

土壤污染生物復育技術之應用及展望

陳致谷* 張添晉**

摘要

目前常應用之新穎生物復育技術包括生物氣提、生物稀泥槽處理、堆肥處理、土壤農地處理及就地強化生物處理等，由於具有較低之處理成本與無額外污染性副產物產生，生物復育技術已成為當前污染土壤復育技術之趨勢。為有效利用生物降解機構分解污染物，復育進行時必需控制其需求之特殊環境因子包括土壤含水率、溫度、pH、營養劑及ORP等。此外，美國環保署已將土壤復育技術之研發列為1994年主要推動四大技術之一，根據統計資料顯示生物復育技術具雄厚發展潛力，而曝氣機構、營養劑傳輸、微生物植種及實廠化程序則為未來生物復育技術研究之主要課題。

【關鍵字】

- 1.生物復育(bioremediation)
- 2.生物降解(biodegradation)
- 3.生物氣提(bioventing)
- 4.土壤農地處理(landfarming)
- 5.就地強化生物復育(enhanced in-situ bioremediation)
- 6.稀泥槽(slurry reactor)

* 國立台北技術學院土木系研究助理

** 國立台北技術學院土木系副教授兼系主任

一、前　　言

在生物復育技術中，生物降解(biodegradation)一詞係指有機物藉由微生物的作用而轉變為二氧化碳、水或甲烷，其中轉化有機物為二氧化碳及水之作用稱為礦化作用(mineralization)。生物轉化(biotransformation)則指將有機物轉變為更小分子或較不具毒性的物質，因此，經生物轉化作用能改變有機物之毒性、型態甚至移動性；由於無機物質較不具生物降解性，因此可藉由生物轉化的作用將之轉變為較低毒性或可移動性的化合物。

通常土壤中之生物降解及生物轉化程序是利用特定微生物分解污染場址中之污染物，且具有一定之選擇性，而一般微生物程序則不具明顯之選擇性並且需有其他生物觸媒(即酵素)參與，在復育技術中微生物由多種組合而成，造成降解污染有機物時有多條路徑(pathway)，致產生許多非原先預定之終產物，而降低處理效果。因此在特定土壤環境下，經由供應充份之自由氧或營養劑，改變適於特定微生物之生存環境，強化土壤中優勢種微生物作用而降解污染物，由於不同的污染物特性及微生物種類的差異，常有不同的環境需求。

目前常應用之新穎生物復育處理技術包括生物氣提(bioventing)、生物稀泥槽處理(slurry reactor)、土壤農地利用(landfarming)、堆肥處理(composting)與就地強化生物處理(enhanced in-situ bioremediation)等。應用時土壤環境因子(如pH、溫度、含水率等)與污染物特性(如生物降解性、揮發性及毒性等)均需綜合考量，場址環境部份須有環境危害性評估；污染物特性方面需進行可處理性試驗(treatability test)。此外，相關法令之規定與處理經驗也是決定復育技術選用的根據。在應用生物復育技術處理污染場址前宜就該項技術之處理特性進行必要之評估研究。

二、生物復育中之微生物與降解特性

微生物一詞概括單細胞與多細胞生物，小如結構簡單之細菌(bacteria)、放線菌(actinomycetes)及藍綠藻(blue-green algae)等。其中因涵括基因的染色體

外沒有核膜(nuclear membrane)，故稱此微生物為原核體(prokaryotes)。真菌(fungi)及真藻(true algae)中有許多個染色體，其外有核膜環繞，與其他高等生物類似故稱做真核體(eukaryotes)。真菌與原核體於降解污染物上扮演一樣重要的角色，大部分真藻很少以有機物為其能量來源，故在生物復育程序中應用較少。其他單細胞或多細胞微生物如原生動物雖亦較少應用於土壤生物復育中，但對改善土壤性質以利原核菌或真菌的生長具有相當大之貢獻。以下分別敘述土壤中常見微生物種類與其在土壤復育上應用特性。

2.1 復育中常見微生物菌種

1. 細菌

根據能量來源，細菌可分為光合成菌(phototrophs)、異營菌(heterotrophs)及化學自營菌(chemoautotrophic bacteria)等。部份細菌同時利用兩種以上能源，例如有些細菌可同時以有機及無機物為其營養源，在處理外來人工污染物(如鹵素化合物)時，此類微生物在生物降解中扮演相當重要角色。異營菌在土壤生物復育中為主要降解有機污染物的菌種；而光合成菌常應用於處理土壤中重金屬污染物 或毒性污染物之生物轉化，同時也是土壤生物復育中營養劑回收再利用之主要因子，此乃因所有生物最終之能量循環多透過光合成菌進行。

復育程序中利用氧化污染物所得之電子還原其他物質(如氧氣等)，稱為電子接受者。大部分真菌或其他微生物多以氧氣為其電子接受者，稱之好氧呼吸(aerobic respiration)，主要副產物為水及二氧化碳。缺氧狀況下部份特定微生物若以無機物為其電子接受者，則稱為厭氧呼吸；若以有機物為電子接受者其過程則稱做酸酵作用。在欠缺氧氣情況下，硝酸鹽(nitrate)常成為最終電子接受者；但若在土壤中較低還原電位下某些特定細菌則會利用其他氧化物質為其最終電子接受者，因為對這些細菌而言氧氣具毒性，不適於其生存；故另稱此類情況為絕對厭氧(obligate anaerobic)。

污染之土壤中亦隨深度(氧濃度含量)的變化而存在不同微生物族群；其中各族群間存有某種程度的共生關係；若一方獲利而另一族群並不受其影響則稱為共利共生現象(commensalism)；而若兩族群均能自其活動中獲利則稱為互利共生現象(symbiosis)。

一般認為降解性污染物多進入好氧處理程序，而事實上雖然大部分污染物都以好氧降解，但其中某些重要降解路徑則可能是以厭氧程序進行，如鹵素有機物中的去鹵化作用主要為厭氧作用所致。

2.真菌

常見降解土壤污染物中的真菌類包含許多菌種，大部分屬異營性之好氧菌，並在其成長末期變為絲狀結構。酵母菌(yeast)雖需要低濃度氧氣存在，但仍被視為一兼氣厭氧性或酸酵真菌類，可降解土壤中有機物而異於一般菌類的降解路徑，故有利於降解外來之污染物；其他較高級之真菌類，如擔子菌綱(basidiomycetes)及半知菌綱(deuteromycetes)具特殊之降解路徑，常用於處理部份頑強之污染物。

3.光合成微生物

因陽光無法滲透進入土壤中，故表土上常存在許多光合成原核菌（包含光合成菌及藍綠藻），但因光源不易穿透土壤，因而限制其在土壤生物復育中之應用，土壤中有機物為其主要食物來源，因此部份光合成真核菌亦能在無陽光下進行降解作用。光合成微生物在土壤生物復育中扮演第二線的工作，有機物經其降解作用之產物提供細菌或其他微生物所需碳源，而加速污染物分解的速率，但也可能因而限制部份較頑強污染物的分解。此外，部份表土中的藻類(alage)也具有降解頑強污染物的能力，並利於較深層土壤環境的養分調理。

4.微小蟲類

生存在土壤中的小蟲；如原生動物、蟲類及部份昆蟲對生物復育處理雖沒有直接的作用，但其活動對促使土壤的攪動、降低土壤之異質性有絕對的幫助。此外透過生物中食物鏈的關係亦可做為控制微生物數量的一種方式，應用時應評估其對生物復育是否形成障礙。

2.2 微生物降解所需條件

微生物中包含了基因、酵素及細胞質等各種元素組成的機構，因此不同微生物需要不同的養分，這些元素主要為氫、碳、氧、氮、磷及硫等。一般水是主要氫及氧之來源，但微生物必須透過光合作用破壞其間的氫氧鍵，以取得所需的分子氧或氫，由於土壤成份含大量之碳氫化合物，因此微生物在碳氫的獲取上就毋須光合作用的配合。土壤中硫含量通常已足供微生物所需，且可立即

為微生物使用。磷元素含量雖然亦相當充足，但較少以能被微生物需求型態出現。土壤中氮元素通常為氮氣形式，並不是為微生物所需之胺基酸(amino acid)、氨(ammonium)或硝酸鹽(nitrate)，除土壤中好氧分解所需之氧元素外，主要限制微生物生長之元素應為磷元素及氮元素，故許多生物復育中多會補充磷源及氮源或輸送維持好氧所需之氧氣。

一般而言，在養分的供給上希望最終能夠達到碳：氮：磷為100:10:1至100:10:0.5之比例(須視污染物情況而定)，又若能迴流含微生物之營養劑，亦可提昇污染物轉化為能量的速率，並固定土壤中氮氣成為能被微生物利用的型式。磷元素的補充需特別注意可能造成的阻塞(plugging)問題，一般高濃度(10mg/L以上)的鄰位磷酸鹽即可使某些地質脆弱之場址發生阻塞，故其濃度最好能低於20 mg/L，若因微生物養分所需而必需高於此濃度，則建議使用複磷酸鹽(polyphosphates)以取代鄰位磷酸鹽(orthophosphate)。此外，土壤中之微量元素含量如鈣、鋅、鎂及鐵都是微生物酵素作用所不可或缺，在營養劑成份的設計上均需加以考量。

2.3 飼養降解之微生物

當微生物獲得並適應(即遲滯階段)最佳之生長條件及所需之養分後，其生長階段進入對數生長期是為馴養期(acclimation)，馴養時間的長短視污染物降解難易而定，一般厭氧處理都需要較久的馴養期，馴養期長短也可當作系統中克服抑制物質的能力，或酵素適應不良環境的指標。在土壤生物復育中較少有馴養期的報告出現，因生物復育大多利用原有場址之微生物，該微生物已能適應場址環境較不需要進一步的馴養作為。

2.4 降解機構：共同代謝作用與二級基質的使用

微生物與其他生物一樣，都需要適當並且充份的營養，經由新陳代謝作用提供需要的基質以維持生長。就土壤生物復育而言，污染物即為其基本的食物來源，但在某些特例中，污染物僅有部份分解，且其分解所產生能量並無法被微生物利用或進入分解循環，此現象稱為共同代謝作用(cometabolism)或共同氧化作用(cooxidation)，此程序主要特徵為需有兩種或兩種以上的污染物存

在，以其中一種污染物作為協助其他原始污染物(primary substrates)完成分解循環，作為微生物合成所需。McCarty指出雖然協助作用的污染物無法於第一順序中完成降解分離程序，但通常仍可於後續程序中分解成能被微生物利用之產物。

利用這項機構，許多污染物使用二級基質協助降解。二級基質之生物可利用性(bioavailable)必須低於一級基質，除非有特殊限定，否則以不違反上述理論為原則；此外，部份酵素的作用或毒性的影響會不利於一級基質的降解，在應用時需特別留心。

若某項有機物為微生物之一級基質，但是環境中含量較低，可加入相關之二級基質協助降解，在無抑制條件下微生物甚至可利用到百萬分之一濃度的有機物；若有額外之一級基質加入其利用率更可達到十億分之一濃度。

適當的營養調理為微生物分解作用所需，但高濃度或過量之有機物則對降解有不利的影響。例如加入不適當的營養劑可能增加非目標微生物的大量成長，但卻因此抑制主要具作用性微生物群而破壞微生物生態，可能因而造成酵素間的競爭及最終電子接受者的缺乏，甚至生成毒性物抑制代謝作用的進行增加系統困擾。

2.5 影響微生物與污染物降解的環境因子

微生物與污染物間的作用必須有一特定媒介，提供微生物分解所需的空間及污染物的接觸，土壤就是最佳的媒介，但由於大部分污染物並非以微生物所需或其所能接受的型式存在，故環境需要進一步改進。倘若現存環境不適於某項微生物生長，則該項微生物活性通常會趨於惰化甚至死亡，但也可能在適當環境條件下重新恢復作用。通常小規模調整可以有效刺激微生物活性；也有可能造成微生物群與其生態的大轉變。根據以往的經驗，場址環境的改良也是生物復育中最困難、複雜及昂貴的一部份，以下就影響降解之環境因子加以說明。

1. 土壤含水率

土壤中的水份除可供微生物所需以外，對於營養劑和代謝副產物的擴散及微生物種的選定都有重要的影響。雖然飽和水層會限制污染物揮發的速度，但過低的含水率則會由於土壤的吸附作用而降低污染物揮發性。Torpy

et al. (1989)曾建議生物復育時土壤中含水率應具有 1 bar 的張力；此外，Miller及Hinchee (1990) 根據土壤通氣(soil venting)處理經驗認為土壤中水份重量比在6.5%以上並不會影響微生物的降解。

2. 土壤溫度

土壤中的溫度也是控制微生物活性與污染物分解的重要手段。由Q₁₀定理(Q₁₀ Theory)得知，溫度每上升10度，微生物的代謝速率會增加兩倍，並通常維持在40度左右，除非是土壤凍結的情況下，大多數微生物都能存活。土壤溫度的改變除氣候與人為的改變之外，部份也可能是污染物降解或毒性物質混合所產生之化學熱所致。此外。溫度也會影響污染物的揮發，但同時也增加了土壤對污染物的吸附性。

3. 土壤的酸鹼值

中性環境最適於生物的降解，而且中性土壤也能降低因為加入磷酸鹽所造成的阻塞問題。土壤中氫離子來源多為微生物降解污染物產生，並受碳酸系平衡的限制。

4. 土壤中的氧化還原電位(ORP)

在不同污染物的生物轉化中，氧化還原電位(Eh)是一項相當重要的指標。例如含高度污染物的場址偏向於厭氧狀況，在復育程序中的電子接受者多具有較高的氧化還原電位，惟需注意的是Eh僅能提供某項氧化還原反應(如微生物的呼吸反應)潛能，而無法分出各種有機物或無機物的反應作用，在應用時仍需參酌其他指標。

三、現行常用之生物復育技術

1972年Reynold等在美國Suntech地方試驗就地生物處理污染場址，開啓土壤生物復育之先鋒。污染場址之生物復育技術可概略分為以下幾種方式，現地(on site)堆肥處理(composting)、土壤農地處理(landfarming)、就地生物(in-situ)處理、離場(off-site)處理(稀泥反應槽系統)和生物氣提(bioventing)。以下分別就各技術之操作程序、應用條件與處理成本做分析討論，作為生物復育技術應用之參考。

3.1 生物氣提(bioventing)

3.1.1 系統概述

生物氣提程序利用輸入空氣的移動提供場址中好氧微生物所需氧氣，使反應場址污染物成為無害物質。與其他一般氣提程序不同的是，在非飽和區中需要足夠水份配合操作，並添加適當營養劑催化微生物作用，因此生物氣提主要處理之污染指標物多為較不具揮發性之有機物，如柴油等，其設置方式如圖1所示。

3.1.2 影響生物氣提之操作因子

影響程序操作之主要因素為污染物特性與場址環境因素，茲分序如下：

1. 污染物特性

生物氣提處理之污染物必須具有揮發性並具生物降解性，尤其具有高揮發性和降解性污染物為最佳條件，但通常兩者無法同時具備。就碳水化合物而言，高分子量物質通常較具生物降解性，但低分子量化合物之揮發性優於高分子量物質。此外，由於使用氣體為媒介物，污染物在氣體中必須有一定的溶解度以利操作。以處理甲基乙基酮(methyl ethyl ketone, MEK)為例，因其在含水土壤中之溶解度較高，不利於污染物自吸附劑(即土壤)至氣體間之傳送，因此較難獲得良好之處理效率。一般污染物所處環境之蒸氣壓為生物氣提操作之主要控制因子，此點可由污染物之亨利常數(Henry's Law constant)與溶解度判定。

2. 場址中環境因子

- 土壤之滲透性對氣流流動有重大影響，若土壤之滲透度小於 10^{-5} cm/sec，氣體流動會有明顯降低。
- 土壤的不均質性亦影響生物氣提進行，因為土層壓實狀況不盡相同，氣體在土壤中容易出現氣壓不均衡區域，因而降低污染物去除效率。
- 土壤含水量。由於氣流速率與土壤中孔隙率大小有關，土壤中水量嚴重影響空氣流通，因此若污染群位於地下水位下，必須採取排水措施或直接注入大量高壓空氣至含水層中。
- 其他如溫度、pH或土壤中的養分也會影響生物氣提的操作進行。

3.1.3 本法之優點缺點

生物氣提具備以下優點：

1. 直接萃取並降解場址中有機污染物

根據資料顯示，生物氣提具處理 500 lb/day 以上之污染物能力，表 1 為利用生物氣提處理處理平均分子量 100，氣流量 $100\text{ ft}^3/\text{min}$ 生物氣提處理程序處理效率。

充分的氧氣供應能有效進行生物降解作用，表 2 則為各種氧氣供應方式比較。

2. 生物氣提單位處理成本低。

3. 生物氣提所需操作空間小。

對場址附近地區的影響降至最低，利於場址上其他設施之使用。

其主要缺點為：

1. 場址之土壤滲透度不得低於 10^{-5} cm/sec ，因為滲透度對氣流的傳送影響極大，太低之滲透度會妨礙氣流輸入。

程序中一般氣井的設置有以下三種方式，如圖 1 所示。

- 單一蒸氣萃取井，僅由一氣井提供處理所需大量氣體
- 豈取空氣注入井與污染氣體萃取井
- 使用一口空氣注入井配合兩口萃取井操作

生物氣提使用之氣井壓力為：

- 低壓氣井 ($20 \sim 30\text{ mm Hg}$) 與高壓氣井 (100 mm Hg)
- 單井或多井生物氣提

高壓氣提在操作上可獲致較大之處理半徑、縮短復育的時間及處理滲透度不良之土質，但井爆問題必須小心預防；而低壓氣井則具有較低的建造成本與操作維護費用，並可獲致較均質的處理效果。多井生物氣提的操作則需特別注意污染物群的流動是否確實為萃取井所收集，避免流入非污染區或非處理區而導致二次污染；因此，應用壓力與使用井數需視各場址特性而定。

2. 生物氣提系統容易隨著操作時間而發生「老化」現象

因為長時間操作易造成土壤中形成特定氣流路徑，而無法均勻的散佈到污染場址內，此類問題可以利用改變氣井設置位置、深度等加以改善之。

...土壤污染的生物氣提技術，其原理是利用微生物將土壤中的有機物質轉化為氣體，從而達到去除污染的目的。

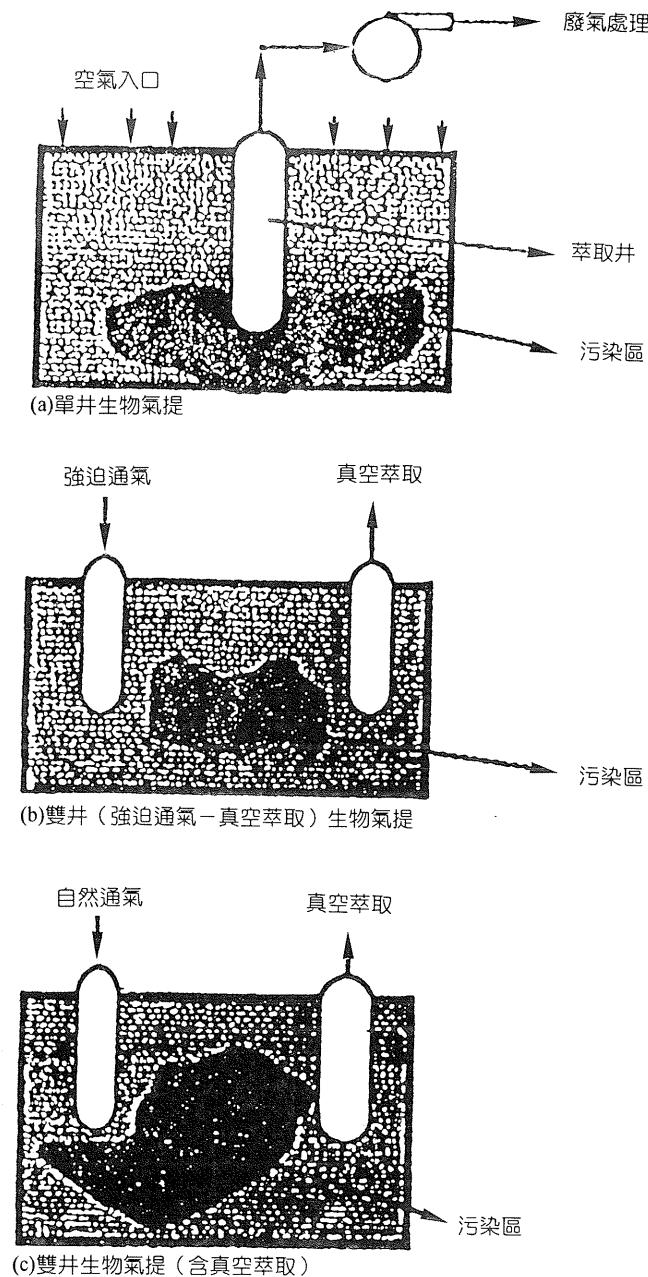


圖 1 生物氣提氣井設置方式⁽²⁹⁾

表1 生物氣提處理效率⁽²⁹⁾

蒸氣壓(mm Hg)	污染物去除量(lb/day)		
	100%	10%	1%
甲苯 (0~15)	0~400	0~20	0~4
苯 (15~30)	400~2,500	20~120	4~10
丙酮 (30~45)	2,500~5,000	120~500	10~75
(45~60)	5,000~7,000	500~800	75~100
(60~90)	7,000~10,000	800~1,000	100~120

表2 各種氯氣供應方式比較

氧 源	供應方式	優 點	缺 點
• 空氣	• 管線式 • 曝氣井	• 經濟 • 供應穩定	• 僅對微量之污染物有效(COD< 10 mg/L)
• 純氧	• 管線式 • 曝氣井	• 可提供較高溶氧量 • 供應穩定	• 昂貴 • 有井爆問題
• 過氧化氫	• 管線式	• 價格適中 • 能迅速與地下水混合 • 能提供50 mg/L的溶氧 • 需預防井中微生物生長	• 分解快速，且不穩定時容易損失散逸
• 臭氧	• 管線式	• 產出之化學反應使污染更易為微生物分解	• 昂貴 • 高濃度時對生物具有毒性 • 可能需要額外之曝氣設施

3. 污染群(plume) 的移動

污染群可能隨氣流或水流在污染場址內竄流，在系統設計之初需納入考量，一般藉由設立監測井觀察控制污染物位移。

4. 因場址環境與污染物分佈的不確定性，生物氣提復育時間較難以控制預測。

5.因為生物氣提技術為一創新技術，在操作復育前需注意必要的溝通說明工作，使關心人士了解並支持場址復育的進行。

3.1.4 生物氣提系統之設計

設計生物氣提系統需對鼓風機及管線之設計有深刻的認識。一般而言，影響鼓風機容量大小的因子有氣壓大小、污染場址面積、土壤滲透度、系統中壓力損失等。此外，為避免有害污染物的揮發，必要之防塵罩及緊急通風設備亦需列入鼓風機設計時的考量。氣井的管線隨氣井設置數量多少而趨複雜，工程上常使用之管材為PVC管、聚丙烯管或不銹鋼管，且必須能承受土壤壓力為原則，並避免漏氣發生。

3.1.5 處理費用概估

生物氣提處理成本受下列因素影響：

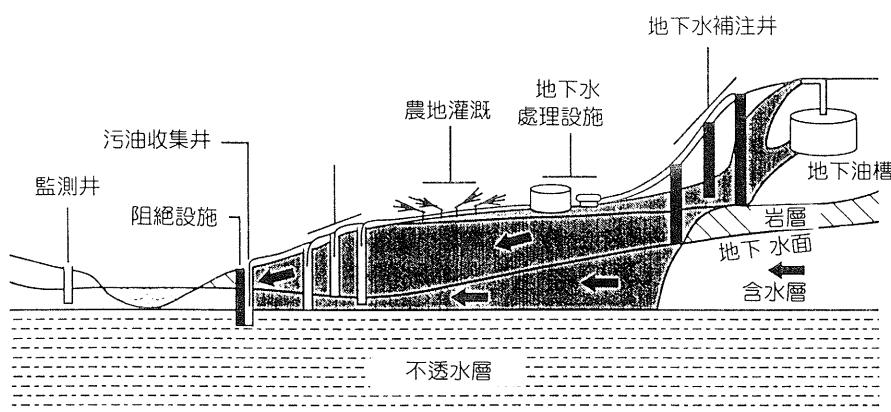
- 1.場址地理特性
- 2.污染物濃度與型態
- 3.污染物在場址中分佈之均勻度
- 4.污染群體積與污染場址面積
- 5.生物氣提系統特性如壓力大小、氣流迴流方式或設置之氣井數量等
- 6.操作時間操作。

以1.5~2年生物氣提處理受汽油污染場址為例，其每英畝費用約為US\$25,000；若包含氣體處理費用則高達US\$35,000~40,000；若又有營養劑的加入，則每英畝處理需額外加US\$20~4,000之費用。

3.2 就地強化生物復育(*In-situ* Enhanced Bioremediation)

處理污染場址之另一創新技術為就地(*in-situ*)生物復育技術，如圖2所示。由於具較低之操作成本，且無須開挖場址土壤，已漸成為生物復育趨勢。應用限制為場址需具傳輸氧氣、營養劑與導入微生物的條件，特別適於受壓污染群層的清理，就地生物復育技術之應用限制因子有：

- 污染物特性
- 微生物作用環境需求
- 場址水力特性

圖 2 就地生物復育示意圖⁽⁸⁾

3.2.1 生物降解性

污染物之降解性決定就地生物復育系統的操作，由於牽涉因子頗多，故應有詳細嚴密的調查。此外，也可經由試驗場規模操作結果判定污染物所具之降解性大小。表 3 為相關之就地生物復育處理案例。

表 3 污染土壤就地生物復育案例

污染物種類	污染物濃度(mg/L)	場址特性
苯乙烯	25	火車運輸槽外洩，污染土壤深度達8英吋
三氯酚污泥	300	污染土壤深度達6英吋
重油	12,000	污染範圍4英畝
丙烯	1,000	土壤與地下水均受污染
甲醛	1,400	土壤與地下水均受污染
鄰氯酚	15,000	土壤與地下水均受污染

3.2.2 場址環境最佳化

為協助場址中污染物的降解及配合微生物生長所需；控制因子有下四項：

- 最終電子接受者(TEA, terminal electron acceptor)之種類與需求
- 營養劑配比與需求量
- 操作溫度範圍
- 操作pH範圍

於設計就地生物處理程序時均應對以上影響因素有深入了解，避免產生無謂干擾；表4可作為就地生物復育程序規劃時之參考。

就地復育之技術特徵如下：

- (1)復育執行結果較難量化及監測
- (2)污染物降解後物質仍會殘存於土壤中
- (3)需較長的復育時間，主要視污染物性質與環境因子而定
- (4)需調整復育環境於最佳化，如pH、溫度及含水率等
- (5)通常與其他污染控制技術併同操作，以控制復育期間可能造成的擴散

3.2.3 處理成本

就地生物復育之處理單位成本受污染物性質（包括溶解度、揮發性及吸附性等）、場址污染擴散情況、位址、地下水文特性、處理限制與處理標準等因素影響。根據美國石油化學協會在1988年的統計，處理每一加侖之洩漏汽油需US\$100，一般土地處理技術單位成本約介於US\$5~80，均較其他處理(如焚化)便宜。

3.3 土壤農地處理(landfarming)

在自然環境中土壤中的微生物能對污染物進行一部份之降解，但程度很小，可以在場址上針對有利微生物生長的環境進行施肥(fertilizing)、灌溉(irrigating)或耕耘(tilling)等程序，使得土壤中的微生物獲得所需水份、養分與空氣等，此處理方式稱為土壤農地處理。

場址之土壤農地處理使用場址現場菌體，可由控制適當的環境條件完成，多適用於淺層土壤污染物的復育，其作用範圍約45~60 cm之污染土壤，處理超過於60cm以上的土壤則較少見。

表4 就地生物復育程序規劃步驟⁽¹¹⁾

步 驟	設 計 目 的	執 行 內 容
1.場址初勘	<ul style="list-style-type: none"> • 確認場址特性污染面積、物化特性、水力特性、有礙生物復育特性等環境因子 • 污染物種類及污染程度 • 優勢原生微生物種及其分布區域 	<ul style="list-style-type: none"> • 應提出污染濃度梯降及水力流向等相關數據，以利爾後程序之設計，尤其污染物不均勻場址之數據較難以客觀，應保守估計 • 污染物之均質性成份與濃度為生物降解之重要因子 • 土壤好厭氧狀態之判定 • 若場址接近海岸，其硫酸鹽含量對場址中微生物影響需注意 • 若場址海拔較高則應注意溫度對微生物之影響 • 高濃度污染物需適當之稀釋
2.擬定就地生物復育評估計劃	<ul style="list-style-type: none"> • 根據化學反應理論確認生物復育中關鍵之生化反應 • 以更精確之檢驗分析污染物種類及微生物種類 	<ul style="list-style-type: none"> • 分析採樣方法需能有效顯示場址復育情形
3.提出場址細密特性	<ul style="list-style-type: none"> • 找出微生物之各種生化特性，及其對新陳代謝作用之影響 	
4.就地生物復育處理效果之評定	<ul style="list-style-type: none"> • 新陳代謝中所生成之中間產物，尤其是與污染物特性相異者 • 找出場址復育中失去之不安定異構物(labile isomers)，特別是與一般非生物性相異之物質 • 污染物異構物之新陳代謝 • 穩定同位素比 • 代謝程度 • 場址特有之生物降解情形 	<ul style="list-style-type: none"> • 脫氮作用之NO⁻ • 甲烷化中生成之CH₄ • 如求出碳/異十八烷與碳/二十烷之比例 • 對稱異構物(chiral)中之對映異構物(enantiomer)比例 • 如甲烷化中對輕重不同之異構物具選擇性 • 比較污染與未受污染區之土壤污染情形 • 養份或其它關鍵元素之輸入以激發復育發生 • 以同位素配合監測系統檢視生物復育及代謝狀況 • 以實驗證明生物復育係一生物性作用而非一般物化作用 • 分離出生物復育中觸發反應之微生物種 • 以DNA或RNA基因試驗證明同化作用之進行
5.收集有關微生物證據確認生物復育處理	雖然各項指數無法單獨明確表示生物復育情形，但經由間接的轉換仍可用以說明生物復育	

3.3.1 限制土壤農地處理因素

較常見影響土壤農地處理效果之因素包括：

1. 污染物的限制

(1) 污染物的降解性

污染物之降解特性必須為好氧性，若污染物不易進行好氧性降解(如 PCBs)則不適於進行土壤農地處理，若好氧性為可行，則必需考量必要的前處理，如萃取、溶劑沖洗(solvent washing)等程序的施行。

(2) 污染物的毒性

部份污染物之毒性濃度會對微生物生長造成影響必須加以考量，實行必要的前處理程序。

2. 環境因子

- 溫度：一般建議控制在15~45 °C間。
- pH：由於土壤具微酸性，為利於場址微生物生長宜控制在5.0~8.0之間。
- 茌養劑：土壤環境中之養分比建議為C:N:P = 100:2:0.2。

3. 微生物群種之影響

- 微生物種類，場址微生物種類及數量將決定生物降解速率的快慢。
- 飼養程序。

3.3.2 本法之優缺點

土壤農地處理的優點包括：

1. 施行簡易，毋須太複雜的處理設施。
2. 處理費用低廉。
3. 特別適於需較長降解時間之土壤污染物應用，可減少建造其他設施所需空間及費用。
4. 常使用於中度污染土壤之復育。

缺點為：

1. 對揮發性有機污染物須進行必要的前處理，避免二次空氣污染的發生。
2. 處理顆粒或粉塵污染物須注意所造成的逸散問題。
3. 污染物的毒性問題。

4. 土壤農地處理對土壤含水量及pH控制要求較為嚴格。
5. 受氣候限制較大。
6. 所需使用之處理面積較大，且受處理區之地下水位影響。
7. 處理時間較長。

3.3.3 處理費用

傳統之土地處理費用在50~80 US\$/yd³之間；處理6,000 yd³受柴油污染土壤成本約為33 US\$/yd³；大部分需是場址特性而定。若處理大於1,000 yd³之石化污染土壤費用概約為30~50 US\$/yd³。

3.4 堆肥處理

堆肥處裡(composting)處理技術係將有機污染物在特定控制的高溫情況下分解而穩定化，經由適當之水份調理與翻堆提供曝氣，為一種穩定化技術。堆肥處理通常應用於固狀或半固狀污染物的處理，在厭氧或好氧狀況下皆可進行。有機質堆肥化的必要條件：

1. 堆肥化材料的選定要適中：易分解有機質與難分有解有機質間要做適當比例的配合。
2. 有機質的粒度：一般的要求是10~20mm，太粗則由於能被微生物作用之表面積小，分解速度會慢。太細則由於細粒間的空隙太小，會造成氧氣供應孔道不順暢，不利好氧性分解。
3. 保持適當的水分：水分是微生物活動（生活及繁殖）所不可或缺的物質，通常要保持在50~70%，但水分太多時會造成厭氧狀態，不利於好氧性微生物的活動。
4. 有機質之碳氮比(C/N ratio)需適當：微生物的菌體其碳氮比約為10，所以作為微生物的食物的有機質其碳氮比也以該值較為理想。
5. 微生物的種類及量要充分：雖然很早以前即有提議用接種人工培養的微生物菌體來促進有機質的醣酵，但是到目前大部分的有機質堆肥化仍是利用自然界的微生物群。

6.維持適當的pH值：通常有機質分解時會產生低級脂肪酸和碳酸氫鹽，這些都有很大的緩衝能力，能保持堆肥呈中性。

7.需保溫或附加溫設備：纖維質有機物分解溫度以60～70°C的高溫條件最容易進行，但是發酵時要強制通氣，自然會產生降溫效應，所以要考慮保溫或附加增溫設施。

3.4.1 堆肥處理之分類

土壤復育之堆肥單元可簡略分為反應槽系統與非反應槽系統。

1.反應槽系統

反應槽的形式可在更進一步劃分為垂直反應槽、水平反應槽與傾斜反應槽。垂直反應槽可視其床體形式再加區分，若能在反應槽中進行翻攪者稱之攪拌床，反之，無法在反應槽中進行翻攪者稱之固定床，有連續式與批次反應槽。水平反應槽及傾斜反應槽則視反應槽中翻攪機構而劃分為機械式翻攪及強迫通氣式翻攪(forced aeration)兩種。

2.非反應槽系統

非反應槽系統顧名思義沒有反應槽的設置，有動態堆肥床與靜態堆肥床兩種，前者在堆肥處裡期間需定時的攪動，藉以供給所需要的氧氣，此系統中常需應用相關的通風設備。

3.4.2 處理費用

一般處理費用約為20～40 US\$/T間，其中尚且包括了土地成本，場址整建及其他設備等。摻入木屑的靜態堆肥成本較為昂貴，一般木屑成本為13 US\$/m³，其處理費用約為42 US\$/T。

3.5 離場稀泥槽處理(off-site slurry reactor)

稀泥反應槽中之微生物生長方式分有懸浮生長式(suspended growth)與固定生長式(imobilized growth)，應用於污染土壤之生物復育處理中多採用固定接觸生長式，乃因其具備較穩定的操作條件，且比懸浮式生長更能承受較大之水流剪力；同時形成微生物密度亦較懸浮式生長為大。

固定接觸生長反應槽中常使用之介質有土壤(soil)、泥炭(peat)、活性碳(activated carbon)、焦炭(coke)、塑膠濾料、圭藻土(celite)或玻璃珠等，滴濾池或旋轉生物盤中的材質亦可應用參考；近來發展之超孔隙(microporous)之熱

固性(thermoset)有機合成濾料；如聚胺基甲酸乙脂(polyurethane)、聚乙烯類化合物、含鉀鹿角菜(potassium carrageenan)、海藻鈣(calcium alginate)、聚丙烯醯胺(polyacrylamide)、戊二醛(glutaraldehyde)等，皆常應用於稀泥批次反應槽或連續反應槽中。圖3為典型之稀泥反應槽處理程序圖。

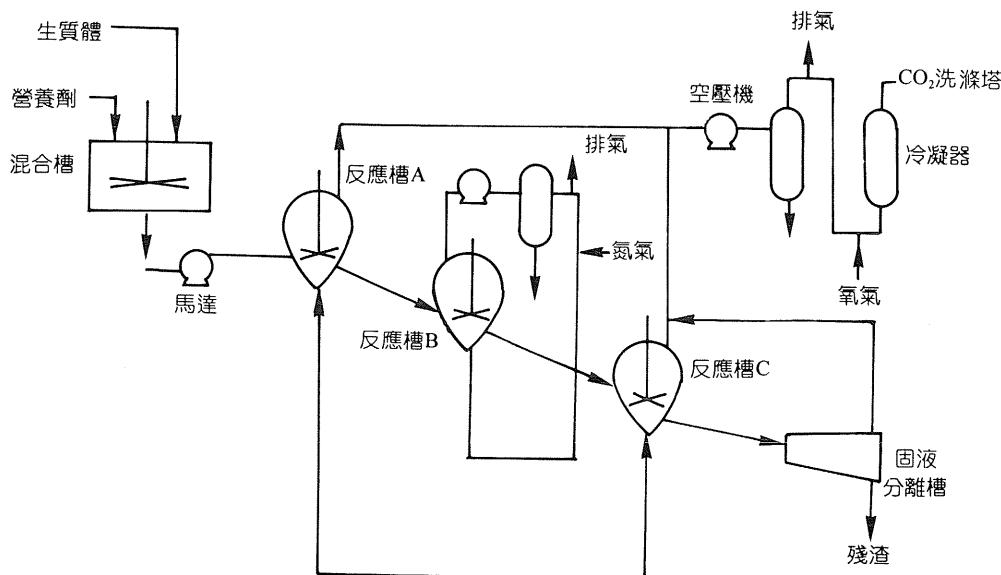


圖3 典型稀泥處理程序⁽²⁶⁾

3.5.1 限制離場處理之因素

影響離場處理之因素包括：

- 污染物在水中之溶解度
- 污染物的吸附/脫附特性

- 污染土壤的老化(aging)
- 微生物濃度(即MLSS的控制)
- 塊狀或大型顆粒的篩除
- 土壤之黏稠度在反應槽中可能造成的結塊影響

3.5.2 本法之優缺點

本程序優點如下：

1. 處理費用較焚化處理低50%以上。
2. 能有效控制並處理復育過程中所可能產生的污染氣體。

其缺點則為：

1. 場址的開挖與污染土壤的運送所需成本較高。
2. 需額外之控制技術做前處理配合。
3. 產生之污水需進一步的處理。

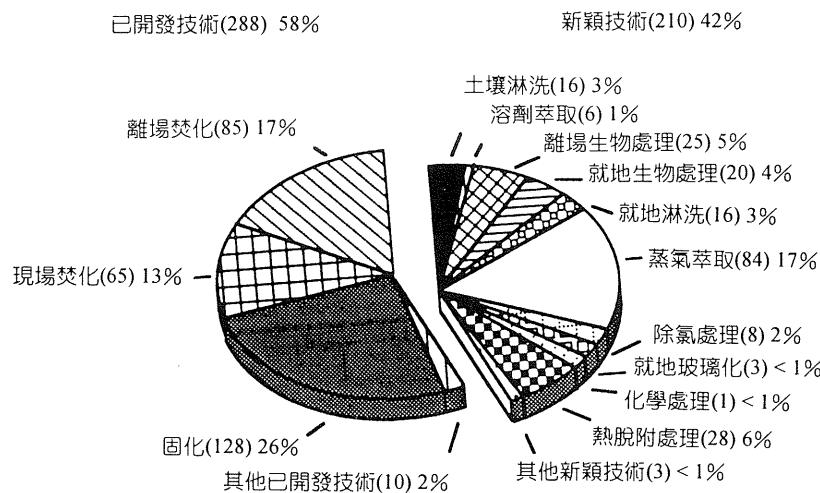
3.5.3 處理費用

處理費用介於100~150 US\$/yd³之間，若需額外之氣體處理則其處理成本為125~160 US\$/yd³。

四、生物復育技術之現況與展望

根據美國環保署的統計，1991年所有施行超級基金法案之498個污染場址復育清理工作中，應用新穎技術比例達42%，如圖4所示，與傳統清理技術(焚化、固化程序等)應用比例58%僅相差16%，顯示污染場址的清理工作中新穎技術之應用已日趨普遍，若再進一步分析應用之新穎技術種類，以土壤蒸氣萃取(soil vapor extraction)、生物復育、熱脫附處理(thermal desorption)及土壤淋洗(soil washing)四項技術為多數。圖5統計過去七年來這四項技術應用次數，可明顯發現土壤蒸氣萃取與土壤生物復育程序具雄厚應用潛力。Taylor及McLean(1992)提出各項復育技術成本資料，如表5，其中生物復育處理成本介於5~75英鎊/m³，僅為其他處理技術成本(平均介於46~190英鎊/m³)之

10~40%，在高昂的場址清理費用下，較低的處理成本應是本技術被採用原因之一。



(註) ()內為該項復育技術被應用之次數

圖 4 1991年各項復育技術應用情形⁽¹¹⁾

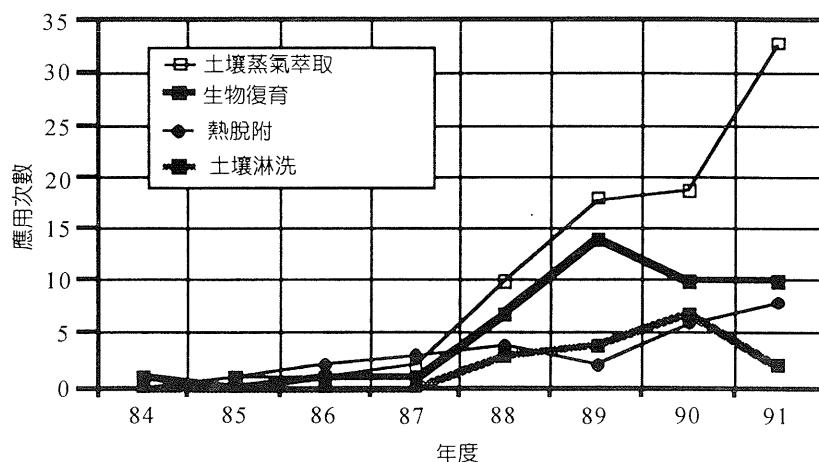


圖 5 四種新穎技術應用次數比較圖⁽¹¹⁾

表5 各項土壤復育技術處理成本比較⁽²⁵⁾

處 理 技 術	處理成本(英鎊/立方公尺)
掩埋處置	25~100
熱處理	
· 離場處理 荷蘭	25~100
· 離場處理 北美	100~500
· 現場處理 北美	75~300
蒸氣萃取	20~50
溶劑萃取	35~100
生物復育	5~40
· 生物槽處理	50~75

但生物復育技術之應用仍存在下列限制，有待進一步突破：

- 處理時程較長
- 可能代謝生成其他更具毒性之副產物
- 殘留之代謝產物及微生物群可能對地下水層造成污染
- 難分解污染物之殘留問題
- 去除率較低(部份特定污染物甚至低於50%)
- 處理程度(即污染物在土壤中殘存濃度)不易控制
- 微生物群易造成土壤中孔隙聚積阻塞現象

雖然應用生物復育技術受污染場址現地特性及其他多項客觀因素限制，但可藉由下列幾項操作參數的控制加以克服，此亦為未來土壤生物復育工程技術主要研究課題。

- (1)曝氣機構(aeration)
- (2)營養劑的調配及傳輸機構
- (3)實廠操作及啓動程序(scale-up and warm-up)
- (4)微生物植種程序

五、結論

應用土壤生物復育技術時對微生物與目標污染物間之生物降解性(biodegradability)、生物可利用性(bioavailability)及生物化學特性(biochemistry)之調查研究工作須有充份的了解。土壤生物復育中主要作用微生物屬為細菌、真菌類、光合成菌等，其生長及降解功能受土壤環境的影響，主要項目有土壤中的溫度、含水率、酸鹼值及氧化還原電位等，需視不同污染物及微生物特性調整控制。

現行新穎之土壤復育有生物稀泥槽處理、土壤農地處理、堆肥處理、生物氣提及就地強化生物降解處理。生物氣提處理具低廉處理成本且能現場直接降解有機污染物之優點，惟多受限於污染物揮發性的限制。就地強化生物降解處理程序為未來發展趨勢，其優點為毋須開挖污染土壤，並適於大規模場址應用，但操作時間較長且處理品質較難掌握則為其缺點。生物稀泥槽處理設施可形成一套裝設備(treatment train)，可具有移動性，惟開挖及運送污染土壤成本較高，需預防二次污染發生。土壤農化及堆肥處理程序不適於處理高污染度或高毒性物質，其操作經驗及處理費用上較其他處理技術為佳。

此外美國環保署將土壤復育技術之研發列為1994年主要推動四大技術之一，根據統計資料顯示生物復育技術具雄厚發展潛力，而曝氣機構、微生物種植及實廠啓動程序等技術則成為未來生物復育研究之主要課題。

參考文獻

- 1.J.M. Thomas and C.H. Ward, In Situ Bioremediation of organic contaminants in the subsurface, Environ. Sci. & Tech., Vol. 23, No. 7, 1989.
- 2.R.L. Autenrieth et al., Biodegradation of phenolic wastes, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
- 3.Michael L. Bradford and Raj Krishnamoorthy, Consider Bioremediation for waste site cleanup, Chemical Engineering, Feb. 1991.

4. Stephen D. Field et al., Advanced biological treatment and separation of hazardous constituents from petrochemical sludges, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
5. C.W. English and R.C. Loehr, Degradation of organic vapors in unsaturated soils, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
6. R.C. Ragaini, Technologies for environmental cleanup: Soil and ground water, page 1-12, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993.
7. B. Larsen, L. Montanarella and F. Mousty, Identification and characterisation of organic and inorganic contaminants, simple cleanup and analytical methods, page 61-144, Technologies for environ. cleanup: Soil and groundwater, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993.
8. Katherine H. Baker and Diane S. Herson, Bioremediation, McGraw-Hill Inc., USA, 1994.
9. P. Hap Pritchard, Bioremediation as technology: Experience with the Exxon valdez oil spill, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
10. Ronald E. Hoppel and Robert E. Hinchee, Enhanced biodegradation for on-site remediation of contaminated soils and groundwater, chap. 7, Hazardous waste site soil remediation, Marcel Dekker Inc., USA, 1994.
11. F. Arendt and G.J. Annokkee, Contaminated soil '93, vol. II, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993.
12. Perry L. McCarty, Engineering concepts for in situ bioremediation, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
13. P. Scott Ziegebfuss, Richard T. Williams and Cragi A. Myler, Hazardous materials composting, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.
14. C. M. Griffiths et al., Approaches to the assessment and remediation of polluted land in Europe and America, Journal of IWEM, Dec. 1992.
15. Gilbert M. Long, Cleanup hydrocarbon contamination effectively, Chemical Engineering Progress, May 1993.
16. S. Fiorenza, K.L. Duston and C.H. Ward, decision making - Is bioremediation a viable option?, Journal of hazardous materials, Sep. 1991.

- 17.Comenic Grasso, Hazardous waste site remediation-source control, US EPA, Jan. 1993.
- 18.Gudehus B. and Kampf R., Biological in-situ remediation of sandy gravelly gasworks subsoils, Contaminated soil '93, vol. II,Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993.
- 19.Vree H.B.R.J. et al., In-situ bioremediation techniques of a site contaminated with PAH - applying nitrate as a alternative oxygen source - on laboratory and pilot plant scale, Contaminated soil '93, vol. II, Kluwer Academic Publishers, Netherlands,1993.
- 20.James W. Blackburn and William R. Hafker, The impact of biochemistry , bioavailability and bioactivity on the selection of bioremediation techniques, Vol. 11, Tibtech, 1993.
- 21.Andrew R. Autry and Gray M. Ellis, bioremediation: An effective alternative for petroleum hydrocarbon-contaminated soil, No1. 11, No. 4, Environmental Progress, 1992.
- 22.Mostafa A. Warith, Ronald ferehner and Leta Fernandes, Bioremediation of organic contaminated soil, Vol. 9, No. 2, Hazardous waste & hazardous material, 1992.
- 23.Battermann G. et al., Pilot and large scal experiences in the in situ bioremediation of an refinery-site polluted with hydrocarbons, Contaminated soil '93, vol. II, Kluwer Academic Publishers, Netherland , 1993.
- 24.Brummerler E., Enhanced biotechnological remediation of oil polluted soil with the CUM BAC system by optimization and modelling of the limiting factors, Contaminated soil '93, vol. II,Kluwer Academic Publiushers, Netherlands, 1993.
- 25.Mackenbrock K., Treatment of contaminated soils by a combination of suitable, proven technologies, Contaminated soil '93, vol. II, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1993.
- 26.經濟部工業局，污染場址復育技術，臺北，民國82年。
- 27.張添晉，土壤污染復育工程技術評估，教育部科技顧問室，民國80年。

- 28.經濟部工業局，污泥資源化回收利用技術研討會，臺北，民國82年。
- 29.Keith Kaufman，實用生物復育技術與污染整治，環境規劃暨污染鑑定與復育技術研討會，台北，民國83年。
- 30.張添晉，陳致谷，土壤污染復育工程技術與成本分析，第五屆大地工程學術研討會，台北，民國82年。
- 31.陳致谷，張添晉，土壤污染復育工程技術與成本分析，第45期，工業污染防治，1993。
- 32.張添晉，土壤污染生物復育技術評估及應用，國科會專題研究報告，民國83年。