

下水污泥资源化再利用-----作為土壤改良材施用於綠農地

林獻山¹、張添晉²、洪明宏³

1. 蘭陽技術學院 循環型永續環境研究中心 執行長

2. 台北科技大學 循環型環境研究中心 主任

3. 台北科技大學 環境研究所 碩士

摘要

臺灣地區20餘年來推動污水下水道系統建設，目前以臺北市及高雄市兩都會區普及率較高，隨經濟高度發展及下水道普及率提升，預估未來每年將有數量龐大之都市下水污泥產生，倘若污泥未能予以妥善處理與處置，勢必成為另一環境污染負荷之問題，因此，再利用及資源化技術發展，始能因應實際之需要。

目前雖然污泥再利用已有一些具體之研發成果，包括作為水泥原料、骨材等建築材料，達成污泥處理減量化的一些效果，然下水污泥含有大量之揮發性固體物及營養鹽等成分，是農地土壤所需的物質，經適當處理後，可製成肥料或做土壤改良材。

本研究首先整理美國、日本與歐洲國家對公共下水道污水處理廠污泥再利用於土壤改良材之相關案例，尤其是土壤改良材之經濟效益及市場需求。進而調查美國、日本與歐洲國家對公共下水道污水處理廠污泥特性，評估再利用於土壤改良材之可行性。利用搜集所得之國內公共下水道污水處理廠污泥再利用相關資料，以利後續研議污泥再利用於土壤改良材之可行性與施用規範。並調查國內公共下水道污水處理廠污泥再利用條件與法令限制，用以判斷作為土壤改良材之依據。最後研議國內公共下水道污水處理廠污泥再利用於土壤改良材之可行性與施用規範，將研究成果作為未來下水污泥資源化技術之基準。

土壤改良材主要用途為維護或改良土壤之吸水性、通氣性、土質膨鬆粒狀化等功能，而化學肥料則在提供主要多量之養份，在目前臺灣農地大都使用化學肥料之情況下，土壤已多呈現酸化、硬化情形，若兩者能相互搭配使用，則能發揮更大之土壤改善效果。

歐美日等國家對於下水污泥之處理處置與再利用，均已訂定相關之準則或規範，對下水污泥於土地施用時，重金屬在土壤中之累積量均有清楚之規定，而且美國EPA於40CFR part503管理規範中，更具體說明污染限值、操作標準、監測、紀錄及報告等管理細節。經由環保先進國多年持續努力，已累積相當豐富經驗，對國內有關下水污泥土壤改良材資源化利用之推動，極具參考價值。

下水污泥如用於土壤改良時，需進行土壤調查再依土壤改良步驟進行施肥及植栽，目的主要係改善土壤物理性質中之透水性及通氣性，而其施用量必須依據土壤中含氮量及植物種類而定。由於污泥土壤改良材利用之成份(氮、磷、鉀)

含量不如農畜業之禽畜糞堆肥，因此未來在市場之競爭立足點，長遠之規劃應以低於市價為販賣基礎，並使用低處理成本技術(如堆肥處理)，在市場得以較低價售出，才具競爭力，而被消費者與使用者所接受，經營污泥土壤改良材利用之廠商將因處理之低成本而有利潤可言，而得以永續經營，達成政府在不增加污泥處理費用之原則下，採行污染最少又資源化再利用之污泥處理政策，良好之污泥處理政策及行銷規劃等措施，國內下水污泥土壤改良材利用才有更大之拓展空間。

關鍵字：下水污泥、土壤改良材

一、前言

近年來隨著下水道普及率之增加，公共下水道污泥產生量也日益增加。因此，下水污泥再利用為當前施政重要課題。許多土地因施用化學肥料致土地利用降低，若能以污泥做為土壤改良材，可達到土壤整治之效果，其相關評估指標為土壤改良材之單位價格及污泥中有毒重金屬含量，由資源化再利用產物所得之商業利益，間接提升企業廠商形象及可降低其他處置所需負擔之環境成本，同時也可降低公眾對污泥產生排斥所產生之社會成本。

下水污泥之土壤改良材利用方式如表1所示，包括污泥經濃縮、脫水、乾燥後直接利用於土地，這點以綠地利用為主，以及污泥與其他基材經調和與堆肥過後，以農業利用為主，以及污泥、無機介質、其他有機介質與副資材共同製作成農地利用之土壤改良劑。本研究重點以污泥作為土壤改良材再利用為重點，改良土壤之物理性與化學性。

表 1 下水污泥之土壤改良材利用方式

技術名稱	原理、流程	成品適用範圍	技術成熟度	特點
土壤改良	污泥→濃縮→ 脫水→乾燥→ 土地施用	綠地公園為主	國外研究階段	需考慮重金屬、病原菌對土地之污染與累積
堆肥	污泥+其他基材→調和→堆肥→成品	農業利用 土壤改良	國外已商業化	技術發展相當成熟
培養土	污泥+無機介質+其他有機介質+副資材→成品	農業利用 土壤改良	國外已商業化	需考慮重金屬、病原菌對土地之污染與累積

二、土壤改良材應用潛力與趨勢

2-1 下水污泥基本特性與種類

污水處理場處理之流程若以活性污泥為例如圖 1 所示，污水所含砂及沉降性固體物經由沉砂池、初沉池去除，在初沉池中所溢出之細小懸浮性物質及溶解性污染物，經由曝氣槽內活性污泥的微生物所分解，由曝氣槽活性污泥所增殖之污泥在最終沉澱池沉降與上澄液分離，沉澱污泥部分回流至曝氣槽，至少部分則加以廢棄，處理後的水排放至承受水體。

由污水處理後排出之固體物為廢棄活性污泥污泥，從初沉池排出之污泥稱為初沉污泥，廢棄之初沉與終沉污泥合稱為混和污泥。此種污泥水分及有機物相當高，容易腐臭，因此為了將污泥減量化及安定化，需進行污泥處理。減量化之過程包括濃縮、脫水、乾燥、焚化及融熔；安定化過程則包括有機物消化、堆肥化、焚化及融熔。

下水污泥依據處理單元所產的污泥可分為數類，做為土壤改良材（包括可能利用在綠農地）之污泥可分為：1.堆肥化污泥 2.乾燥污泥 3.消化脫水污泥。

1.堆肥化污泥

堆肥化污泥是脫水污泥添加鋸屑、稻殼再進行好氧發酵，將有機物分解、安定化所形成之物。發酵過程可分為一次發酵及二次發酵：一次發酵是

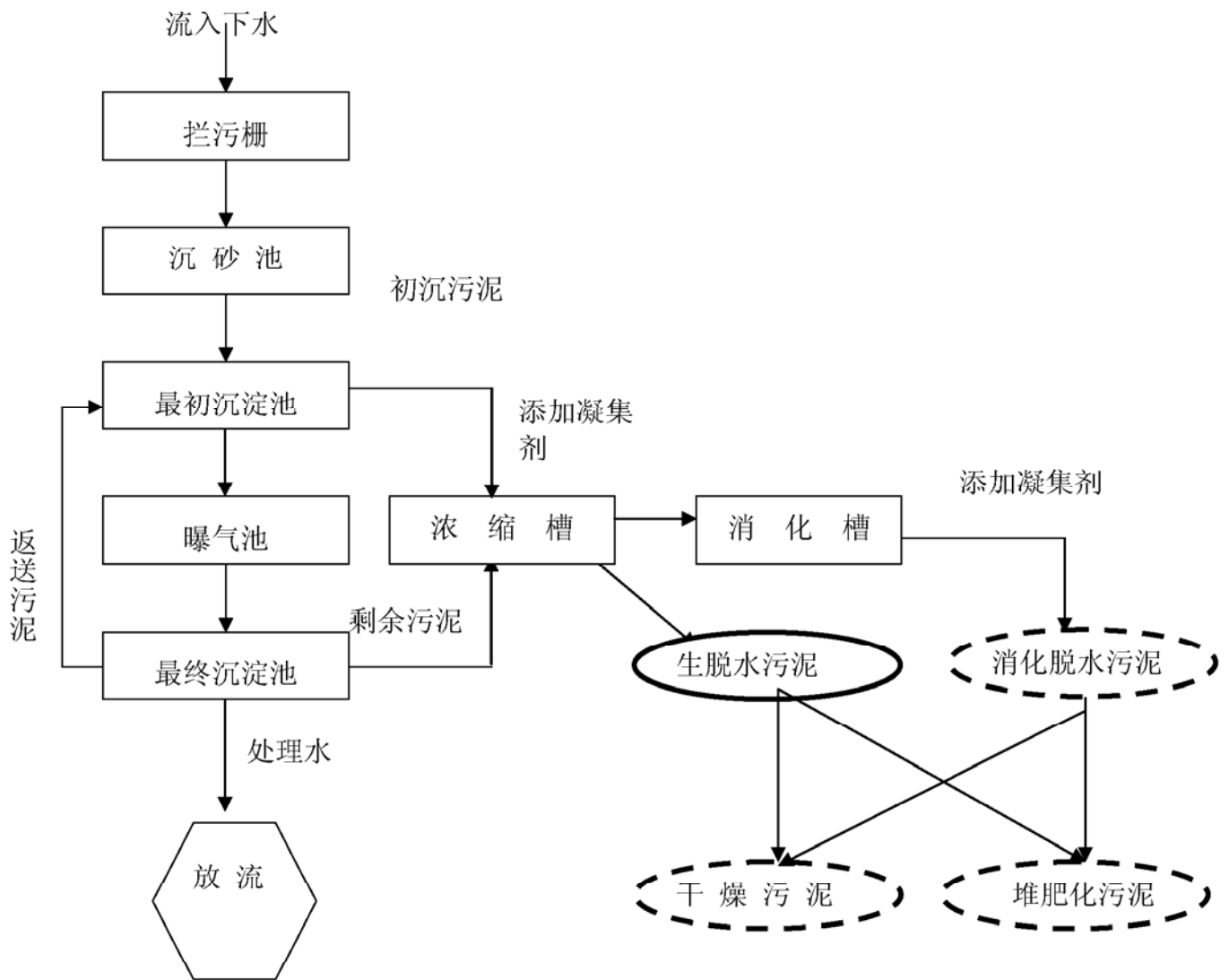


圖 1 典型之污水處理流程（標準活性污泥法）

將容易分解之有機物進行分解、抑制病原菌、寄生蟲及雜草種子之生長；二次發酵是將一次發酵所殘留之有機物進一步分解達成污泥腐熟。

2. 乾燥污泥

乾燥污泥是將脫水污泥加熱或日曬所形成污泥，含水率 5-15%，乾燥處理無法將有機物分解，因此，固體物中有機物的比率與脫水污泥相近。

3. 消化脫水污泥

所謂脫水污泥是利用真空吸引力、機械壓力或離心力等將濃縮污泥的水份去除。其含水率約 70-80%。若直接將濃縮污泥脫水有其困難，因此在脫水前後添加凝集劑進行調理。一般脫水凝集劑可分為無機系的石灰或氯化鐵 (FeCl_2)，及有機系的高分子凝集劑。脫水污泥有機物含量較高，若在濃縮後脫水前進行消化可減少有機物。消化方式一般採用厭氧消化，利用厭氧菌分解有機物，以減少污泥固體物。經由此過程再將污泥進行脫水稱之為消化脫水污泥。消化脫水污泥較未消化而脫水的污泥不管在有機物分解性、衛生

面、臭味面而言都有較好之傾向，施工時，為了顧及周遭環境用於綠農地還原之污泥，大部分使用消化脫水污泥。

污泥成分與污泥種類、污泥產生時間、及處理場地理性因素有關。堆肥化污泥、乾燥污泥、消化脫水污泥其主要成分如表 2 所示

表 2 堆肥化污泥、乾燥污泥、消化脫水污泥主要成分表

種類		有機物 (幹基%)	C/N 比	全氮(幹基 %)	磷(幹基 %)	鉀(幹基 %)
堆肥 化污 泥	石灰系	36	9.3	2.0	3.6	0.21
	高分子系	53	9.4	2.7	3.2	0.36
乾燥 污泥	石灰系	42	8.2	2.7	2.3	0.15
	高分子系	56	8.1	4.5	3.6	0.30
消化 脫水 污泥	石灰系	51	7.9	3.2	3.5	0.21
	高分子系	70	6.5	5.2	5.8	0.36

2-2 臺灣 3 座主要污水廠消化脫水污泥特性

根據營建署研究報告，國內 3 座污水廠消化脫水污泥特性如表 3 所示。

表 3 臺灣 3 座污水廠有機物含量、發熱量與含水率一覽表

廠別 \ 項目	TS(%)	VS/TS(%)	發熱量(幹 基)(Kcal/kg-DS)	含水率(%)
迪化	30.54	72.4	4312	70.46
民生	15.62	64.0	3594	84.48
中洲	40	49.5	-	60

(內政部營建署)

下水道污泥重金屬含量將影響污泥處理處置方法的選擇，國內北部與南部污水處理廠脫水污泥含重金屬特性如表 4，以臺北內湖與高雄中區脫水污泥重金屬資料顯示，添加污水處理之凝聚劑對於污泥重金屬含量並無直接影響，若將污泥直接利用於土壤，濃度也遠低於土壤監測標準。

表 4 國內汙水處理廠脫水污泥重金屬特性

廠別		鋅	鉛	鎘	鎳	鐵	錳	銅	砷	鉻	單位
臺北迪化	最大	3870	47.5	19	77.7	10737	171	302	29.4	117.6	ppm
	最小	517	0	0	7.4	3104	48.1	49.3	5.2	8.9	
	平均	1546	5.5	6.2	37.3	5177	118	172	18.8	47.5	
臺北民生	最大	3770	42.3	18.6	65.8	10271	121.2	167	32.4	60.9	
	最小	752	0	0	10.6	2856	27.1	57.4	5	3.2	
	平均	1342	8.6	4	25.8	6618	79.5	122	15.9	29	
臺北內湖		—	0.09	—	—	—	—	—	0.004	0.006	mg/L
高雄中區		0.85	ND	ND	0.52	—	—	<0.1	0.008	ND	

(內政部營建署、中環科技事業股份有限公司、佳美環境科技股份有限公司)

美國、英國、日本乾燥污泥的重金屬含量平均值及發生機率最大的範圍如圖 2，目前國內尚無法針對下水污泥之處理處置，限制幹污泥重金屬含量。

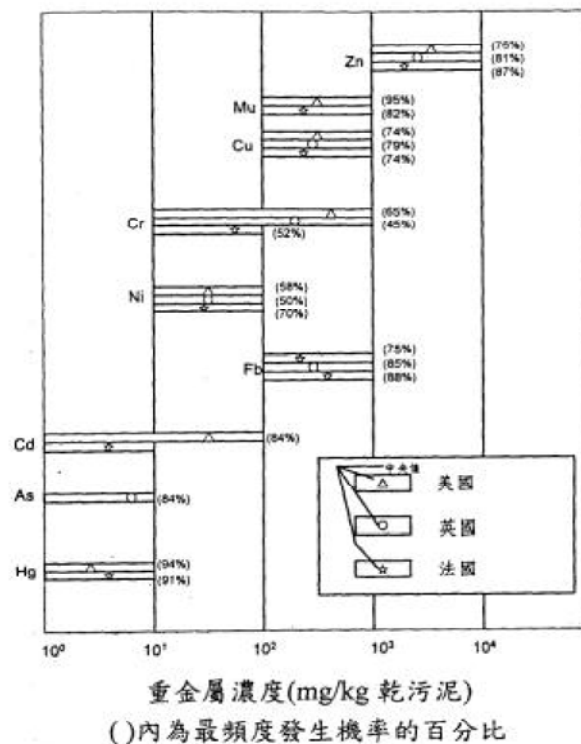


圖 2 美國及英國下水污泥中的重金屬含量平均值及範圍

三、 污泥再利用於土壤改良材之作業程式

3-1 污泥成分分析

使用污泥作為土壤改良材時，應考慮污泥成分、作業特性、臭氣、保存性及價格等因素，選擇適當的污泥。

一、污泥成分

1. 肥效成分

污泥中的肥效成分主要為氮、磷，另還包含錳、鐵等礦物成分。污泥成分隨季節及處理場不同而有所變化，為了掌握肥效成分，必須收集處理場年平均的污泥成分加以分析。

2. 重金屬

有關重金屬含有量需收集汙水處理廠之年平均數據加以並確認。

二、操作特性

污泥再利用時，其操作特性良否視污泥處理狀態而異，消化脫水污泥含水率 70~80 %，黏性強，呈黏土狀態之污泥，較堆肥化污泥操作特性低。乾燥污泥呈粒狀，其操作特性佳。堆肥化污泥其含水率 20~50 %，宛如分散狀之土壤其操作特性亦佳。

三、臭氣

臭氣一般在污泥急速醱酵(一次醱酵)時較易發生。已醱酵之堆肥化污泥不易發生臭氣。乾燥污泥在乾燥狀態時，無臭味產生的困擾。乾燥污泥若含有水份則與消化脫水污泥同會有臭味產生。因此，在人口密集處及人為活動頻繁地點，在使用消化脫水污泥或含有水份之乾燥污泥時應注意臭氣之產生。

四、儲存性

含水率較低之乾燥污泥及堆肥化污泥較消化脫水污泥有較佳的儲存性。

五、其他

污泥之來源可洽各政府都市汙水處理廠、下水道局或工務單位。為進行土壤改良，首先必須進行土壤調查，把握土壤特性，所得結果作為實施改善方法之參考，具體改良步驟如下圖 3 所示。

3-2 土壤改良材利用之特徵與限制

下水污泥作為土壤改良材利用所適用綠地土壤之特徵與限制，分述如下：

一、土壤物理性質與限制

在整地時，大都經過大型重機械碾壓，造成土壤變的堅硬，使得土壤之透水性與通氣性相當不良，欲於此種土壤下挖小洞種植樹木，水份容易儲留，而植物的根及微生物因儲留在洞內的水，無法吸收所需之氧，造成根部窒息腐爛而枯死。大部分樹木枯損之原因，多為透水性及通氣性不良所致，再加上土壤中微生物及有機物較多時，因微生物分解有機物需要氧，造成氧嚴重不足，當溫度高時此情形更為顯著。故在施用下水污泥肥料時，應比無施用時保有更佳之透水性與通氣性。若土壤透水及通氣性不佳之土壤，根無法深入土壤中，植物將無法成長。

二、養分不足之貧營養土壤

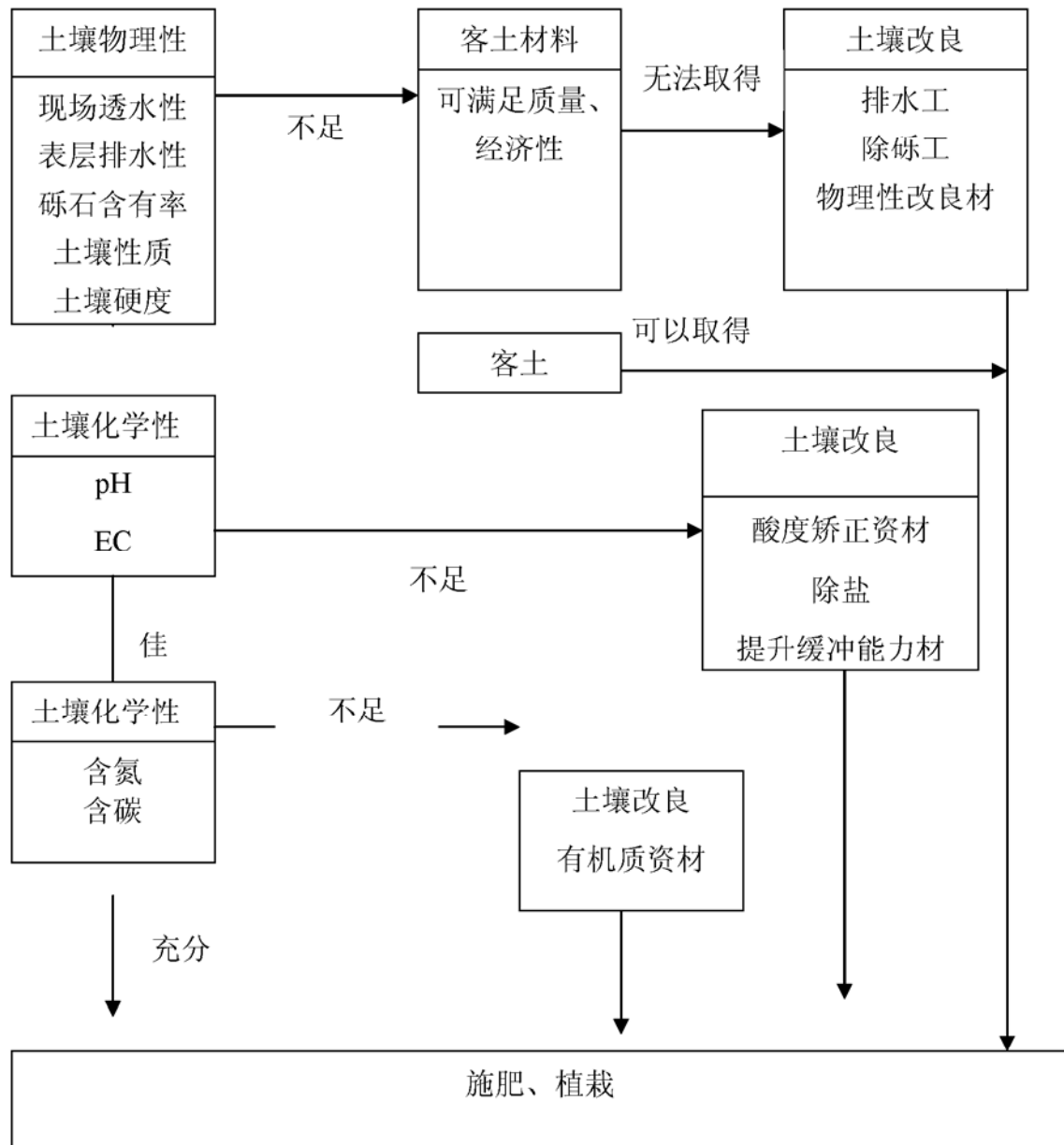


圖 3 土壤改良之步驟

一般公園綠地大多為人工造成，所以用的是切土與盛土。自然土壤層狀態基本上在表層數十公分至一公分左右微生物圈，含有一定之養份，在此下層土壤大都是經由岩石所風化之土壤，此土壤稱之為；“心土”，較缺乏養份。用切土、盛土所造成之綠地，多屬於此“心土”之土壤，因其土壤所含之養分較少，此“心土”需用肥料或土壤改良材加以改善，此乃下水污泥肥料施用最主要之功能。一般而言，綠地不如農地之土壤品質與環境均佳，故綠地基本上是屬於在比較不好之土壤上種植“耐候性”等樹木之綠帶植物為其特徵。

有關海岸掩埋地，行道樹等綠地，其土壤可分為表 5 所示之五種，其可能產生不良之因數及基本改良對策，整理如下表所示：

表 5 各種土地使用種類可能產生不良因數及基本改良對策

綠地種類	土壤不良因素之特徵	改良之基本對策
海岸掩埋地	1. 含有海底之淤泥及砂質土壤，透水性不佳。 2. 含有鹽分較多之高鹽類土壤。 3. 受鈉鹽影響成鹼性土壤。 4. 有時會受酸性硫酸鹽土壤影響而呈強酸性土壤。	1. 利用鋪設暗管（渠），或耕耘作用改善排水。 2. 加入無機質改良材及碎石，改良其物理性。 3. 施用良質腐植質增進土壤對鹽類及 pH 變化之緩衝能力。
灰爐等建築廢土、垃圾掩埋地	1. 受到壓密影響造成透水性不佳。 2. 因透水性不佳造成氧不足而使有機物呈厭氧發酵，產生甲烷、硫化氫等氣體。	1. 利用鋪設暗管（渠），或耕耘作用改善排水。 2. 加入無機質改良材及碎石，改良其物理性。
切土、盛土之人造地	1. 在成型時由於大型機械碾壓之影響，造成土壤固結及透水透氣性不良。 2. 利用“心土”造土使土壤呈“貧營養化”。 3. 有時會出現異常之土質。	1. 利用鋪設暗管（渠），或耕耘作用改善排水。 2. 加入無機質改良材及碎石，改良其物理性。
都市公園	1. 因土木工程重機械碾壓造成土壤固結透水及透氣性不佳。 2. 行人踐踏造成土壤固結化。	1. 利用耕耘方法改善排水及防止固結。
行道樹	1. 在狹窄區域中種樹，造成根成長區域受限。 2. 因鋪裝作用造成雨水浸透量不足，	1. 加入土壤改良材使土壤增加保水性及養分。

3-3 土壤改良目的與應用範圍

3-3-1 土壤改良之目的

下水污泥作為土壤改良材的目的包括：

1.改善土壤的保水性、2.改善土壤的透水性、3.改善土壤的膨軟化、4.增加土壤的保肥力、5.促進土壤糰粒性、6.提供部分有機物及微量元素。因此，訂定下水污泥作為土壤改良材品質表示基準實屬必要，而土壤改良材須遵守下列規定：

1.名稱之標示、2.販賣、製造廠商名稱、3.包裝上須有下列標示：

- (1)一般表示事項
- (2)原料(下水污泥)
- (3)有機物含量
- (4)有機物中腐植酸的含有量
- (5)水分含量
- (6)施用方法

土壤改良材重要評估項目與誤差範圍如表 6 所示。

表 6 土壤改良材重要項目與誤差範圍

項目	單位	容許誤差範圍
有機物含量	百分比 (%)	表示值負 10%
有機物中腐植酸含量	百分比 (%)	表示值正負 15%
水分含量	百分比 (%)	表示值正 10%
陽離子交換容量	meq/100g	表示值負 10%
單位容積品質	kg/l	表示值正 10%
膨脹力	mg/2g	表示值負 10%

3-3-2、土壤改良流程與診斷基準

土壤改良主要為土壤 pH 的矯正，及物理與化學性的改良，其診斷基準如圖 4，及表 7，茲分述如下：

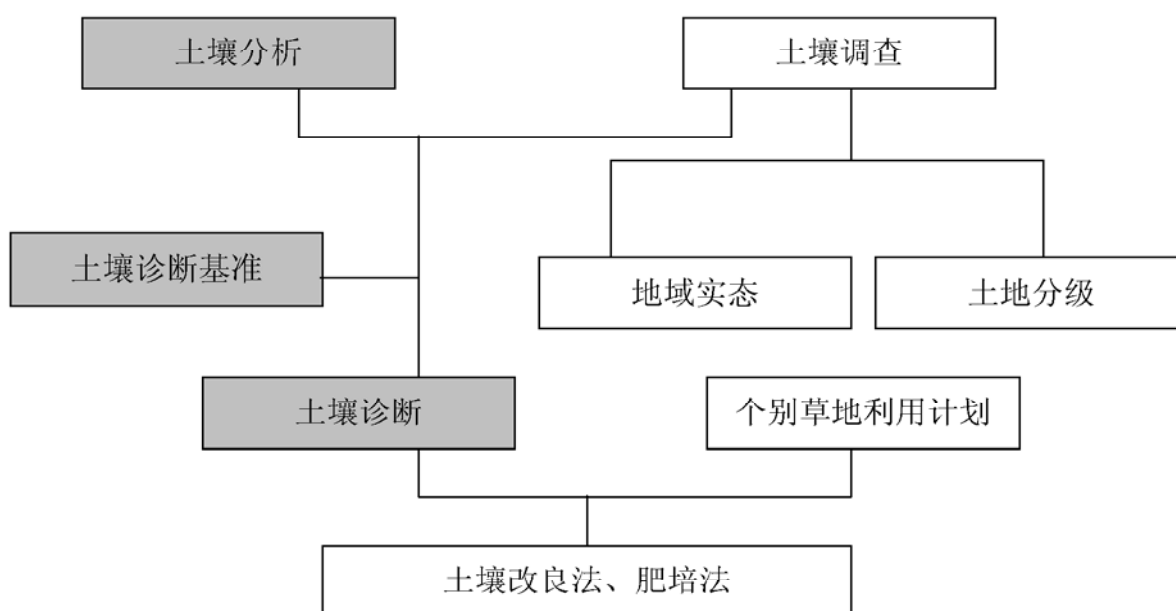


圖 4 土壤改良流程

表 7 土壤診斷基準

區分	診斷項目	基準值		
		火山性土 (黑褐土等)	非火山性礦質 土(褐色森林 土、紅黃色土)	泥炭土
物理性	表土有效根域密度	20-30cm 18-22mm	10-20cm 18-22mm	10-20cm —
	表土粗孔隙	15-20%	10%以上	—
化學性	pH	6.5	6.5	6.5

	有效性磷酸 鹽基飽和度 鈣鎂比 鎂鉀比	20mg/100g 以上 60-80% 5-10 2 以上	20mg/100g 以 上 60-80% 5-10 2 以上	30mg/100g 以 上 60-80% 5-10 2 以上
--	------------------------------	--	--	--

1. 土壤化學性改良

土壤 pH 為土壤中最重要之性質之一，pH 之變化對養分之有效性影響甚大，臺灣目前的土壤由於酸雨作用，普遍呈現酸性，因此有必要調整土壤的 pH 值。

2. 土壤物理性改良

(1) 土壤通氣性

(2) 土壤保水性

三、土壤改良材之應用物件

土壤改良材可施用之範圍包括：

1. 池塘、河川、海等泥漿處理、汙水處理
2. 水底的土沙再利用、早期處理
3. 作業用鋪設道路
4. 路床與路盤改良
5. 住宅地土質改良
6. 魚池、蓮藕池等堆積污泥之土質改良
7. 公園、步道利用
8. 廢油泥固化處理
9. 高爾夫球場土質改良
10. 一般產業廢棄物處理

由於下水污泥富含有機固體或營養鹽成分，通常經處理後可製成肥料或土壤改良材，改良綠地、農地土質，促進土壤肥度、吸水性及透氣性，並疏鬆土壤保持地力等功能，確為化學肥料所不及。

本研究參考國外下水污泥再利用之經驗與發展趨勢，針對下水污泥綠地土壤改良材利用之目的、種類與基本構想，進行實務可行性分析，並探討污泥成分、處理方式與成本、利用競爭性與適用土壤性質、適用作物與經濟性，獲致結論與建議如下：

一、凡欲進行土壤改良材利用之污泥，均都須先進行詳盡之分析工作，確切其有害成份含量與品質狀況，以及遵循施用要點及注意事項，使可達到土壤改良材之功效。

二、土壤改良材主要用途為維護或改良土壤之吸水性、通氣性、土質膨鬆粒狀化等功能，而化學肥料則在提供主要多量之養份，在目前台灣農地大都使用化學肥料之情況下，土壤已多呈現酸化、硬化情形，若兩者能相互搭配使用，則能發揮更大之土壤改善效果。

三、歐美日等國家對於下水污泥之處理處置與再利用，均已訂定相關之準則或規範，對下水污泥於土地施用時，重金屬在土壤中之累積量均有清楚之規定，而且美國 EPA 於 40CFR part503 管理規範中，更具體說明污染限值、操作標準、監

測、紀錄及報告等管理細節。經由環保先進國多年持續努力，已累積相當豐富經驗，對國內有關下水污泥土壤改良材資源化利用之推動，極具參考價值。

四、下水污泥如用於綠地土壤改良時，需進行土壤調查再依土壤改良步驟進行施肥及植栽，目的主要係改善土壤物理性質中之透水性及通氣性，而其施用量必須依據土壤中含氮量及植物種類而定。

四、參考文獻

- 1.林獻山、張添晉等人，公共下水道汙水處理廠污泥再利用於土壤改良材之研究，2004，臺灣水環境再生協會。
2. 林獻山、張添晉等人，「下水污泥綠地、農地利用手冊之研訂」2004，臺灣水環境再生協會。
- 3.臺北市府工務局衛生下水道工程處，污泥最終處置最佳方案評估計畫-污泥堆肥化研究，2002。
- 4.社團法人日本下水道協會網站(<http://www.alpha-web.ne.jp>)。
- 5.嶋豐雅文，「下水污泥燒卻灰之土壤改良材」，下水污泥資源利用協議會志，第23卷，第89期，2000，第73~75頁。
- 6.楊萬發、洪明龍，「家庭廚餘與下水污泥共同堆肥之資源化研究」，化工技術，第9卷，第1期，2001，第148~158頁。
- 7.潘時正、曾迪華，「下水污泥灰渣特性及再利用於水泥材料之評估」，國立中央大學環境工程學刊第五期，(<http://w3.ev.ncu.edu.tw/w3backup/Accomplishment/paper/fiv/list-5.htm>)，1999。
- 8.經濟部工業局資源化工業網，「再利用技術資訊-各案介紹-有機污泥資源化技術」，(<http://www.iw-recycling.org.tw/iwopt0431a1.htm>)，2003。
- 9.Doxiadis, C.A., Ancient Greek settlements:Third report: Ekistics, vol.35, no11, 1973.