

下水道污泥处理处置之现况与展望

曾迪華¹ 潘時正²

¹ 國立中央大學環境工程研究所教授

² 中興工程顧問股份有限公司計畫主任

前言

國內為改善都市環境及水體水質，近年積極推動污水下水道建設，有關主管單位除頒布「下水道法」，作為下水道建設之法源依據，並制訂「污水下水道發展方案」，據以推動各項具體實施計畫。至民國 94 年底，污水下水道接管普及率已達 24% [1] (含公共污水下水道及專用污水下水道)，至民國 95 年底預計將再提高 3%，使整體污水下水道接管普及率達到 27%。然而隨著污水下水道接管普及率的逐年提升，可預見在不久的未來，從各污水處理廠將產生大量下水道污泥。這些廢棄物如何配合台灣都會區人口稠密、土地資源有限等限制因子，得以適當處理處置，亟需妥善規劃與準備，以免未來成為嚴重的環境負荷，甚至引發民怨，進而阻礙了污水下水道建設的持續推展。

至於國內下水道污泥應如何妥善處理處置，參酌歐美先進國家經驗，可初步歸納出以下的基本方針[2]：

1. 明訂污泥处理的三項目標，包括(1)污泥來源減量；(2)安全化與衛生化；(3)以多種再生利用方案取代棄置。
2. 發展正確的污泥管理方法與運作體系，使得(1)再生利用的途徑及效益最大化；(2)運作體系符合當地經濟、地理與氣候特性；(3)整合並聯結污水處理與廢棄物處置工作；(4)確保持發展體系永續運作。
3. 在高密度都會化地區，污泥採集中處理，並以焚化為最終處理方案，配合能源回收與污泥物質之再生利用。

前述基本原則充分揭櫫未來下水道污泥處理處置與再生利用之方向，然而如何擬訂符合本地特性與需求之實施方案，有待相關主管機關、學術單位以及工程專業人士群策群力，方能妥善規劃與執行。為此，本文參酌相關文獻資料，分就國內下水道污泥質量與處理處置現況，以及污泥再生利用方法，進行彙整與評析，同時依據本地需求，提出未來下水道污泥處理處置之建議，期能作為各界之參考，進而收拋磚引玉之效。

下水道污泥質量現況

1. 下水道污泥產生量推估

內政部營建署目前雖已逐年編製「污水下水道統計要覽」[1]，但其中尚缺各污水處理廠污泥產生量資料，因此必須依各污水處理污水量進行推估。依據文獻調查資料顯示[3]，台北縣八里污水處理廠及台北市民生污水處理(現已除役)，每處理 10,000 立方公尺產生之脫水污泥餅量，分別為 1 公噸與 2.2 公噸。本文中以上述統計數據，分別代表國內典型初級與二級處理廠(含三級砂濾處理廠)之污泥產生率以及污泥餅固體物含量，並推估現有各公共下水道污水處理廠之污泥量，如表 1 所示。

表 1 公共下水道污水處理廠污水量及推估污泥量

系統名稱	處理類型	污水量 (立方公尺/年)	推估污泥量(公噸/年)		
			污泥餅體積	乾重	
基隆市 六堵污水處理廠	三級(砂濾)	1,427,960	315	63	
台北市 內湖污水處理廠	二級	13,734,234	3,022	604	
台北縣 八里污水處理廠	初級	330,352,600	33,036	9,911	
桃園縣 林口南區污水處理廠	二級	4,284,698	943	189	
台中縣 台中港關連工業區污水處理廠	二級	1,060,898	234	47	
台中市 福田水資源回收中心	二級	17,093,562	3,761	752	
南投縣	中興新村中正污水處理廠	二級	57,600	13	2.6
	中興新村內轆污水處理廠	二級	126,000	28	5.6
	溪頭森林遊樂區污水處理廠	二級	448,090	99	20
嘉義縣	嘉義縣治污水處理廠	二級	385,075	85	17
	阿里山風景特定區污水處理廠	二級	40,321	9	1.8
台南縣 柳營水資源回收中心	二級	76,184	17	3.4	
台南市	虎尾寮污水處理廠	三級(砂濾)	---	---	---
	安平污水處理廠	二級	21,453,660	4,720	944
高雄市 中區污水處理廠	初級	294,171,460	29,418	8,825	
高雄縣 五明污水處理廠	二級	---	---	---	
屏東縣	南灣污水處理廠	三級(砂濾)	206,098	46	9.2
	墾丁污水處理廠	二級	151,113	34	6.8
金門縣	太湖污水處理廠	二級	484,887	107	21
	榮湖污水處理廠	二級	195,105	43	8.6
	金城污水處理廠	二級	350,722	78	16
	東林污水處理廠	二級	56,868	13	2.6
	擎天污水處理廠	二級	92,622	21	4.2
總計		686,249,757	76,042	21,454	

註 1：公共下水道污水處理廠污水量為 94 年統計資料[1]。

註 2：虎尾寮污水處理廠及五明污水處理廠 94 年尚未正營運，故無污水量資料。

註 3：初級與二級處理廠污泥餅產生量，分別以 1/10,000 及 2.2/10,000 估計；污泥餅固體物含量，分別以 30% 及 20% 計算。三級處理廠污泥餅產生量及性質，假設與二級處理廠相同。

由表可知，台灣地區於 94 年共有 21 座公共下水道污水處理廠納入運轉，其年處理污水量累計達 6 億 8 千餘立方公尺，相當於每日處理污水量 1,880,000 立方公尺，推估脫水污泥餅年產生量達 76,000 公噸(固體物乾重約 21,400 公噸)。此外，台北市迪化污水處理廠提升二級處理工程已近完成(設計流量 500,000 CMD)，預計加入營運後國內脫水污泥餅年產生量將增加 40,000 公噸(固體物乾重約 8,000 公噸)。

另一方面，國外污水處理廠每處理 10,000 立方公尺產生之脫水污泥餅量，約為 4~20 公噸，以上國內公共下水道污泥產生量，與歐美國家相比明顯偏低，甚至不及丹麥、比利時等北歐小國[2]，其可能原因分析如下：

- (1) 家庭污水強度不同：由於生活飲食習慣以及污水收集方式之差異，導致國內家庭污水生化需氧量及懸浮固體物等水質項目，均遠低於歐美、日本等國，甚致低於污水廠設計水質，以致污泥產生量偏低，各污水廠污泥處理系統多在低負荷狀態下運轉。
- (2) 現階段污水處理量多來自大型初級處理廠：由表 1 可知，雖然國內公共下水道目前僅有二座初級處理廠(台北縣八里污水處理廠及高雄市中區污水處理廠)，但其處理污水量佔 94 年國內總處理量之 91%，如未來將此 2 座污水處理廠提升為二級處理，估計每年污泥產生量將會加倍。

2. 下水道污泥組成

都市污水處理廠產生之下水道污泥，其最終型態多為脫水污泥餅，本文以民生污水廠及八里污水廠之脫水污泥餅，分別代表典型之二級與初級處理廠產生之下水道污泥，結果發現其脫水污泥餅固體物含量約為 15~30%，其餘成分主要為水。至於脫水污泥餅固體物之組成，大致可分為以下三部分[3]：

- (1) 有機成分：主要包括來自原污水中之有機固體物，以及在下水道系統或污水處理廠中生成之微生物及其代謝產物，構成污泥中之揮發性固體物(volatile solids)，也是污泥熱能的來源。污泥有機成分可分為碳水化合物、脂肪、蛋白質三大類，其中又含有氮及磷等微量元素。國內下水道污泥中之揮發性固體物所佔之比例，如圖 1 所示典型二級處理廠污泥約為 70%，而典型初級處理廠污泥約為 35%。
- (2) 礦物成分：進流污水中無機性懸浮固體物，經過污水廠初級與二級處理程序，被沉澱收集並濃縮至廢棄污泥之中，因而構成污泥中大部分之固定性固體物(fixed solids)。至於污水中礦物成分來源，初步推測如下：
 - a. 石英及黏土等天然地層礦物，亦即細微之砂土顆粒。
 - b. 赤鐵礦等含鐵物質，可能來自天然礦物，部分也可能來自管線剝落之鐵鏽。
 - c. 污水所含鈣及鎂，推測來自家庭用水中之硬度，以及排入下水道系統的少量食物殘渣。
- (3) 無機鹽類：來自天然水體、家戶衛生污水及工業廢水中溶解離子與沉澱物，包括碳酸鹽、硫酸鹽、硝酸鹽、磷酸鹽及微量重金屬，均屬污泥中之固定性固體物。調查結果顯示，國內公共下水道污泥中含量較高之重金屬為鋅及銅，分別為 2.2~

2.9 g/kg(固定性固體物)以及 0.4~1.1 g/kg(固定性固體物)，此外也含有少量之鉛、鉻、鎳、砷等[3]。

3. 下水道污泥焚化灰渣性質

由相關資料可知，目前基隆市六堵、台北市內湖及高雄市中區等 3 座污水處理廠，其脫水污泥餅採焚化處理，但均為與都市垃圾混燒。由於國內尚無專用之下水道污泥焚化廠，因此本文以文獻中台北民生及台北縣八里污水廠之下水道灰渣分析結果，代表台灣地區下水道污泥焚化灰渣特性[3]：

- (1) 物理性質：污泥灰渣視比重約為 2.59~2.61，與矽砂之 2.70 相近。利用掃瞄式電子顯微鏡(SEM)觀測下水道污泥灰渣，可發現其為表面不規則之細微顆粒，同時具有孔隙結構，經分析發現污泥灰渣具有 11,670~15,160 m²/kg 之比表面積，同時孔隙體積約為 0.057 cm³/g，依此推估污泥灰渣孔隙率約為 15%。
- (2) 化學及礦物組成：表 2 所示，為污泥灰渣化學組成分析結果。由表可知，污泥灰渣最主要成分為氧化矽，約佔灰渣總重量之 50%。其中結晶性氧化矽，包括石英(quartz)、斜矽石(moganite)等，約佔氧化矽含量之 3/4；其餘 1/4 屬不定型態(amorphous)，推測為原污泥中黏土礦物之灼燒殘餘物。至於污泥灰渣中次多成分，依序為氧化鋁、氧化鐵，鈣、鎂、硫、磷等氧化物，以及少量重金屬如鋅及銅等。
- (3) 卜作嵐活性：由於下水道污泥含有一定之黏土礦物，會在焚化過程中發生脫水反應(dehydroxylation)，生成不定形態氧化矽(簡寫為 S)及氧化鋁(簡寫為 A)，會與氫氧化鈣(簡寫為 CH)及水(簡寫為 H)反應，生成矽酸鈣水化膠體(C-S-H)，或是鋁酸鈣水化膠體(C-A-H)

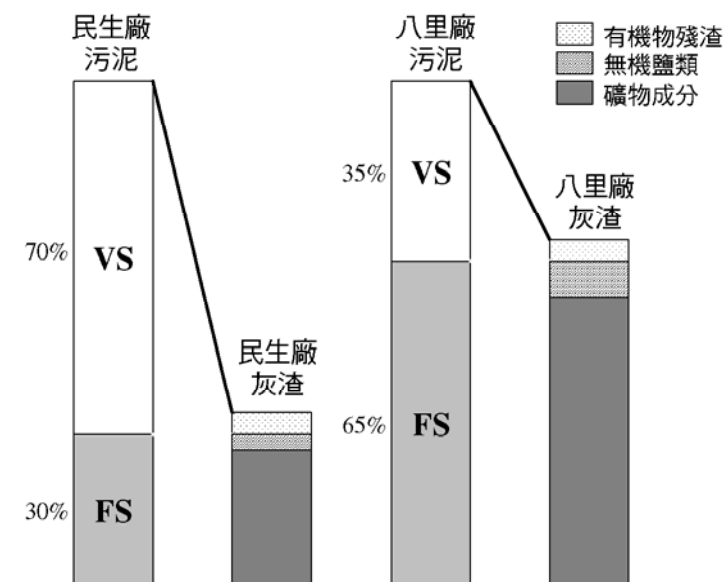


圖 1 下水道污泥固體物組成

表 2 污泥灰渣化學組成分析結果

樣 本	主要成分，重量%								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	P ₂ O ₅	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
民生廠(一)	56.1	14.7	8.2	2.1	1.9	1.7	1.7	0.31	1.9
民生廠(二)	41.3	16.5	8.5	5.3	8.5	2.3	1.5	0.23	2.0
八里廠(一)	50.2	12.0	7.1	1.8	1.8	1.4	2.4	0.32	1.6
八里廠(二)	50.6	12.8	7.2	1.9	1.7	1.5	2.4	0.32	1.7

，即所謂卜作嵐反應(pozzolanic reaction)：



至於民生及八里污水廠污泥灰渣之卜作嵐活性(pozzolanic activity)，以 28 天強度活性指數(SAI)作為指標，分別為 81 及 70%(平均值)，已接近國內外相關規範對卜作嵐材料之要求，亦即應用於混凝土時其 SAI 應不小於 75%。

- (4) 表面化學性質：污泥灰渣之表面化學性質，可用等電位點 pH 值(pH_{ZPC})，以及陽離子交換容量(CEC)加以描述。民生及八里廠污泥灰渣之 pH_{ZPC} 約為 3.1~3.4，CEC 則約為 24~26 meq/100g。由於污泥灰渣之化學與結晶成分，為數種礦物質與無機物構成之混合物，因此前述 pH_{ZPC} 及 CEC 分析結果，可視為污泥灰渣中各種組成綜合作用之結果。

下水道污泥處理處置現況

表 3 所示，為國內現有 23 座公共下水道污水處理廠之污泥處理及處置方式。在污泥處理方面，除了部分小型污水處理廠外，中大型污水處理廠均設有完整之污泥濃縮、穩定、調理及脫水單元。各廠採用之污泥濃縮方法，多為較傳統之重力濃縮(gravity thickening)，僅有少數污水處理廠採用浮除(dissolved air floatation)或重力帶式(gravity belt thickener)等機械濃縮；在污泥穩定方面，佔多數的小型污水處理廠多未設置污泥穩定單元，中大型污水處理廠則普

遍採用厭氧消化或好氧消化，僅有內湖污水處理廠因用地不足，於設計時即採用較特殊之石灰穩定法；至於污泥調理方法，添加高分子聚電解質之化學調理，已為各廠所普遍採用；最後各廠污泥脫水單元中，帶式過濾(belt filter press)為最普遍使用之污泥脫水方式，而近年新建之污水廠也有採用離心脫水設備(centrifuge)，至於較簡易之污泥乾燥床則是有部分小型污水處理廠採用。在各廠污泥處理運作情形方面，因實際污泥質量與原設計值有相當落差，以致大部分污水處理廠之污泥處理單元，均常在低負荷狀態下運轉，尤其台北縣八里、高雄市中區等大型污水處理廠之厭氧消化單元，尚無法充分發揮其原有功能。

表 3 公共下水道污水處理廠污泥處理處置方式

系統名稱	污泥處理方式				污泥處置方式
	濃縮	穩定	調理	脫水	
基隆市 六堵污水處理廠	重力	好氧消化	化學	帶式過濾	熱處理
台北市 內湖污水處理廠	重力帶式	石灰穩定	化學	帶式過濾	熱處理 土地利用
台北縣 八里污水處理廠	重力	厭氧消化	化學	帶式過濾	掩埋
桃園縣 林口南區污水處理廠	重力			乾燥床 帶式過濾	堆肥
台中縣 台中港關連工業區污水處理廠	重力	好氧消化		帶式過濾	
台中市 福田水資源回收中心	重力	厭氧消化		帶式過濾	掩埋
南投縣 中興新村中正污水處理廠			化學	帶式過濾	掩埋
				乾燥床	掩埋
		好氧消化	化學	帶式過濾	掩埋
嘉義縣 嘉義縣治污水處理廠				乾燥床	掩埋
	重力			帶式過濾	掩埋
台南縣 柳營水資源回收中心	重力	好氧消化	化學	帶式過濾	掩埋
台南市 虎尾寮污水處理廠	重力		化學	離心機	未定
	浮除	厭氧消化		帶式過濾	掩埋
高雄市 中區污水處理廠	重力	厭氧消化		帶式過濾 離心機	熱處理
高雄縣 五明污水處理廠	1.重力 2.浮除		化學	帶式過濾	掩埋
屏東縣 南灣污水處理廠	重力		淘洗	帶式過濾	掩埋
	重力		化學	帶式過濾	掩埋
金門縣 太湖污水處理廠	重力			帶式過濾	土地利用
	重力			帶式過濾	土地利用
	重力			帶式過濾	土地利用
	重力			帶式過濾	土地利用
	重力			帶式過濾	土地利用

註：污泥處理方式不代表實廠各處理單元之先後順序。

資料來源：內政部營建署，污水下水道統計要覽(95年版)[1]。部份資料由作者更新。

在污泥處置現況方面，各廠採用方式大致可分為掩埋、熱處理(焚化)及土地利用(含堆肥)等三種，以下分述其處置概況：

- (1) 掩埋：國內目前共 12 座公共下水道污水處理廠污泥處置採用掩埋方式，超過污水廠總數之半。此外，參照表 1 之推估值，採用掩埋方式之污泥量，合計佔國內污泥產生量之 54.4% (以污泥乾重計算)，為目前國內最主要之污泥處置方式之一。

- (2) 熱處理(焚化)：亦屬國內最主要之污泥處置方式之一，目前共有基隆市六堵、台北市內湖及高雄市中區等 3 廠污泥處置採用熱處理(焚化)，其處理污泥量合計佔國內污泥產生量之 44.2% (以污泥乾重計算)。惟前述現行污泥焚化方式均為與都市垃圾混燒，而國內尚未設置專用之下水道污泥焚化廠。
- (3) 堆肥或土地利用：包括林口南區及金門縣各污水廠之污泥，採堆肥或土地利用方式處置，其處理污泥量，合計約佔國內污泥產生量之 1.1% (以污泥乾重計算)，因此本法目前屬於次要之污泥處置方式。

污泥再生利用技術回顧

下水道污泥再生利用，可取其各項成分以為適當之用途，也可將其所含熱能回收，圖 2 所示，為以現階段國內下水道污泥產生量(含迪化污水廠)推估污泥物質與熱能產生量，以及相關再生利用方式之示意圖，以下分就四種主要再生利用方式加以說明。

1. 污泥熱能回收

下水道污泥為一含有高量熱值之物質，國內下水道污泥高位發熱量約為 13,100 ~ 18,700 kJ/kg(乾重)[4-5]，與美國之 13,000 ~ 22,000 kJ/kg(乾重)相近[6]。目前將下水道污泥所含熱能加以利用的方式主要有以下三種：

- (1) 污泥焚化：將脫水污泥乾燥後再加以焚化，可產生蒸汽、電力等不同型式之再生能源。在歐洲及日本均設有多座下水道污泥焚化廠，部分焚化廠則是處理含有下水道污泥之混合有機廢棄物[2]。
- (2) 污泥衍生燃料(sludge-derived fuel)：將污泥加熱乾燥並製成焦炭[2]，或者經熱解後產生燃氣與燃油，均屬污泥衍生燃料[7]。以上污泥衍生燃料可進一步用於推動內燃機，或是用於火力發電廠並產生電力。
- (3) 消化瓦斯：污泥厭氧消化產生消化瓦斯含豐富甲烷氣，歐美各國多將其用於鍋爐以產生熱水或蒸汽，或是用於推動引擎發電機以產生電力，目前正在開發將消化瓦斯純化並用於發電效率更高之燃料電池[8]。

2. 污泥成分再生利用

下水道污泥含有豐富有機物及微生物，利用物理化學方法，可自污泥中分離出有用之有機物及微生物，或是將下水道污泥直接製成有用資材。此類再生利用方式之實例包括：

- (1) 自下水道污泥回收有機物：利用鹼劑提高 pH 值，再利用超音波加速污泥水解，使產生大量揮發性脂肪酸(VFA) [9]。自污泥中回收之揮發性脂肪酸，可使之迴流至生物祛氮除磷程序(BNR)，以提升系統除磷效率。
- (2) 自下水道污泥回收貴重金屬：對於某些兼納工業廢水的都市污水廠，其污泥含高

量金屬成分，可將其焚化後之污泥灰渣加以熔煉，並從中回收可觀的貴重金屬[10]。

- (3) 製成生物吸附劑：下水道污泥含有多醣類等有機成分，因此具有回收作為重金屬吸附劑之應用潛力[11]。

3. 焚化灰渣材料

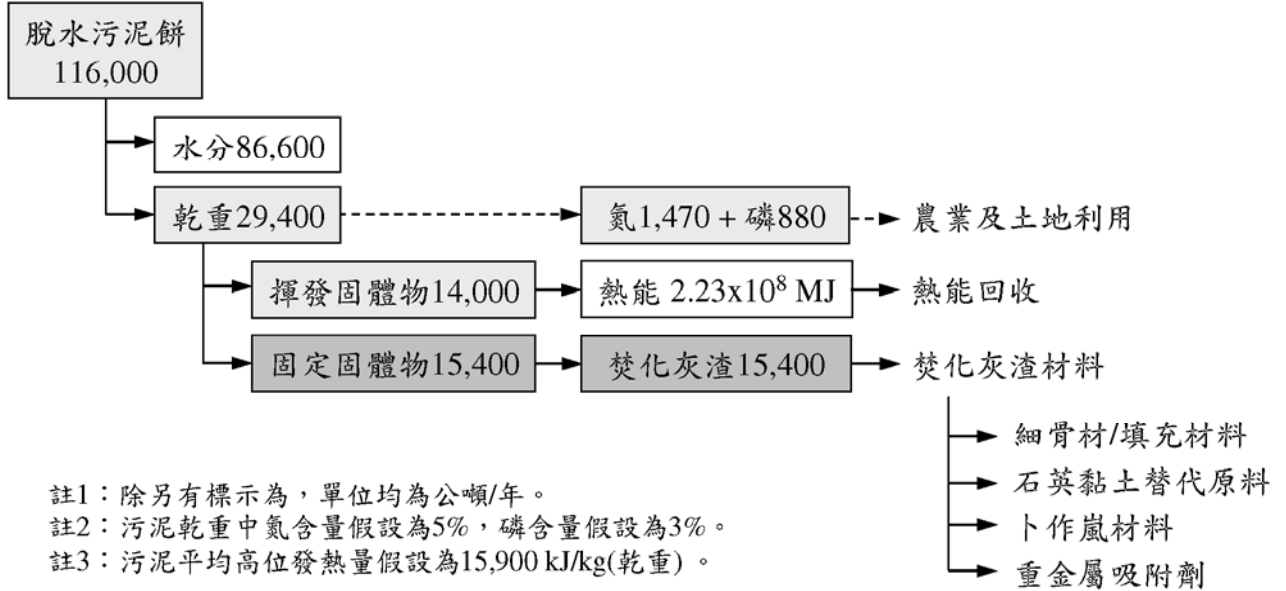


圖 2 下水道污泥物質流與再生利用示意圖

在歐洲及日本等地，污泥焚化為主要處置方式之一，因此利用下水道污泥焚化灰渣作為土木或建築材料之情形十分普遍。目前下水道污泥焚化灰渣可行再生利用技術分別說明如下：

- (1) 作為細骨材或填充材料：由於污泥灰渣顆粒比重與成分近似於砂土，因此可作為工程用細骨材或填充材料，例如用於掩埋場覆蓋面、下水道施工開挖回填、築路工程之路基材料，或是作為瀝青混凝土之礦物摻料[12-13]。此外，污泥灰渣具有相當之孔隙體積，因此有作為輕質混凝土或隔熱混凝土之應用潛力[14]。其次，有鑑於下水道污泥灰渣顆粒機械強度不及天然砂石骨材，因此也有研究建議，將污泥灰渣以燒結或熔融方式處理，並製成輕質骨材[15]或污泥熔渣[16]，其性質優於未經處理之污泥灰渣，可作為良好之砂漿骨材或路基材料。
- (2) 石英及黏土替代原料：由於污泥灰渣主要由石英及黏土礦物所構成，提供大量氧化矽及氧化鋁成分，因此可加以回收並用於替代石英及黏土原料，以下所述，為文獻記載數種相關資源化方式：
 - a. 製造水泥：利用污泥灰渣，混合垃圾焚化灰渣等廢棄物，可煨燒成環保水泥(eco-cement)，並用於製備多孔混凝土(porous concrete)，具有隔音、透水等特性[17]。目前日本下水道污泥再生利用於水泥製造，已達總污泥產生量之 27.2% (以污泥乾重計算) [2]。

- b. 污泥融熔：污泥融熔是在高溫下(1,200~1,500°C)將污泥中的有機物完全分解破壞，並將礦物成分液化，冷卻後形成玻璃狀的熔渣[18]。融熔方法也可以污泥灰渣為原料，用以生產地磚、排水板、釉陶管等製品[19-20]。
 - c. 製造污泥磚：利用污泥灰渣取代部分黏土製磚，可在低於灰渣玻璃軟化溫度(1,100°C 左右)，可燒製出強度高、吸水性低(0.4~6.1%)的磚體[21-23]。而在污泥灰渣添加量 40%、燒製溫度 950°C 時，以污泥灰渣製磚具有較佳之經濟效益[24]。
- (3) 作為卜作嵐材料：如前節所述，由於污泥灰渣有一定之卜作嵐活性，因此可應用於水泥砂漿或混凝土中，以取代部分卜特蘭水泥，並應用於非結構性用途，例如作為圬土砂漿，或是圍牆、景觀等非結構用混凝土，也可用於製作預鑄式水泥產品，例如混凝土透水地磚、植草磚等。為使污泥灰渣呈現卜作嵐活性，可將污泥灰渣磨碎，使其布蘭氏細度(Blaine's fineness)達 1,000 m²/kg 左右[25]。此外，在灰渣砂漿中添加強塑劑(superplasticizer)，則可明顯改善砂漿工作性[26]。
- (4) 作為吸附劑：污泥灰渣具有相當之比表面積，以及與黏土礦物近似之表面化學特性，因此可透過靜電吸引(electrostatic attraction)、表面錯合作用(surface complex formation)以及陽離子交換(cation exchange)等作用機制，吸附溶液中之陽離子未來除了可應用於含重金屬廢水處理外，也能作為掩埋場保護層材料，用以吸附滲漏水中重金屬離子，保護地下水與土層免受污染。相關研究以初始濃度 50 mg/L 之銅離子溶液，進行污泥灰渣恆溫吸附試驗，結果發現當污泥灰渣劑量增加至 30 g/L，吸附平衡之銅離子濃度約為 0.7~1.1 mg/L，此時污泥灰渣對銅離子之吸附去除率約為 98%，確認污泥灰渣具有吸附水中陽離子之能力[27]。

4. 農業及土地利用

再生利用於農業及土地之下水道污泥，稱為生物固體(biosolids)。生物固體之農業及土地利用，在歐美先進國家相當普遍，主要得力於農林及畜牧業對有機肥料需求，並形成一可觀的市場[28]。例如日本近年下水道污泥再生利用於農業之比例達 13.7%，而英法德義等西歐諸國則介於 33~61%，在美國更高達 66% [2]。下水道污泥除了經過減毒、堆肥等再處理程序，製成肥料或土壤改良劑[29-30]，也可應用於礦區土壤復育[31]。美國環保署為規範下水道污泥之土地利用，於 1993 年頒布 40 CFR Part 503 聯邦法規，對下水道污泥之性質、用途及處理程序，均有詳細規定[32]。另一方面，為了解下水道污泥作為肥料，對農作物及環境之影響，美國國家研究會議(National Research Council)也持續進行調查分析，其初步研究結果顯示，將合於法規規定之下水道污泥施用於食用農作物，對人體或動物不會造成明顯影響或損害[33]。

目前下水道污泥在農業及土地利用方面的主要課題包括[34]：

- (1) 除毒化：包括管制或去除下水道污泥中之重金屬、具危害性有機物及致病性微生物等，對公共下水道而言管制工業廢水排放將成為重要課題。

- (2) 養分調整：包括氮、磷等養分之添加調整，以提高其作為肥料之可行性。
- (3) 土壤、地下水及植物監測：由於使用下水道污泥作為農業及土地利用仍有較多疑慮，因此對施用區域土壤、地下水的長期監測，以及作物中的有害物質攝取量的分析，可作為調整下水道污泥農業及土地利用政策或相關標準之依據。
- (4) 市場開發：應由政府訂定分級及使用標準，以便製成不同用途商品並在市場上銷售。
- (5) 下水道污泥中微量物質與環境荷爾蒙之健康風險評估[35]。

未來展望

國內目前下水道污泥年產生量推估達 76,000 公噸(固體物乾重約 21,400 公噸)，其中約 54.4%採掩埋處置、44.2%採熱處理(焚化)，而堆肥或土地利用比例約 1.1%，整體而言下水道污泥再生利用程度不高。然而隨著污水下水道接管普及率的逐年提升，可預見在不久的未來，從各污水處理廠將產生大量下水道污泥，而繼續採用掩埋處置可能性則是逐年降低。因此展望未來，必須擬訂下水道污泥處理處置略策，加速再生利用，減輕環境負荷與衝擊，以建立資源循環型社會。至於如何建立下水道污泥處理處置略策，又如何逐步施行，需要各界集思廣益，以下為作者初步之幾點淺見：

- (1) 目前各污水處理廠污泥處理單元均屬低負荷運轉，不利於維持系統正常功能，建議應修正相關設計準則，適度減少污泥處理系統初設容量，再保留較大之擴建空間，以避免過當設計浪費工程經費，同時可使污泥處理單元操作正常化。
- (2) 儘速建立公共下水道污水處理廠污泥品質管理制度，其建議具體內容包括：
 - a. 明訂污泥性質分析項目與監測頻率，例如污泥外觀檢視、固體物濃度、揮發性固體物比例及重金屬等。
 - b. 進行污泥量量測與記錄：各種流質污泥(例如原污泥、濃縮污泥)以流量計測定其流量，而固態污泥(污泥餅)則測定其重量。
 - c. 建立日常操作記錄：包括污泥處理藥劑使用量、貯存量，污泥處理單元運轉時間、控制條件、操作參數等，以及設備之故障、異常與維護保養記錄。
 - d. 進行全廠質量平衡計算。
 - e. 針對污水處理廠進流污水毒性來源進行監測與控管，必要時研擬污泥減毒方案。
- (3) 下水道主管單位應擬訂明確政策，持續調查下水道污泥產生、處理及處置狀況，同時獎勵或補助各污水廠，以聯合方式辦理下水道污泥再生利用。

- (4) 下水道處理水與污泥之再生利用，應有整體構想。參酌歐洲及日本經驗，污水朝向分散式處理發展，污泥則傾向於集中處理，建議對於新設公共下水道系統考量此原則加以規劃，如此對於處理水與污泥之再生利用，均能達到最大之效益。
- (5) 基於下水道污泥集中處理之原則，評估未來針對都會區設置下水道污泥焚化廠之需要性及可行性。
- (6) 下水道污泥之再生利用，應有最多之途徑，因此現階段各種可行之再生利方式，包括能源化、材料化、農業及土地利用，均應同步加以推廣，務必使污泥再生利用率達到最大，以便能在最短的時間內建立規模經濟，使再生利用體系持續運作。
- (7) 建請下水道主管單位對於不同之下水道污泥再生利用方式，儘速進行研究與實廠測試，並依據測試結果訂定原料及(或)產品品質標準，同時依「資源回收再利用法」申請下水道污泥為可再生利用之資源項目。

參考文獻

1. 內政部營建署，「污水下水道統計要覽—中華民國 95 年版」，內政部營建署，台北 (2006)。
2. Spinosa, L. (Ed.), Wastewater Sludge: A Global Overview of the Current Status and Future Prospects, Water21 Market Briefing Series, International Water Association, London (2007).
3. 潘時正，「下水污泥灰渣特性及應用於水泥砂漿之研究」，國立中央大學土木工程研究所博士論文，中壢 (2002)。
4. 曾迪華、葉俊宏，都市污水廠污泥脫水性和燃燒值改良之研究，中央大學土木工程研究所，中壢市 (1985)。
5. 曾迪華、葉仁博，以機械脫水和自然乾燥法進行污泥脫水性和燃燒值改良之研究，中央大學土木工程研究所，中壢市 (1987)。
6. Cheremisinoff, P.N., Sludge Management and Disposal, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1994).
7. Bridle, T., "Fuel first", Water Quality International, No.5, pp.20-21 (1997).
8. 台灣下水道協會，「台灣下水道發展策略」，中興工程科技研究發展基金會，台北 (2002)。
9. Chiu, Y.C., and Chang, C.N., and Lin, J.G., and Huang, S.J., "Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion", Water Science and Technology, Vol.36, No.11, pp.155-162 (1997).
10. Lue-Hing, C., Zenz, D.R., and Kuchenrither, R. (Ed.), Municipal Sewage Sludge Management, Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania (1992).
11. Jeyaseelan, S., and Qing, L.G., "Development of adsorbent/catalyst from municipal wastewater sludge", Water Science Technology, Vol.34, No.3-4, pp.499-505 (1996).
12. Matthews, P. (Ed.), A Global Atlas of Wastewater Sludge and Biosolids Use and Disposal, International Association on Water Quality, London (1996).
13. Al Sayed, M.H., Madany, I.M., and Buali, A.R.M., "Use of sewage sludge ash in asphaltic paving mixes in hot regions", Construction Building Materials, Vol.9, No.1, pp.19-23 (1995).

14. Tay, J.H., Yip, W.K., and Show, K.Y., "Clay-blended sludge as lightweight aggregate concrete material", *J. Environmental Engineering, ASCE*, Vol.117, No.6, pp.834-844 (1991).
15. 王鯤生、楊志政、蔡振球、胡趙原,「下水污泥灰砂晶相調質之輕質化燒結特性研究」, 第 11 屆下水道及水環境再生研討會論文集, 台北, pp.187-194 (2001)。
16. Chan, M.Y., and Ouyang, C.F., "Feasibility study of two sewage sludge slag as fine aggregate", *Proceeding of Sludge Management Entering the 3rd Millenium, Taipei*, pp.440-449 (2001).
17. Tamai, M., Yoshida, K., and Kuromatsu, A., "Reduction in environmental load with eco-cement and porous concrete", *Proceeding of International Conference on Cleaner Production and Sustainable Development '99, Taipei*, pp.20-33 (1999).
18. 詹孟贊、李釗、歐陽嶠暉,「都市下水污泥熔渣細骨材利用可行性之研究」, 第十屆廢棄物處理技術研討會論文集, pp.54-63 (1995)。
19. Smith, P.G., "Thermal treatment and ultimate disposal of sewage sludge in Japan", *J. Institution of Water and Environmental Management*, Vol.6, No.6, pp.653-658 (1992).
20. Hiraoka, M., "Advanced sludge thermal processes in Japan", *Water Science Technology*, Vol.30, No.8, pp.139-148 (1994).
21. Anderson, M., Skerratt, R.G., Thomas, J., and Clay, S.D., "Case study involving using fluidised bed incinerator sludge ash as a partial clay substitute in brick manufacture", *Water Science Technology*, Vol.34, No.3-4, pp.507-515 (1996).
22. Tay, J.H., "Bricks manufactured from sludge," *J. Environmental Engineering, ASCE*, Vol.113, No.2, pp.278-284 (1987).
23. Trauner, E.J., "Sludge ash bricks fired to above and bellow ash-vitrifying temperature", *J. Environmental Engineering, ASCE*, Vol.119, No.3, pp.506-519 (1993).
24. 林登峰、傅國柱、翁誌煌、曾志晏、邱政韶,「家庭廢水污泥與黏土燒製成磚之資源化研究」, 第 9 屆下水道技術研討會論文集, 台北, pp.291-304 (1999)。
25. Pan, S.C., Tseng, D.H., Lee, C.C., and Lee, C., "Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties", *Cement Concrete Research*, Vol.33, No.11, pp.1749-1754 (2003).
26. 曾迪華、潘時正、李智強、李釗,「應用強塑劑改良下水污泥灰渣砂漿性質」, 第 11 屆下水道及水環境再生研討會論文集, 台北, pp.181-186 (2001)。
27. Pan, S.C., Lin, C.C., and Tseng, D.H., "Reusing sewage sludge ash as adsorbent for copper removal from wastewater", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol.39, No.1, pp.79-90 (2003).
28. Cargill, G.D., Cook, E.J., and Richard, S., "Biosolids marketing," *Water Environment Technology*, Vol.9, No.9, pp.87-91 (1997).
29. 江康鈺、張今濃、黃煌竣,「下水污泥堆肥資源化過程重金屬分佈特性之研究」, 第 11 屆下水道及水環境再生研討會論文集, 台北, pp.211-221 (2001)。
30. 江康鈺、林鶴年、游世達、嚴浩哲、黃俊傑、林莞慧、王鯤生,「利用堆肥資源化技術處理下水污泥之可行性研究」, 第 9 屆下水道技術研討會論文集, 台北, pp.277-290 (1999)。
31. Sopper, W.E., *Municipal Sludge Use in Land Reclamation*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida (1993).
32. U.S. EPA, *Land Application of Biosolids Process Design Manual*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio (1996).
33. National Research Council, *Use of Reclaimed Water and Sludge in Food Crop Production*, National Academy Press, Washington, D.C. (1996).
34. 曾迪華、潘時正,「台灣地區下水污泥處理處置之現況與展望」, 第 5 屆海峽兩岸

- 環境保護學術研討會論文集，南京，pp.135-140 (1998)。
35. 鄭長和，「污泥土地施用污染物指標的篩選與風險評估」，國立屏東科技大學環境工程與科學系碩士論文，屏東 (2004)。