, Water Pollution Control Association of Pennsylvania Magazine, pp.35~39 July-August 1991.
- 2.EPA, Handbook-Remedial Action at Waste Disposal Sites, EPA/625/6-85/006, Chapter 9.
- 3.McCarty, P.L., Bioengineering Issues Related to In Situ Remediation of Contaminated Soils and Groundwater, Environmental Biotechnology (edited by Gilbert S. Omenn),Plenum Publishing Corporation, pp.143~161, 1998.
- 4.Sims,J. L ., Sims, R. C., Matthews, J.E., Approach to Bioremediation of Contaminated Soils, Hazardous Waste & Hazardous Materials, Vol.7,No.2, pp.117~149,1990.
- 5.Wentz, C.A., Hazardous Waste Management, McGraw Hill Book Company, 1989.
- 6.陳龍吉、徐振盛編譯，廢棄物處置場污染補救措施，淑馨出版社，1992。
- 7.吳文隆，大地工程學，九樺出版社，82年。