



# 工業污染防治

Industrial Pollution Prevention and Control

122

本期專題：清潔生產與綠色技術

中華民國一〇一年六月 VOL.31 NO.2 Jun. 2012



經濟部工業局 編印

INDUSTRIAL DEVELOPMENT BUREAU  
MINISTRY OF ECONOMIC AFFAIRS  
TAIWAN R.O.C.

本期專題為「清潔生產與綠色技術」，承蒙周委員明顯多方邀稿，共邀得專題稿件5篇，期盼提供業界及學者專家就此專題深入探討的參考，並能運用於實務技術方面。



中華民國七十一年一月創刊

中華民國一〇一年六月出刊

發行人：沈榮津

總編輯：呂正華

編輯委員：吳委員志超、李委員公哲、周委員明顯、胡委員憲倫、馬委員小康、  
歐陽委員嶠暉、鄭委員福田、顧委員洋（依姓氏筆劃順序）

本期專題編輯委員：周明顯

企劃：凌韻生、于台珊、李碧鈴

執行編輯：陳見財、曾郁雯、陳千翔

發行所：經濟部工業局

出版所：經濟部工業局

台北市信義路三段41-3號

TEL：(02) 2754-1255 FAX：(02) 2704-3753

網址 <http://www.moeaidb.gov.tw>

財團法人台灣產業服務基金會

台北市大安區106四維路198巷39弄14號1F

TEL：(02) 2325-5223 FAX：(02) 2325-3922

網址 <http://www.ftis.org.tw>

行政院新聞局出版事業登記證

局版臺誌第三一四七號

中華郵政北字〇五二七號

執照登記為雜誌交寄

印刷承製：質聖印刷

# 122 工業污染防治

## 地下水污染整治技術

以高分子乳膠基質之生物整治牆技術處理受三氯乙烯污染之地下水 .....	梁書豪、高志明、郭育嘉、簡華逸	1
--	-----------------	---

## 空氣污染

高屏地區指標性空氣污染物來源探討 .....	王文正	25
---------------------------	-----	----

## 節能減碳

廢(污)水處理廠節能規劃與改善-以工研院中興院區為例 .....	黃文昌、姜榮煌、洪政偉	47
-------------------------------------	-------------	----

## 土壤污染

利用風險地圖探討都市農地管理策略 .....	陳怡君、蔡鴻德、王根樹、馬鴻文	59
---------------------------	-----------------	----

## 廢棄物資源化技術

TFT-LCD 廢玻璃製備無機聚合物之研究 .....	林凱隆、許皓翔、鄭大偉、黃兆龍	77
--------------------------------	-----------------	----

## 本期專題：清潔生產與綠色技術

清潔生產-綠色企業 .....	林俊宏、周明顯	99
清潔生產與綠色技術法令之範圍與特性 .....	顏秀慧	109
創新節能案例-智慧照明所帶來的綠色趨勢 .....	陳重勸、王壬	115
綠色技術-藻類生質柴油 .....	周明顯	127
一貫作業鋼廠清潔生產技術 .....	張西龍、歐正章	137



## 地下水污染整治技術

# 以高分子乳膠基質之生物整治牆技術處理受三氯乙烯污染之地下水

梁書豪\*、高志明\*\*、郭育嘉\*\*\*、簡華逸\*

### 摘要

含氯有機溶劑如三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)具有潛在之基因突變性及致癌性等毒性特徵，一旦發生三氯乙烯洩漏，將可能經由飲用水等多種暴露途徑，對鄰近民眾之健康造成嚴重危害。因此，本文以三氯乙烯為目標污染物，研究發展處理重質非水相溶液(dense non-aqueous phase liquids, DNAPL)污染地下水之整治技術。本文之目的為設計生物透水性整治牆，並發展一種可緩慢釋放碳源、氮源及營養物質之基質，以加速三氯乙烯之生物降解。本文所設計合成之基質將結合蔬菜油(慢速分解基質)、糖蜜(快速分解基質)及生物可分解界面活性劑(simple green, SG 和卵磷脂)，使蔬菜油乳化為較易擴散之高分子乳膠基質，以期長期提供微生物厭氧還原脫氯所需之碳源或氮源。本文內容包括高分子乳膠基質合成及厭氧微生物批次試驗。乳膠液合成配方方面，以 50%乳膠液為基準，卵磷脂及 SG 濃度分別為 72 mg/L 及 71 mg/L 時，其乳化程度可達 100%，顯示該配方為乳化最佳比例。乳膠液之合成方式，以卵磷脂及 SG 混合乳膠液以乳化均質機攪拌 30 分鐘所生成之粒徑最小，且界達電位為負值，有利於土壤孔隙間傳輸。蔬菜油/水對 TCE 之分配係數實驗顯示，蔬菜油對 TCE 有強的吸附能力，可使高濃度三氯乙烯集中於蔬菜乳膠液油滴中，當地下含水層環境尚未有厭氧產氫情況發生時，蔬菜油可有效攔阻溶於水中 TCE，待微生物增長後，蔬菜油物理攔阻及微生物厭氧產氫脫氯反應同時發生，增強 TCE 之處理效率。延遲係數推估方面，若假設透水性反應牆注入之乳膠液寬度

## 2 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

約 3 m，且含水層中無任何微生物反應，則上游三氯乙烯污染物需 2.68 年方能穿透反應牆。由微生物厭氧批次試驗得知，因高分子乳膠基質確實可有效促進厭氧生物還原脫氯反應，使 TCE 降解至乙烯。由以上結果推設以高分子乳膠基質建立生物透水性整治牆同時具有下列機制：(1)蔬菜油對於 TCE 之吸附能力及(2)緩慢釋出氫氣及醋酸鹽促進厭氧還原脫氯作用產生等機制，因此可有效攔阻及降解 TCE 及其降解副產物，並透過溶氧消耗，使反應環境處於還原狀態下，更可促進厭氧脫氯菌群增長。選用高分子乳膠基質作為厭氧生物整治之基質可避免持續灌注之高操作費用，在考量成本及效能上，高分子乳膠基質之生物透水性整治牆極具競爭力，但目前仍缺乏實際應用案例，未來將朝模場或實場應用，以加強該技術之應用性。

---

【關鍵字】綠色整治技術、厭氧還原脫氯、三氯乙烯、生物透水性整治牆

\*中山大學 環境工程研究所 博士

\*\*中山大學 環境工程研究所 教授

\*\*\*中山大學 環境工程研究所 博士候選人



## 一、前言

含氯脂肪族碳氫化合物(chlorinated aliphatic hydrocarbons, CAHs)由於對脂類有高溶解力，且具有低可燃、低沸點及高蒸氣壓等特性，因此大量被使用於工業上金屬及電子零件之清洗、脫脂、表面黏著及乾洗等作業<sup>[1]</sup>，又因其比重大於水，溶解度亦較低，當洩漏至地下水後，常無法完全溶解，並形成一分離的液體，對地下水水質造成長期的危害，因此，亦被稱為重質非水相液體(dense non-aqueous phase liquid, DNAPL)，其中又以三氯乙烯(trichloroethylene, TCE)及四氯乙烯(terachloroethylene, PCE)最為常見，造成土壤及地下水嚴重污染及整治不易等問題<sup>[2-5]</sup>。傳統含氯有機物常用之整治法包括抽取處理(pump and treat)、空氣貫入法(air spargin)、土壤蒸氣萃取(soil vapor extraction)、化學氧化(chemical oxidation)、界面活性劑與共溶劑(surfactants or cosolents)等<sup>[6-9]</sup>。美國環保署在 2008 及 2009 年發佈一系列之綠色整治(green remediation)原則及標準草案，在目前新穎整治技術方面，應優先採用現地(in situ)、被動式(passive)及生物(bio)為主之整治系統<sup>[10]</sup>，而美國環保署認為較符合現地、被動及生物整治概念之技術即包括現地生物復育技術結合透水性反應牆。而生物復育技術中，厭氧條件下可更有效降解含氯有機物<sup>[11]</sup>。氫氣是在微生物還原脫氯反應之電子接受者，電子供給者氧化及電子接受者還原之氧化還原條件下，含氯有機物之還原脫氯反應則是利用氫原子逐步取代氯原子，還原脫氯過程中，中間產物如順-二氯乙烯(*cis*-1,2 DCE)和極少量反-二氯乙烯(*trans*-1,2 DCE)產生<sup>[12]</sup>。當每一階段之還原脫氯產生時，其反應所生成之能量則可被微生物所利用生長<sup>[13]</sup>，當添加營養基質促進微生物生長降解污染物效率最佳<sup>[14]</sup>。有許多基質經微生物發酵後可產生氫氣促進 TCE 還原脫氯並廣泛應用於現地厭氧生物降解技術，如醣類(糖蜜)、有機酸(乳酸鹽、甲酸鹽、酪酸鹽、丙酸鹽及苯甲酸鹽)、醇類(甲醇和乙醇)和酵母萃取物。這些基質必須具有高溶解性和高生物分解性，並且需經常添加補充促進微生物生長<sup>[15]</sup>。然而，注入阻塞問題造成注入或抽水井之操作及維護費用增加。因此，整治區選擇緩慢釋放有機基質處理長期促進厭氧生物降解目標污染物，緩慢釋放基質包括纖維素、幾丁質、釋氫物質(Hydrogen Release Compound,

#### 4 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

HRC<sup>®</sup>)及食用油(如大豆油或蔬菜油)。但若直接將食用油注入則無法達到較佳之整治成效，原因由於食用油的延展性不佳，因此需要抽取大量的水持續置換使食用油擴散至土壤孔隙間<sup>[16]</sup>。因此本文目的，為研發一種以生物界面活性劑、蔬菜油及其他營養物質合成之高分子乳膠基質，使蔬菜油可以乳化型態均勻注入至地下含水層環境，並以厭氧生物批次試驗觀察該基質刺激微生物降解 TCE 之成效。建立一套高分子乳膠基質新穎現地生物復育技術，以長期刺激現地微生物生長並有效降解污染物之綠色整治技術。

## 二、研究方法

### 2.1 乳化試驗

高分子乳膠基質之主要組成有；(1)蔬菜油(Crisco, Smucker, USA)、(2)界面活性劑(Simple Green 及卵磷脂)、(3)糖蜜、(4)去離子水及(5)綜合維他命及維生素 B 群，乳化試程如表 1 及表 2 所示，將以上成份經不同混合方式(如果菜汁機、乳化用均質機)、混合轉速及混合時間，將形成之乳液倒入 50 mL 玻璃管內，放置於室溫下，經 24 小時後觀測其乳析分層(creaming)情形，並以顯微鏡及雷射粒徑分析儀(Coulter LS-100, USA)觀察並紀錄混合後油滴大小藉此找出最佳乳液穩定性之乳液製備程序。

### 2.2 油/水對 TCE 分配係數批次實驗

此實驗為探討蔬菜油對 TCE 的吸附能力，取不同 TCE 濃度分別以不同油水比例將蔬菜油及 TCE 水溶液注入內含鐵氟龍墊片之棕色血清瓶，經水平震盪機震盪 24 小時後取出樣品進行分析。

### 2.3 厭氧微生物批次試驗

在厭氧條件下，以高分子乳膠基質為主要電子接受者對加強 TCE 厭氧還原脫氯之可行性及其分解速率。將以 160 mL 之培養瓶做為此分解實驗中之 microcosm。污染場址所採集之乾淨含水層土壤為微生物之來源。實驗步驟則先將現地地下水



(已添加基礎營養鹽(單位 mg 溶於 1 L 現地地下水中):  $\text{H}_2\text{PO}_4$  326.4;  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  1,263.8;  $\text{Mg}_2\text{SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 98.6;  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 44.1;  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 10.7; 及添加 1 mL 微量元素包含(單位 mg 溶於 1 L 去離子水中) $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  1;  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  1;  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{21} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  0.25,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  0.25;  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.25;  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.25;  $\text{ZnCl}_2$ , 0.25;  $\text{NH}_4\text{VO}_3$  0.1)<sup>[17]</sup>以 80/20(v/v) 氮氣及二氧化碳混合氣吹提至溶氧低於 0.05 mg/L, 之後將已估算之 TCE 量注入供試水樣中 (TCE 估算濃度為 1 mg/L), 分裝至已含 5 g 現地含水層土壤、5 g 厭氧污泥及 2 mL 高分子乳膠基質之培養瓶中並以黑色膠塞及鋁蓋封口。

### 三、結果與討論

#### 3.1 選擇乳膠液合成之最佳比例及合成方式

製作高分子乳膠基質前, 需添加適量之界面活性劑比例, 方可合成含有較小油滴且乳化穩定之乳膠液, 以利基質灌注至地下含水層時, 土壤孔隙間有效傳輸<sup>[19]</sup>。在眾多乳化劑當中, 卵磷脂為目前食品業或食品加工業中常見之界面活性劑, 其具備良好乳化穩定性、潤濕性及適宜的延展性<sup>[20]</sup>, 亦常用於在乳化系統研究中<sup>[21~24]</sup>, 而蔡氏等選用 SG 作為土壤淋洗之界面活性劑, 有利後續生物復育技術亦有幫助<sup>[25~27]</sup>。為選擇穩定且乳化效果最佳之界面活性劑濃度及比例, 因此本文選擇 SG 和卵磷脂作為乳化用界面活性劑, 並藉由乳化試驗觀察界面活性劑種類及濃度對於乳化程度及穩定性之影響。

由文獻得知, 若需合成乳化穩定之乳膠液, 需尋得合適之 HLB<sup>[28~29]</sup>, 但對於混合型界面活性劑之乳化並無法完全以 HLB 決定最佳乳化劑量, 因此僅能以經驗或試誤法找尋最佳乳化劑量<sup>[30]</sup>。中心組合法(central composite design)常用於決定界面活性劑之最適劑量<sup>[31~33]</sup>。而中心組合法的目的是為了提供足夠的實驗數目來符合二階模式, 此實驗設計包含了 3 部份: (1)2K 因素配置, K 為因素數目。(2)重複中心點  $n_0$  次。(3)由中心點增加 2K 個軸點, 長度為  $\alpha$ 。由於此實驗設計包含  $N = 2K + n_0 + 2K$  次, 其中 2K 為全因素配置的實驗點, 重複中心點  $n_0$  次可估計純誤差, 用來檢定缺適度, 增加 2K 個軸點, 以利於曲面係數估算。本文試程如表 1 所示, 以

## 6 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

卵磷脂及 SG 濃度為乳化因子，其階次如表 2 所示，卵磷脂及 SG 最小及最大邊界濃度分別選定 20 mg/L 及 100 mg/L，固定配製 50% (wt) 蔬菜乳膠液，並依表 1 試程進行乳化成試驗，合成後靜置 24 小時觀察其乳化程度。其運算結果如圖 1 所示，圖中得知，若固定 SG 濃度時，則卵磷脂濃度越高，乳化穩定度越佳，而若固定卵磷脂濃度時，SG 濃度越高，乳化穩定度越佳，但 SG 濃度超過 70 mg/L 時，乳化穩定度則停滯無法增加，因此由圖中可得，以 50% 乳膠液為基準，卵磷脂及 SG 濃度分別為 72 mg/L 及 71 mg/L 時，乳化穩定度可大於 90%，而本文實際以該比例進行乳化試驗，其乳化程度可達 100%，顯示該配方為乳化最佳比例。

表 1 卵磷脂與 SG 實驗設計配置

RUN	lecithin(mg/L)	SG(mg/L)
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	-1.414
9	0	1.414
10	-1.414	0
11	1.414	0

表 2 卵磷脂與 SG 實驗因子階次

level	factor	
	lecithin(mg/L)	SG(mg/L)
-1.414	20	20
-1	30	30
0	60	60
1	70	70
1.414	100	100

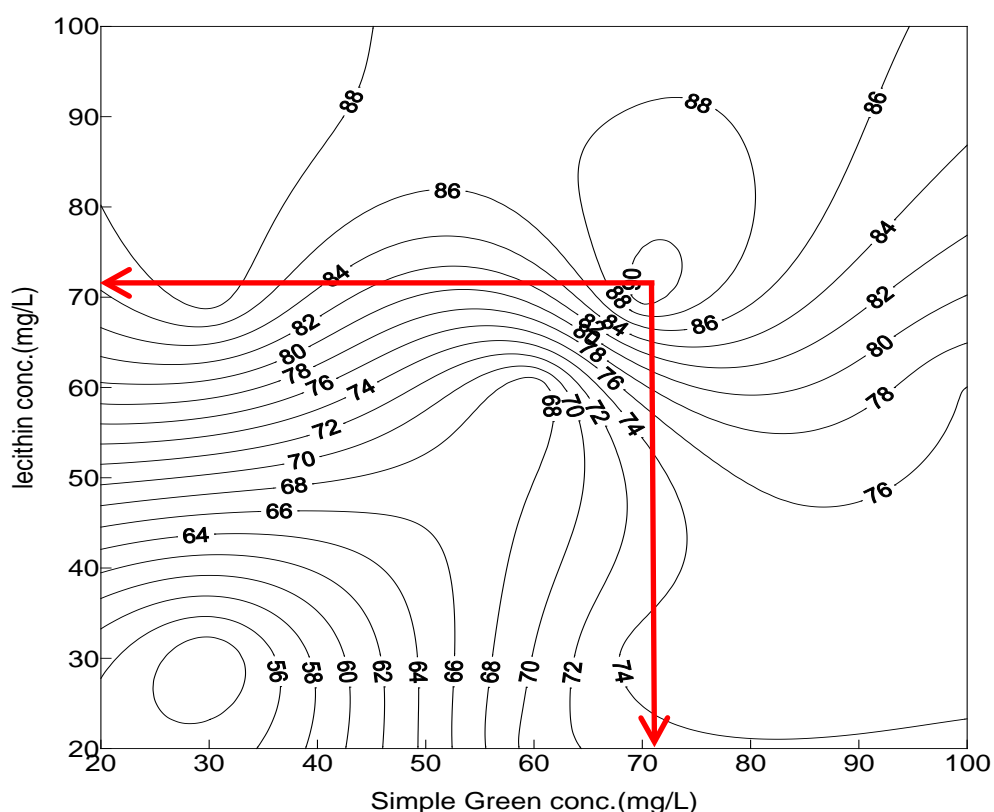


圖 1 卵磷脂與 SG 乳化蔬菜油之乳化層比例答應曲面圖

### 3.2 選擇最佳乳化成方式

影響乳化穩定度之原因除界面活性劑濃度外，攪拌方式及速率亦影響乳化後之油滴粒徑及乳化穩定度。攪拌可以提供能量使兩種互不相溶的液體，增加兩者相混合的效率和乳化反應。當轉速提高時能量變大，會使得剪切力也隨著增大，乳液液滴直徑會被切得更小，整個體系的平均粒徑都降低而成較穩定狀態。因此本文選用廚房用果菜汁機及乳化均質機作為攪拌工具，其廚房用果菜汁機攪拌功率選用中速，均質機攪拌功率為  $12,000 \text{ min}^{-1}$ ，攪拌時間分別選擇 10 及 30 分鐘，配方選用卵磷脂添加 80 mg/L 及卵磷脂 72 mg/L 混合 SG 71 mg/L，混合乳化後，以雷射粒徑分析儀及光學顯微鏡測定觀察其乳化後之油滴粒徑，並以界達電位分析儀測定其油滴表面電位。

## 8 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

混合乳膠液之實驗組別及各組別乳化後油滴粒徑結果如表 3 及圖 2 所示。依界面活性劑種類比較，H1 及 H2 之平均粒徑小於 H3 及 H4，K1 及 K2 之平均粒徑小於 K3 及 K4，顯示卵磷脂與 SG 混合乳膠液之平均粒徑皆小於單一卵磷脂乳膠液。依攪拌種類比較，在相同界面活性劑添加下，H1 及 H2 之平均粒徑皆小於 K1 及 K2，H3 及 H4 之平均粒徑皆小於 K3 及 K4，顯示乳化均質機攪拌後所生成之乳膠液滴皆小於廚房用果菜汁機。依攪拌時間比較，H2 及 K2 之平均粒徑皆小於 H1 及 K1，H4 及 K4 之平均粒徑皆小於 H3 及 K3，顯示在相同界面活性劑劑量及攪拌條件下，攪拌時間越長，其乳化生成之油滴粒徑越小。文獻得知乳膠液之穩定性必須借助外力及界面活性劑，外力的作用可控制分散相中小油滴之粒徑大小；而界面活性劑則可在油滴上形成保護膜，並降低油水表面張力。粒徑之大小及保護膜之理化特性均會影響乳化安定性<sup>[34-35]</sup>。推測卵磷脂及 SG 混合乳膠液之表面張力應小於單一卵磷脂乳膠液，造成卵磷脂及 SG 混合乳膠液平均油滴粒徑小於單一卵磷脂乳膠液。通常乳膠液油滴合併最重要之影響因子為油滴粒徑之大小，粒徑越大，併合速率越大。當粒徑大於 7  $\mu\text{m}$  時，其大粒徑相互碰撞時產生力矩易使保護膜解體或脫落<sup>[36]</sup>。另外，親水性界面活性劑(SG)及親油性界面活性劑(卵磷脂)乳化後可以產生高包覆性的混合保護膜，使油滴互相碰撞時保護膜不易破裂造成凝聚，提高乳膠液之穩定度<sup>[30]</sup>。而在所有組別中，以 H2(卵磷脂及 SG 混合乳膠液以乳化均質機攪拌 30 分鐘)所生成之粒徑最小， $D_{10}$  可達 0.93  $\mu\text{m}$ ， $D_{90}$  僅 4.56  $\mu\text{m}$ ，平均粒徑為 2.10  $\mu\text{m}$ 。此外，不論單一卵磷脂乳膠液或卵磷脂及 SG 混合乳膠液，其界達電位皆為負值，且卵磷脂及 SG 混合乳膠液之界達電位皆小於單一卵磷脂乳膠液，由文獻得知乳膠液之穩定性可藉由改變界面活性劑在油滴上形成之保護膜其電荷組成增加相互排斥力，抑制凝聚發生。且界達電位越低，其排斥力越強，其乳化穩定度越佳<sup>[24,34,37]</sup>，因此卵磷脂及 SG 混合乳膠液之乳化穩定度較單一卵磷脂乳膠液佳。

表 3 不同攪拌方式之油滴粒徑及界達電位比較

	surfactant	mixer	mixing time (min)	mean ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>10</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>50</sub> ( $\mu\text{m}$ )	D <sub>90</sub> ( $\mu\text{m}$ )	Zeta potential (mV)
H1	lecithin 72 mg/L+ simple green 71 mg/L	homogenizer	10	2.57	1.31	2.97	5.54	-23.4 $\pm$ 2.97
H2			30	2.10	0.93	2.16	4.56	-38.1 $\pm$ 6.70
K1		kitchen blender middle speed	10	2.80	0.99	2.77	5.90	-45.7 $\pm$ 11.3
K2			30	2.25	0.99	2.33	4.84	-44.5 $\pm$ 11.9
H3	lecithin 80 mg/L	homogenizer	10	3.03	1.02	3.41	7.32	-20.7 $\pm$ 5.96
H4			30	2.38	0.89	2.40	6.15	-7.68 $\pm$ 1.63
K3		kitchen blender middle speed	10	4.61	0.99	5.12	17.2	-12.2 $\pm$ 2.12
K4			30	3.02	1.04	3.33	7.52	-13.7 $\pm$ 1.19

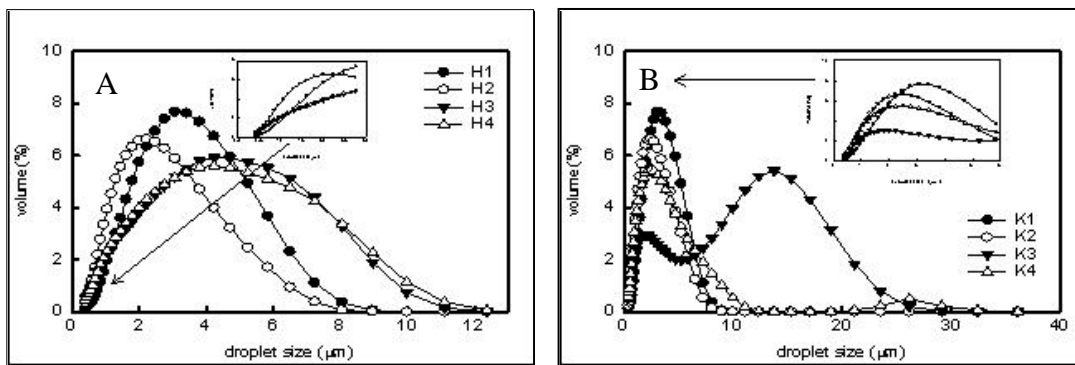


圖 2 以不同攪拌器具於不同界面活性劑條件下之油滴型態(A：均質機；B：果菜汁機)

## 10 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

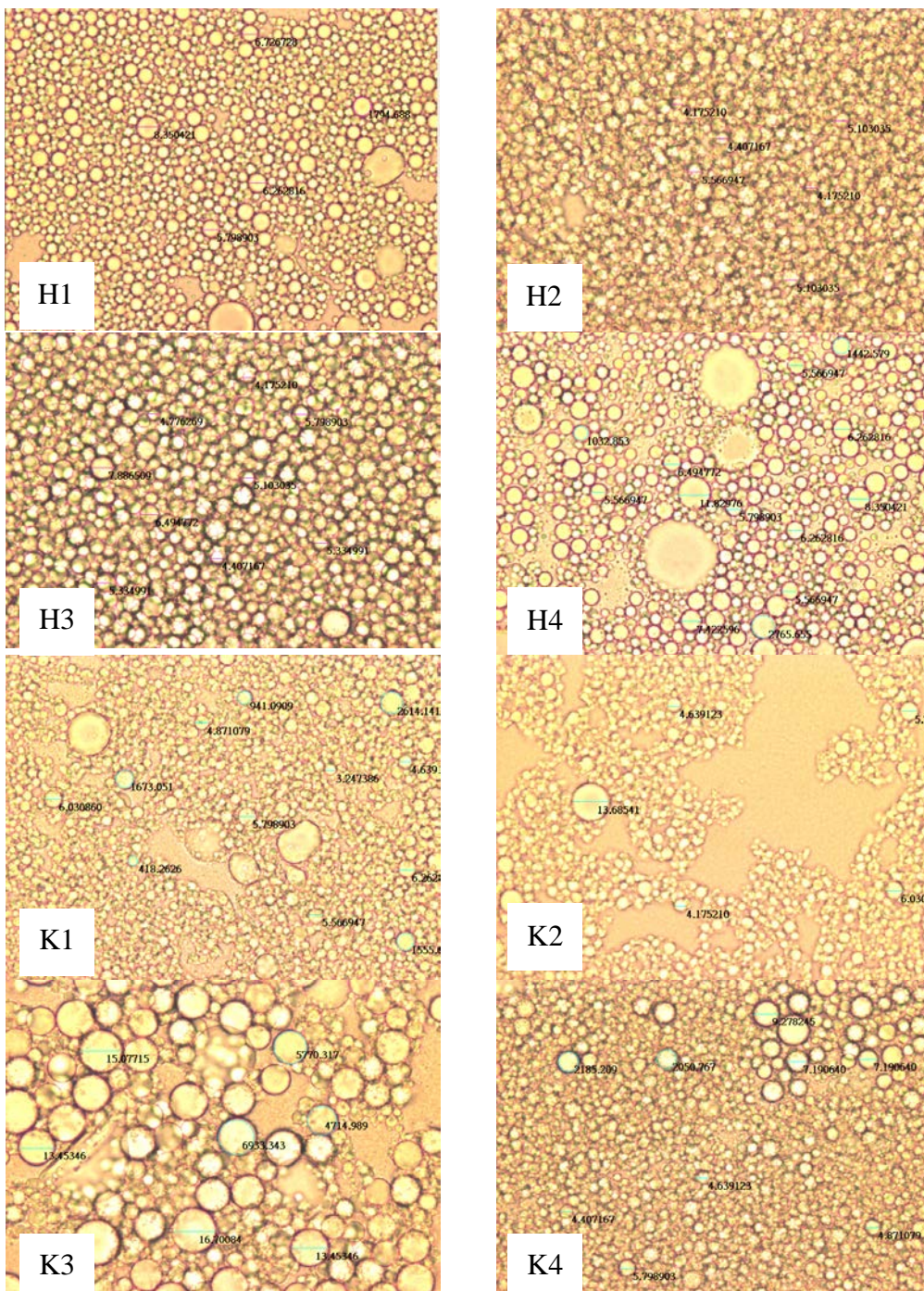


圖 3 不同混合條件下之油滴型態



### 3.3 油/水對 TCE 分配係數

目前已知 TCE 具滲透、揮發、脂溶等特性<sup>[38]</sup>，而蔬菜油之主要成份為三酸甘油酯(93~99%)及少量之磷脂、脂肪酸、非皂化物及維生素 E<sup>[39]</sup>，為瞭解乳膠液注入地下含水層後對於 TCE 之吸附性及其他相關優勢，本文以油水比 1:1 之比例將蔬菜油及 TCE 水溶液注入內含鐵氟龍墊片之棕色血清瓶，經行星式水平震盪機，震盪速率 160 rpm，震盪時間 24 小時後取出樣品分析，觀察蔬菜油對於水中 TCE 之分配特性。

油/水對 TCE 分配係數如圖 4 所示，Y 軸為吸收平衡後油相之 TCE 濃度，而 X 軸為水相中 TCE 濃度，反應溫度為 25℃，推算油/水對 TCE 分配係數為 355.23，Pfeiffer 等人之研究顯示，在反應溫度 20℃ 時，大豆沙拉油/水對 TCE 之分配係數為 337.4，即大豆沙拉油吸收 TCE 濃度為水的 337.4 倍<sup>[40]</sup>。蔬菜油/水對 TCE 之分配係數實驗顯示，蔬菜油對 TCE 有強的吸附能力，可使高濃度三氯乙烯集中於蔬菜乳膠液油滴中，當地下含水層環境尚未有厭氧產氫情況發生時，蔬菜油可有效攔阻溶於水中 TCE，待微生物增長後，蔬菜油物理攔阻及微生物厭氧產氫脫氯反應同時發生時，可增強 TCE 之處理效率。

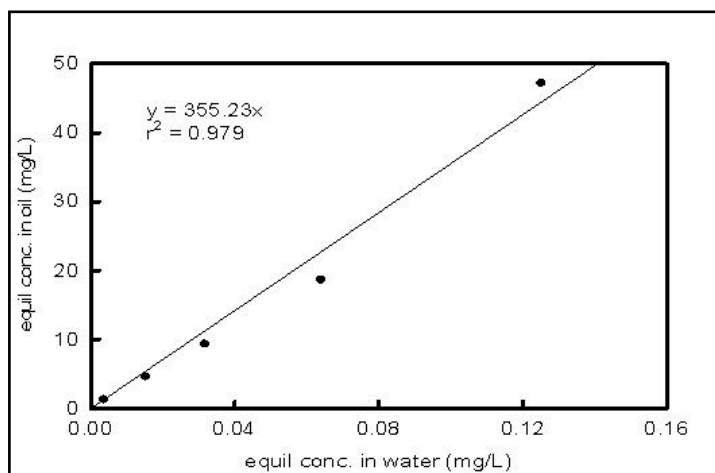


圖 4 殘留於水中 TCE 與殘留於蔬菜油中 TCE 之分配比例

蔬菜油對於 TCE 分配影響污染物移除速率可利用遲滯係數(R)探討<sup>[41]</sup>，R 為污染物傳輸速度與非反應性溶質速度之比值，本文假設可忽略背景有機物之吸附作



## 12 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

用，因此  $R$  可由下式求得：

$$R = 1 + \frac{\rho_B f_0 K_p}{n}$$

$\rho_B$  為土壤密度， $f_0$  為可與乳膠液結合之土壤有機碳之比例， $K_p$  為油-水之分配係數， $n$  為孔隙率。為求出遲滯係數  $R$ ，式中代入理論假設值( $\rho_B = 1.45 \text{ g/cm}^3$ ， $f_0 = 0.0174 \text{ g/g}$ ， $K_p = 355.23$ ， $n = 0.275$ )，而求出遲滯係數  $R$  為 3.43，由於遲滯係數  $R$  為污染物傳輸速度與非反應性溶質速度之比值，假設非反應性溶質流速約  $0.1 \text{ m/day}$ ，即可求得污染物傳輸速度約  $3.07 \times 10^{-3} \text{ m/day}$ ，假設透水性反應牆注入之乳膠液寬度約  $3 \text{ m}$ ，且含水層中無任何微生物反應，上游 TCE 污染物需 2.68 年方能穿透反應牆。換言之，當高分子乳膠基質注入至地下含水層中時，可利用基質中蔬菜乳膠液油滴對於 TCE 之分配係數，將 TCE 攔截於油滴中，並藉由糖蜜、卵磷脂、SG 及其他營養元素等基質營造適合微生物生長之環境，可加速生物反應牆之建立。

### 3.4 微生物厭氧批次試驗

微生物在厭氧環境主要以還原脫氯作用降解 TCE<sup>[11]</sup>。因此本文以厭氧微生物批次試驗進行試驗，利用某場區之現地含水層土壤(如表 4)、地下水及台灣氯乙烯公司厭氧槽污泥作為微生物來源，其含水層地下水基本性質如表 5 所示，為避免營養鹽為 TCE 厭氧還原脫氯之限制因子，本文額外添加基礎營養鹽，另外供試地下水經 80/20(v/v)氮氣及二氧化碳混合氣吹提，使水中溶氧低於  $0.05 \text{ mg/L as O}_2$ ，並觀察該些基質是否有利於現地微生物/厭氧污泥於現地土壤及地下水環境下厭氧還原脫氯 TCE。

表 4 現地含水層土壤基本性質

含水層土壤參數	實測濃度
pH	7.6
Total organic carbon (%)	0.08
Total bacteria count	$3.44 \times 10^5$
Soil texture	壤土質砂土

表 5 現地地下水基本性質(厭氧)

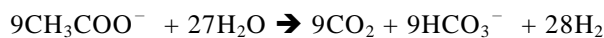
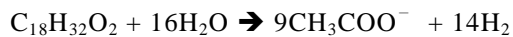
現地地下水水質參數	實測濃度
Alkalinity(mg $\text{CaCO}_3/\text{L}$ )	241
COD(mg $\text{O}_2/\text{L}$ )	30
Chloride(mg $\text{Cl}^-/\text{L}$ )	26
Ammonia(mg $\text{NH}_4^+/\text{L}$ )	6.4
Nitrite(mg $\text{NO}_2^-/\text{L}$ )	0.005
Nitrate(mg $\text{NO}_3^-/\text{L}$ )	22
Phosphate(mg $\text{PO}_4^{3-}/\text{L}$ )	1.21
Sulfate(mg $\text{SO}_4^{2-}/\text{L}$ )	396
Ferrous(mg $\text{Fe}^{2+}/\text{L}$ )	73.8
Total Ferric(mg $\text{Fe}^{3+}/\text{L}$ )	0.05

含氯有機物之還原脫氯反應則是利用氫原子逐步取代氯原子，於還原脫氯過程中亦產生中間產物如 1,1-DCE、*cis*-DCE 和 VC 及最終產物乙烯<sup>[11,43~48]</sup>，而氯乙烯為已知之致癌物質<sup>[49]</sup>。在有適當的電子供給者存在下，以含氯化合物為最終電子接受者及生長所需之碳源，則為直接代謝還原脫氯又稱為脫氯呼吸作用<sup>[11]</sup>。因此在厭氧環境中，需要添加電子供給者，以促進微生物進行還原脫氯作用，而目前已知氫、酪酸鹽、醋酸鹽、乳酸鹽、甲醇及糖蜜等<sup>[48,50~55]</sup>可作為電子供給者，但該些基質皆需維持補充，無法達到長期釋放之效果。本文則利用蔬菜油合成之高分子乳膠基質作為電子供給者，而高分子乳膠基質內容物含蔬菜油(主要成分)、卵磷脂、SG、糖

#### 14 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

蜜及綜合維他命，目前已由相關文獻得知，蔬菜油或大豆油可有效促進好氧或厭氧微生物生長，並可有效降解硝酸鹽、含氯有機物及過氯酸鹽<sup>[41,56-62]</sup>，且已有市售商品如 EOS<sup>®</sup>，但購買仍需透過國外訂購，為發展本土性生物促進劑，本文自行研發之高分子乳膠基質進行功能評估，觀察該基質對於還原脫氯之成效。

結果如圖 5 所示，控制組之 TCE 於反應期間微量的下降，但無任何副產物生成，顯示並無任何微生物反應發生，可能由於頂空揮發或現地含水層土壤之吸附作用造成<sup>[42]</sup>。TCE 起始濃度為 3.36 mg/L，於反應第 0 天因蔬菜油的吸附作用使 TCE 濃度下降至 1.42 mg/L，此結果顯示高分子乳膠基質於微生物反應尚未發生時即 TCE 進行非生物性吸附作用。反應直至反應第 52 天時，TCE 濃度降解至 0.21 mg/L。另外 TCE 副產物生成方面，反應期間皆測得 1,1-DCE 約  $2.94 \times 10^{-3}$ - $3.39 \times 10^{-3}$ 。Cis-DCE 於反應第 7 天測得 0.1 mg/L，並持續增加，於反應第 24 天測得最高濃度 0.24 mg/L，該結果可能由於基質的添加刺激現地或污泥的降解菌群產生還原脫氯反應。而其他的降解副產物如 1,1-DCE 也於反應中被測得，VC 於反應第 24 天被測得，於反應第 24 天後皆低於偵測極限。顯示高分子乳膠基質確實可有效促進厭氧生物還原脫氯反應，使 TCE 降解至乙烯。由文獻得知當蔬菜油於含水層環境時，會先被水解並釋出甘油(醇類)和多鏈脂肪酸(long-chain fatty acids (LCFAs))<sup>[63-64]</sup>，由於甘油具有生物分解性且易溶於水，因此當甘油存在於系統中時，則會被快速分解或刺激微生物，LCFAs 水溶性較差<sup>[65]</sup>，因此吸附於土壤孔隙間緩慢氧化並持續生成 H<sub>2</sub> 及醋酸鹽<sup>[66]</sup>，其持續生成 H<sub>2</sub> 及醋酸鹽有助於污染物削減。另外這些脂肪酸通常以亞麻油酸(linoleic acid)型態存在於蔬菜油中<sup>[67]</sup>，這些亞麻油酸可以化學平衡計量表示之，1 莫耳亞麻油酸經生物分解可產生 9 莫耳醋酸及 14 莫耳氫氣，當醋酸完全氧化分解產生 CO<sub>2</sub> 時，則產生 28 莫耳氫氣，其反應式如下：



當醋酸鹽生成時，氫氣則同時存在於厭氧環境中，即可促進微生物厭氧還原脫氯作用，而醋酸鹽的生成代表高分子乳膠基質中蔬菜油之分解，由於蔬菜油具有吸附含氯溶劑之特性<sup>[66]</sup>，因此蔬菜油經分解後恐造成污染物釋出之虞慮，但由結果得

知 TCE 濃度並無累積或增加，推測環境中已存在多種脫氯菌種(如 *Dehalococcoides* 等)可避免 TCE 及其他降解副產物累積。另外醋酸鹽除可促進厭氧微生物還原脫氯作用<sup>[50,69~72]</sup>，亦可進行硫酸鹽還原及乙酸甲烷化<sup>[73]</sup>。

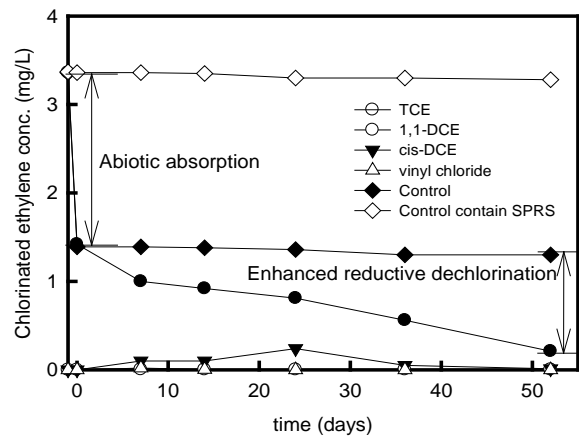


圖 6 現地含水層於厭氧環境下添加高分子乳膠基質之三氯乙烯降解及降解副產物變化趨勢

#### 四、結論

本文之高分子乳膠基質合成及 TCE 厭氧還原脫氯試驗，主要結論如下：

1. 以 50%乳膠液為基準，卵磷脂及 SG 濃度分別為 72 mg/L 及 71 mg/L 時，乳化穩定度可大於 90%，而本文實際以該比例進行乳化試驗，其乳化程度可達 100%，顯示該配方為乳化最佳比例。
2. 以卵磷脂及 SG 混合乳膠液以乳化均質機攪拌 30 分鐘所生成之粒徑最小， $D_{10}$  可達  $0.93 \mu\text{m}$ ， $D_{90}$  僅  $4.56 \mu\text{m}$ ，平均粒徑為  $2.10 \mu\text{m}$ ，且界達電位為負值，有利於土壤孔隙間傳輸。
3. 蔬菜油/水對 TCE 之分配係數實驗顯示，蔬菜油對 TCE 有強的吸附能力，可使高濃度 TCE 集中於蔬菜乳膠液油滴中，當地下含水層環境尚未有厭氧生物還原產氫脫氯情況發生時，蔬菜油可有效攔阻溶於水中 TCE，待微生

## 16 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

物增長後，蔬菜油物理攔阻及微生物厭氧產氫脫氯反應同時發生，增強 TCE 之處理效率。

4. 延遲係數推估方面，假設透水性反應牆注入之乳膠液寬度約 3 m，且含水層中無任何微生物反應，上游 TCE 污染物需 2.68 年方能穿透反應牆。
5. 高分子乳膠基質可有效促進厭氧生物還原脫氯反應，使 TCE 降解至乙烯。
6. 由以上結果推設以高分子乳膠基質建立生物透水性整治牆同時具有下列機制：(1)蔬菜油對於 TCE 之吸附能力及(2)緩慢釋出氫氣及醋酸鹽促進厭氧還原脫氯作用產生等機制，因此可有效攔阻及降解 TCE 及其降解副產物，並透過溶氧消耗，使反應環境處於還原狀態下，更可促進厭氧脫氯菌群增長。

## 參考文獻

1. Agency for Toxic Substances and Disease Registry Case Studies in Environmental Medicine (CSEM) “Trichloroethylene Toxicity”, WB1112. (2007)
2. Bennett, P., Gandhi, D., Warner, S. and Bussey, J. “In situ reductive dechlorination of chlorinated ethenes in high nitrate groundwater”, Journal of hazardous materials, 149(3), 568-573 (2007).
3. Lee S. “Enhanced dissolution of TCE in NAPL by TCE-degrading bacteria in wetland soils”, Journal of Hazardous Materials, 145(1-2), 17-22 (2007a).
4. U.S. Environmental Protection Agency (EPA) “Treatment technologies for site cleanup: annual status report (twelfth edition)”, EPA-542-R-07-012 (2007).
5. Saleh, N., Sirk, K., Liu, Y., Phenrat, T., Dufour, B., Matyjaszewski, K., Tilton, R. D. and Lowry, G. V. “Surface modifications enhance nanoiron transport and NAPL targeting in saturated porous media”, Environmental Engineering Science, 24(1), 45-57 (2007).
6. Siegrist, R. L., Urynowicz, M. A., West, O. R., Crimi, M. L. and Lowe, K. S. “Principle and Practices of In Situ Chemical Oxidation Using Permanganate”, Battelle Press (2001).
7. Siegrist, R. L. “Fundamentals of In Situ Chemical Oxidation (ISCO)”, Teleconference of In Situ Treatment of Groundwater Contaminated with Non-aqueous Phase Liquids, Dec. 10-11, ,

- Chicago, IL (2002).
8. Kao, C. M., Huang, W. Y., Chang, L. J., Chien, H. Y. and Hou, F. "Application of monitored natural attenuation to remediate a petroleum- hydrocarbon spill site", *Water Science and Technology*, 53, 321-328 (2005).
  9. Brar, S. K., Verma, M. R., Surampalli, Y., Misra, K., Tyagi, R. D. and N. Meunier, J. F. "Blais, Bioremediation of hazardous wastes - a review", *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 10(2), 59-72 (2006).
  10. U.S. Environmental Protection Agency (EPA) "Incorporating Sustainable Practices into Site Remediation", EPA 542-F-08-002 (2008).
  11. Aulenta, F., Potalivo, M. Majone, M. Papini, M. P. and Tandoi, V. "Anaerobic bioremediation of groundwater containing a mixture of 1, 1, 2, 2-tetrachloroethane and chloroethenes", *Biodegradation*, 17(3), 193-206 (2006).
  12. Bhatt, P., Kumar, M. S., Mudliar, S. and Chakrabarti, T. "Biodegradation of chlorinated compounds - A review", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 37(2), 165-198 (2007).
  13. Simmonds, A. C. "Dechlorination Rates in KB-1, a Commercial Trichloroethylene-Degrading Bacterial Culture", M.A.Sc. thesis, University of Toronto, Toronto, Ont (2007).
  14. Duhamel, M. A. "Community Structure and dynamics of Anaerobic Chlorinated Ethene-Degrading Enrichment Cultures", PhD dissertation, University of Toronto, Toronto, Ont (2005).
  15. Harkness, M. R. "Economic considerations in enhanced anaerobic degradation", *Bioremediation and Phytoremediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*. 2nd Internat. Conf. Remediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Monterey, CA (2000).
  16. Zenker, M. J., Borden, R. C., Barlaz, M. A., Lieberman, M. T. and Lee, M. D. "Insoluble substrates for reductive dehalogenation in permeable reactive barriers", In: Wickramanayake, G.B., Gavaskar, A. R., Alleman, B. C., Magar, V. S.

## 18 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

- (2000)Bioremediation and Phytoremediation of Chlorinated and Recalcitrant Compounds. Battelle Press, 47-53.
17. Kao, C. M. and Yang, L. (2000) "Enhanced bioremediation of trichloroethene contaminated by a biobarrier system", *Water Science and Technology*, 42(3-4), 429-434 (2000).
18. Saby, S., Sibille, I., Mathieu, L., Paquin, J. L. and Block, J. C. "Influence of water chlorination on the counting of bacteria with DAPI (4'6-Diamidino-2-Phenylindole)", *Applied and Environmental Microbiology*, 63(4), 1564-1569 (1997).
19. Coulbaly, K. M. and Borden, R. C. "Impact of edible oil injection on the permeability of aquifer sands", *Journal of Contaminant Hydrology*, 71, 1-4 (2004).
20. 陳介武，1999，大豆卵磷脂在食品工業上的應用，第 163 期，第 38-43 頁。
21. Agboola, S. O., Singh, H., Munro, P. A., Dalglish, D. G. and Singh A. M. "Stability of emulsions formed using whey protein hydrolysate: Effects of lecithin addition and retorting", *Journal of agricultural and food chemistry*, 46(5), 1814-1819 (1998).
22. Knoth, A., Scherze, I. and Muscholik, G. "Stability of water-in-oil-emulsions containing phosphatidylcholine-depleted lecithin", *Food Hydrocolloids*, 19(3), 635-640 (2005).
23. Comas, D. I., Wagner, J. R. and Tomas, M. C. "Creaming stability of oil in water (O/W) emulsions: Influence of pH on soybean protein-lecithin interaction", *Food Hydrocolloids*, 20(7), 990-996 (2006).
24. McSweeney, S. L., Healy, R. and Mulvihill, D. M. "Effect of lecithin and monoglycerides on the heat stability of a model infant formula emulsion" *Food Hydrocolloids*, 22(5), 888-898 (2008).
25. 蔡在唐、梁書豪、簡華逸、高志明、葉琮裕，2007，以串聯式整治列車系統處理受燃料油污染之土壤，*工業污染防治季刊*，第 102 期，第 33-48 頁。
26. Tsai, T. T., Kao, C. M., Hong, A., Liang, S. H. and Chien, H. Y. "Remediation of TCE-contaminated aquifer by an in situ three-stage treatment train system", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects* 322, pp.130-137 (2008).
27. Tsai, T. T., Kao, C. M., Yeh, T. Y., Liang, S. H. and Chien, H. Y. "Application of surfactant enhanced permanganate oxidation and biodegradation of trichloroethylene in groundwater",



- Journal of Hazardous Materials, 161, pp.111-119. (2009)
28. Orafiidiya, L. O. and Oladimeji, F. A. "Determination of the required HLB values of some essential oils", International Journal of Pharmaceutics, 237(1-2), pp.241-249 (2002).
29. 劉黛蒂、劉宗熙、吳宗昇、陳慧婷、劉玉秀、楊竣翔，2006，以反應曲面法探討月見草油乳化系統安定性之影響因素，台灣農業化學與食品科學，第 2 期，第 44 卷，第 83-89 頁。
30. 趙承琛，2001，界面科學基礎，復文書局。
31. Ribeiro, H. S., Rico, L. G., Badolato, G. G. and Schubert, H. "Production of O/W emulsions containing astaxanthin by repeated Premix membrane emulsification", Food Engineering and Physical Properties, 70(2), E117-E123 (2005).
32. Lorenzo, G., Zaritzky, N. and Califano, A. "Modeling rheological properties of low-in-fat o/w emulsions stabilized with xanthan/guar mixtures", Food Research International, 41(5), 487-494 (2008).
33. Shivakumar, H. N., Patel, R. and Desai, B. G. "Formulation optimization of propranolol hydrochloride microcapsules employing central composite design", Indian journal of pharmaceutical sciences, 70(3), 408-413 (2008).
34. Paul, B. K. and Moulik, S. P. "Microemulsions: An overview", Journal of Dispersion Science and Technology, 184(4), 301-367 (1997).
35. Rousseau, D. "Fat crystals and emulsion stability-a review", Food Research International, 33(1), 3-14 (2000).
36. Muschiolik, G. "Multiple emulsions for food use", Current Opinion in Colloid and Interface Science, 12(4-5), 213-220 (2007).
37. McClements, D. J. "Critical review of techniques and methodologies for characterization of emulsion stability", Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 47(7), 611-649 (2007).
38. 行政院勞委會物質安全資料表，2007，  
[http://www.iosh.gov.tw/userfiles/file/database/material\\_safety/msds0118.pdf](http://www.iosh.gov.tw/userfiles/file/database/material_safety/msds0118.pdf)
39. Przybylski, R. and Zambiasi, R. C. "Predicting oxidative stability of vegetable oils using neural network system and endogenous oil components", Journal of the American Oil

## 20 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

- Chemists' Society, 77(9), 925-931 (2000).
40. Pfeiffer, P., Bielefeldt, A. R., Illangasekare, T. and Henry B. "Partitioning of dissolved chlorinated ethenes into vegetable oil", *Water Research*, 39, 4521-4527 (2005a).
  41. Cameron, M. L. and Borden, R. C. "Enhanced reductive dechlorination in columns treated with edible oil emulsion", *Journal of contaminant hydrology*, 87(1-2), 54-72 (2006).
  42. Shih, Y. H. "Sorption of trichloroethylene in humic acid studied by experimental investigations and molecular dynamics simulations", *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1813-1821 (2007).
  43. Kao, C. M., Chen, S. C., Wang, J. Y., Chen, Y. L. and Lee, S. Z. "Remediation of PCE-contaminated aquifer by an in situ two-layer biobarrier: laboratory batch and column studies", *Water Research*, 37(1), 27-38 (2003a).
  44. Kao, C. M., Chen, Y. L., Chen, S. C., Yeh, T. Y., and Wu, W. S. "Enhanced PCE dechlorination by biobarrier systems under different redox conditions" *Water Research*, 37, 4885-4894 (2003b).
  45. Hageman, K. J., Field, J. A., Istok, J. D. and Semprini, L. "Quantifying the effects of fumarate on in situ reductive dechlorination rates", *Journal of contaminant hydrology*, 75(3-4), 281-296 (2004).
  46. Lee, I. S., Bae, J. H. and McCarty, P. L. "Comparison between acetate and hydrogen as electron donors and implications for the reductive dehalogenation of PCE and TCE", *Journal of contaminant hydrology*, 94(1-2), 76-85 (2007b).
  47. Aulenta, F., Fuoco, M., Canosa, A., Papini, M. P. and Majone, M. "Use of poly-beta-hydroxy-butyrate as a slow-release electron donor for the microbial reductive dechlorination of TCE", *Water science and technology*, 57(6), 921-925 (2008).
  48. Huang, D. Y. and Becker, J. G. "Determination of Intrinsic Monod Kinetic Parameters for Two Heterotrophic Tetrachloroethene (PCE)-Respiring Strains and Insight into Their Application", *Biotechnology and bioengineering*, 104(2), 301-311 (2009).
  49. Jang, W. and Aral, M. M. "Effect of biotransformation on multispecies plume evolution and natural attenuation", *Transport in porous media*, 72(2), 207-226 (2008).

50. Fennell, D. E., Carroll, A. B., Gossett, J. M. and Zinder, S. H. "Assessment of indigenous reductive dechlorinating potential at a TCE-contaminated site using microcosms, polymerase chain reaction analysis, and site data", *Environmental science and technology*, 35(9), 1830-1839 (2001).
51. Luijten, M. L. G. C., Roelofsen, W., Langenhoff, A. A. M., Schraa, G. and Stams, A. J. M. "Hydrogen threshold concentrations in pure cultures of halorespiring bacteria and at a site polluted with chlorinated ethenes", *Environmental microbiology*, 6(6), 646-650 (2004).
52. Aulenta, F., Bianchi, A., Majone, M., Papini, M. P., Potalivo, M. and Tandoi, V. "Assessment of natural or enhanced in situ bioremediation at a chlorinated solvent-contaminated aquifer in Italy: a microcosm study", *Environment international*, 31(2), 185-190 (2005).
53. Révész, S., Sipos, R., Kende, A., Rikker, T., Romsics, C., Mészáros, E., Mohr, A., Tancsics, A. and Márialigeti, K. "Bacterial community changes in TCE biodegradation detected in microcosm experiments", *International biodeterioration and biodegradation*, 58(3-4), 239-247 (2006).
54. Aulenta, F., Pera, A., Rossetti, S., Petrangeli, P. and Majone, M. "Relevance of side reactions in anaerobic reductive dechlorination microcosms amended with different electron donors", *Water Research*, 41, 27-38 (2007).
55. Yang, Q., Shang, H. T., Li, H. D., Xi, H. B. and Wang, J. L. "Biodegradation of tetrachloroethylene using methanol as co-metabolic substrate", *Biomedical and environmental sciences*, 21(2), pp.98-102 (2008).
56. Hunter, W. J. "Use of vegetable oil in a pilot-scale denitrifying barrier", *Journal of Contaminant Hydrology*, 53, pp.119-131 (2001).
57. Hunter W. J. "Accumulation of nitrite in denitrifying barriers when phosphate is limiting", *Journal of Contaminant Hydrology*, 66(1-2), pp.79-91 (2003).
58. Hunter, W. J. "Injection of Innocuous Oils to Create Reactive Barriers for Bioremediation: Laboratory Studies", *Journal of Contaminant Hydrology*, 80, pp.31-48 (2005).
59. Li, Z., Wrenn, B. A. and Venosa, A. D. "Effect of iron on the sensitivity of hydrogen, acetate,

## 22 以高分子乳膠基質處理受三氯乙烯污染之地下水

- and butyrate metabolism to inhibition by long-chain fatty acid in vegetable-oil-enriched freshwater sediments”, *Water Research*, 39, 3109-3119 (2005).
60. Hunter, W. J. “Removing selenate from groundwater with a vegetable oil-based biobarriers”, *Current Microbiology*, 53(3), 244-248 (2006).
61. Borden, R. C. “Effective distribution of emulsified edible oil for enhanced anaerobic bioremediation”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 94, 1-12 (2007).
62. Hunter, W. J. and Shaner, D. L. “Nitrogen limited biobarriers remove atrazine from contaminated water: Laboratory studies”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 103(1-2), 29-37 (2009).
63. Hanaki, K., Nagase, M. and Matsuo, T. “Mechanism of inhibition caused by long-chain fatty acids in anaerobic digester process”, *Biotechnology and Bioengineering*, 23, 1591-1610 (1981).
64. Long, C. M. and Borden, R. C. “Enhanced reductive dechlorination in columns treated with edible oil emulsion”, *Journal of Contaminant Hydrology*, 87, 54-72 (2006).
65. Ralston, A. W. and Hoerr, C. W. “The solubilities of the normal saturated fatty acids”, *Journal of Organic Chemistry*, 7, 546-555 (1942).
66. Sawyer, C. N., McCarty, P. L. and Parkin, G. F. “Chemistry for Environmental Engineering”, McGraw-Hill Inc (1994).
67. Ray S., Chowdhury, N., Lalman, J. A., Seth, R. and Biswas, N. “Impact of initial pH and linoleic acid (C18 : 2) on hydrogen production by a mesophilic anaerobic mixed culture”, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 34(2), 110-117 (2008).
68. Pfeiffer, P., Bielefeldt, A. R. Illangasekare, T. and Henry, B. “Physical properties of vegetable oil and chlorinated ethene mixtures”, *Journal of Environmental Engineering-ASCE*, 131(10), 1447-1452 (2005b).
69. Kao, C. M., Chen, K. F., Chen, Y. L. and Chen, T. Y. “Biobarrier system for remediation of TCE-contaminated aquifers”, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 37(1), 87-93 (2004).
70. Kassenga, G., Pardue, J. H., Moe, W. M., Bowman, K. S. “Hydrogen thresholds as

- indicators of dehalorespiration in constructed treatment wetlands”, *Environmental Science and Technology*, 38(4), 1024-1030 (2007).
71. He, J., Sung, Y., Krajmalnik-Brown, R., Ritalahti, K. M. and Loffler, F. E. “Isolation and characterization of *Dehalococcoides* sp. Strain FL2, a trichloroethene (TCE)- and cis-1,2-dichloroethene-respiring anaerobe”, *Environmental Microbiology*, 7, 1442-1450 (2005).
72. Sung, Y., Ritalahti, K. M., Apkarian, R. P., and Loffler, F. E. “Quantification PCR confirms purity of strain GT, a novel trichloroethene-to-ethene-respiring *Dehalococcoides* isolate”, *Applied and Environmental Microbiology*, 72, 1980-1987 (2006).
73. Yang, Y. and McCarty, P. L. “Comparison between donor substrates for biologically enhanced tetrachloroethene DNAPL dissolution”, *Environmental science and technology*, 36(15), 3400-3404 (2002).



## 空氣污染

# 高屏地區指標性空氣污染物來源探討

王文正\*

### 摘要

台灣地區依行政區域之劃分，共分 7 大空品區。其中，以高屏空品區最具惡劣之空氣品質狀況。高屏空品區空品不良率介於 6.65~13.56%；雲嘉南空品區(2.58~6.98%)次之，但不良率僅為高屏空品區之一半，顯見高屏地區空氣品質之惡劣情況。石化、鋼鐵、電力等高污染性工業為高屏地區之主要發展產業，綜以人口、車輛密度、地形及氣象等因素，令空氣污染問題更為嚴重。在秋末、冬季及早春時期，高屏地區受東北季風吹送與中央山脈地形之阻擋影響，形成不利空氣污染擴散環境，並伴隨污染物隨季風之跨區域傳送，加上高屏地區工廠及移動車輛廢氣密集排放，形成全國最糟之空氣品質。本文針對高屏地區之指標性污染物，懸浮微粒  $PM_{10}$  進行研究並應用受體模式(receptor model)，針對高屏地區空氣污染之來源探究，掌握污染源及受體點之因果關係，分析出各地域之  $PM_{2.5}$  及  $PM_{2.5-10}$  主要污染物來源及其分佈。高屏地區  $PM_{2.5}$  排放來源以移動車輛排放為主。高屏地區  $PM_{2.5-10}$  則以鋪面道路揚塵逸散為主。

【關鍵字】指標性空氣污染物、高屏空品區、懸浮微粒  $PM_{10}$ 、受體模式

---

\*中央研究院 博士後研究員



## 一、前言

台灣地區之行政區域之劃分，共有北部空品區(台北市、基隆市、新北市及桃園縣)、竹苗空品區(新竹市、新竹縣及苗栗縣)、中部空品區(台中市、彰化縣及南投縣)、雲嘉南空品區(雲林縣、嘉義市、嘉義縣、台南市)、高屏空品區(高雄市及屏東縣)、宜蘭空品區(宜蘭縣)及花東空品區(花蓮縣及台東縣)等 7 大空品區。其中，以高屏空品區每每具備最糟之空氣品質狀況。由 1998 至 2007 年之環保署空品監測年報顯示，以高屏空品區空氣品質不良率最高，其值介於 6.65~13.56%之間；其次為雲嘉南空品區，然而不良率卻只有高屏空品區一半，其值在 2.58~6.98%。顯見高屏空品區之空氣污染嚴重，更凸顯瞭解空氣污染來源及分佈之重要。

高屏地區以石化產業、鋼鐵工業及電力產業等高污染性工業為主要發展產業，工廠分佈全區，污染物日夜排放。加上高雄地區人口及車輛密度亦高，為數眾多的機動車輛成為不可忽略之污染排放來源。中央山脈之地形因素及冬季季風遞送之氣象因素致使下風處之屏東地區易造成污染物累積效應，污染物擴散不易，遂讓空氣污染問題較其他空品區更為嚴重。即於秋末、冬季及早春期間，不利空氣污染擴散的環境條件形成，伴隨污染物隨季風之跨區域傳送，且高屏地區工廠及移動車輛廢氣排放亦高，造成高屏地區屢屢超過空氣品質標準之結果。

高屏空品區之主要指標污染物以懸浮微粒( $PM_{10}$ )及臭氧( $O_3$ )為主，尤以懸浮微粒之來源及傳輸過程最難掌握，本文乃依據受體點採樣分析結果，利用受體模式(receptor model)分析之結果，解析高屏地區懸浮微粒之主要來源分佈及成因，期使空污問題能對症下藥，避免防治策略空轉及資源浪費。

## 二、懸浮微粒特性概述

懸浮微粒為懸浮於大氣環境中除水分子外之微粒，可為固態或液態，一般泛指氣動粒徑在  $0.002\sim 100\ \mu m$  之粒狀物(Hinds, 1999)<sup>[1]</sup>。懸浮微粒依其粒徑，主要分類為 TSP (total suspended particulate)、 $PM_{10}$ (粒徑小於  $10\ \mu m$ )及  $PM_{2.5}$ (粒徑小於  $2.5\ \mu m$ )。其中粒徑小於  $2.5\ \mu m$  以下微粒稱為細微粒(fine particles)，主要來自凝核(nucleation)、混凝(coagulation)、凝結(condensation)等作用生成；粒徑大於  $2.5\ \mu m$

者，稱為粗微粒(coarse particles)，主要來自風蝕揚塵(wind blown dust)、海鹽飛沫(sea spray)、火山噴發(volcanos)及人為排放(emissions)。PM<sub>2.5</sub>之顆粒易進入人體體內(圖 1)，沉積在肺泡中，不易由呼吸系統所排除(Miller et al., 1979)<sup>[2]</sup>，進而影響健康造成傷害。懸浮微粒對動、植物及建築物均會造成危害及破壞，目前皆為各國環保單位列為管制項目。

各國目前對空氣中懸浮微粒皆有規範(表 1)，台灣 PM<sub>10</sub> 之法規標準以 24 小時平均值超過 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  即為空品不良日(事件日)，美國現亦以此為標準，香港則採用較寬鬆的 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，英國及澳洲空品標準則相對嚴格(50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (柳中明及尤思喻，2006)<sup>[3]</sup>。美國 NAAQS(national ambient Air quality standards)以 PM<sub>2.5</sub> 之 24 小時平均值 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  為空品劣化基準。

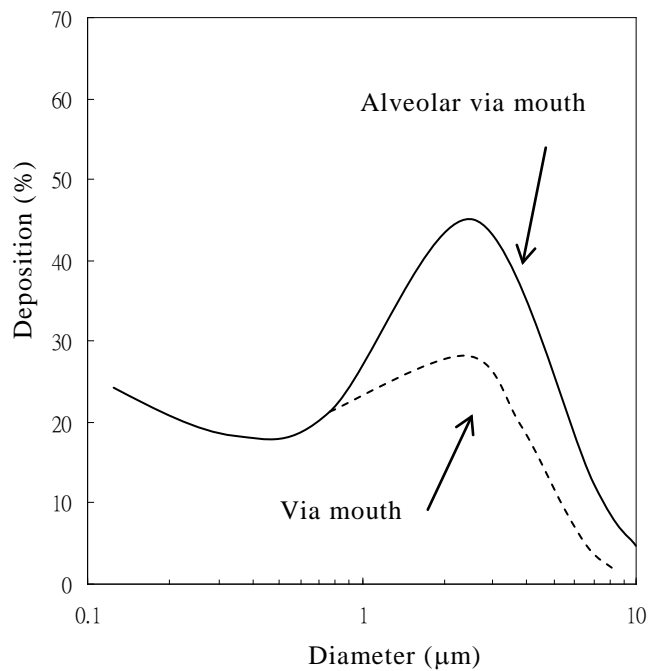


圖 1 不同粒徑於肺泡之沉積率<sup>[2]</sup>

表 1 各國懸浮微粒之法規規範

國別	指標物種	空品劣化標準 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
台灣	PM <sub>10</sub>	150
美國	PM <sub>10</sub>	150
加拿大	TSP	120
英國	PM <sub>10</sub>	50
澳洲	PM <sub>10</sub>	50
紐西蘭	PM <sub>10</sub>	120
香港	PM <sub>10</sub>	180

大氣懸浮微粒依其粒徑可分為 3 類形成機制及去除機制(圖 2.3-2)，1.物理作用生成(mechanically generated aerosol)；2.累積作用(accumulation)；3.過渡核粒(transient nuclei)(Wark et al., 1998)<sup>[4]</sup>。

1.物理作用：大多屬於原生性微粒，粒徑多在 2  $\mu\text{m}$  以上，且因沉降較快，主要以自然沉降為主要去除機制。如風蝕揚塵之微粒、製程排放、海水飛沫、火山爆發及火災等所產生之微粒。

2.累積作用：多屬衍生性反應所形成，粒徑大多介於 0.8~2  $\mu\text{m}$  之間，其沉降速度較慢，故多半以濕沉降方式自大氣中去除。其為氣體經化學轉化而成低揮發蒸氣，再經均相核化(homogeneous nucleation)及凝核成長(condensation growth of nuclei)形成液滴，再經膠凝作用(coagulation)而形成。

3.過渡核粒：此類微粒粒徑大多在 0.8  $\mu\text{m}$  以下，於短時間內與其他微粒凝聚而形成較大之微粒。為熱蒸氣冷凝生成，再經鍵結聚合，其或稱為艾特坎核子(Aitken nuclei)。

由 Watson et al.(1998)<sup>[5]</sup>之研究(表 2)，不同污染源於不同粒徑具有不同之化學組成特性，由此特性可追蹤、判定受體點之主要污染源為何，此即受體模式之主要理論概念。不同污染源之特性亦形成個別排放源之特徵，此即該污染源之物種剖面(source profile)，亦為污染源指紋資料(fingerprint)。

表 2 各污染源排放懸浮微粒主要成份一覽表

污染源	主要微粒 粒徑範圍	化學物種含量百分率			
		<0.1 %	0.1-1 %	1-10 %	>10 %
鋪面 道路揚塵	粗粒徑	Cr、Sr、Pb、Zr	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、P、S、 Cl、Mn、Zn、Ba、Ti	EC、Al、K、Ca、Fe	OC、Si
未鋪面 道路揚塵	粗粒徑	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、P、 Zn、Sr、Ba	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、P、S、 Cl、Mn、Ba、Ti	OC、Al、K、Ca、Fe	Si
建築工地	粗粒徑	Cr、Mn、Zn、Sr、 Ba	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、K <sup>+</sup> 、S、Ti	OC、Al、K、Ca、Fe	Si
農業活動	粗粒徑	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Cr、 Zn、Sr	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、K <sup>+</sup> 、S、 Cl、Mn、Ba、Ti	OC、Al、K、Ca、Fe	Si
土壤揚塵	粗粒徑	Cr、Mn、Sr、Zn、 Ba	Cl <sup>-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、EC、P、S、 Cl、Ti	OC、Al、Mg、K、Ca、 Fe	Si
河床	粗粒徑	Mn、Sr、Ba	K <sup>+</sup> 、Ti	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、OC、Al、 S、Cl、K、Ca、Fe	Si
機動車輛 排放	細粒徑	Cr、Ni、Y	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Si、Cl、Al、Si、 P、Ca、Mn、Fe、Zn、 Br、Pb	Cl <sup>-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、S	OC、EC
植物排放	細粒徑	Ca、Mn、Fe、Zn、 Br、Rb、Pb	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、 Na <sup>+</sup> 、S	Cl <sup>-</sup> 、K <sup>+</sup> 、Cl、K	OC、EC
蒸餘油 燃燒	細粒徑	K <sup>+</sup> 、OC、Cl、Ti、 Cr、Co、Ga、Se	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、Na <sup>+</sup> 、Zn、Fe、 Si	V、OC、EC、Ni	S、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
焚化爐	細粒徑	V、Mn、Cu、Ag、 Sn	K <sup>+</sup> 、Al、Ti、Zn、Hg	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、EC、Si、S、 Ca、Fe、Br、La、Pb	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、 NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、OC、 Cl
燃煤鍋爐	細粒徑	Cl、Cr、Mn、Ga、 As、Se、Br、Rb、 Zr	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、P、K、Ti、V、 Ni、Zn、Sr、Ba、Pb	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、OC、EC、Al、S、 Ca、Fe	Si
燃油電廠	細粒徑	V、Ni、Se、As、 Br、Ba	Al、Si、P、K、Zn	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> 、OC、EC、Na、 Ca、Pb	S、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
煉鋼高爐	細粒徑	V、Ni、Se	Al、Si、P、K、Zn	Mn、OC、EC	Fe
金屬 冶鍊業	細粒徑	V、Mn、Sb、Cr、 Ti	Cd、Zn、Mg、Na、Ca、 K、Se	Fe、Cu、As、Pb	S
煉鋇電爐	細粒徑	V、Cl、Ni、Mn	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、Sb、Pb	S	None reported
海水飛沫	粗粒徑及 細粒徑	Ti、V、Ni、Sr、Zr、 Pd、Ag、Sn、Sb、 Pb	Al、Si、K、Ca、Fe、 Cu、Zn、Ba、La	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、OC、EC	Cl <sup>-</sup> 、Na <sup>+</sup> 、 Na、Cl

### 三、空品區概述

依台灣空品區之分佈，高屏空品區位於台灣西南，區內有高雄市、高雄縣(現已縣市合併改制為高雄市，惟資料分析之便利，本文依循舊制稱之)及屏東縣等行政區(圖 2)。由 1998 至 2007 等 10 年間 7 大空品區平均空品不良率中，高屏空品區皆為全國之冠(9.66%)，其次為雲嘉南空品區(4.62%)，顯示台灣南部之空品不良率皆高於其他地區。

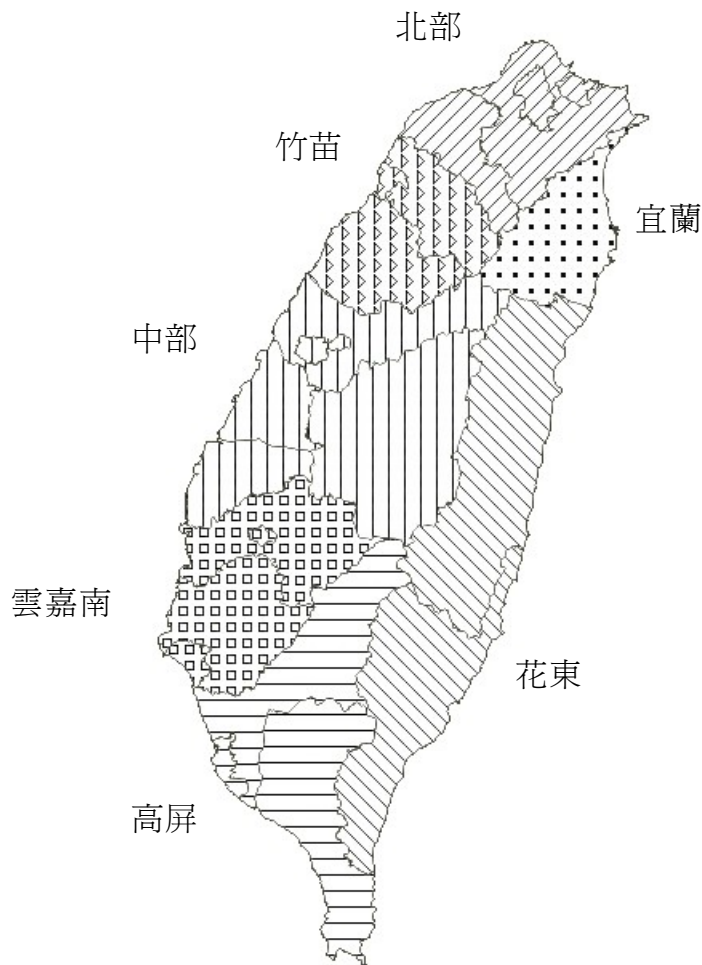


圖 2 台灣 7 大空品區圖

高屏地區主要指標污染物為  $\text{PM}_{10}$  及  $\text{O}_3$ ，區內之空氣品質不良率(PSI 大於 100 之站日數比率)由 1998 年至 2003 年具有改善之趨勢，但 2004 年後便又開始劣化(圖 3)。由  $\text{PM}_{10}$  所造成之空品不良率，高雄市自 1998 年起呈改善趨勢，由 10.4% 至 2003 年降為 2.5%，其後遂惡化至 2005 年 10.4%，再降至 2007 年 5.3%；高雄縣由 1998 年 10.8% 降至 2002 年 4.6%，再略微上升至 2007 年 7.4%；屏東縣由 1998 年 3.9% 降至 2002 年 1.0%，2005 年突升至 3.0%，之後略降至 2007 年 1.6%。由  $\text{O}_3$  所造成之空品不良率，高雄市由 1998 年 8.5% 降至 2007 年 4.5%，呈改善趨勢；高雄縣 10 年內並無明顯改善趨勢，惟 2005 年降至 5.9%，然 2007 年又惡化至 11.5%；屏東縣 10 年間略有改善，先由 1998 年 7.9% 降至 2000 年 3.9%，而後上升至 2007 年 6.0%。

綜觀高屏空品區，高雄市空氣品質受  $\text{PM}_{10}$  影響較大(10 年平均值  $\text{PM}_{10}$  為 7.7%； $\text{O}_3$  為 5.7%)，高雄縣亦受  $\text{PM}_{10}$  影響為高(10 年平均值  $\text{PM}_{10}$  為 8.7%； $\text{O}_3$  為 8.5%)，屏東縣則受  $\text{O}_3$  影響最為明顯(10 年平均值  $\text{PM}_{10}$  為 2.7%； $\text{O}_3$  為 7.0%)。統合以上資料，高屏空品區受  $\text{O}_3$  之影響較  $\text{PM}_{10}$  為高(10 年平均值  $\text{PM}_{10}$  為 6.3%； $\text{O}_3$  為 7.1%)， $\text{PM}_{10}$  有明顯改善趨勢， $\text{O}_3$  改善趨勢較少。分別而論，高雄市及高雄縣空氣品質受  $\text{PM}_{10}$  影響較多，而屏東縣則受  $\text{O}_3$  影響甚巨，近 10 年間以 2003 年之空品較佳，其後三地之空氣品質皆有劣化之現象。

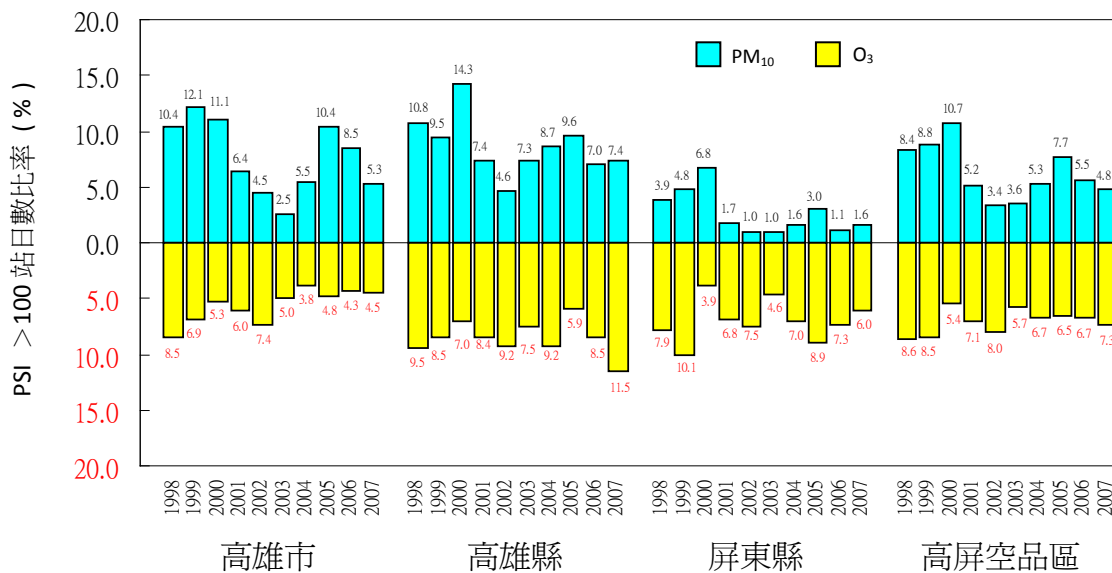


圖 3 高屏空品區空品不良日站日數比率

#### 四、指標性污染物 PM<sub>10</sub> 濃度趨勢變化

高雄市於楠梓、左營、前金及小港設置空品測站，近 10 年(1998~2007)之 PM<sub>10</sub> 月平均濃度變化以每年 6~8 月有相對低值出現(圖 4)。高雄縣之空品測站位於美濃、仁武、大寮及林園，其 PM<sub>10</sub> 月平均濃度變化亦於 6~8 月有相對低值(圖 5)。屏東縣之空品測站位於屏東、潮州，PM<sub>10</sub> 月平均濃度相對低值亦於 6~8 月出現(圖 6)。

高屏空品區 PM<sub>10</sub> 在月平均濃度之時序變化顯示，污染物在夏季 (6~8 月)有相對低之濃度；污染物濃度自 9 月開始上升至 5 月後再下降，顯示春季及秋、冬季易有較差之空氣品質。夏季除易有午後雷陣雨洗除大氣中之污染物、污染前驅物外，混合層高度較其他季節高亦使污染物有較大之擴散空間，致使濃度較其他季節為低(何宜達，2004) [6]。此間，污染物於時序變化上具一致性，顯現影響污染物月變化之主因乃以中尺度之氣象變化有極大的關係。

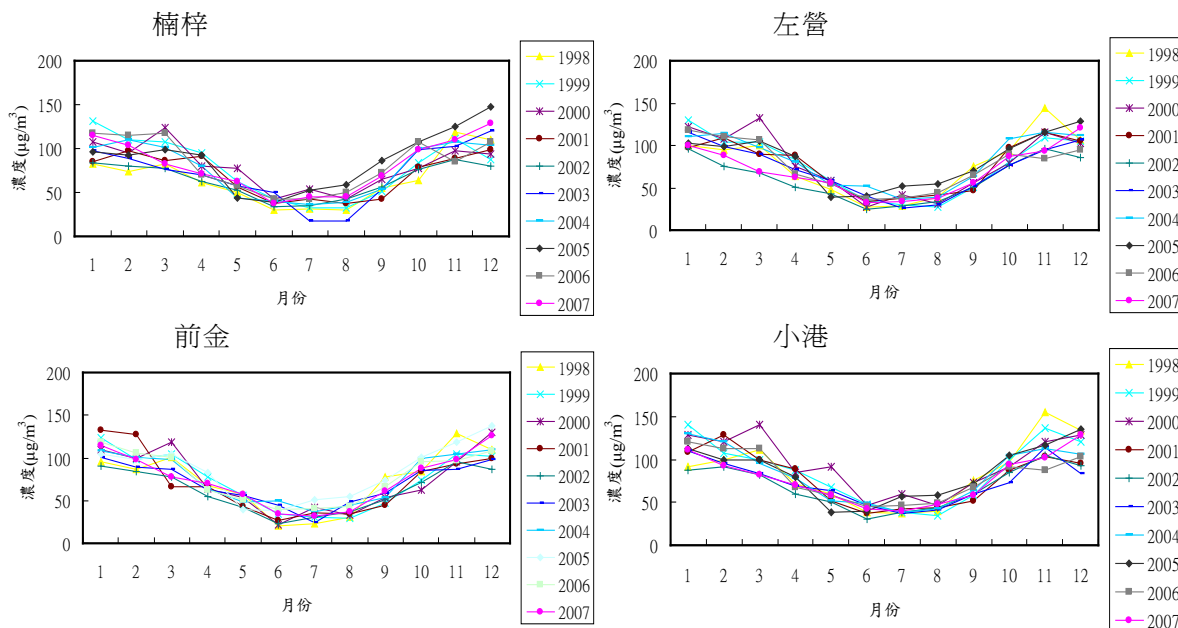


圖 4 高雄市空品測站 PM<sub>10</sub> 逐月濃度變化圖



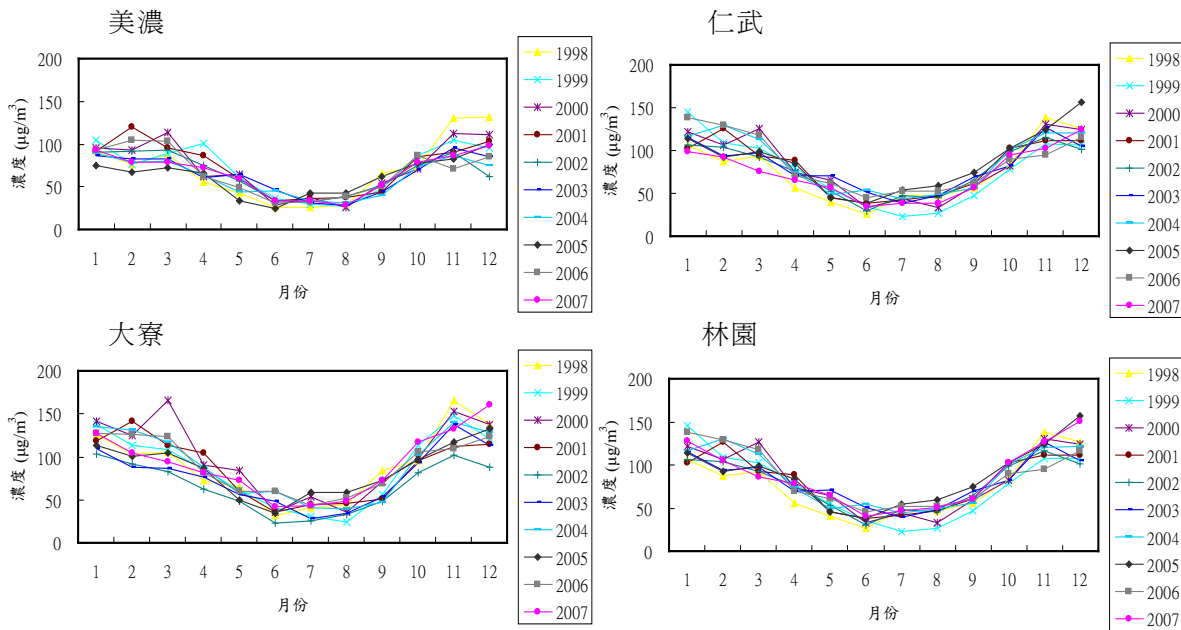


圖 5 高雄縣空品測站  $PM_{10}$  逐月濃度變化圖

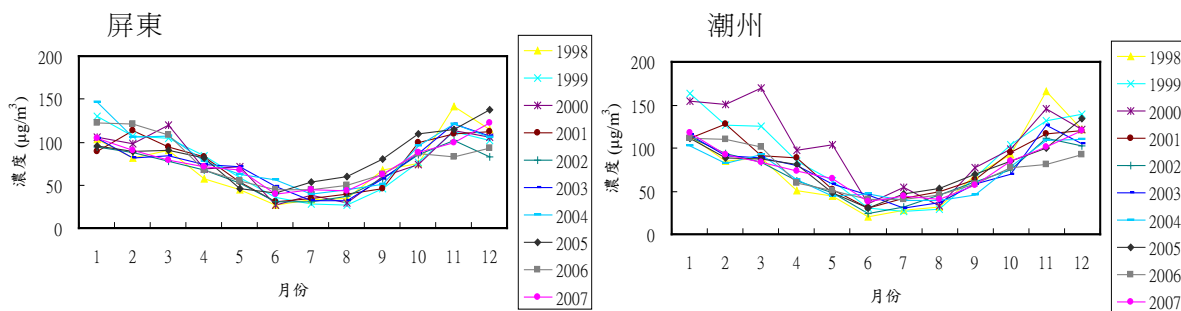


圖 6 屏東縣空品測站  $PM_{10}$  逐月濃度變化圖

統整高雄市、高雄縣及屏東縣之指標污染物濃度資料，並迴歸出 10 年之懸浮微粒  $PM_{10}$  污染物濃度年變化趨勢(圖 7~圖 9)。高雄市之  $PM_{10}$  濃度年趨勢變化中，楠梓(10.47%)及前金(5.27%)呈上升趨勢，左營(-1.15%)及小港(-5.44%)則呈下降趨勢。高雄縣之  $PM_{10}$  濃度年趨勢變化中，仁武(3.42%)及林園(9.00%)為上升趨勢，美濃(-6.78%)及大寮(-0.17%)則為下降趨勢。屏東縣之  $PM_{10}$  濃度年趨勢變化中，屏東

### 34 高屏地區指標性空氣污染物來源探討

(5.37%)為上升趨勢，潮州(-10.44%)則為下降趨勢。高屏空品區之  $PM_{10}$  濃度年變化趨勢互有升降，以高雄市之楠梓(10.47%)上升幅度最大，下降趨勢則以潮州之-10.44%為最大。懸浮微粒污染物尚需配合個別地域特質，其污染物濃度之擴散、累積有其區域性。

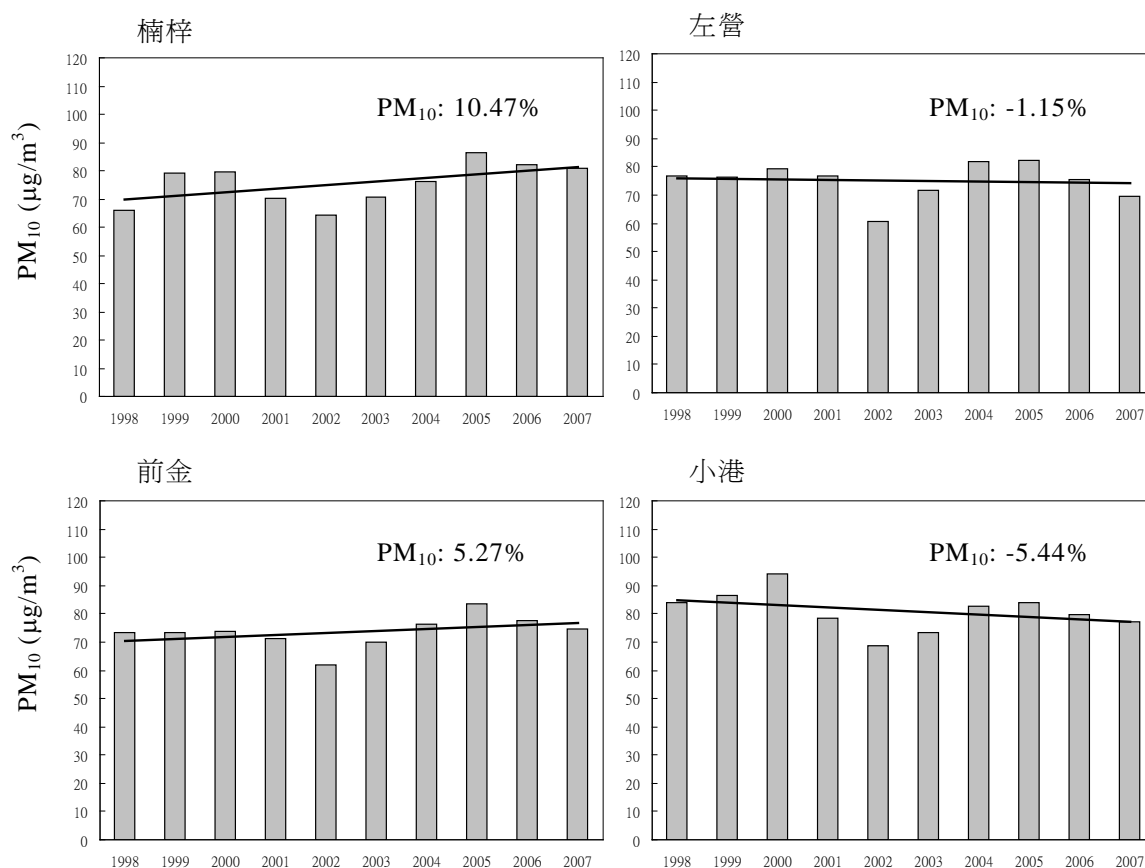


圖 7 高雄市  $PM_{10}$  濃度年變化趨勢

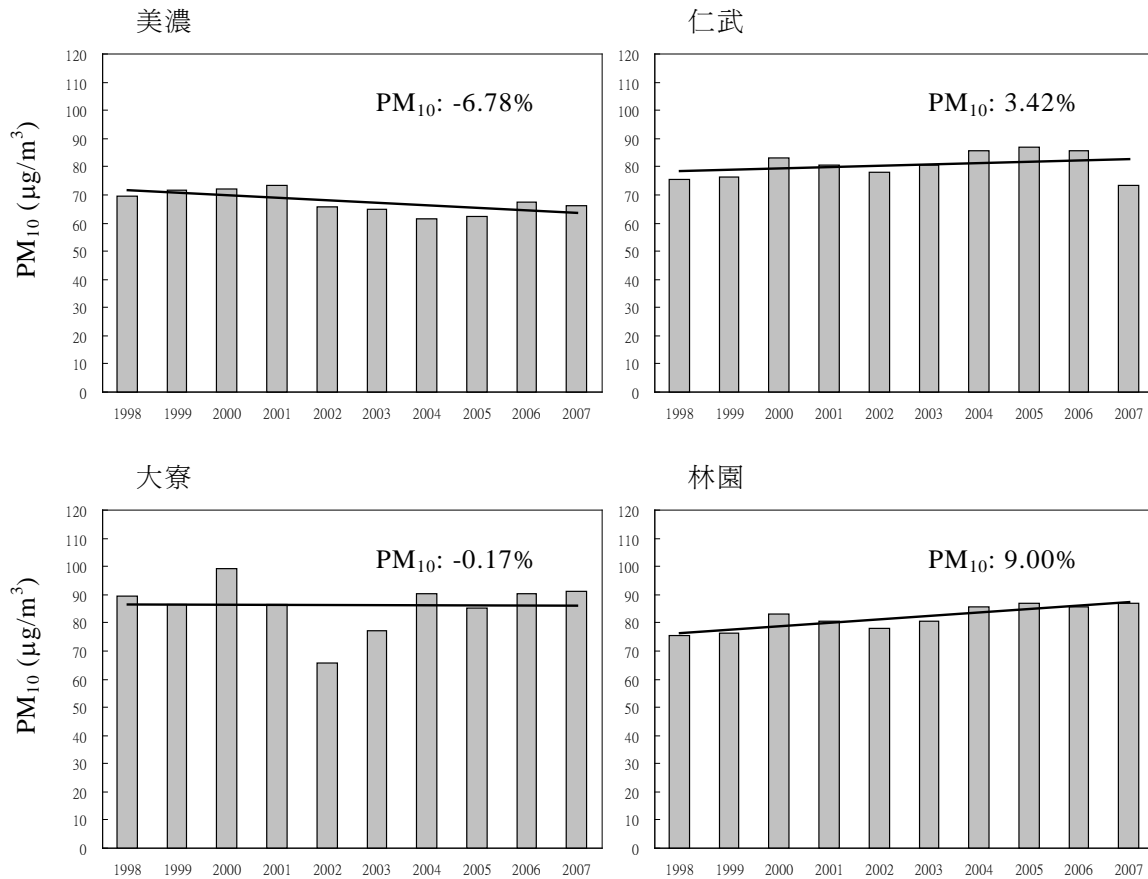


圖 8 高雄縣  $PM_{10}$  濃度年變化趨勢

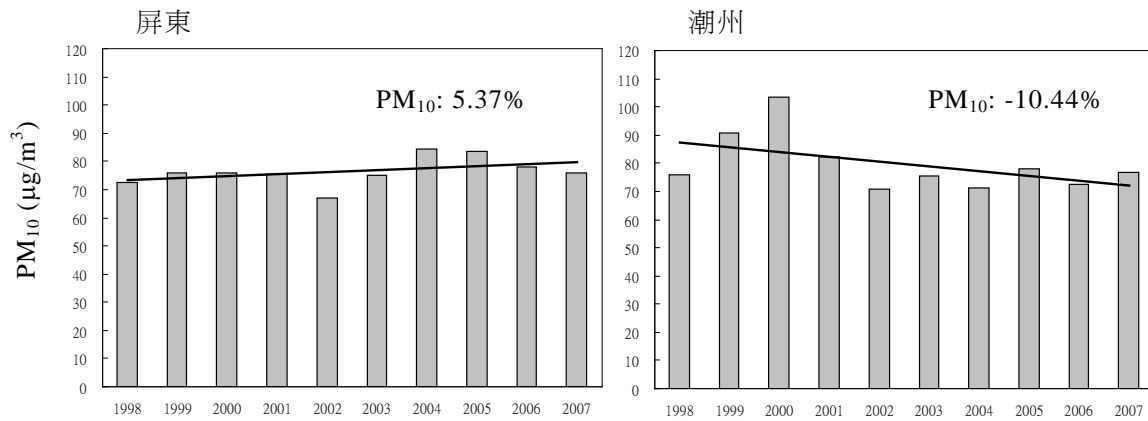


圖 9 屏東縣  $PM_{10}$  濃度年變化趨勢

## 五、受體模式介紹

目前受體模式之應用有：1.化學質量平衡法(CMB, chemical mass balance)，2.主成分分析/絕對主成分分析(PCA/APCA, principal component analysis / absolute principal component analysis)，3.正矩陣因子化法(PMF, positive matrix factorization)，此3項模式之研究最為廣泛。本文所使用之受體模式，乃選擇以化學質量平衡法為基礎之CMB8模式。茲將3種受體模式介紹如下：

### 5.1 化學質量平衡法(CMB)

受體模式於國外之應用，大多以化學方法來推估大氣懸浮微粒之污染來源，其中又以化學質量平衡法(CMB)應用最廣。第一個具使用者介面之CMB模式乃由Watson, (1979)<sup>[7]</sup>以FORTRAN IV寫成，至CMB7乃結合C及FORTRAN等程式語言發展而成，擴展至最後改版之CMB8乃延續CMB7之計算方式，但具更方便使用者操作之介面。於1970年代，CMB模式開始發展並逐漸在研究上應用及驗證(Winchester and Nifong (1971)<sup>[8]</sup>, Hidy and Friedlander (1971)<sup>[9]</sup>, and Kneip et al.(1973)<sup>[10]</sup>)。CMB模式之應用最先只限定於追蹤個別來源的特定化學物種，直至Friedlander (1973)<sup>[11]</sup>於模式中應用普通加權最小平方解(the ordinary weighted least-square solution)，開始不受限個別污染源解析特定化學物種之問題。

Chow et al.(1992)<sup>[12]</sup>於美國加州Rubidoux地區經CMB模式推估該地區之PM<sub>10</sub>污染來源，以移動源排放、硫酸鹽及硝酸鹽、地殼元素及石灰工廠操作等為主要污染源。Vega et al.(1997)<sup>[13]</sup>等於墨西哥市之日、夜之採樣期程中，解析PM<sub>2.5</sub>約佔總懸浮微粒(TSP)之40~60%，並利用CMB7推估PM<sub>2.5</sub>之主要污染來源為移動源(汽油車)和衍生性氣膠，總和貢獻量約為60%。Chen et al. (2001)<sup>[14]</sup>於台灣高雄進行大氣PM<sub>2.5</sub>之採樣，分析微粒中之水溶性離子、金屬離子及有機碳(OC)、元素碳(EC)，蒐集當地污染源指紋資料及美國Speciate指紋資料庫，以CMB模式解析高雄市主要污染源為移動源(18~54%)、衍生性氣膠(30~41%)及農廢燃燒(13~17%)。Engelbrecht et al.(2002)<sup>[15]</sup>以CMB7解析南非之污染型態，分析PM<sub>2.5</sub>主要來源為住宅煤炭燃燒(62.1%)及生質燃燒(13.8%)，PM<sub>10</sub>主要來源為住宅煤炭燃燒(42.6%)、生質燃燒(19.9%)及地殼元素(11.3%)，衍生性氣膠各約佔5~6%，其他諸如移動源及工

業源之排放皆小於 1%。Olson et al.(2008)<sup>[16]</sup>於美東 Tower Dairy 地區應用 CMB 模式解析 PM<sub>2.5</sub>之主要來源，其中以硫酸鹽(55%)為主，其次為汽油車(32%)、柴油車(8%)及道路揚塵(5%)。

## 5.2 主成分分析/絕對主成分分析(PCA/APCA)

主成分分析(PCA)乃由 Pearson(1901)<sup>[17]</sup>所提出，為一多變量統計分析方法，主要以轉換原始變數使之縮減成一組線性獨立之組合變數，其新成立之不同成分因子軸乃由原始變數之集合得其各具不同意義之解釋，而後命名各成分因子軸之定義。絕對主成分分析(APCA)乃由變數之相關係數矩陣解出其特徵向量矩陣，以正交轉軸法令特徵向量矩陣因子負荷標準化後，其介於 0 與 1 之間，各因子軸代表個別污染源所含之化學組成。其後，以氣膠濃度對個別污染源之代表因子軸進行迴歸分析，所得之迴歸係數矩陣即代表個別污染源於受體點之貢獻量。其與 CMB 最大不同處乃在無須得知污染源之化學物種組成，亦即無須事先得知污染源之指紋資料，此即增加使用 PCA/APCA 之方便性，但也增加解析污染來源之不確定性。

Swietlicki and Krejci(1996)<sup>[18]</sup>於捷克近一年之細微粒(2~5 μm)採樣期程(313 天)中，使用 APCA 解析中歐的細微粒之污染來源為：移動源、地殼元素、油品燃燒、煤炭燃燒、硫酸鹽衍生性氣膠及海鹽飛沫。Harrison et al. (1996)<sup>[19]</sup>利用 PCA (Principal Component factor Analysis)及 MLRA(Multi-Linear Regression Analysis)之方法推估 Birmingham (英國)、Coimbra (葡萄牙)及 Lahore (巴基斯坦)等 3 個國家 3 城市之污染來源，細微粒主要來自移動源、衍生性氣膠；而粗微粒則以地殼元素、海鹽飛沫及冶金工廠為主要污染來源。Marcazzan et al.(2003)<sup>[20]</sup>應用 APCA 解析義大利 Milan 之 PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 主要污染來源，PM<sub>10</sub> 主要來自地殼元素、移動源、工業排放及衍生性氣膠，PM<sub>2.5</sub> 主要來自人為排放、地殼元素及衍生性氣膠，並推論移動源所造成之直接或間接影響佔 PM<sub>10</sub> 之 60% 影響濃度。Espinosa et al. (2004)<sup>[21]</sup>於西班牙 Seville 地區，以 PCA 解析出都市細微粒主要來自地殼元素、油品燃燒、鑄造廠及移動源。Guo et al. (2009)<sup>[22]</sup>解析香港住商合用地區之 PM<sub>2.5</sub> 主要有五大來源，即硫酸鹽衍生性氣膠、地殼元素、油渣、移動源及海鹽飛沫，其中以硫酸鹽衍生性氣膠之貢獻量最多(24~44%)。

### 5.3 正矩陣因子化法(PMF)

PMF 乃由 Paatero and Tapper (1994)<sup>[23]</sup>之研究發展而來，針對各元素之矩陣運算需有非負值之限制條件及加權最小平方法，求得最佳解，俾使運算之結果有較高之精密度。其後更發展至以 Gauss-Newton 法取代最小平方法之運算之 PMF2 及 PMF3，而 PMF2 代表 2 維空間線性求解，PMF3 則代表可擴散至 3 維空間之線性運算。

Hien et al. (2004)<sup>[24]</sup>於越南 Hanoi 市之研究中，以 PMF 解析 PM<sub>10</sub> 之主要來源乃為地殼元素、露天燃燒、街道揚塵、海洋飛沫及長程傳輸。Owega et al. (2004)<sup>[25]</sup>亦以 PMF 模式運用於研究 Toronto(加拿大)地區 PM<sub>2.5</sub> 之主要污染源，包含生物源、地殼元素、建築揚塵、道路揚塵、衍生性氣膠、木材燃燒及長程傳輸等。Vecchi et al. (2008)<sup>[26]</sup>即用 PMF 模式解析義大利都會區次微米氣膠(PM<sub>1</sub>)之來源分佈，發現地殼元素、燃油燃燒、硫酸鹽衍生性氣膠及混合型燃燒為主要之來源。

## 六、CMB 模式概述

受體模式(receptor model)藉不同污染源之排放物種特徵，經由化學質量平衡法(CMB)及排放源指紋資料庫解析受體點之污染物化學特徵，決定主要之污染源及其貢獻量。其中，不同污染源排放之物質皆有其個別物化性質及成分比例，可列為個別污染源之辨別基準，視為「指紋」(fingerprint)。受體模式之基本論點為每一污染源具有其特性，受體點之污染物濃度乃由不同污染源組合而成，以盡可能蒐集到的排放源指紋資料庫，估計不同污染源之貢獻量。本文乃使用 CMB 8 版本。

化學質量平衡法為污染源與受體點之質量守恆，其目的為決定污染源類別及其貢獻量。CMB 模式乃以受體之物種及質量為不同污染源貢獻之線性總和。受體模式之運用上，因統計模式與真實狀況上有所差異，使用時應注意其假設與限制。

Watson et al. (1997)<sup>[27]</sup>之研究指出，模式有以下之假設：

- 1.於大氣週期及採樣期間，污染源之物種組成均不變。
- 2.各化學物種彼此間不互相反應(亦即可線性加總)。
- 3.不同污染源之污染物皆清楚界定，且具有其特性。

- 4.污染源或來源分類之總數需小於或等於污染物種之數目。
- 5.各污染源之間皆為線性獨立關係。
- 6.量測之不確定性是隨機、非相關性，且呈常態分佈。

應用 CMB8 模式時需注意之使用時機及注意事項，茲說明如下：

1.污染源特徵及物種分率需清楚

污染源主要之物種組成必須詳細清楚，引用文獻數據為污染源指紋需謹慎，物種組成會因時(如法規標準)、因地(製程特性、使用原料)而不同。

2.衍生性及具反應性物種之限制

污染物種之穩定性甚為重要，物種之反應、降解差異及凝結效應亦可造成污染源特徵之改變，故不建議以 CMB 解析高光化反應性或二次污染物。

3.污染源貢獻量之辨識程度

CMB 模式能合理預測主要污染源類型，卻仍無法細分同一類型中某一物種的污染量及「共線性問題」。主因為 CMB 僅能追蹤個別物種代表類型之污染源，對於此類污染源間物種組成之單獨貢獻量則無法分別。

以 CMB 研究大氣懸浮微粒之污染源貢獻量，需選用適當之排放資料庫及解析物種。CMB 於解析主要污染源貢獻有其判定準則(表 3)，包括污染源貢獻評估(SEC, source contribution estimate)、標準差(STDER, standard error)、T-統計量(T-STAT, T-statistic)、 $R^2$ 、 $\chi^2$ 、估計質量百分比(PCMASS, percent mass)及自由度(DF, degrees of freedom)等 7 項指標參數。

表 3 CMB8 模式統計指標判定準則

指 標 參 數	符 號	判 定 準 則 說 明
污染源貢獻評估	SEC	單位： $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 或 $\text{ppmC}$
標準差	STDER	SEC 精確度與未定量指標。(目標：STDER < SEC)
T-統計量	T-STAT	解釋 STDER，其值為 SEC/STDER，T-STAT 越高表 SEC 不等於 0 之機率越高。(目標：T-STAT > 2)
$R^2$	R-SQUARE	用來測量計算得知物種濃度可解釋樣本中物種濃度變異量，其值介於 0 與 1 之間。(R2 目標：0.8-1.0)
$\chi^2$	CHI-SQUAR	與 R2 之目的相似，同時考慮估計之物種之未定量。 $(\chi^2$ 目標：0-4)
估計質量百分比	PCMASS	解釋 SEC 之總和可解釋樣本質量之百分比數值。(目標：PCMASS：80-120)
自由度	DF	解析物種減去污染源數目。(目標：大於 5)

## 七、受體模式分析結果

本文應用大氣採樣分析數據，其中採樣點包括小港、屏東及潮州 3 站(皆位於環保署空品測站)，代表高屏空品區工業型都市、商業型都市及郊區，並解析其相關之懸浮微粒來源分佈類型。大氣採樣數據乃以分道採樣器(manual dichotomous sampler, Dichot)及泛用型空氣採樣器(universal air sampler, UAS)進行大氣粗( $\text{PM}_{2.5-10}$ )、懸浮微粒細( $\text{PM}_{2.5}$ )採樣。CMB 決定污染源類型之先決條件除滿足判定準則外，尚需進行指紋資料與受體點污染物種濃度之最佳配適分析，此即指紋資料之敏感性分析。由美國環保署 Speciate 3.2 及國內蒐集而得之指紋資料庫中，進行試誤配適汰除不符合 CMB 判定準則者，以此再進行敏感性分析(表 4)。

受體模式分析結果於  $\text{PM}_{2.5}$  之污染貢獻量部分(圖 10)，小港站可解析出 5 個大氣污染源，即 1.汽油車為 43%，2.柴油車為 17%，3.衍生性硝酸鹽為 26%，4.衍生性硫酸鹽為 10%，5.鋼鐵業排放為 4%。屏東站可解析出 5 個大氣污染源，即 1.汽油車為 45%，2.柴油車為 19%，3.衍生性硝酸鹽為 22%，4.衍生性硫酸鹽為 12%，5.焚化爐排放為 2%。潮州站可解析出 5 個大氣污染源，即 1.汽油車為 12%，2.柴油車為 29%，3.衍生性硝酸鹽為 17%，4.衍生性硫酸鹽為 18%，5.露天燃燒為 24%。

於  $\text{PM}_{2.5-10}$  之污染貢獻量部分(圖 11)，小港站可解析出 4 個大氣污染源，1.道



路鋪面為 40%，2.汽油車為 24%，3.衍生性硝酸鹽為 22%，4.衍生性硫酸鹽為 14%。  
 屏東站可解析出 4 個大氣污染源，1.道路鋪面為 48%，2.汽油車為 20%，3.衍生性  
 硝酸鹽為 12%，4.衍生性硫酸鹽為 20%。潮州站可解析出 4 個大氣污染源，1.道路  
 鋪面為 50%，2.汽油車為 36%，3.衍生性硝酸鹽為 8%，4.衍生性硫酸鹽為 6%。

表 4 CMB 指紋資料庫

Profile name/number	Abbreviation	Descriptions and references
Paved road dust (profile #41109)	Pave1	Paved road dust—Alabama; USEPA (2002)
Paved road dust (profile #41120)	Pave2	Paved road dust— Los Angeles; USEPA (2002)
Vehicle exhaust (profile #31101)	Auto1	Light duty vehicles; USEPA (2002)
Vehicle exhaust	Auto2	Gasoline vehicle—motorcycles; Chen et al. (2001)
Vehicle exhaust (profile #32208)	Auto3	Heavy duty diesel trucks; USEPA (2002)
Vehicle exhaust (profile #32103)	Auto4	Light duty vehicles —diesel; USEPA (2002)
Vehicle exhaust	Auto5	Heavy duty diesel trucks; Chen et al. (2006)
Municipal incinerator	Incer1	Municipal incinerator—Kaohsiung, Taiwan; Chen et al. (2001)
Municipal incinerator (profile #17105)	Incer2	Municipal incinerator—Philadelphia, USEPA (2002)
Field burning (profile #42304)	Burn1	Agricultural field burning; USEPA (2002)
Field burning (profile #42324)	Burn2	Field burning—Fescue; USEPA (2002)
Secondary reactant (profile #25409)	Amnit	Ammonium nitrate; USEPA (2002)
Secondary reactant (profile #25410)	Amsul	Ammonium sulfate; USEPA (2002)

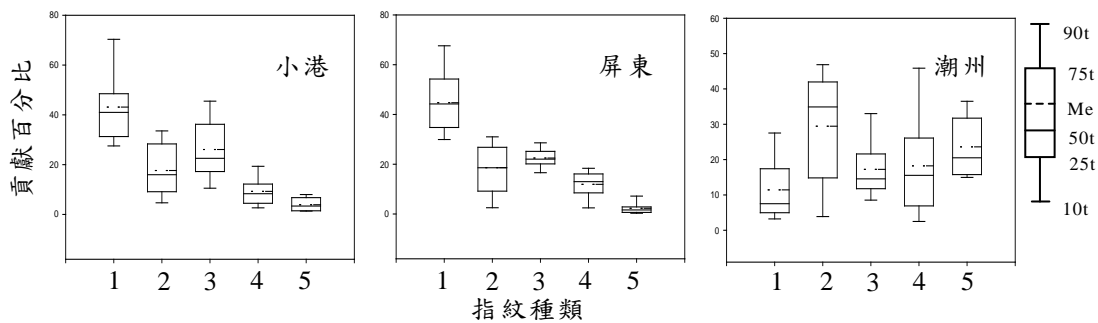


圖 10 PM<sub>2.5</sub> 各污染源貢獻百分比(1.汽油車，2.柴油車，3.衍生性硝酸鹽，4.衍生性硫酸鹽，5.小港：鋼鐵業排放；屏東：焚化爐；潮州：露天燃燒)

## 42 高屏地區指標性空氣污染物來源探討

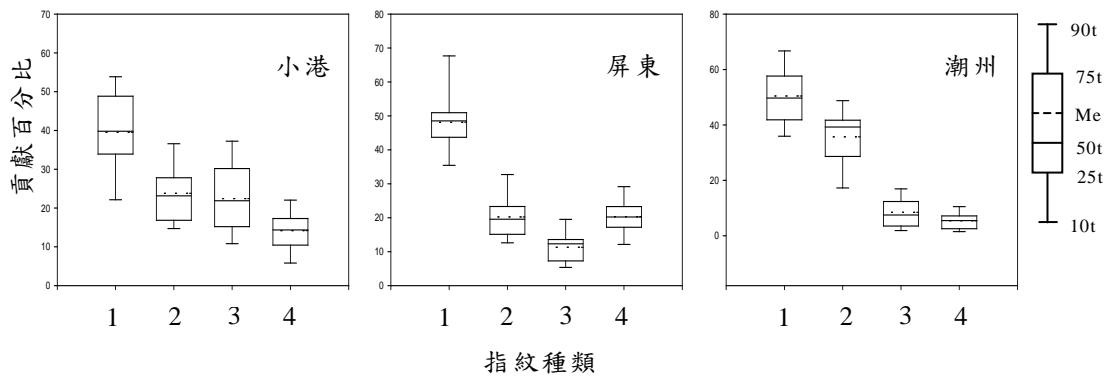


圖 11 PM<sub>2.5-10</sub> 各污染源貢獻百分比(1.道路鋪面，2.汽油車，3.衍生性硝酸鹽，4.衍生性硫酸鹽)

## 八、結論

懸浮微粒 PM<sub>10</sub> 濃度在氣象因素上主要受氣壓、風場及濕度之影響甚鉅，當 3 者配合高氣壓、低風速及低濕度時，污染濃度值可達最高值。由受體點之樣品重量分析結果，在高屏地區 PM<sub>2.5</sub> 佔 PM<sub>10</sub> 之質量比例，小港為 68.4%，屏東為 67.9%，潮州為 70.3%，可知高屏地區之大氣微粒以 PM<sub>2.5</sub> 為主，約佔 7 成左右。

受體模式分析顯示，PM<sub>2.5</sub> 之來源工業型都市(小港)及商業型都市(屏東)以汽油車及柴油車為主，其中以汽油車為大宗；但是郊區(潮州)則以柴油車為大宗。PM<sub>2.5-10</sub> 之來源，3 種不同類型之城市及鄉鎮皆以鋪面道路為主。由是此故，在污染防治策略上，如欲降低高屏空品區之 PM<sub>2.5</sub> 濃度，應以移動源控制為優先。國內自建之污染源指紋資料不足，為現今使用受體模式解析運用上之一大盲點，建議政府相關單位應用所屬資源，建置可靠及詳細之指紋資料庫，以使污染源推估結果更加精確及完備。

## 參考資料

- 1.Hinds, W.C.. Aerosol Technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles, 2nd ed., John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- 2.Miller, F.J., Gardner, D.E., Graham, J.A., Lee, R.E., Wilson, W.E., Bachmann, J.D.. Size considerations for establishing a standard for inhalable particles, JAPCA 29, 610–615, 1979.
- 3.柳中明、尤思喻，2006，高屏地區大氣懸浮微粒(PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub>)特性及成因分析研究子計畫二：本土化「空氣品質指標 (AQI) 研析與建議」，95 年度「環保署/國科會空污防制科研合作計畫」成果完整報告，NSC 95－EPA－Z－002－005。
- 4.Wark, K., Warner, C.F., Davis, W.T.. Air pollution: its origin and control, 3rd ed., Addison Wesley Longman, Inc., 1998.
- 5.Watson, J.G., Robinson, N.F., Fujita, E.M., Chow, J.C., Pace, T.G., Lewis, C., Coulter, T.. CMB8 applications and validation protocol for PM<sub>2.5</sub> and VOCs, Desert Research Institute Document No. 1808.2D1, 1998.
- 6.何宜達，2004，高屏地區臭氧事件日光化學模式解析及氣象條件之探討，中山大學環工所博士論文。
- 7.Watson, J.G.. Chemical element balance receptor model methodology for assessing the sources of fine and total particulate matter in Portland, Oregon. Ph.D. Oregon Graduate Center, Beaverton, OR, 1979.
- 8.Winchester, J.W., Nifong, G.D.. Water Pollution in Lake Michigan by Trace Elements from Pollution Aerosol Fallout. Water, Air, & Soil Pollution 1, 50–64, 1971.
- 9.Hidy, G.M., Friedlander, S.K.. The nature of the Los Angeles aerosol. Proc. Second Int. Clean Air Congress. Academic Press, 1971.
- 10.Kneip, T.J., Kleinman, M.T., Eisenbud, M.. Relative contribution of emission sources to the total airborne particulates in New York City. In Third International Clean Air Congress, Dusseldorf, FRG. , 1973.

#### 44 高屏地區指標性空氣污染物來源探討

- 11.Friedlander, S.K.. Chemical element balances and identification of air pollution sources. *Environ. Sci. Technol.* 7, 235–240, 1973.
- 12.Chow, J.C., Liu, C.S., Cassmassi, J., Watson, J.G., Lu, Z., Pritchett, L.C.. A neighborhood-scale study of PM<sub>10</sub> source contributions in Rubidoux, California. *Atmos. Environ.* 26, 693–706, 1992.
- 13.Vega, E., Garcia, I., Apam, D., Ruiz, M.E., Baraiaus, M.. Application of a Chemical Mass Balance Receptor Model to Respirable Matter in Mexico City. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 47, 524–529, 1997.
- 14.Chen, K.S., Lin, C.F., Chou, Y.M.. Determination of source contributions to ambient PM<sub>2.5</sub> in Kaohsiung, Taiwan, using a receptor model. *J. Air and Waste Manage. Assoc.* 51, 489–498, 2001.
- 15.Engelbrecht, J.P., Swanepoel, L., Chow, J.C., Watson, J.G., Egami, R.T.. The comparison of source contributions from residential coal and low-smoke fuels, using CMB modeling, in South Africa. *Environ. Sci. and Policy* 5, 157–167, 2002.
- 16.Olson, D.A., Turlington, J., Duvall, R.M., McDow, S.R., Stevens, C.D., Williams, R.. Indoor and outdoor concentrations of organic and inorganic molecular markers: Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> using low-volume samples. *Atmos. Environ.* 42, 1742–1751, 2008.
- 17.Pearson, K.. On line and planes of closest fit to systems of points in space, *Philosophy Magazine* 2, 559 - 572, 1901.
- 18.Swietlicki, E., Krejci, R.. Source characterisation of the Central European atmospheric aerosol using multivariate statistical methods. *NIMB: Beam Interactions with Materials and Atoms* 109/110, 519-525, 1996.
- 19.Harrison, R.M., Smith, D.J.T., Luhana, L.. Source apportionment of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U.K. *Environ. Sci. Technol.* 30, 825-832, 1996.
- 20.Marcazzan, G.M., Ceriani, M., Valli, G., Vecchi, R.. Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Milan (Italy) using receptor modeling. *Sci. of Total Environ.* 317,

- 137–147, 2003.
- 21.Espinosa, A.J.F., Rodriguez, M.T., Alvarez, F.F.. Source characterisation of fine urban particles by multivariate analysis of trace metals speciation. *Atmos. Environ.* 38, 873–886, 2004.
- 22.Guo, H., Ding, A.J., So, K.L., Ayoko, G., Li, Y.S., Hung, W.T.. Receptor modeling of source apportionment of Hong Kong aerosols and the implication of urban and regional contribution. *Atmos. Environ.* 43, 1159–1169, 2008.
- 23.Paatero, P., Tapper, U.. Positive matrix factorization: A non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values. *Environmetrics* 5, 111–126, 1994.
- 24.Hien, P.D., Bac, V.T., Thinh, N.T.H.. PMF receptor modelling of fine and coarse PM<sub>10</sub> in air masses governing monsoon conditions in Hanoi, northern Vietnam. *Atmos. Environ.* 38, 189–201, 2004.
- 25.Owega, S., Khan, B.U.Z., Dsouza, R., Evans, G.J., Fila, M., Jervis, R.E.. Receptor modeling of Toronto PM<sub>2.5</sub> characterized by aerosol laser ablation mass spectrometry. *Environ. Sci. Technol.* 38, 5712–5720, 2004.
- 26.Vecchi, R., Chiari, M., D'Alessandro, A., Fermo, P., Lucarelli, F., Mazzei, F., Nava, S., Piazzalunga, A., Prati, P., Silvani, F., Valli, G.. A mass closure and PMF source apportionment study on the sub-micron sized aerosol fraction at urban sites in Italy. *Atmos. Environ.* 42, 2240–2253, 2008.
- 27.Watson, J.G., Robinson, N.F., Lewis, C., Coulter, T.. Chemical Mass Balance Receptor Model-Version 8 (CMB8) User's Manual. Desert Research Institute Document No. 1808. 1D1, 1997.



## 節能減碳

# 廢(污)水處理廠節能規劃與改善 以工研院中興院區為例

黃文昌\*、姜榮煌\*\*、洪政偉\*\*\*

### 摘要

依據資料顯示<sup>[1]</sup>廢水處理流程中各處理程序的耗能情況，發現廢水處理耗電佔整廠的 50~80% 最大，而污泥處理僅佔 15~40%，所以廢水處理自然是節能重點。其中又以進流抽水泵、曝氣機為主。

工研院中興院區廢(污)水處理廠(以下簡稱本廠)，體認到廢水處理是高耗能的，高耗能造成廢(污)水廠營運成本高，所以從 2007 年開始進行節能改善。首先分析過去現在能源消耗，然後鑑別重大能源消耗區域，最後決定節能改善優先順序。

本廠節能規劃及改善方式；1.曝氣池的鼓風機加裝變頻器，2.兩套曝氣單元連通，3.減少進水波動，減低抽水泵的啓停次數，4.設備維護與保養。2007 年整廠總用電量 55.4 萬度，到 2011 年整廠用電量為 26 萬度，節電 29.4 萬度，以目前每度電 2.6 元，換算節省電費約 76.4 萬元，減少約 18 萬kg CO<sub>2</sub> 排放量(依 99 年我國電力排放係數 0.612 kg CO<sub>2</sub>/度電計算)。

【關鍵字】溫室效應、氣候變遷、廢水廠節能

---

\*工研院工安室 主任

\*\*工研院工安室 環保服務部經理

\*\*\*工研院工安室 環保服務部管理師

## 一、前言

進入 21 世紀，能源短缺、環境污染、氣候暖化等問題受到全世界關注，成為個人、企業與政府共同面對的挑戰。水資源缺乏及水體環境被破壞，影響到環境的永續發展。為解決此一問題，大量建造工業和都市廢(污)水處理廠被認為是有效的方式。近幾年來，我國的都市污水處理設施建設成長快速，依據內政部營建署統計資料<sup>[8]</sup>，截至 2010 年 12 月止，全國都市污水處理廠共 52 座(已運轉，不包括規劃中)、年處理污水量 105,008 萬噸/年(不包括工業區廢水處理廠)。

大量廢(污)水處理廠的興建，使廢污水處理費用增加。在歐美先進國家，如美國，水和污水處理的能源消耗達到都市公共設施用能的 1/3，佔總能源消耗的 3%，全年耗電量達 560 億 kWh，其中 2/3 以上能源消耗和費用是用於污水處理。在我國，依據內政部營建署統計資料<sup>[8]</sup>，94 年污水下水道系統營運管理費用中，電費為 44,931.8 萬元，到 2010 年為 76,827.7 萬元，成長約 41.5%。隨著廢(污)水處理率提高，廢(污)水處理所佔的能源消耗也會越來越大。最近國內電費已確定上漲，而為了滿足日益嚴格放流水排放標準，廢(污)水廠不但要消耗更多電能，也要付出更多的費用。

節能<sup>[2]</sup>，簡單的講，就是在盡可能地減少能源消耗量的情況下，做到我們需要或者想要做的事情，比如生產出與原來同樣數量、同樣品質的產品；或者是以原來同樣數量的能源消耗量，生產出比原來數量更多或數量相等品質更好的產品。具體實現節能的方法和手段可謂是多種多樣，但原理是相通的，那就是根據各種能源特性和使用情況制定相應的節能措施。首先要分析能耗狀況，找出能源浪費在哪裡，找到節能空間，然後再根據具體情況選擇相對應的節能技術手段或應用合理的節能產品，從而達到節能的目標。

本廠於 2006 年 10 月設置運轉，其主要功能及目的是將本院產出的廢(污)水處理達國家規定的放流水標準，當時設計偏重在處理效率，能源的耗用不是廢(污)水處理廠的重點。但是，近年來由於溫室效應及全球對二氧化碳排放的關注，先進國家如美、日、中國大陸早已經紛紛開始重視廢(污)水處理廠能源的消耗，本廠也從 96 年開始逐年進行節能之規劃改善。



## 二、廢(污)水處理廠的節能範圍和內容

依據資料顯示<sup>[3]</sup>，廢(污)水處理廠的耗能受許多因素影響，例如，污水處理的規模、處理程序的類型、進水水量和水質的變化、各處理單元運轉條件及其穩定性、自動控制系統策略等，每個因素對耗能都會有影響，而且是相互影響。只有將廢(污)水處理視為一個系統來考量，在符合放流水標準下，以整廠節能為目標。

一座廢(污)水處理廠，節能的範圍包含進流抽水機、鼓風機、曝氣設備、管線、藥劑添加、消毒、機械潤滑、污泥處理、照明、通風空調等，每一單元耗能的程度不盡相同，依美國紐約州能源研究與發展局資料顯示<sup>[7]</sup>，一座二級廢(污)水處理廠包含一級處理、二級處理、污泥處理等各主要處理單元其耗能分佈如圖 1 所示。從圖中可以看出二級處理單元是整個廢(污)水處理廠的最大耗能單元，佔全廠的 48.4%(不包括空調)，污水抽送耗能約佔全廠的 18.2%左右。所以廢(污)水處理廠的污水抽送和二級處理單元節能是改善重點。

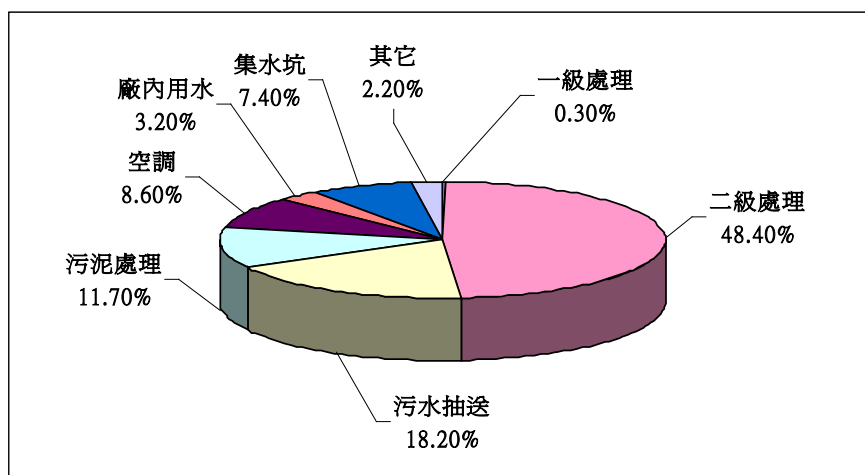


圖 1 廢(污)水廠電能耗用分佈圖

依據資料顯示<sup>[6]</sup>，在美國，約 85%以上的廢(污)水處理廠使用二級以上的處理程序來處理廢(污)水，在一般二級處理中，用電消耗主要在生物處理單元，即活性污泥法的曝氣單元或滴濾池的原水輸送和出水迴流；第二項主要用電消耗為進抽水單元，用於輸送污水、污泥，第三項主要用電消耗為污泥處理，主要用到的設備有脫水設備，攪拌機。將廢(污)水處理廠耗能狀況分析作圖，如圖 2 所示，可

## 50 廢(污)水處理廠節能規劃與改善-以工研院中興院區為例

以看出活性污泥(鼓風機曝氣)在整廠的耗電可達 57%，進抽水泵、迴流泵等各種泵的耗電佔 22.6%。可見，鼓風機和泵是整個污水處理廠節能的關鍵點。

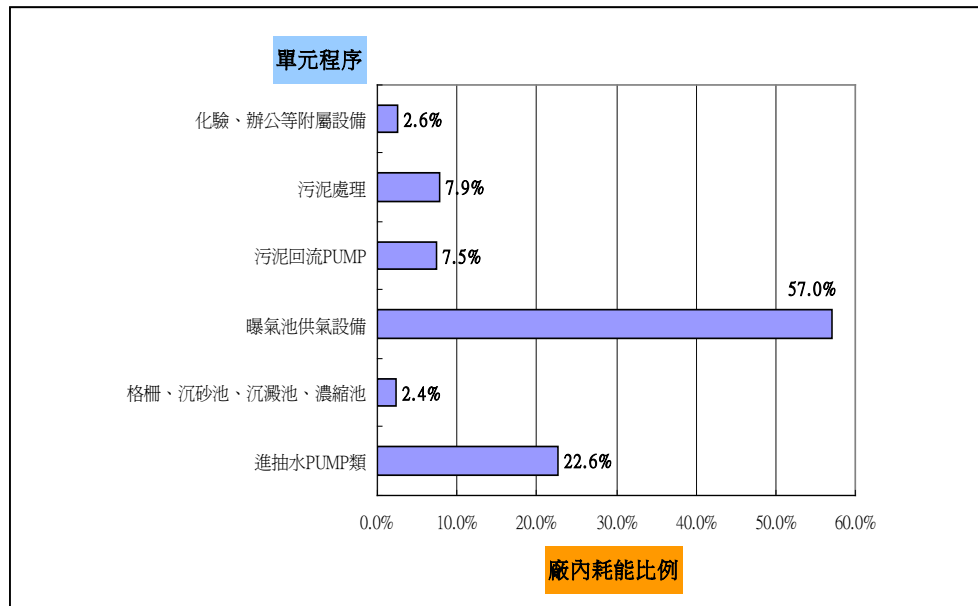


圖 2 廢(污)水處理廠程序電能耗用狀況分析圖

廢(污)水處理廠運轉能耗指標，一般以  $\text{kWh/m}^3$ （單位水處理量所耗用的電能）或  $\text{kWh/kgBOD}_5$ 、 $\text{kWh/kgCOD}$ （每去除單位重量的污染物 COD 或  $\text{BOD}_5$  所消耗的電能）為單位，若以  $\text{kWh/m}^3$  為污水處理耗電量單位，依據資料顯示<sup>[6]</sup>，1999 年日本全國污水廠平均約  $0.26\text{kWh/m}^3$ ，美國約  $0.2\text{kWh/m}^3$ ，2000 年德國污水處理廠平均用電損耗為  $0.32\text{kWh/m}^3$ ，而本廠 2007 年廢污水處理耗電量為  $2.01\text{kWh/m}^3$ ，可見進行節能已到刻不容緩的地步。

### 三、廢(污)水處理廠節能規劃及改善

依國內、外廢(污)水處理廠節能經驗，從廢(污)水處理廠處理流程分析，對全廠運轉成本影響最大的單元為鼓風機單元和泵(或抽水機)單元，只有對重點單元進行操作維護及改善，才能真正實現廢(污)水處理廠的節能。下面將對這兩個單元提出本廠的作法。

### 3.1 曝氣系統的節能

鼓風機曝氣系統耗電一般佔全廠用電的 40%~50%，是全廠節能關鍵。最根本的節能措施就是減小風量<sup>[9]</sup>。

#### 1. 廢(污)水處理廠鼓風機連通，以達節能措施

本廠曝氣系統分別由兩套鼓風機單元供應，主要規格、用途如下表 1 所示。本廠因實際操作處理之水質、水量，遠小於設計處理之水質、水量，所以將公用鼓風機暫停使用，以增設 5" 連通管(含法蘭、閘閥)，將曝氣池鼓風機併接共用，其設計理念如圖 3 所示。連通管完工後，進行試車，調配風量比例。

表 1 鼓風機主要規格及用途表

名稱	主要規格	用途
公用鼓風機	富資 TSD-100 型， 魯式鼓風機 6m <sup>3</sup> /min， 4,500mmAg，15HP，2 台	用於供應 pH 調整池、回收水池、污泥濃縮池
曝氣池鼓風機	富資 TSD-125 型， 魯式鼓風機 11.1m <sup>3</sup> /min， 6500mmAg，30HP，4 台	用於供應污水中所需的空氣

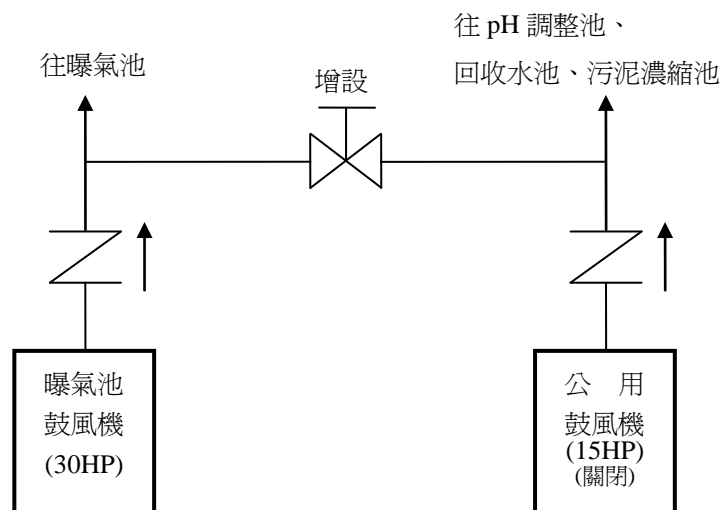


圖 3 增設鼓風機連通管設計圖

## 2.曝氣池鼓風機增設變頻器組<sup>[5]</sup>

廢(污)水處理廠的鼓風機幾乎是全天候運轉。傳統鼓風機的風量是靠風門(閘閥)調節，對鼓風機的馬達不做速度調節，此種方式節能有限。在不同的水質、水量及處理階段所需的風量不一樣，但鼓風機消耗的電力基本不變，造成很大的電力浪費。

由圖 4 得知，曲線 1 和 2 表示調速時的壓力-流量曲線；曲線 3 和 4 表示閘閥調節時管路阻力特性曲線；曲線 5 表示恒速時功率-流量曲線；設 A 點為風機最大操作點。當風量需從  $Q_1$  減少到  $Q_2$  時，如果採用閘閥調節法，操作點由 A 到 B，風壓增加到  $H_2$ ，由圖中可看出軸功率  $P_2$  下降，但減少的不太多。如果採用變頻調節方式，風機操作點由 A 到 C，可見在滿足同樣風量  $Q_2$  情況下，風壓  $H_3$  將大幅度下降，功率  $P_3$  隨著顯著減少。節省的功率損耗  $\Delta P = \Delta H Q_2$ ，與圖中面積  $BH_2H_3C$  成正比。由以上分析可知，變頻調節是一種高效的調節方式。

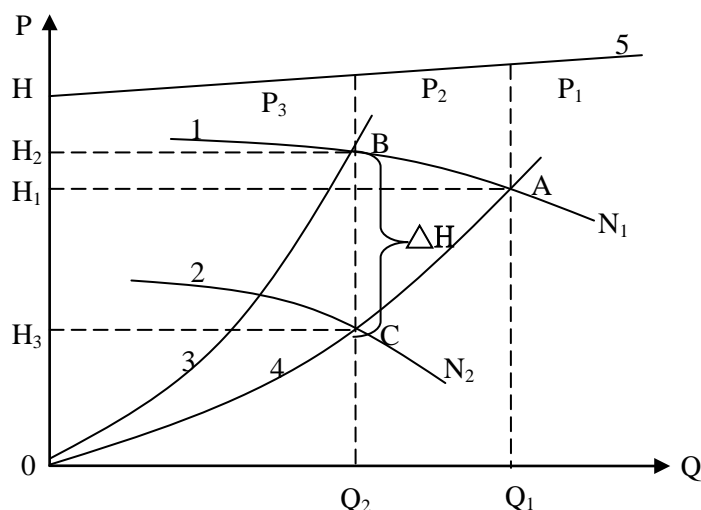


圖 4 變頻調節時鼓風機的性能曲線

### 變頻器增設方案：

- 鼓風機參數，參閱表 1。
- 根據原設備現況，考慮可靠性及配置的靈活性，採用一對一方案，即每台鼓風機加裝一套變頻器。變頻控制櫃內含變頻器、切換接觸器、指示表、指示燈及

按鈕開關等。系統圖如下：

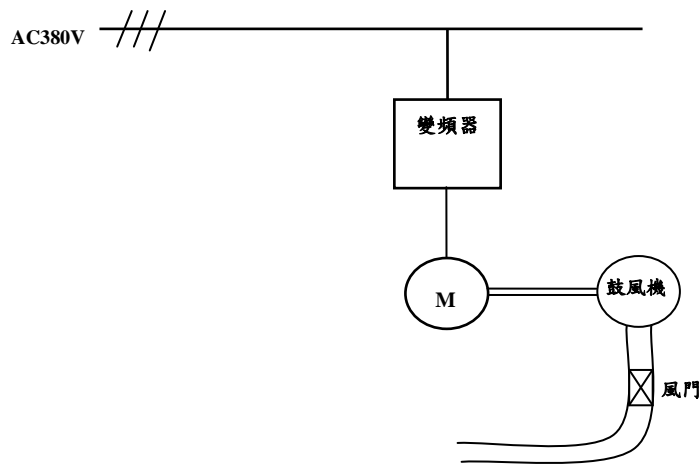


圖 5 鼓風機增設變頻器系統圖

### 3.2 抽水泵的節能

本廠有使用抽水泵的處理單元為進流抽水井、調整池、中間水池，其規格、用途如表 2 所示。

表 2 抽水泵規格及用途

處理單元	泵規格	用途
進流抽水井	TOS-150 B411 型，無阻塞型 沉 水 式 2.0CMM，15HP，3 部	將污水抽送至後續處理單位
調整池	TOS-100 B45.5 型，無阻塞型 沉 水 式 1.4CMM，7.5HP，3 部	將均勻化之污水，抽送至活性污泥池進行生物處理
中間水池	成功 GAHE4012 型，地面渦卷式 1.3CMM，10HP，3 部	將處理後之污水，抽送至放流池

#### 1.進流抽水泵

進流抽水井之抽水泵的耗電一般佔廢(污)水廠全廠耗電的 10~20%，是廢(污)水廠節能的重點單元<sup>[9]</sup>。

本廠對進流抽水井抽水泵節能對策如下：

a.減少進水波動，減低進流抽水泵啓停頻繁。

## 54 廢(污)水處理廠節能規劃與改善-以工研院中興院區為例

院區內設有員工宿舍、餐廳及實驗室產出之廢(污)水，水量受到晨昏、上下班因素變動，設置水量緩衝池(2,500 噸均勻池)均衡進流水量，以降低抽水泵耗能，對穩定處理效率亦有幫助。

b.進流抽水井抽水泵最小啟動時間(Tmin)<sup>[10]</sup>

$$T_{min} = \frac{V}{g}$$

其中，

Tmin：啟動至停止一次所需之時間(min)，視抽水泵(大小而異)，約在 5~30 分鐘。

V：濕井的體積(m<sup>3</sup>)

g：抽水泵的抽水量(m<sup>3</sup>/min)

本廠設定進流抽水井抽水泵最小啟動時間 Tmin 為 12min(當進流抽水井抽水泵啟動液位 3.0m，停止液位 1.5m)。

### 2.調整池及中間水池抽水泵

視水量及透過圖控，調整調整池及中間水池濕井工作液位，是本廠改善調整池及中間水池節能手段。減少抽水機啟動頻率對管路設備的衝擊和損害會相對減輕，也間接提高設備使用壽命。

a.調整池單元

本單元之圖控如下，圖 6 所示。其控制機制係利用調整池液位控制器偵測池內液位高度，據以啟動/停止調整池抽水泵，將污水定量輸送至後續生物處理系統。

- 當調整池內之液位高度達到高液位設定高度 3.5m 以上時，由圖控系統自動啟動調整池內抽水泵(A、B→B、C→A、C 順序運轉)；
- 當調整池內之液位高度降至低液位設定值 2.2m 以下後，由圖控系統自動停止調整池抽水泵之運轉。

b.中間水池單元

本單元之圖控如圖 7 示。其控制機制系利用中間水池液位控制器偵測中間水池內液位高度，再據以啟動/停止中間抽水泵，將污水送至後續處理單元：

- 當中間水池內液位高度達到高液位設定值 3.0m 以上時，由圖控系統自動啟動中間抽水泵(以 A→B→C 順序運轉)；
- 當中間水池內液位高度降至低液位設定值 1.5m 以下後，由圖控系統自動停止中間抽水泵之運轉。

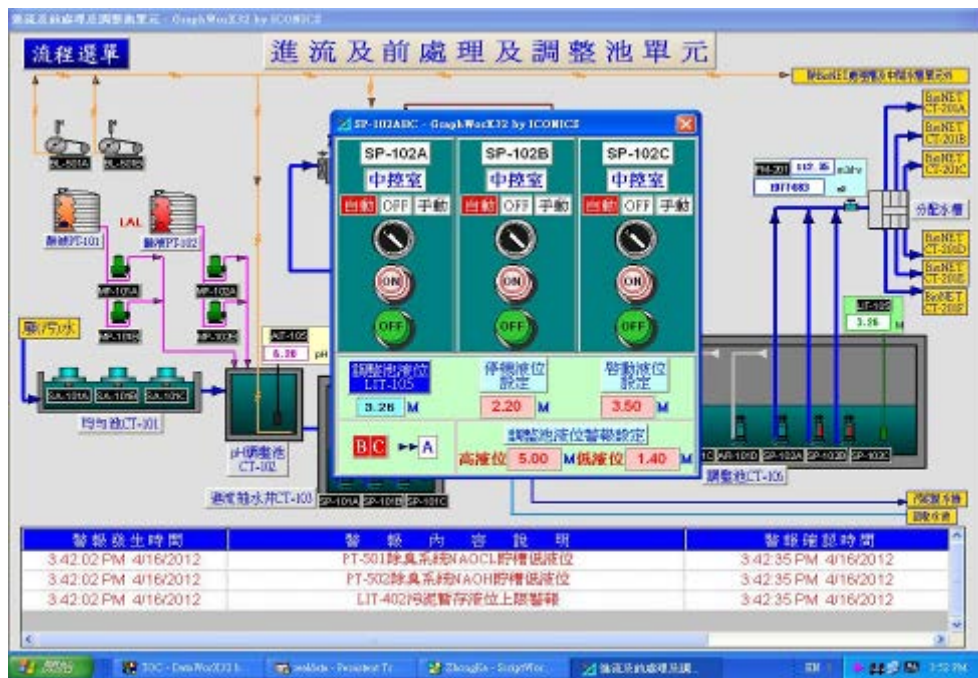


圖 6 調整池單元控制流程圖

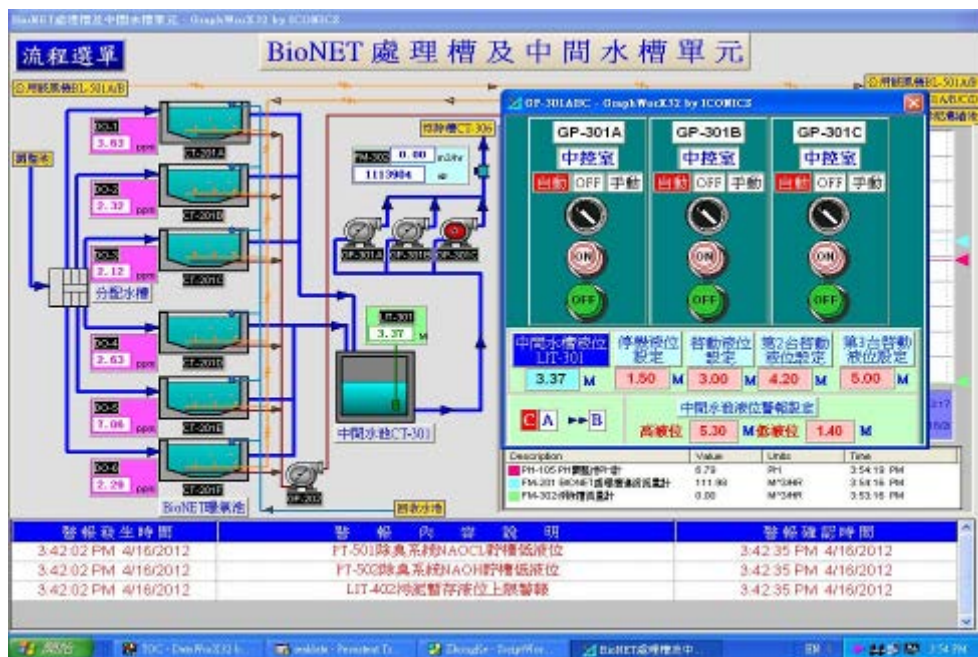


圖 7 水池單元控制流程圖

## 四、設備定期保養維護

機械設備如缺乏良好的維護與管理，不僅難以達到設備原有的性能，而且還會造成耗能的增加。

### 4.1 設備保養與維護

- 1.廠區之機械設備，依照年度「設備保養維護及工作時程表」所排定期程，每半年進行機械潤滑、更換油料及調整。
- 2.各項偵測電極，如 DO 電極、pH 電極、導電度電極等，需定期進行電極清洗與校正作業，依年度「設備保養維護及工作時程表」所訂定之頻率，DO 電極為每週清洗 1 次，每半年進行校正 1 次；pH 電極、導電度電極為每半年進行清洗及校正 1 次。
- 3.日常巡檢工作時即進行機械設備檢查，並記錄於每日操作記錄簿上，一但發現異常之情形，即進行停機維修。

### 4.2 標準維護作業程序建置

- 1.日常巡檢與設備定期保養維護，可減少設備之損壞，並降低維護費用。
- 2.設置「廢污水處理場設備規範總覽」內含設備名稱、規格、型號、廠商之聯絡電話及特殊規格之保養油品、材料之型號電子檔，不僅確保維護操作之可靠性，並降低新進同仁對熟悉處理廠入門之障礙。
- 3.備品庫存管理，所有設備及備品，皆以資訊電子化方式，建立設備備品清單，便於管理。

## 五、節能改善成果

本廠於 2006 年 10 月正式取得環保局核發排放許可證啓用，2007 年整廠總用電量為 55.4 萬度，於 2008 年開始投入節能規劃改善，2008 年 11 月完成鼓風機增設變頻器組(含 UPS 不斷電系統)，改善費用約 30.99 萬元，2009 年 4 月完成鼓風機管線串接工程，改善費用約 6.5 萬元，總費用合計約 37.49 萬元。2007 至 2011 年本廠處理每立方米污水電力耗用量如圖 8。

改善前，本廠在 2008 年整廠總用電量為 37.3 萬度，處理後放流量為 24.7



萬  $\text{m}^3$ ，每單位耗能為  $1.511$  度電/ $\text{m}^3$ ，改善後 2009 年整廠總用電量改降至 34.1 萬度，節能 9.2%，處理後放流量為 29.8 萬  $\text{m}^3$ ，每單位耗能為  $1.143$  度電/ $\text{m}^3$ ，2010 年整廠用電 30.9 萬度，又比 2009 年節電 3.2 萬度，每單位耗能減少至  $0.915$ ，從 2008 至 2011 年整廠節電 29.4 萬度，以目前每度電 2.6 元；換算節省電費約 76.4 萬元，減少約 18 萬  $\text{kg CO}_2$  排放量（依 99 年我國電力排放係數  $0.612 \text{ kgCO}_2\text{e/度電}$  計算）。

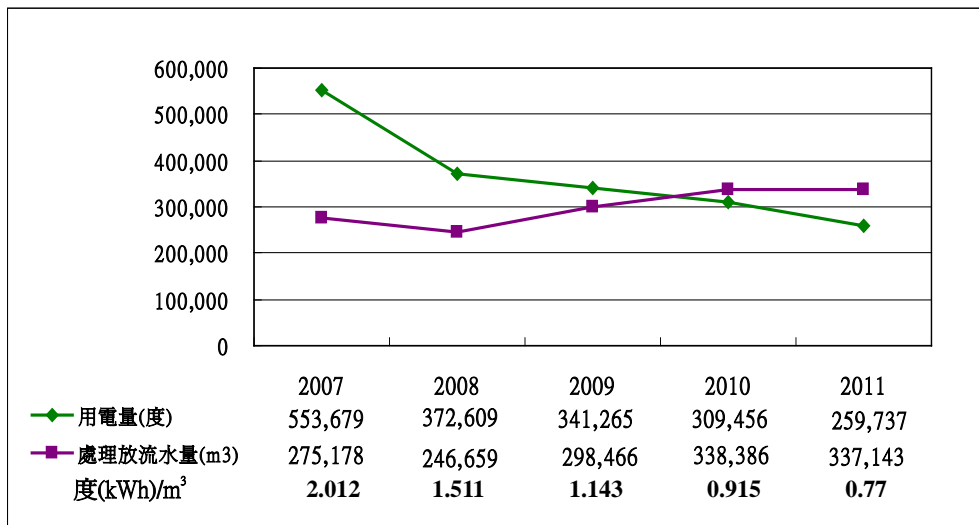


圖 8 2007 至 2011 年處理每噸污水電力耗用情形

1. 本廠節能之績效，耗電量從 2007 年的 55.4 萬度降至 2011 年的 26 萬度，但從處理每立方米污水電力耗用量來看 2011 年為  $0.77$ ，比起美、日等國的污水處理廠節能成效  $0.2\sim 0.3$ ，可見還有很大的改善空間。
2. 鼓風曝氣系統之供氣調節，本廠利用變頻器來調整鼓風機轉速，以達節能節電效果，但本廠鼓風機通過總管向每個曝氣槽供氧(本廠有 5 個曝氣槽)，以手動閘閥調整每槽的氣量，如何合理的調節不同閘門，即可以滿足不同曝氣槽的曝氣流量需要？同時又使得調節造成的壓力損失最小，鼓風機能耗最低，是未來必須解決的。
3. 調整池及中間池抽水泵工作效率待提升，本廠調整池及中間水池均使用沉水式泵浦，揚程都在  $6\sim 7\text{m}$  之間，從泵的有效功率  $NU=YQH$  可以看出當  $Y$ 、 $Q$  一定時， $NU$  與  $H$  成正比，所以降低泵揚程，可以讓節能效果更顯著。

## 58 廢(污)水處理廠節能規劃與改善-以工研院中興院區為例

4. 應用節能新技術、新設備，如太陽能發電、DO 自動控制、廢水發電(在排水口設置發電設施，利用處理後的廢(污)水發電)。

## 參考文獻

- 1.林榮忱、李金河、林文，污水處理廠泵站與曝氣系統的節能途徑，P.1，2007。
- 2.中國節能線上，污水處理廠運行的節能降耗技術進展，2011。
- 3.趙冬泉、佟慶遠、杜鵬飛、李甯、陳吉甯，我國污水處理廠節能途徑與控制技術分析，P.2。
- 4.張泳，節能控制技術在污水處理廠改造工程中的應用，2011。
- 5.ALPHA 變頻器，ALPHA 變頻器在南寧污水處理廠變頻改造應用方案，P.2～5。
- 6.張志峰、孟少卿，污水處理節能降耗問答，2010。
- 7.侯萬善，污水處理廠節能實務與案例介紹，財團法人台灣綜合研究院，2010。
- 8.內政部營建署，99 年台閩地區營建統計年報，P.4～5，2010。
- 9.內政部營建署，污水處理廠操作維護節能手冊，P.17～19，2011。
- 10.內政部營建署，污水處理廠節能規劃設計手冊，P.29，2011。

## 土壤污染

# 利用風險地圖探討都市農地管理策略

陳怡君\*、蔡鴻德\*\*、王根樹\*\*\*、馬鴻文\*\*\*\*

### 摘要

台灣農地污染問題，因灌溉渠道長年累積人為污染之外，其天然地質條件導致部分土壤含有高濃度重金屬，因此人為與自然條件下已無法釐清污染清除責任。本文標的場址若以食用作物管制標準與污染土壤管制標準作為後續農地管理策略，補償經費為 45,000 元/每公頃/每期作計算，每年須支付約新台幣 5,748 萬元補償經費，並且無經費進行整治移除污染物，造成農地無法活絡等問題。場址管制策略應整體思考風險管理與土地再生並存，不應以最大暴露劑量作為整治目標，進而場址因整治成本增加而無法活絡，本文針對農地污染場址，發展族群專一性暴露風險地圖研究方法，搭配問卷蒐集不同族群暴露參數，依照風險地圖影響族群比例，提出農地污染場址整體風險地圖，透過族群風險地圖區域空間差異及不同風險等級之土地利用方式，提出階段性土地用途改變及阻絕生活暴露型態風險管理方案，規劃高、中、低風險區域進行風險管理策略，解決農地污染因土地價值、整治技術、食物鏈風險等因素導致土地利用無法活化問題。

【關鍵字】風險地圖、土地再利用、都市農地

---

\*工業技術研究院 綠能與環境研究所 研究員

\*\*土壤及地下水污染整治基金管理會 執行秘書

\*\*\*國立台灣大學公共衛生學系 教授

\*\*\*\*國立台灣大學環境工程研究所 教授

## 一、前言

重金屬砷的毒性而言，當中 As(III)的毒性遠高於 As(V)，國際癌症研究署(IARC)已把砷及其化合物列為 Group 1(對人體有致癌危害)，即有足夠證據證明為人體致癌物質，WHO 相關環境數據亦發現中國與台灣背景濃度較高，應須關注其三價砷造成健康風險影響(WHO, 2001)。台灣土壤與地下水含有高濃度重金屬砷，(Liang 等人, 2009)風險評析結合地理資訊系統，發現地下水中含重金屬砷產生烏腳病疾病具有顯著相關。透過水產食物鏈傳遞繪製高風險潛勢地圖，研究結果顯示鄰近高濃度重金屬砷地下水之水產漁業為高風險區域，建議調整高風險區域水產養殖管理策略。重金屬砷不僅於地下水具有健康風險危害，其造成食物鏈風險隨之受到國際間重視，經由台灣政府歷年稻米作物檢測分析數據顯示，糙米濃度平均約為 0.159 mg/kg，與中國大陸食品標準局提出稻米重金屬砷管制標準為 0.15 mg/kg(Chinese Food Standards Agency, 2005)比較略高。Zhu et. al., 2008 利用中國大陸不同省份之稻米作研究分析，稻米中無機砷含總砷的 80%，As(III)則佔無機砷的 72%。導致累積三價砷稻米造成食品安全危害。然而，稻米為亞洲人主要食材，根據不同國情又有不同的料理方式，Rahman et al.(2006)認為於評估因食用稻米而導致砷的暴露劑量時，不宜直接以檢測數據作評估，而應經過一系列料理方法(如水洗及蒸煮)後，再以處理後之砷濃度予以評估暴露劑量。英國食物標準管理局相關報告指出，有效之水洗可去除稻米中 9%的無機砷；若再以水米比 6:1 作蒸煮，則平均無機砷含量可降低至未處理前的 45%(Raab, et al,2009)。蘇等人，2009 年研究顯示當土壤全量砷濃度達 200 mg/kg 以上時，筊白筍食用部位砷濃度高達 4.81 mg/kg，在食品安全上具有潛在風險。由此可知，農地作物導致健康風險基於污染物吸收特性、食物產銷傳遞及居民生活習慣等因素，影響食用作物造成居民健康風險主要因子。

污染場址是否明顯影響環境與居民健康風險，應需要有一套完整量化篩選機制，以釐清污染土地所造成鄰近居民風險危害(Tedd et al., 2001)，污染場址健康風險評估方法，常以透過量化危害風險因子評析(quantitative risk assessment, QRA)，

或場址風險機率圖(frequency of occurrence-number of fatalities curve)呈現污染場址風險特徵。污染場址健康風險評估，基於污染物分佈、土地利用特性、及居民暴露程度不同，使得居民健康風險不同而影響後續土地整治策略，管理者可依不同條件下選擇層次風險評估方法，從假設有可能發生的最嚴重情況(worse case scenario)條件下第一層次(Tier 1)原則至彈性第三層次(Tier 3)不確定性風險評估(ASTM, 2000)。因此管理者依照保護族群之健康風險標準，作為污染場址後續整治規劃與目標(USEPA, 2001)。然而，台灣政府單位大都採以最保守性決策方法，決策目標為可接受致癌風險( $10^{-6}$ )以及非致癌危害商數(1)考量，導致污染場址整治與管理決策瓶頸，尤其針對大範圍污染場址以及天然條件所導致農地污染場址，其涉及土地利用類型與受體暴露途徑複雜，造成提出農地場址風險管理決策困難。

對於污染場址風險評估方法而言，污染源擴散係因水文、地質、風險評估敏感度因子如污染物濃度分布與各影響範圍居民暴露參數差異，導致分析風險機率分布不確定性影響整治成本增減(Chen, 2007)。由此可知，污染土地再開發成本效益與污染風險影響區域範圍息息相關。對於土地管理、健康風險、環境品質等議題，地理資訊系統(GIS)是解決區域空間變異性問題良好工具。傳統結合 GIS 與健康風險概念研究，以探討大區域空氣污染物傳輸造成不同族群居民健康風險影響(Morra, 2006;2009)。甚至利用 GIS 應用於地下水含氯有機污染物，探討空間變異與污染物時序性衰減相關性研究，模擬降解副產物污染物擴散範圍(Thomas, 2008)。然而，過去風險地圖方法多著重污染物濃度擴散導致居民暴露風險影響，並未特別探討不同族群或受體暴露習性差異。

有鑑於此，本文提出針對農地污染場址，發展族群專一性風險地圖研究方法。搭配風險暴露問卷蒐集不同族群暴露參數，建構族群差異風險地圖分布。研究結果可以呈現受體空間屬性與族群暴露參數差異，導致風險地圖分布累積機率值，以作為後續管理決策參考依據。近幾年，利用地理統計區域空間自相關指標方法LISA(local indicators of spatial association)，探討環境重金屬污染與疾病致癌發生率相關性(Su, 2010)。此外結合貝式最大熵數法(bayesian maximum entropy method)癌症地圖，釐清高疾病發生族群與大尺度區域環境重金屬污染有相關(Yu, 2010)。癌症地圖僅能說明該區域居民因環境污染具有高致癌發生機率，卻無法連結受體暴露

習慣與污染特徵相關性。因此結合風險問卷與健康風險地圖研究方法，可解決癌症地圖無法釐清受體與污染場址不同接觸暴露情境之關係等問題，更可以直接印證族群致癌發生機率與污染相關性。

## 二、研究方法

### 2.1 風險地圖建構

本系統突破以往風險評估單點計算模式，把風險特徵描述之結果以風險地圖之形式顯示，並將風險評估四大步驟結合於地理資訊系統應用當中，建構污染場址風險地圖模式(arc gis for risk assessment management, 簡稱 Arc-RAM)，執行流程如圖 1 所示。主要係以小尺度之污染場址專一性風險地圖作為評估基礎，ArcRAM 對應風險評估步驟之具有空間屬性資料庫，包含場址基本資料(土地利用、村里面積、人口屬性)、污染特徵(監測資料)、環境傳輸(水文地質資料)、受體暴露(一般族群與特殊族群)...等，專一性參數調查，包含環境介質污染調查、污染物之食物鏈吸收與累積參數調查、受體暴露生活型態調查等，建構污染場址風險地圖資料庫。

### 2.2 場址基本資料蒐集

透過蒐集土地利用狀況分區圖與村里圖繪製受體屬性與土地利用連結圖，界定場址受體風險影響範圍，以釐清主要評析範圍邊界。依據環保署提供污染場址健康風險評析原則，以污染場址範圍半徑 1 公里，評估土地利用類別(如住宅區、商業區、工業區、遊憩區)與受體（如一般族群與特殊族群）相關性，解析受體暴露風險情境假設，以進行後續受體生活型態問卷參數擬定。本文場址為自然條件造成農地重金屬砷污染場址，污染範圍共計 6.387 平方公里，風險影響範圍甚大涵蓋鄰里包括 7 個村里，屬於台灣人口密度較高已開發都市區域，其土地價值具有地理區域之發展價值。

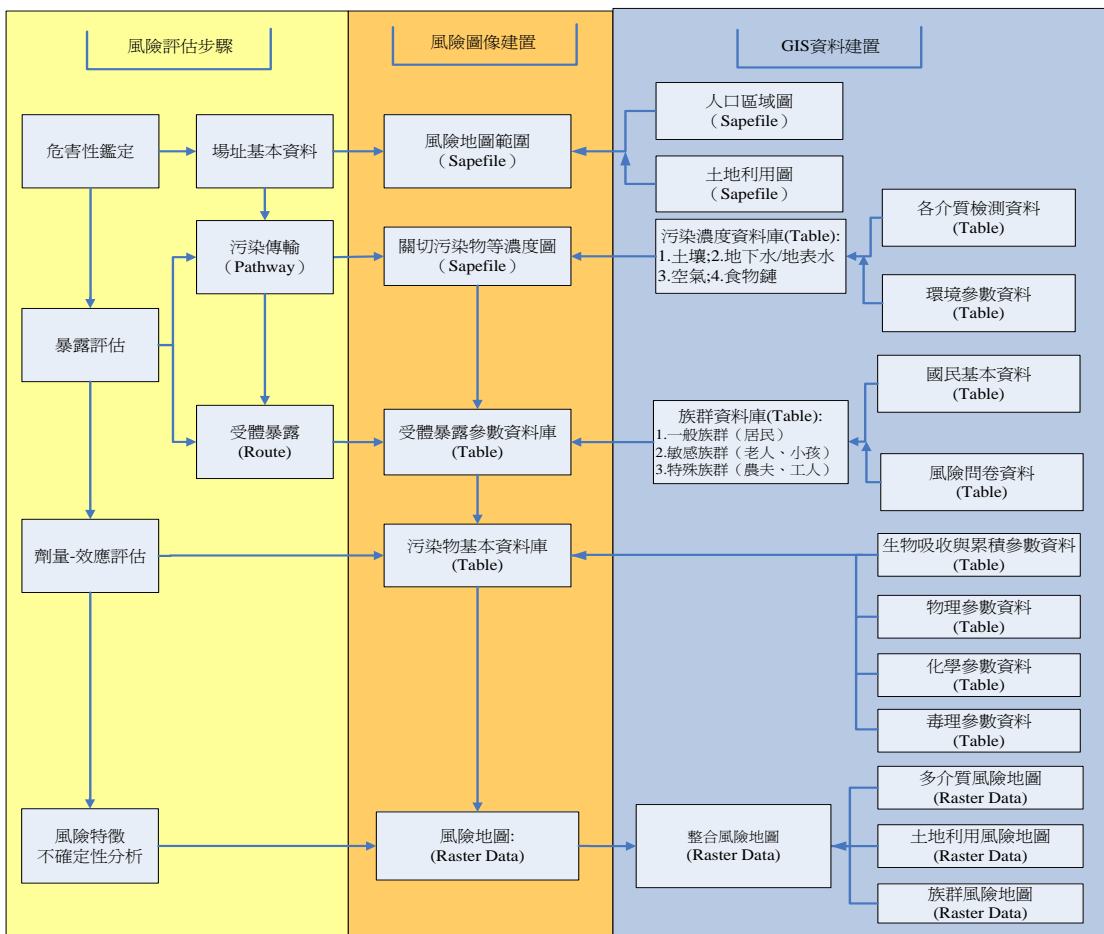


圖 1 污染場址風險地圖執行流程

### 2.3 污染特徵基本資料

歷年檢測與學術調查發現，本區表土與裡土含有高濃度重金屬砷，其中表土 (0~15cm) 之濃度為 4.75~458mg/kg；裡土 (15~30cm) 之濃度為 4.71~513mg/kg，皆超過土壤污染管制標準 60 mg/kg(TWEPA, 2004~2006)。本文使用近 5 年內之檢測資料，彙整砷的物化、毒性、皮膚滲透係數，農地污染場址因土地利用特殊性影響污染物食物鏈傳遞，生物可利用性(bioavailability)與生物蓄積性(bioaccumulation)等參數可確認植物體中吸收污染物型態與濃度，研究顯示該區域種植稻米與蔬菜具有吸收重金屬砷能力，本文彙整該區域種植作物重金屬砷含量，推估不同作物 BCF 專一性參數值。以 Natural Neighbor 地理統計方法，利用 10m\*10m 土壤介質污染

## 64 利用風險地圖探討都市農地管理策略

特徵資料格點圖，建置 AOC 範圍內農地種植食用作物類型與地理資料庫，以推估食用作物重金屬砷含量參考依據。此外依據環保署 2010 年進行場址土壤重金屬砷價數分析，釐清本文場址土壤屬於無機三價砷佔比約 16.6%(TWEPA, 2010)。

### 2.4 受體暴露情境訪查

透過居民風險問卷訪查可以瞭解居民暴露於關切污染物之途徑、接觸頻率、接觸時間及食物攝入量...等訊息，本文依據影響範圍上下游之人口密度、人口屬性(年齡比例、性別比例)及不同族群人口特徵比例(一般族群與特殊族群)，決定各村里進行抽樣訪視之調查問卷數，並調整敏感族群(如老人及孩童)或高風險族群(特殊工作者如農夫或污染區下游居民)之調查訪視人數，風險問卷採樣流程如圖 2 所示。依據生活型態問卷反映不同族群與場址污染物暴露特徵關係，透過建置於 ArcRAM 不同族群受體暴露參數資料庫，重新校正污染場址鄰近不同族群暴露風險途徑，以提供受體專一性暴露參數資料，包含受體基本資料(性別、體重、年齡、居住年限、及受訪者與調查地點之關係)；接觸途徑與接觸史(環境介質接觸途徑與型態、接觸時間與頻率)；飲食習慣，如食用污染土地上所種植或養殖的農牧產品比例、食材之食用量與食用頻率...等(圖 3)。

本文規劃場址不同族群取樣分配數，依據人口屬性比例成人與孩童分別為 87.6%：12.4% 進行問卷分配，規劃一般族群(成人、孩童)與特殊族群(農夫)問卷數比例為 78%：17%：5%，以維持族群保護比例原則，問卷份數共計 307 份問卷佔影響人口數約 0.8%。根據問卷結果，提出場址居民暴露途徑包括：1. 污染物經受體「使用地表水導致皮膚接觸」進入人體；2. 污染物經受體「誤食土壤」進入人體；3. 污染物經受體「接觸土壤」進入人體；4. 污染物經「食物鏈」進入人體；5. 污染物經受體「吸入懸浮微粒」由人體所吸收。

各暴露公式如下所述：

- [途徑一]：使用地表水皮膚接觸

$$Intake_{dermal-water} = \frac{DA_{event} \times Ev_{freq} \times SA}{BW}; DA_{event} = K_p \times C_{water} \times F \times t_{event} \times CF$$



[途徑二]：誤食土壤

$$Intake_{oral-soil} = \frac{C_{soil} \times F \times IR_{oral-soil} \times FI}{BW} \times CF ; FI = \frac{EV_{freq} \times t_{event}}{8}$$

● [途徑三]：土壤皮膚接觸

$$Intake_{dermal-soil} = \frac{DA_{event} \times Ev_{freq} \times SA \times f_{sa}}{BW}$$

$$DA_{event} = C_{soil} \times F \times AF \times ABS_d \times CF$$

● [途徑四]：食物鏈傳遞

$$Intake_{food} = \frac{\sum i [Conc_i \times F \times (RC_{cooked-washing}) \times CR_i \times Frac_i]}{BW}$$

● [途徑五]：吸入懸浮微粒

$$Intake_{inh-soil} = \frac{C_{air} \times IR_{inhal}}{BW}$$

$$Risk = \frac{ED}{AT} \times \frac{EF}{365} \times SF \times \sum i ADD_i ;$$

$$\sum i ADD_i = Intake_{oral-soil} + Intake_{inh-soil} + Intake_{food} + Intake_{dermal-soil} + Intake_{dermal-surfacewater}$$

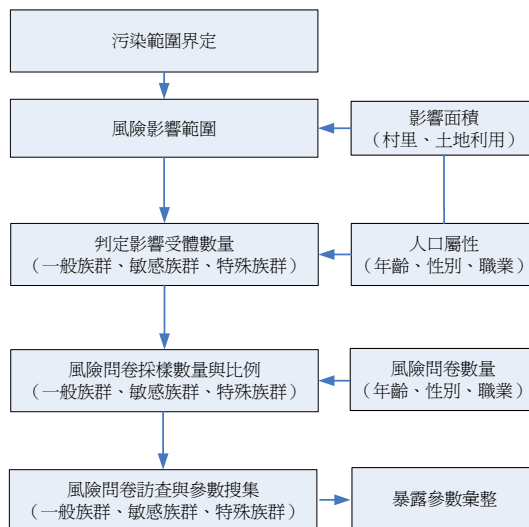


圖 2 風險問卷訪查規劃流程圖

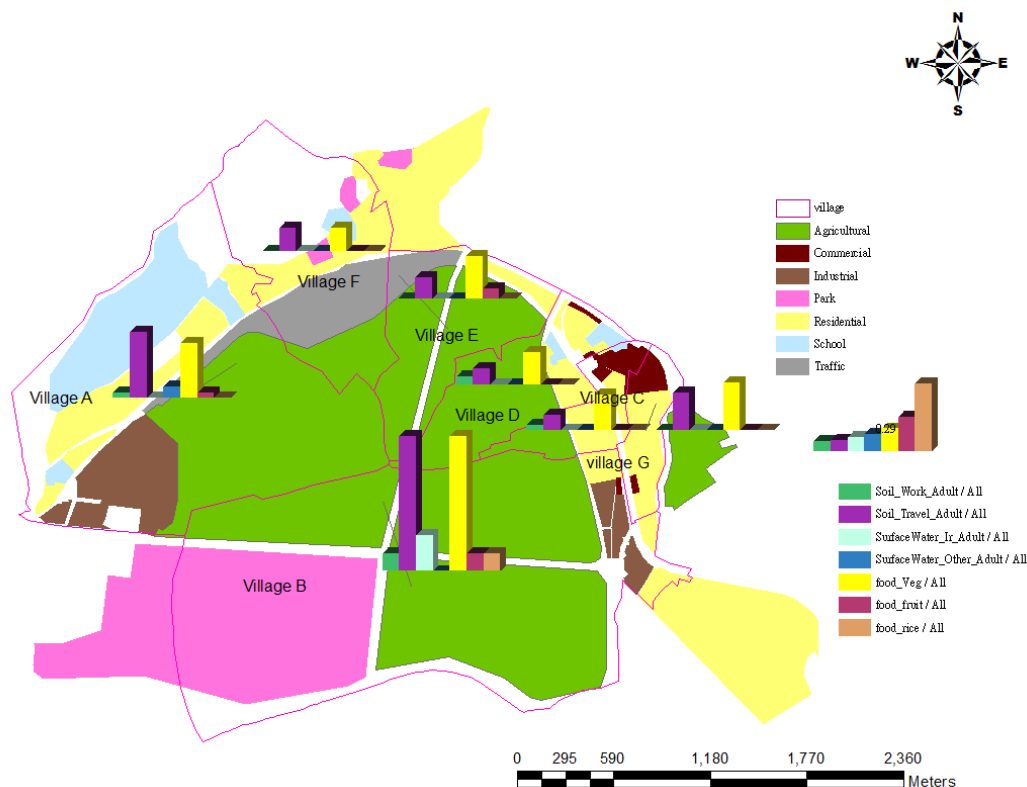


圖 3 各村里族群與環境介質接觸暴露統計圖

### 三、結果與討論

本文透過「介質濃度資料庫」、「環境參數資料庫」、「風險問卷資料庫」等專一性參數數據呈現污染場址風險分布範圍，其概念與傳統污染場址進行第三層次不確定性分析風險機率分布相同，但風險地圖可呈現空間分布概念呈現，已解決不確定性分析無法提供管理者明確區域風險空間分布問題，如表 1 所示，風險地圖與蒙地卡羅不確定性分析累積風險分布約差一個數量級。並進一步分析本案例場址各村里各暴露途徑風險共獻百分比(表 2)本污染場址因高風險主要原因為大面積農業用地造成食物鏈風險，食物鏈於任何受體均是致癌風險的最大貢獻源，其中致癌風險值之貢獻超過 90%，造成食物鏈貢獻量最大的原因，係因風險暴露途徑中食物自

污染範圍比例以及國民食用稻米飲食習慣所引起，透過食物鏈傳遞已造成長期造成健康上危害。依據各受體暴露途徑敏感度分析結果顯示(表 3)，土壤中砷污染物濃度變化是三種受體最主要敏感參數之一，其次則為體重與蔬菜自污染範圍之比例，此外攝食污染範圍內食物比率也是需要考量因子之一，因此本案例受體暴露情況，係以食物鏈為最關切風險貢獻值為主。以高暴露風險農夫族群而言，農夫風險分布範圍較窄，主要原因為農夫為特殊接觸風險族群，基於農夫問卷結果顯示暴露情形與生活習慣相近，而且因農夫族群占整體人口比例低(5%)，本文並未區分空間尺度農夫暴露參數差異，僅由農夫問卷結果作為一致化之暴露參數與污染連結關係，並未區分不同村里農夫暴露參數高低，導致農夫風險等級範圍不因暴露參數影響而呈現較窄分布差異較小。

表 1 風險地圖與不確定性累積機率風險百分位

分析方法	族群	2.50%	20%	50%	90%	97.50%	mean	sd
Monte Carlo	整體	$1.39 \times 10^{-5}$	$4.87 \times 10^{-5}$	$1.04 \times 10^{-4}$	$2.70 \times 10^{-4}$	$3.99 \times 10^{-4}$	$1.31 \times 10^{-4}$	$1.04 \times 10^{-4}$
Riskmap	整體	$2.22 \times 10^{-6}$	$2.85 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-5}$	$6.44 \times 10^{-5}$	$1.00 \times 10^{-4}$	$2.30 \times 10^{-5}$	$2.70 \times 10^{-5}$
	成人	$3.60 \times 10^{-7}$	$1.94 \times 10^{-6}$	$6.44 \times 10^{-6}$	$3.90 \times 10^{-5}$	$1.01 \times 10^{-4}$	$1.72 \times 10^{-5}$	$4.27 \times 10^{-5}$
	孩童	$1.56 \times 10^{-10}$	$2.29 \times 10^{-9}$	$1.72 \times 10^{-9}$	$1.52 \times 10^{-6}$	$5.58 \times 10^{-6}$	$5.70 \times 10^{-7}$	$1.80 \times 10^{-6}$
	農夫	$1.83 \times 10^{-5}$	$2.70 \times 10^{-5}$	$1.09 \times 10^{-4}$	$5.82 \times 10^{-4}$	$9.13 \times 10^{-4}$	$2.14 \times 10^{-4}$	$2.48 \times 10^{-4}$

從不同族群風險地圖結果得知，可知除兒童族群暴露風險較小外，成人與特殊族群農夫已部分區域暴露風險超過一般可接受標準。由圖 3 顯示風險暴露途徑主要來自於「食物鏈攝入」與「皮膚接觸污染土壤」。一般居民與孩童接觸污染土壤途徑以遊玩居多(佔 17.7%)；特殊族群接觸污染土壤則以工作途徑居多(佔 100.0%)，因此若需降低受體暴露途徑主要來源，仍應將高濃度污染土壤阻隔與受體接觸。然而，考量不同族群風險地圖分布型態外，經由不同族群風險圖像與暴露族群人口數比例修正整體風險圖像，於 95%信賴區間下，風險地圖分布範圍  $2.22 \times 10^{-6}$  至  $1.00 \times 10^{-4}$ ，略高於成人風險地圖分布。目前污染場址整治目標，係以 95%UCL(upper confidence level)單一健康風險值標準，則需 584 公頃全面積進行污染場址整治，不僅造成農地禁止使用外，使得該區域土地因整治成本太高而無法使土地價值再活絡。

表 2 不同村里之各暴露族群風險途徑貢獻百分比

暴露途徑		皮膚接觸地表水	誤食土壤	皮膚接觸土壤	食物鏈攝入	吸入揚塵	總風險
Village A	成人	0.0%	0.2%	0.3%	99.4%	0.0%	100%
	孩童	-	1.8%	3.6%	94.5%	0.0%	100%
	農民	0.2%	5.9%	0.5%	93.4%	0.0%	100%
Village B	成人	0.0%	1.8%	2.1%	96.1%	0.0%	100%
	孩童	-	-	-	-	100.0%	100%
	農民	0.0%	4.2%	0.4%	95.4%	0.0%	100%
Village C	成人	-	3.0%	3.5%	93.6%	0.0%	100%
	孩童	-	3.5%	7.0%	89.5%	0.0%	100%
	農民	0.0%	4.2%	0.4%	95.8%	0.0%	100%
Village D	成人	-	1.0%	1.1%	98.0%	0.0%	100%
	孩童	-	-	-	100.0%	0.0%	100%
	農民	0.1%	3.9%	0.3%	95.8%	0.0%	100%
Village E	成人	-	0.2%	0.3%	99.5%	0.0%	100%
	孩童	-	-	-	-	100.0%	100%
	農民	0.0%	4.2%	0.4%	95.3%	0.0%	100%
Village F	成人	-	1.8%	2.2%	95.8%	0.0%	100%
	孩童	-	33.1%	66.9%	-	0.0%	100%
	農民	0.5%	4.1%	0.4%	95.1%	0.0%	100%
Village G	成人	-	1.2%	1.4%	97.3%	0.0%	100%
	孩童	-	0.8%	1.7%	98.1%	0.0%	100%
	農民	0.0%	4.2%	0.4%	95.2%	0.0%	100%

表 3 單一風險值(95%UCL)與敏感度因子彙整表

受體	暴露途徑	單一風險值(95%UCL)						不確定性風險
		皮膚接觸 地表水	誤食土壤	皮膚接觸 土壤	食物鏈攝 入	吸入揚塵	總風險	整體(Certainty: 95%)
全體	致癌風險	$4.12 \times 10^{-9}$	$2.24 \times 10^{-6}$	$3.95 \times 10^{-7}$	$3.97 \times 10^{-5}$	$1.50 \times 10^{-12}$	$4.23 \times 10^{-5}$	$1.41 \times 10^{-5} \sim 4.10 \times 10^{-4}$
	貢獻比	0.01%	5.28%	0.93%	93.77%	<0.009%	100.00%	敏感度因子 ■ 三價砷佔比：63.8% ■ 攝食污染範圍蔬菜比例：7.0% ■ 攝食污染範圍稻米比例：1.6% ■ 攝食污染範圍雞鴨比例：17.1%
成人	致癌風險	$1.23 \times 10^{-9}$	$8.47 \times 10^{-7}$	$3.11 \times 10^{-7}$	$3.76 \times 10^{-6}$	$1.50 \times 10^{-12}$	$4.92 \times 10^{-6}$	$3.22 \times 10^{-6} \sim 1.56 \times 10^{-4}$
	貢獻比	0.03%	17.23%	6.32%	76.42%	<0.009%	100.00%	敏感度因子 ■ 三價砷佔比：49.7% ■ 攝食污染範圍蔬菜比例：24.3% ■ 攝食污染範圍稻米比例：11.7% ■ 攝食污染範圍雞鴨比例：-
孩童	致癌風險	-	$9.16 \times 10^{-7}$	$2.56 \times 10^{-7}$	$1.18 \times 10^{-6}$	$1.97 \times 10^{-12}$	$2.35 \times 10^{-6}$	$3.64 \times 10^{-7} \sim 7.77 \times 10^{-5}$
	貢獻比	-	38.92%	10.90%	50.17%	<0.009%	100.00%	敏感度因子 ■ 三價砷佔比：28.2% ■ 攝食污染範圍蔬菜比例：50.3% ■ 攝食污染範圍稻米比例：- ■ 攝食污染範圍雞鴨比例：-
農民	致癌風險	$8.45 \times 10^{-8}$	$3.02 \times 10^{-5}$	$8.63 \times 10^{-6}$	$1.89 \times 10^{-4}$	$1.50 \times 10^{-12}$	$2.28 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-5} \sim 4.82 \times 10^{-4}$
	貢獻比	0.04%	13.27%	3.78%	82.91%	<0.009%	100.00%	敏感度因子 ■ 三價砷佔比：66.9% ■ 攝食污染範圍蔬菜比例：6.2% ■ 攝食污染範圍稻米比例：1.3% ■ 攝食污染範圍雞鴨比例：13.9%

有鑑於此，本文另外依據整體風險地圖結合土地利用面積估算結果，提出不同風險等級影響面積之土地利用轉換策略，進而提供管理者與政府單位評估後續場址分區風險管理策略及整治經費估算。本文統計不同致癌風險等級所影響土地利用面積大小(圖 4)。進而提出風險地圖不同影響等級(第一等級： $R > 1 \times 10^{-5}$ ;第二等級： $1 \times 10^{-5} < R < 1 \times 10^{-6}$ ;第三等級： $R < 1 \times 10^{-6}$ )管理策略。此外，以各村里不同族群風險地圖結果，計算影響致癌人口數與超過可接受風險影響範圍彙整於表 4。本文統計不同致癌風險等級下，各村里(空間)所影響土地利用面積值。以土地利用角度，建議場址依據不同風險等級提出污染整治與風險管理策略。

第一風險等級( $R > 1 \times 10^{-5}$ )：整體風險影響範圍約計 1.13 平方公里，涵蓋 Village

## 70 利用風險地圖探討都市農地管理策略

B、Village C、Village D、Village G 部分區域。上述區域為重金屬砷污染濃度較高，且影響居民人口數亦是全區域較高者。導致受體因接觸污染土壤導致暴露風險較高。依據圖 4 可知土地利用佔比以農業用地>住宅用地>工商用地。影響村里面積為 Village B>Village C>Village G>Village D。本區域大多為農業用地與公園用地，因此建議後續場址管理以清除污染土壤為優先，或以利用土地變更其他用途阻隔受體接觸污染介質暴露途徑。管理策略可將農地之土地用途轉換，如開發低密度住宅區。尤其此風險等級影響居民人口數與人口密度亦較高，對於住宅需求率相對較其他區域為高。以影響面積最高之 Village B 而言，該村里土地用途多為農業用地，建議可優先改善 Village B 農業土地用途，透過土地用途改變增加既有農地價值。增加土地效益進而補貼農地無法耕種等基本生存問題，改善當地居民生活品質。

第二風險等級( $1*10^{-5}<R<1*10^{-6}$ )：本區域污染介質濃度較低但範圍廣泛，共計 4.732 平方公里。圖 4 顯示此風險等級土地利用影響面積以農業用地>其他用地>住宅用地。農業用地較高共計 3.492 平方公里，建議本區域仍以農地風險管理方案為主。影響村里區域面積以 Village B>Village A>Village E>Village D>Village G>Village C>Village F。由於此風險等級範圍，涉及大部分村里各族群受體風險，其中主要風險途徑以食物鏈途徑為主，禁止種植食用作物摒除最大暴露途徑為主要風險管理策略。此外本場址污染範圍廣闊，故以工程方法或生化處理之方法作整治，其成本未必符合經濟效益且造成農地無法再生。因此透過風險管理方式農戶改變種植形態。建議將農業土地變更為公園用地，種植非食用性作物與經濟價值較高者(如觀賞性植物)，特別是對無機砷吸附能力較高的非食用性植物，以對土壤中無機砷作物去除。本文場址原估計 4.814 平方公里農業用地超過忍受健康風險標準需進行整治，若以政府輔導農民轉作 45,000 元/每公頃/每期作補償經費。透過建行農地風險管理柔性措施，僅需 3.492 平方公里進行補貼，由此管理策略可降低補償經費每期作約 594 萬元經費。

第三風險等級( $R<1*10^{-6}$ )：本區域涵蓋影響範圍共計 0.518 平方公里，涵蓋村里為 Village A、Village B、Village E、Village F，主要影響土地用途為農業用地與其他交通用地，由於受體風險以低於一般可接受致癌風險值，建議本區域持續監測污染特徵無須進行污染物清除。

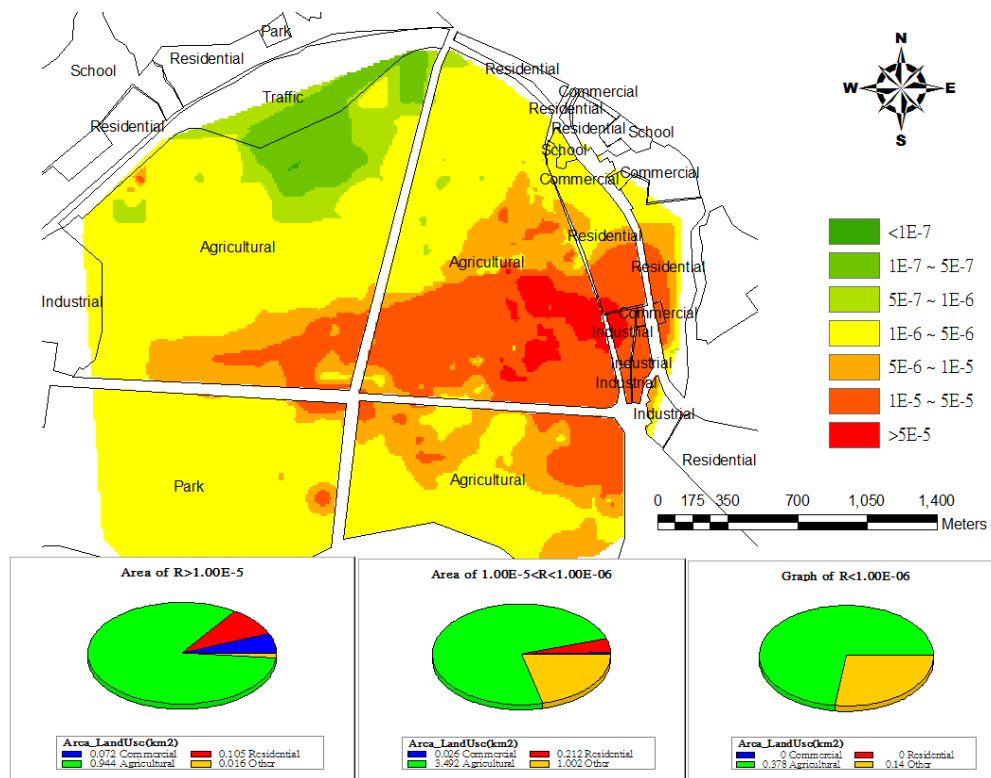


圖 4 污染場址不同風險等級土地利用比例

#### 四、結論

本文針對農地污染場址，發展族群專一性暴露風險地圖。搭配風險暴露問卷蒐集不同族群暴露參數。依照風險地圖影響族群比例，提出農地污染場址整體風險地圖。本文可應用於涉及面積廣泛與都市化農地污染管理問題。對於都市人口密集較高區域，土地利用已漸漸轉換成較高價值利用型態，污染場址再生應整體思考風險管理型態，不應僅保護高暴露族群健康經由最大暴露劑量作為整治目標，導致場址因整治成本增加而無法活絡，並損及土地再利用永續發展。提出風險管理與污染場址整治策略，應可將風險區域劃分等級，依據高風險(如風險地圖中，風險大於  $1.00 \times 10^{-5}$  者)且人口密度較高區域先行整治或重新思考土地利用型態。風險值介於  $1.00 \times 10^{-5}$  與  $1.00 \times 10^{-6}$  之間，建議柔性進行農地風險管理，使土地達到最適之利用，

## 72 利用風險地圖探討都市農地管理策略

又不會對人體健康風險產生疑慮。利用空間(村里)呈現風險等級差異，風險地圖研究方法探討不同風險等級下所影響土地利用面積比例。因此，此研究方法提供在不同風險等級下之詳細土地利用面積比例差異。管理者可以依據研究結果考量分階段進行風險管理策略，依據此方法可以降低農地補償經費每期作約 594 萬元經費。

**表 4 案例一風險地圖各里風險分布與超過可接受風險影響面積彙整表**

村里		Village A				Village B				Village C				Village D											
族群分類		成人		孩童		農夫		成人		孩童		農夫		成人		孩童		農夫							
致癌人口風險值		3.6*10 <sup>-2</sup>		7.8*10 <sup>-3</sup>		6.3*10 <sup>-2</sup>		6.3*10 <sup>-2</sup>		5.0*10 <sup>-10</sup>		4.1*10 <sup>-2</sup>		1.2*10 <sup>-2</sup>		1.14*10 <sup>-3</sup>		2.5*10 <sup>-1</sup>		4.9*10 <sup>-3</sup>		3.3*10 <sup>-3</sup>		2.2*10 <sup>-1</sup>	
項次	單位	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他				
第三風險等級： R<1*10 <sup>-6</sup>	公頃	0	0	10	0.6	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
第二風險等級： 1*10 <sup>-5</sup> <R<1*10 <sup>-6</sup>	公頃	3.5	0	92	0.4	1.4	0.4	110	98	0.6	7.5	6.4	0	0.6	7.5	6.4	0	0.6	7.5	6.4	0				
第一風險等級： R>1*10 <sup>-5</sup>	公頃	0	0	0	0	6.8	4.3	90	1.6	0	2.9	2.0	0	0	2.9	2.0	0	0	2.9	2.0	0				
村里		Village E				Village F				Village G				整體											
族群分類		成人		孩童		農夫		成人		孩童		農夫		成人		孩童		農夫		成人		孩童		農夫	
致癌人口風險值		1.4*10 <sup>-2</sup>		3.8*10 <sup>-11</sup>		2.1*10 <sup>-2</sup>		3.5*10 <sup>-4</sup>		1.1*10 <sup>-6</sup>		4.5*10 <sup>-3</sup>		1.5*10 <sup>-2</sup>		6.1*10 <sup>-4</sup>		8.7*10 <sup>-2</sup>		3.2		0.6		0.3	
項次	單位	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他	工商	住宅	農業	其他				
第三風險等級： R<1*10 <sup>-6</sup>	公頃	0	0	13	1.6	0	0	14	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37.5	14.2				
第二風險等級： 1*10 <sup>-5</sup> <R<1*10 <sup>-6</sup>	公頃	0	0	6	0	0	0	0.1	0	0	6.5	39	0	5.5	21	293.5	99.6								
第一風險等級： R>1*10 <sup>-5</sup>	公頃	0	0	0	0	0	0	0	0	0.4	3.2	0	0	7.2	10.4	93.5	1.6								



## 參考文獻

- 1.ASTM, 2000. E2081-00 Standard Guide for Risk-Based Corrective Action.
- 2.Bartsch, C., Wells, B., 2005. State brownfield financing tools and strategies, Northeast-Midwest Institute.
- 3.Chen, Y.C., Ma, H.W., 2007. Combining the cost of reducing uncertainty with the selection of risk assessment models for remediation decision of site contamination. *Journal of Hazardous Materials* 141, 17-26.
- 4.De Sousa Christopher A., 2000. The brownfield problem in urban Canada issues, approaches and solutions (Ontario). Department of Geography, University of Toronto.
- 5.Gentile, A. R., 2000. Management of contaminated sites in Western Europe. Umweltbundesamt Austria, Irene Edelgaard, Danish Environment Protection Agency.
- 6.Groundwater Services, Inc., 2000. Risk-Based Corrective Action, GSI-RBCA.
- 7.Hu, S.-W., 2003. Compilation of exposure parameters, Taiwan (In Chinese).
- 8.Integrated Risk Information System, IRIS.
9. Liang, C. C., Jang, C. S., Liu, C. W., Lin, K. H., Lin, M. C., 2010. An integrated gis-based approach in assessing carcinogenic risks via food-chain exposure in arsenic-affected groundwater areas. *Environ. Toxicol* 25(2), 113-123.
- 10.Louisiana Department of Environmental Quality, 2003. Risk Evaluation Corrective Action Program, LDEQ-RECAP.
- 11.Ministry for the Environment, New Zealand, 2001. Contaminated Land Management Guidelines-Risk screening system.
- 12.Morra, P., Bagli, S., Spadoni, G., 2006. The analysis of human health risk with a detailed procedure operating in a GIS environment. *Environment International* 32, 444-454.

#### 74 利用風險地圖探討都市農地管理策略

- 13.Morra, P., Lisi, R., Spadoni, G., Maschio, G., 2009. The assessment of human health impact caused by industrial and civil activities in the pace valley of messina. *Science of the Environment* 407, 3712-3720.
- 14.Raab, A., Feldmann, J., Meharg, A.A., 2009. Levels of Arsenic in Rice: The Effects of Cooking. Food Standards Agency, United Kingdom.
- 15.Rahman, M.A., Hasegawa, H., Miah, M.A.M., 2006. Influence of cooking method on arsenic retention in cooked rice related to dietary exposure. *Science of the Total Environmental* 370, 51-60.
- 16.Su, C.-C., Lin, Y.-Y., Chang, T.K., Chiang, C.-T., Chung, J.-A., Hsu, Y.-Y., Lian, I.-B., 2010. Incidence of Oral Cancer in Relation to Nickel and Arsenic Concentrations in Farm Soils of Patients' Residential Areas in Taiwan. *BMC Public Health*.
- 17.Su, S.-W., Liu, T.-L., Chen, Z.-S., 2009. Arsenic contaminated soil and crop food security: current research Guantu Plain literature review and the Global Case. Beitou District Conference Proceedings arsenic pollution (In Chinese).
- 18.Tedd, P., Charles, J.-A., Driscoll R., 2001. Sustainable brownfield redevelopment-risk management. *Engineering Geology* 60, 333-339.
- 19.Thomas, K., Joachim, H., Susanne, H., Thomas, C., Harald, F., 2008. Assessment of a groundwater contamination with vinyl chloride (VC) and precursor volatile organic compounds (VOC) by use of a geographical information system (GIS). *Int. J. Hyg. Environ.-Health* 211, 308-317.
- 20.Thornton, G., Franz, M., Edwards, D., Pahlen, G., Nathanail, P., 2007. The challenge of sustainability: incentives for brownfield regeneration in Europe. *Journal of Environmental Science & Policy* 10, 116-134.
- 21.Thomas M. R., 2002. A GIS-based decision support system for brownfield redevelopment. *Landscape and Urban Planning* 58, 7-23.
- 22.TEPA, 2006. Site soil and groundwater pollution health risk assessment principles Comment, Taipei (In Chinese).

23. TEPA, 2010. Amendment, Enhancement and Consultation of the Human Health Risk Assessment Protocol for Soil and Groundwater Contaminated Sites, Taipei (In Chinese).
24. TEPB, 2009. Taipei soil and groundwater pollution investigation and verification work plan, Taipei (In Chinese).
25. U.S. EPA, 1991. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part B, Development of Risk-based Remediation Goal. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C.
26. U.S. EPA, 1998. Characteristics of Sustainable Brownfields Projects.
27. U.S. EPA, 2003. Using the triad approach to streamline brownfields site assessment and Cleanup.
28. U.S. EPA, 2004. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, D.C.
29. World Health Organization, 2001. Environmental Health Criteria 224- Arsenic and Arsenic Compounds, second ed.
30. Yu, H.-L., Chiang, C.-T., Lin, S.-D., Chang T.-K., 2010. Spatiotemporal Analysis and Mapping of Oral Cancer Risk in Changhua County (Taiwan): an application of generalized Bayesian Maximum Entropy method. *Annals of Epidemiology*.
31. Zhu, Y.-G., Sun, G.-X., Lei, M., Teng, M., Liu, Y.-X., Chen, N.-C., Wang, L.-H., Carey, A.M., Deacon, C., Raab, A., Meharg, A., Williams, P.N., 2008. High Percentage Inorganic Arsenic Content of Mining Impacted and Nonimpacted Chinese Rice. *Environ. Sci. Technol.* 42, 5008-5013.



## 廢棄物資源化技術

## TFT-LCD 廢玻璃製備無機聚合物之研究

林凱隆\*、許皓翔\*\*、鄭大偉\*\*\*、黃兆龍\*\*\*\*

## 摘要

近年來資訊產業發展迅速，使得 TFT-LCD 面板出貨量大量增加，屆時將大量廢棄 TFT-LCD 廢棄玻璃亟待處置。因 TFT-LCD 廢玻璃主要組成爲  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，適合作爲無機聚合物合成之鋁矽酸鹽原料，故本文主要係利用 TFT-LCD 廢玻璃以不同  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比(0.8~2.0)及不同取代量(0~40%)與偏高嶺土以鹼激發方式製備無機聚合物，並探討添加 TFT-LCD 廢玻璃對無機聚合抗壓強度發展之影響，並輔以熱傳導、FTIR 及 SEM 觀察其微結構變化，以評估 TFT-LCD 廢玻璃合成無機聚合物作爲綠色水泥之潛力。結果顯示，當廢玻璃取代量越高，當  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  爲 2.0 時，其凝結時間有顯著延後的現象。在鹼性環境下， $\text{OH}^-$  離子會提高原料的溶解，致使系統中反應加速，進而使  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的溶解力增加；TFT-LCD 廢玻璃無機聚合物其抗壓強度隨著  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比的增加而增加，此爲溶解性矽酸鹽類所形成之齊聚物會加速縮聚反應所致；當養護齡期 28 天時， $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比爲 2.0、TFT-LCD 廢玻璃取代量爲 10%之無機聚合物抗壓強度爲 48 MPa 與純偏高嶺土無機聚合物(51 MPa)相當；另外，熱傳導分析結果顯示，隨著  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  及 TFT-LCD 廢玻璃取代量的增加，其熱傳導係數有些微上升之現象；FTIR 圖譜顯示，TFT-LCD 廢玻璃無機聚合物其主要影響爲波數於  $1,000\text{ cm}^{-1}$  處之 Si-O-T 鍵結。綜合上述結果顯示，TFT-LCD 廢玻璃無機聚合物具有做爲營建資材之潛力，且可達減少  $\text{CO}_2$  排放及省能之目標。

【關鍵字】TFT-LCD、無機聚合物、抗壓強度、偏高嶺土、 $\text{CO}_2$  排放

\*國立宜蘭大學環境工程所 教授

\*\*國立宜蘭大學環境工程所 碩士

\*\*\*國立台北科技大學資源工程研究所 教授

\*\*\*\*國立台灣科技大學營建工程系暨研究所 教授

## 一、前言

近年來，由於資訊科技產業蓬勃發展，使得薄膜電晶體液晶顯示器(TFT-LCD, thin-film transistor liquid crystal display) 面板需求量大增，根據 displaysearch research 統計資料顯示，於 2010 年其大尺寸 TFT-LCD 面板出貨量達較 2009 年成長 25.6%，其出貨量達 164.8 Mm<sup>2</sup>，若根據面板玻璃平均比重 2.57 計算，屆時將有 300 萬噸待處理之 TFT-LCD 廢玻璃；另外，於 TFT-LCD 製造業中，其廢棄物再利用率僅為 69%<sup>[1]</sup>，爲了提高 TFT-LCD 廢玻璃的再利用率，必須提供更多 TFT-LCD 再利用的管道，以達成 TFT-LCD 廢玻璃達到零廢棄全資源化的目標。

根據經濟部事業廢棄物再利用種類及管理方式，目前廢玻璃再利用途徑有：玻璃原料、陶瓷磚製品原料、粒料原料、混凝土粒料、瀝青混凝土粒料、玻璃纖維板原料(線玻璃纖維)、水泥原料或水泥製品原料。表 1 爲目前國內廢玻璃再利用研發之成果。

表 1 TFT-LCD 廢玻璃再利用方式

回收處理項目	主要產品	回收技術簡介
TFT-LCD廢玻璃	透水磚 <sup>[2]</sup> 植草磚 高壓磚	將TFT-LCD廢玻璃以不同粒徑之廢玻璃取代天然粒料，再依照不同粒料漿體比(70:30、75:25、80:20)及不同取代量(0~30%)來製成透水磚、高壓磚、植草磚，其結果符合CNS之標準。
TFT-LCD廢玻璃	環保地磚 <sup>[3]</sup>	利用工業廢棄物焚化底渣及 TFT-LCD 廢玻璃以不同比例(0~40%)取代黏土原料，並以不同燒結溫度(900~1,200℃)燒製環保地磚，其結果顯示以添加量20 %之TFT-LCD廢玻璃調質環保地磚爲佳。
TFT-LCD廢玻璃	水泥生料 <sup>[4]</sup>	將TFT-LCD廢玻璃破碎、球磨後，取代水泥製程中之天然生料，其製造出之環保水泥物化性質與市售OPC I 型相當。
TFT-LCD廢玻璃	多孔陶瓷 <sup>[5]</sup>	將TFT-LCD廢玻璃與廢觸媒經破碎、球磨後，並以不同燒結溫度(600~950 ℃)燒製多孔陶瓷，其結果顯示燒製之壁磚，符合CNS之規範，且具有調濕之能力。
TFT-LCD廢玻璃	高級強化步道磚 <sup>[6]</sup> 高性能預拌混凝土	將面板拆解後，進行密閉破碎，經由熱處理將液晶析出分解，在將廢玻璃磨碎加入玻璃粉末，製作強化步道磚及高性能預拌混凝土。

TFT-LCD 玻璃基板其主要化學組成與傳統玻璃不同(如表 2)，屬於低鹼型硼矽玻璃，因 TFT-LCD 玻璃基板在製程中，為避免鹼金屬離子藉由擴散的方式移動至晶體電路中，造成電路板短路，故於製程中利用 CaO 取代 Na 及 K 等鹼金屬離子，使得鹼金屬含量低於 1% 以下<sup>[7]</sup>。TFT-LCD 的主要組成為 SiO<sub>2</sub> 與 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，而鋁矽礦物通常利用鹼激發的方式來製成材料，因此，TFT-LCD 可取代部分鋁矽酸鹽礦物做為鹼激發膠結材中之原料。

表 2 常見玻璃之主要化學組成<sup>[8]</sup>

	formers			modifiers					Softening Temp(°C)
	SiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	CaO	PbO	
fused silica	99.8					0.1	0.1		1,600
vykor	96.0	3	1						
pyrex	81.0	13	2	3.5	0.5				830
soda silica	72.0		1	20.0		3.0	4.0		
lead silica	63.0		1	8.0	6.0		1.0	21.0	
window	72.0	1	2	15.0	1.0	4.0	5.0		700
e glass	55.0	7	15	1.0	1.0		21.0		830

## 二、鹼活化技術

鹼活化技術為一提供廢棄物再利用之方式，如 CFB(circulating fluid bed)飛灰與水洗浮渣可做為卜作嵐材料應用於水泥上<sup>[9,10]</sup>。根據 Palomo 等人設立 2 種主要鹼活化膠結材系統，第 1 種為活化爐石(Si+Ca)，其 CSH 為主要的反應產物，第 2 種為鹼活化(Si+Al)，一般例子為鹼活化偏高嶺土或 F 級飛灰<sup>[11]</sup>。第 1 種膠結材最早是始於 Purdon 所開始發展，主要是以氫氧化鈉作為活化劑，活化爐石(blast furnace slag)所產生一具有膠結性之材料，而後，Glukhovsky 在將此膠結材料用於古代建築上，並且命名為「soil-cement」，而又有其它學者稱為「alkali-slag cement」或「alkali-activated slag cement」。而這種膠結材料可由天然的鋁矽酸鹽礦物與鹼性之工業廢棄物混合產生。這種膠結材料反應的主要產物為矽酸鈣水化物、鋁矽酸鈣水化物與鋁矽酸鈉水化物，其鹼活化物可分為 6 類(其中 M 為鹼金屬離子)：(1)鹼

性(MOH)；(2)弱酸鹽( $M_2CO_3$ ,  $M_2SO_3$ ,  $M_3PO_4$ , MF)；(3)矽酸鹽( $M_2O \cdot nSiO_3$ )；(4)鋁酸鹽( $M_2O \cdot nAl_2O_3$ )；(5)鋁矽酸鹽( $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6)SiO_2$ )；(6)強酸鹽( $M_2SO_4$ )<sup>[12]</sup>。

第 2 種膠結材由 Davidovits 所開始發展的，主要是由鹼活化偏高嶺土所產生，並且命名這種材料為「geopolymer」<sup>[13]</sup>。這種膠結材料性質類似於古代羅馬建築與埃及金字塔，其主要是由  $CaCO_3$ 、不定形的鋁矽酸鹽和類似於沸石的材料所組成( $Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 2H_2O$ )，其經驗式為  $Mn\{-(SiO_2)_z-AlO_2\}_n \cdot wH_2O$ ，其中  $n$  為聚合程度； $M$  為鹼金屬離子； $z$  為 1, 2, 3，其各類型的聚合物如圖 1 所示<sup>[14]</sup>。

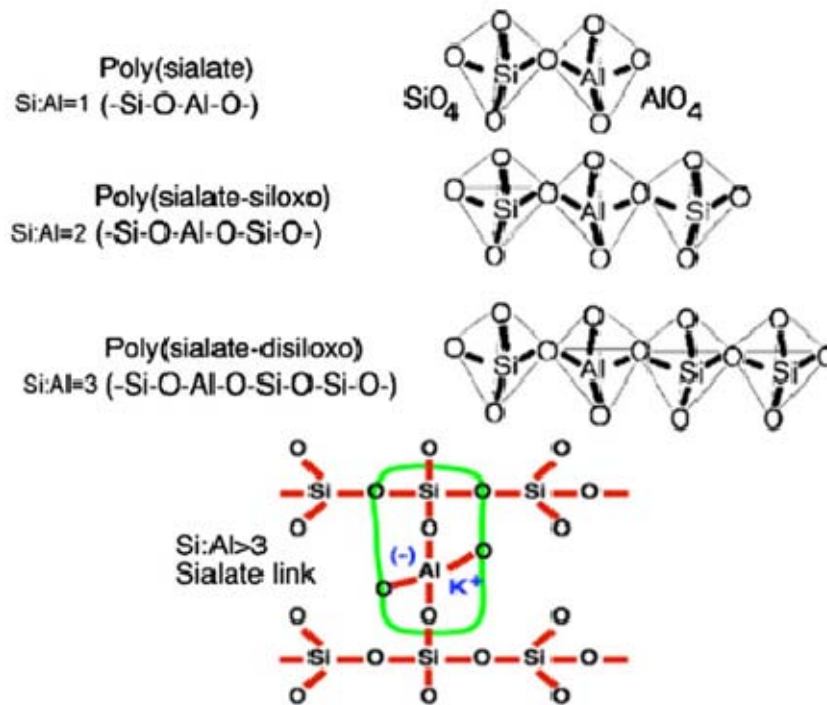


圖 1 不同類型之無機聚合物<sup>[12]</sup>

第 2 種鹼活化又可被稱做為無機聚合反應<sup>[11]</sup>，其為一種化學程序，主要是將結構改變為玻璃質結構，形成一結構緻密之複合材料<sup>[15]</sup>；geopolymer 主要是用於描述鋁矽酸鹽無機聚合物，而通常無機聚合物可以藉由卜作嵐材料或富含鋁矽酸鹽的材料與強鹼性溶液混合產生(如圖 2)，而生成之無機聚合物以  $SiO_4$ 、 $AlO_4$  之四面體



組成架狀結構，其結構相似於沸石，沸石主要為結晶相，但無機聚合物主要是由不定形所組成。

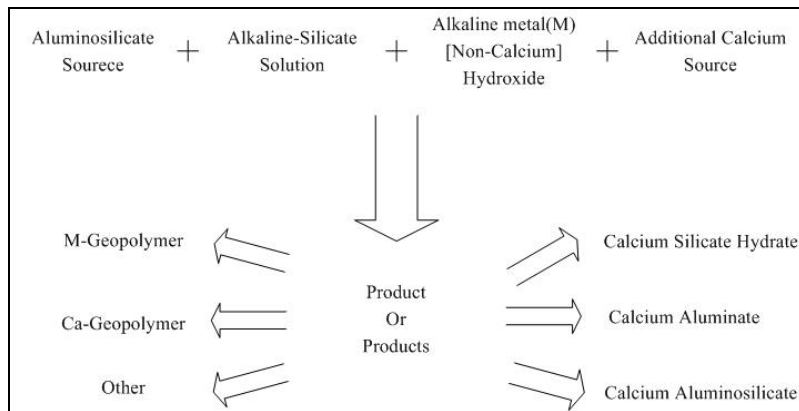


圖 2 鋁矽酸鹽鹼活化可能產物<sup>[16]</sup>

無機聚合物具有良好的機械特性、耐酸鹼性及耐火性等<sup>[17]</sup>，因這些特性使得無機聚合物擁有與波特蘭水泥競爭之潛力，而製造波特蘭水泥在燒製過程中至少需要 1,400℃ 的高溫燒製而成，但無機聚合物可於低於 100℃ 的環境中製備<sup>[18]</sup>，其能源耗用量遠低於水泥，傳統上製造 1 公斤波特蘭水泥需要消耗 1.6 公斤的石灰石，即產生 0.6 公斤之 CO<sub>2</sub>，而無機聚合物所排放 CO<sub>2</sub> 約比傳統波特蘭水泥少約 60%<sup>[19]</sup>，故無機聚合物為對環境友善的建築材料，如圖 3 所示，因此耗用能源所排放之 CO<sub>2</sub> 也較波特蘭水泥低，故無機聚合物可視為一綠色水泥。

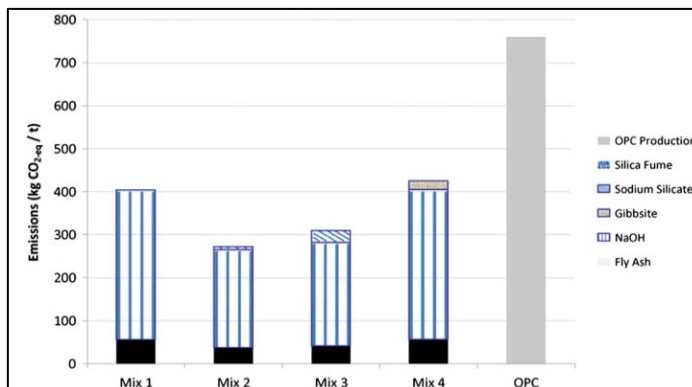
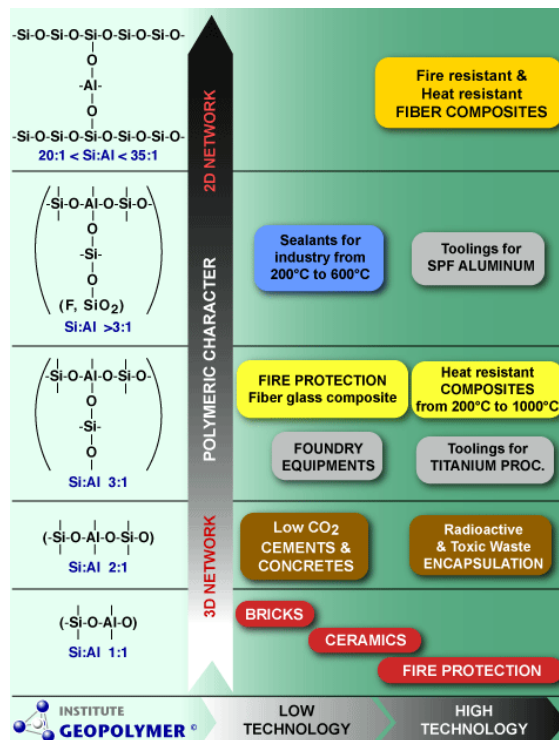


圖 3 不同無機聚合物與 OPC 之 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[20]</sup>

無機聚合物因原料來源相當廣泛，例如天然礦物(高嶺土、變高嶺土)與工業固體廢棄物(煤灰、爐石等)富含矽鋁酸鹽材料者皆可做為無機聚合物之原料，且因於最初合成無機聚合物系統中所含的成分不同，而產生不同的結構之無機聚合物。根據最初原料中所含的  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  比例不同，而應用於不同方面的領域，如圖 4 所示。在  $\text{Si}:\text{Al}=1:1$  時，可應用於磚、陶瓷與防火材料等方面；在  $\text{Si}:\text{Al}=2:1$  可做為綠色水泥混凝土(與波特蘭水泥比較  $\text{CO}_2$  排放較低)與固定有害與輻射廢棄物； $\text{Si}:\text{Al}=3:1$  時，可發展防火玻璃纖維複合材料與耐熱複合材料( $200\sim 1,000^\circ\text{C}$ )，而當  $\text{Si}:\text{Al}>3:1$  又可應用不同的領域。

無機聚合材料與目前大量用於營建材料的波特蘭水泥比較具有環保性、安全與舒適性和經濟性等。在環保性方面，在整個製程中所產生的  $\text{CO}_2$  遠低於波特蘭水泥；在安全與舒適性方面，因無機聚合材料具有多孔隙結構，故可做為吸音材料與防火材料，且無機聚合物具有防火效能(可承受  $1,000^\circ\text{C}$  左右的高溫)；在經濟方面，因可將富含鋁矽酸鹽廢棄物做為原料使用故可降低其成本。



資料來源：Geopolymer Institute

圖 4 無機聚合物應用領域

### 三、研究材料與方法

TFT-LCD 廢玻璃的主要組成爲  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，而鋁矽礦物通常利用鹼激發的方式來製成材料，因此，TFT-LCD 廢玻璃可取代部分鋁矽酸鹽礦物做爲鹼激發膠結材中之原料，故本文說明利用無機聚合反應以做爲一種廢棄物轉換的經濟可行技術。本文主要目的係以 TFT-LCD 廢玻璃(0~40%)取代部分偏高嶺土，並探討於不同  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比(0.8~2.0)之條件下所製備之無機聚合物其初終凝、抗壓強度之變化，最後再輔以熱傳導、FTIR、SEM 等微觀分析，以綜合評估 TFT-LCD 廢玻璃作爲無機聚合物之潛力。

#### 3.1 實驗材料

1. 偏高嶺土：使用偏高嶺土爲商品編號 SNOBRITE 之高嶺土經由  $650^\circ\text{C}$  煅燒 3 小時而成。
2. TFT-LCD 廢玻璃：取自於北部某面板廠，TFT-LCD 廢玻璃經破碎後置入於球磨機研磨，將其細度控制在  $300\sim 400\text{ m}^2/\text{kg}$ 。
3. 矽酸鈉溶液：使用矽酸鈉溶液爲第一化工所販售之產品，其  $\text{Ms}=3.4(\text{SiO}_2=29.5\%、\text{Na}_2\text{O}=9\%、\text{H}_2\text{O}=61.5\%)$ 。主要用途爲提供早期無機聚合物膠結性，並提供無機聚合反應中所需的 Si 離子。
4. 氫氧化鈉溶液：將英國藥廠 Fisher Scientific 之試藥級氫氧化鈉顆粒(純度 97%)溶解於去離子水中配製氫氧化鈉溶液。

#### 3.2 實驗方法

本實驗流程主要分爲 3 個階段，第 1 階段爲進行原料基本特性分析；第 2 階段係於不同  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比中，將 TFT-LCD 廢玻璃取代部分偏高嶺土製成無機聚合物，取代量分別爲 0、10、20、30 及 40%，並探討無機聚合物於養護齡期 1、3、7、14 與 28 天時，抗壓強度，並將試驗完之試體終止反應以進行微觀分析；第 3 階段分利用熱傳導、FTIR 及 SEM 等分析技術對無機聚合物進行微觀分析。

## 四、結果與討論

### 4.1 材料基本特性

表 3 為實驗材料之基本特性。由表得知，高嶺土煅燒前後其比重與密度皆為 3.35(與煤油比)與  $2.65(\text{g}/\text{cm}^3)$ ；另外，高嶺土 pH 值為 6.52，偏高嶺土 pH 值為 5.74。TFT-LCD 廢玻璃其比重與密度分別為 3.1 與  $2.46(\text{g}/\text{cm}^3)$ ，而 pH 值為 6.96。實驗材料之化學組成，分析結果如表 4 所示。由表中得知，高嶺土之主要組成為  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，分別佔 47.34%和 32.71%，而偏高嶺土其  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  分別為 51.4%與 38.0%。TFT-LCD 廢玻璃除主要組成為  $\text{SiO}_2$  與  $\text{Al}_2\text{O}_3$  各佔 62.48%與 18.10%外，CaO 含量為 5.78%。圖 5 為 XRD 分析實驗材料之晶相物種結果。由圖 5 得知，高嶺土之主要晶相為鋁矽酸鹽( $\text{Al}_2(\text{SiO}_5)\text{OH}_4$ )與氧化矽( $\text{SiO}_2$ )，而偏高嶺土，其晶相則由結晶相轉變為半晶質之結晶相，且僅有少數結晶殘存，殘存之低強度繞射峰經由 JCPDS 資料卡判定為  $\text{SiO}_2$ ，此外，並未觀察到高嶺土之晶相，顯示高嶺土已完全轉變為偏高嶺土。TFT-LCD 廢玻璃經 XRD 分析顯示，TFT-LCD 廢玻璃無明顯之繞射峰，故判定 TFT-LCD 廢玻璃屬於非結晶之物質。

表 3 實驗材料基本特性分析

物理特性	TFT-LCD 廢玻璃	Metakaolin	Kaolinite
specific gravity	3.1	3.35	3.35
density( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.46	2.65	2.65
pH	6.96	5.74	6.52

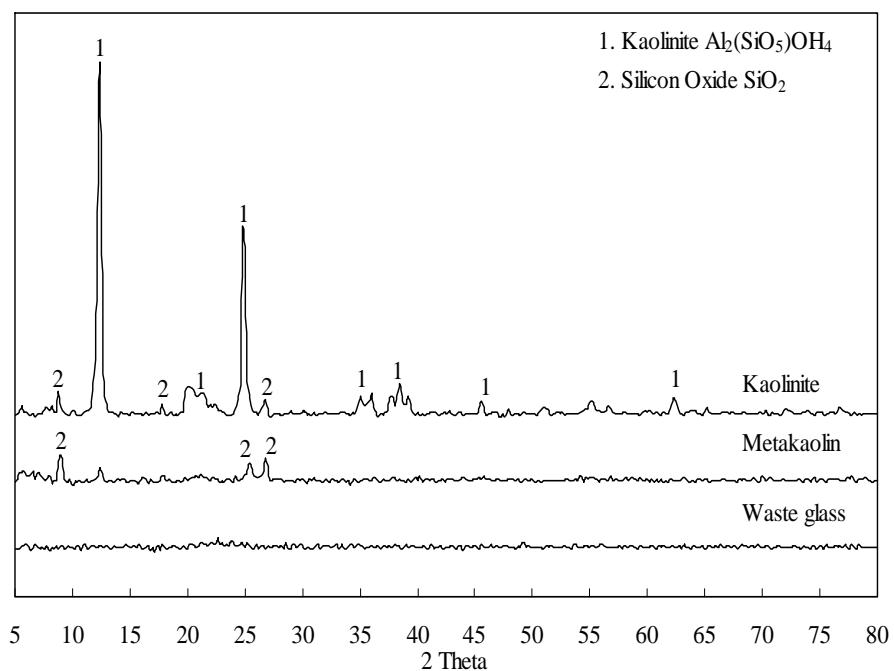


圖 5 實驗材料之 XRD 圖譜

表 4 實驗材料之化學組成

composition	TFT-LCD 廢玻璃	Kaolinite	Metakaolin
$\text{SiO}_2(\%)$	62.48	47.34	51.42
$\text{Al}_2\text{O}_3(\%)$	18.10	32.71	38.00
$\text{Fe}_2\text{O}_3(\%)$	0.19	1.00	1.17
$\text{CaO}(\%)$	5.78	0.41	0.39
$\text{MgO}(\%)$	0.92	0.25	0.29
$\text{SO}_3(\%)$	2.93	2.92	2.95
$\text{Na}_2\text{O}(\%)$	0.04	0.04	0.04
$\text{K}_2\text{O}(\%)$	0.04	0.16	0.21

圖 6 為傅立葉紅外光譜儀(FTIR)分析材料之化學鍵結結果。由圖中顯示，高嶺土於波數為  $470\text{ cm}^{-1}$  處有一 Si-O-Si 及 O-Si-O 鍵結，波數為  $540\text{ cm}^{-1}$  處出現 Al-O-Si，波數於  $833\text{ cm}^{-1}$  處為 Si-O 震動帶，波數於  $914\text{ cm}^{-1}$  處為 Al-OH 鍵結，波數於  $1,008\text{ cm}^{-1}$  為不對稱之 Si-O-Si 及 Al-O-Si 鍵結，此外，波數於  $1,031\text{ cm}^{-1}$  處與波數  $1,107\text{ cm}^{-1}$  處出現 Si-O 平面震動帶。經過煅燒後，偏高嶺土其位於波數為  $540\text{ cm}^{-1}$  處則出現 Al-O-Si 鍵結及波數於  $914\text{ cm}^{-1}$  處為 Al-OH 鍵結消失，顯示其高嶺土結構已被破壞，且脫羟基作用完全。

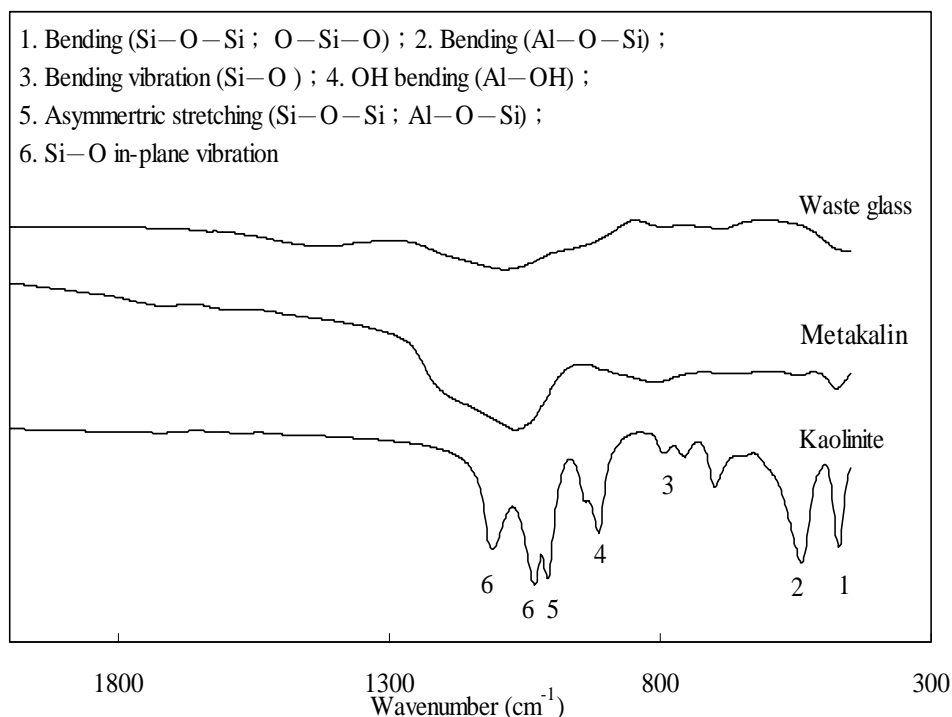


圖 6 實驗材料之 FTIR 圖譜

表 5 及表 6 分別為材料之重金屬總量及 TCLP 溶出試驗之結果。由表中得知，高嶺土中重金屬總量很低，其中 Pb 為  $178.5\text{ mg/kg}$ 、Cu 為  $23.8\text{ mg/kg}$  和 Zn 為  $27\text{ mg/kg}$ ；而偏高嶺土之重金屬總量較高嶺土高(Cu=  $40.8$ 、Zn= $187.0$ 、Ni= $112.2$ 、Cr= $64.6\text{ mg/kg}$ )。TFT-LCD 廢玻璃中重金屬總量分別為 Cu 為  $7.1\text{ mg/kg}$ 、Zn 為  $27.2\text{ mg/kg}$ 、Ni 為  $35.7\text{ mg/kg}$  及 Cr 為  $14.2\text{ mg/kg}$ 。另外，由表 6 得知，高嶺土僅有 Cu

與 Zn 微量的溶出，其溶出值分別為 0.02 mg/L 與 0.08 mg/L，而偏高嶺土分別為 0.02 mg/L 與 0.16 mg/L，另外有檢測出 Ni 為 0.01 mg/L，均遠低於法規標準值。另外，TFT-LCD 廢玻璃之重金屬溶出值分別 Cu 為 0.04 mg/L、Zn 為 0.26 mg/L 及 Cr 為 0.07 mg/L，其所溶出之重金屬亦遠低於法規標準值，故偏高嶺土及 TFT-LCD 廢玻璃極具資源化再利用之潛力。

表 5 實驗材料之重金屬總量

total metal(mg/kg)	TFT-LCD 廢玻璃	metakaolinite	kaolinite
Cu	7.1 ±0.5	40.8 ±1.2	23.8 ±1.6
Pb	N.D.	N.D.	178.5 ±3.5
Zn	27.2 ±3.3	187.0 ±14.3	44.2 ±8.7
Ni	35.7 ±5.7	112.2 ±15.1	N.D.
Cr	14.2 ±0.1	64.6 ±3.3	N.D.
Cd	N.D.	N.D.	N.D.

表 6 實驗材料之毒性溶出試驗結果

TCLP(mg/L)	TFT-LCD 廢玻璃	metakaolinite	kaolinite	regulatory limits
Cu	0.04	0.02	0.02	-
Pb	N.D.	N.D.	N.D.	5.0
Zn	0.26	0.16	0.08	-
Ni	N.D.	0.01	N.D.	-
Cr	0.07	N.D.	N.D.	5.0
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	1.0

## 4.2 廢玻璃無機聚合物之初終凝分析

當催化溶液(鹼性溶液)加入鋁矽酸鹽材料中，鋁矽酸鹽粉末即開始溶解，使 Si 及 Al 離子溶出，隨著時間的增長無機聚合反應也越完全，致使無機聚合物硬逐漸化進而產生強度。而初凝時間表示施工極限，而終凝時間則說明機械強度已開始發展。Zhang 指出，無機聚合物可以藉由  $M_2O$  (M= Na 或 K) 控制物之凝結時間<sup>[21]</sup>。不同矽鈉比無機聚合物之初凝、終凝與總凝結時間如表 7 所示。由表 7 可發現，隨著

$\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  的提高其初凝時間與終凝時間有明顯增長之趨勢，表示矽酸鈉溶液會增加無機聚合物的凝結時間；另外，添加 TFT-LCD 廢玻璃之無機聚合物其初凝時間與終凝時間較純偏高嶺土無機聚合物皆有延長之趨勢，即表示 TFT-LCD 廢玻璃具有緩凝之效果。文獻指出，無機聚合物之凝結時間，系統中之  $\text{M}_2\text{O}$  含量對於無機聚合物之凝結時間有非常大的影響<sup>[22]</sup>。圖 7 為廢玻璃無機聚合物對凝結時間之關係。由圖 7 得知，隨著  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  增加( $\text{NaOH}$  添加量減少)，無機聚合物之凝結時間相對的延長，且當廢玻璃取代量越高，在  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  比為 2.0 時，其凝結時間延後的現象更為顯著。而在鹼性環境下， $\text{OH}^-$  離子會提高原料的溶解，致使系統中反應加速，進而使  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的溶解力增加，結果顯示，若以較低 Ms 活化之系統( $\text{OH}^-$  濃度較高)，有助於原料的溶解，致使無機聚合物之凝結時間縮短<sup>[23]</sup>。

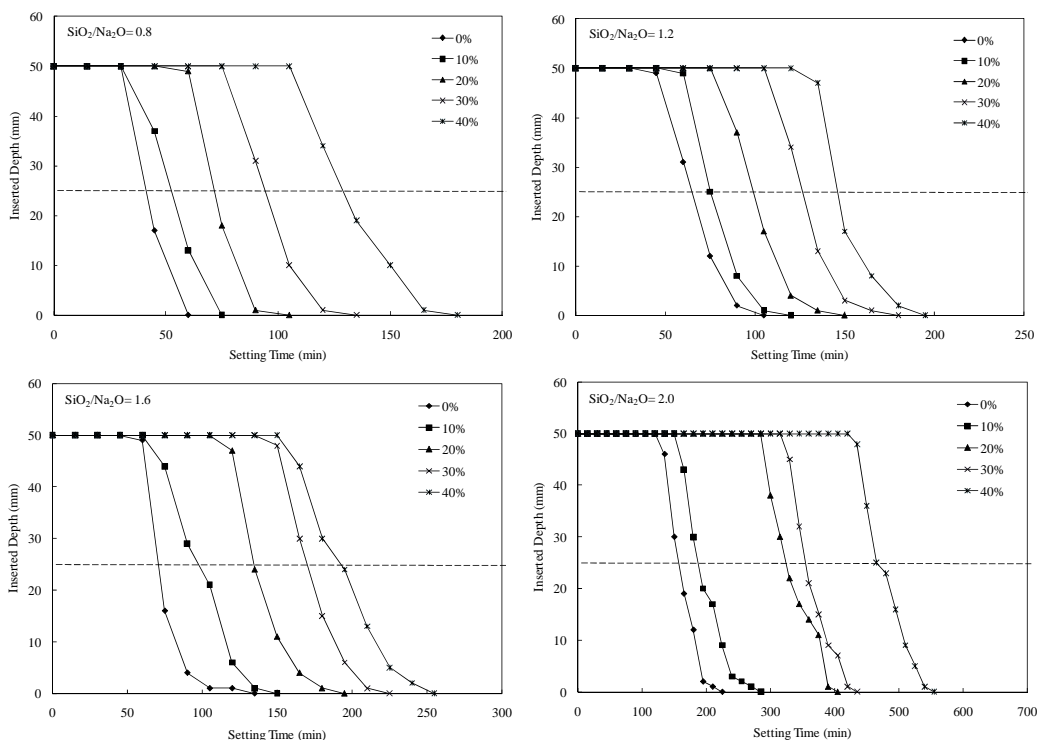


圖 7 廢玻璃無機聚合物之初終凝



表 7 廢玻璃無機聚合物之凝結時間

SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	replacement level(%)	initial setting (min)	final setting (min)
0.8	0	41	60
	10	53	75
	20	72	105
	30	94	135
	40	129	180
1.2	0	65	105
	10	75	120
	20	95	150
	30	126	180
	40	146	195
1.6	0	70	135
	10	98	150
	20	134	196
	30	180	225
	40	193	255
2.0	0	180	195
	10	188	255
	20	324	330
	30	355	435
	40	465	555

### 4.3 廢玻璃無機聚合物之抗壓強度發展

圖 8 為廢玻璃無機聚合物之抗壓強度發展。由圖 8 得知，廢玻璃無機聚合物其抗壓強度隨養護齡期增加而抗壓強度有增加之趨勢；另外，隨著 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 比的提高，其無機聚合物之抗壓強度亦有增強之現象，但隨著廢玻璃取代量的增加，其抗壓強度有減弱的現象。當 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 為 0.8 時其抗壓強度發展明顯較 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 為 2.0 之廢玻璃無機聚合物弱，其可能原因為 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 為 0.8 之系統中 NaOH 含量較多，當系統中有足夠之 OH<sup>-</sup>會增加其溶解性，但會阻礙縮聚作用的進行<sup>[24]</sup>。在高 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 比為 1.6 及 2.0 下之廢玻璃無機聚合物，抗壓強度發展較好，其原因可能為 SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O 提高，會增加無機聚合物中溶解性之矽酸鹽類，而溶解性矽酸鹽類所形成之齊聚物會加速縮聚反應，使得無機聚合反應效率提高<sup>[25]</sup>。

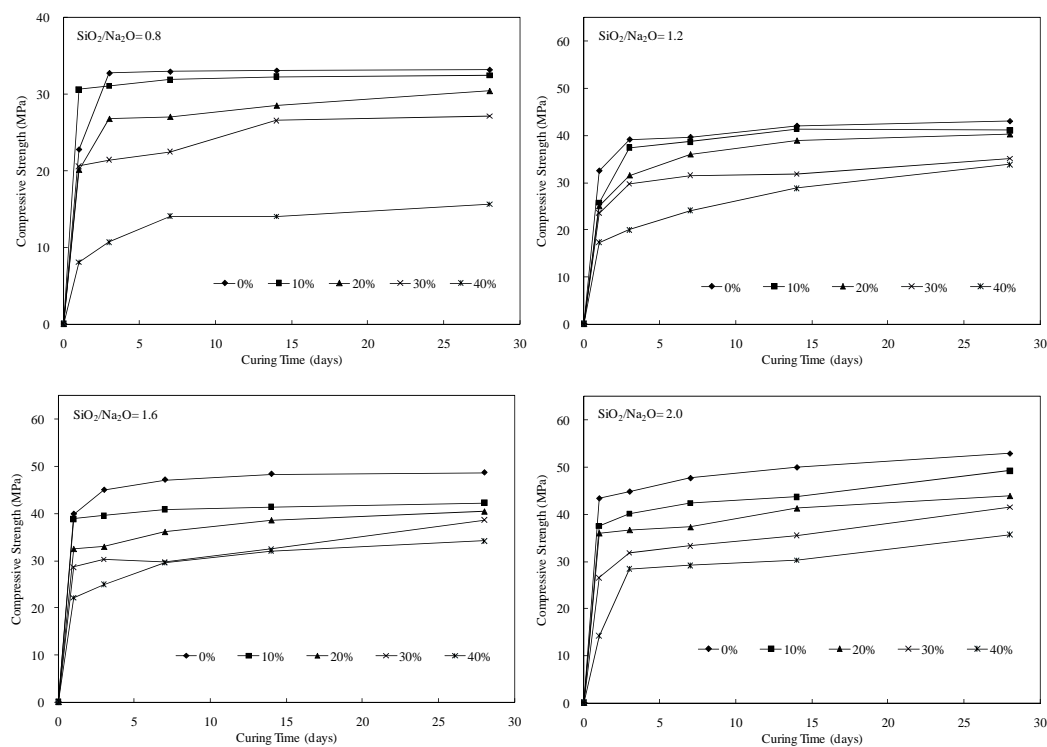


圖 8 廢玻璃無機聚合物抗壓強度發展

#### 4.4 廢玻璃無機聚合物熱傳導分析

圖 9 為廢玻璃無機聚合物之變化情形。由圖中得知，隨著  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  的提高及廢玻璃取代量的增加，其熱傳導係數有逐漸上升之趨勢。當養護齡期 28 天時，於  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  為 0.8 下，廢玻璃取代量為 10% 之廢玻璃無機聚合物，其熱傳導係數為  $0.9606 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  與純偏高嶺土無機聚合物 ( $0.9586 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) 相當；另外，隨著養護齡期的增加，其熱傳導係數亦有逐漸上升之現象，其可能係因無機聚合作用之產物逐漸填補孔洞，致使無機聚合物結構趨於緻密，故使得熱傳導係數有逐漸上升之趨勢。

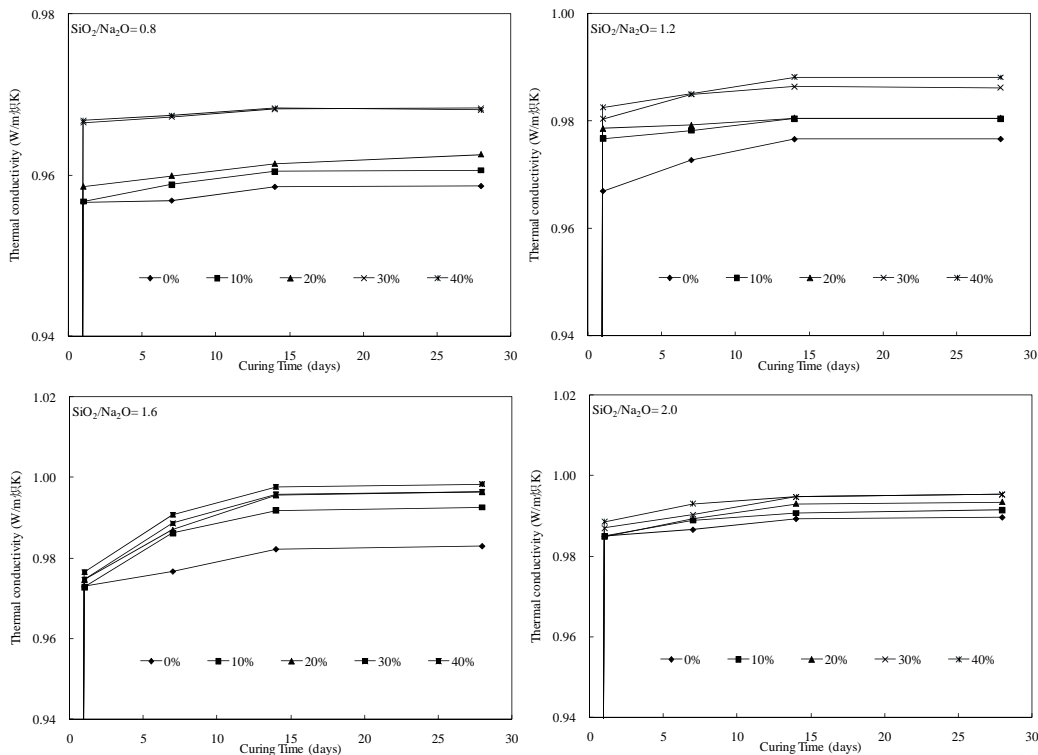


圖 9 廢玻璃無機聚合熱傳導係數變化

#### 4.5 廢玻璃無機聚合物 FTIR 分析

圖 10 為廢玻璃無機聚合物之 FTIR 圖譜。由圖中得知，廢玻璃無機聚合物於波數為  $1,000\text{ cm}^{-1}$  處出現 Si-O-Si 伸縮震動鍵結<sup>[26]</sup>，其 Si-O-Si 伸縮震動鍵結會因聚合程度較高而逐漸往高波數移動；此外，在波數為  $470\text{ cm}^{-1}$  處為 O-Si-O 鍵結<sup>[27,28]</sup>；另外，Si-O-Si 鍵結則較 O-Si-O 明顯，因此 Si-O-Si 鍵結常被用於觀察無機聚合物之聚合反應程度<sup>[29]</sup>；在波數於  $700\text{ cm}^{-1}$  處屬於 Si-O-Si 對稱伸縮震動帶，此波數位置變化與  $\text{SiO}_4$  四面體聚合狀態有關，當  $\text{SiO}_4$  四面體聚合形成鏈狀陰離子時，一方面使 Si-O 伸縮震動帶隨聚合程度增加而增大<sup>[30]</sup>，另一方面會在波數於  $550\sim 750\text{ cm}^{-1}$  處形成新的 Si-O-Si 彎曲震動；此外，於波數為  $850\text{ cm}^{-1}$  處可觀察到一非常小的波峰，此波峰屬於 Si-OH 之震動帶，此波峰表示含有溶解中的原料。而波數為  $917\text{ cm}^{-1}$  處有一強度較弱的波峰，此波峰也可於偏高嶺土之 FTIR 圖譜中觀察到，屬於偏高嶺土 Al-O-Si 鍵結，在無機聚合作用下，此波峰強度有減弱的趨勢。

## 92 TFT-LCD 廢玻璃製備無機聚合物之研究

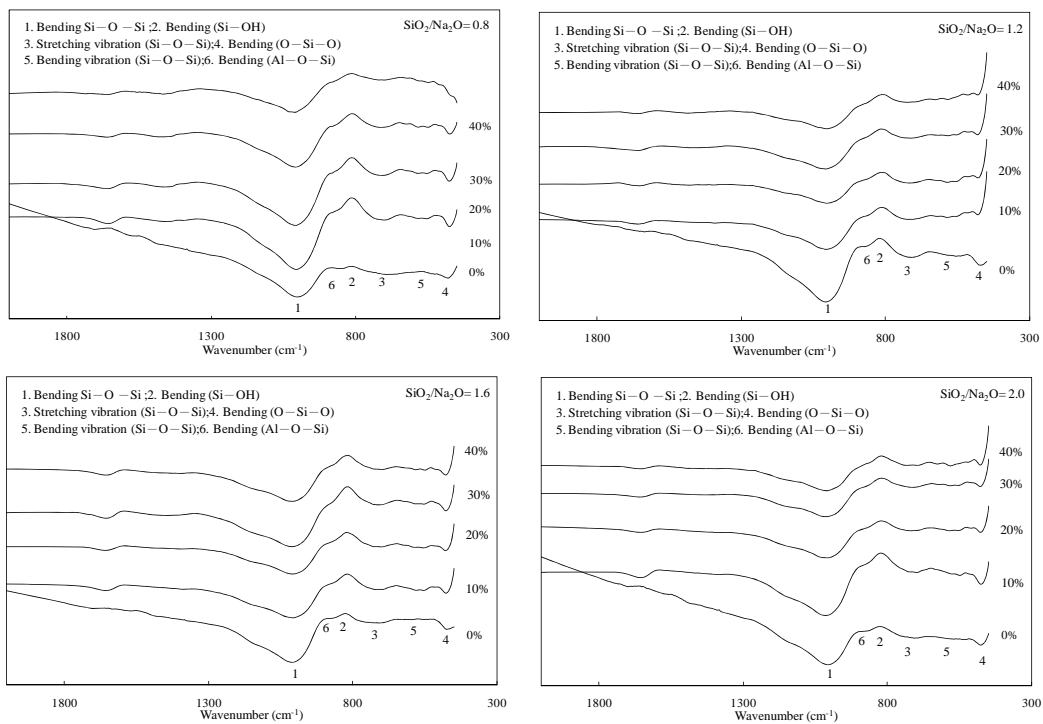


圖 10 廢玻璃無機聚合物之 FTIR 圖(養護齡期 28 天)

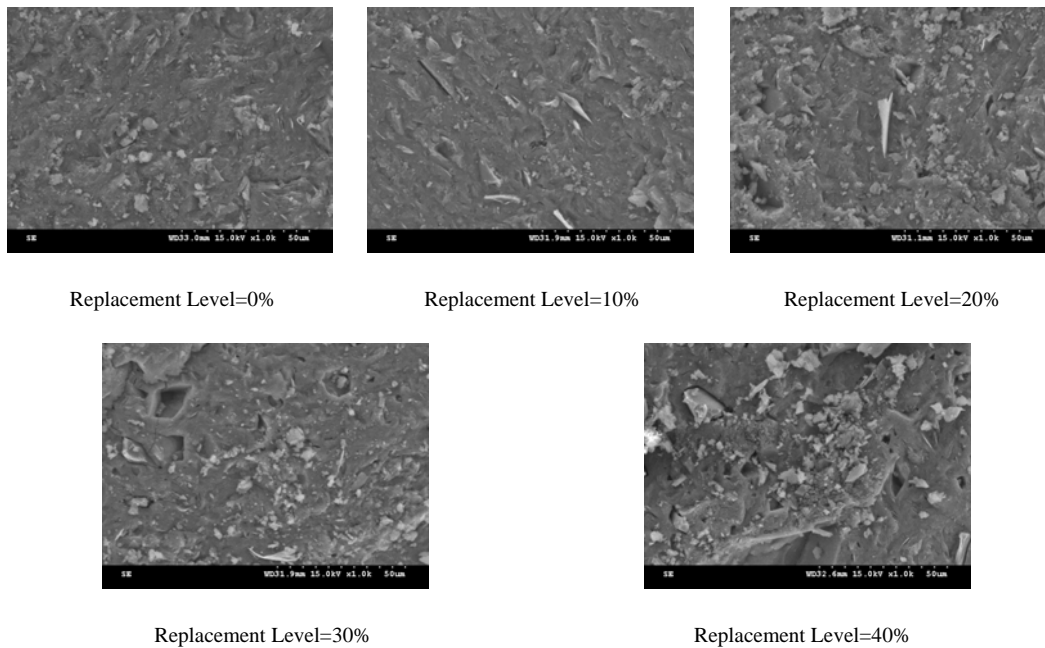


圖 11 固液比為 1.0 之廢玻璃無機聚合物之 SEM 觀察(Curing Time=28 days)

#### 4.6 廢玻璃無機聚合物之微結構觀察

圖 11 為  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  為 2.0 時，廢玻璃無機聚合物於養護齡期 28 天時之 SEM 觀察。由圖 11 顯示，純偏高嶺土無機聚合物之結構具有一些邊角，表示純偏高嶺土無機聚合物其結構為層狀之結構，而此結果與 Steveson 和 Sagoe-Crentsil 所觀察到的偏高嶺土無機聚合結構相符<sup>[31]</sup>；當廢玻璃取代量為 10% 之廢玻璃無機聚合物，其結構與純偏高嶺土無機聚合物相比，則較為緻密且均勻；另外，廢玻璃取代量為 40% 之廢玻璃無機聚合物，其結構顯示較為不均質且鬆散之現象。

#### 4.7 廢玻璃無機聚合物之減少二氧化碳排放效益評估

水泥於生產過程會因高耗能( $1,450^\circ\text{C}$ )及石灰石分解而產生大量的二氧化碳，其二氧化碳排放量約為  $880 \text{ kg/ton}^{[32]}$ ，而廢玻璃無機聚合物於生產過程中，僅有煅燒高嶺土( $650^\circ\text{C}$ )及研磨廢玻璃所耗用能源產生之二氧化碳，其二氧化碳排放量如表 8 所示。根據 2010 年歐盟碳市場價格 14.5 歐元計算(約 600 元新台幣)，本文所研製之廢玻璃無機聚合物若取代傳統水泥，其降低之二氧化碳排放量效益為新台幣 351.6 元/噸。

表 8 波特蘭水泥與廢玻璃無機聚合物  $\text{CO}_2$  排放量

	cement <sup>[32]</sup>	geopolymer	difference
decompose of limestone	0.480	-	0.480
coal-fired	0.280	-	0.280
energy $\text{CO}_2\text{-eq}$	0.120	0.294	-0.174
Total(ton)	0.880	0.294	0.586

### 五、結論

1. TFT-LCD 廢玻璃之重金屬 TCLP 溶出均符合法規值，具資源再利用之潛力。
2. 廢玻璃無機聚合物之凝結時間隨  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  的提高而有延長之現象，且隨著 TFT-LCD 廢玻璃取代量的增加而延長，顯示 TFT-LCD 廢玻璃具緩凝的效果。
3.  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  為 2.0，廢玻璃取代量為 10% 之廢玻璃無機聚合物之抗壓強度與純偏高嶺土無機聚合物相當。

## 94 TFT-LCD 廢玻璃製備無機聚合物之研究

- 4.廢玻璃無機聚合物之熱傳導係數隨 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 及取代量的增加，而有提高的現象。
- 5.廢玻璃無機聚合物位於波數 $1,000\text{ cm}^{-1}$ 處之Si-O-T鍵結，會受聚合程度之影響而往高波數移動。
- 6.廢玻璃無機聚合之微結構觀察顯示於 $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 為2.0時，當廢玻璃取代量為10%時，其無機聚合物結構較為緻密且均勻。
- 7.本文所研製之廢玻璃無機聚合物若取代傳統水泥，其降低之二氧化碳排放量效益為新台幣351.6元/噸。

## 誌謝

本計畫承蒙國科會(研究計畫：NSC 99-2622-E-197-003-CC3)之經費支援，謹致謝忱。

## 參考文獻

- 1.高瑛紘、劉蘭萍、王義基，2008，液晶面板製造業廢棄物資源化現況評析，綠基會通訊。
- 2.林凱隆，2010，薄膜液晶顯示器(TFT-LCD)廢玻璃再利用計畫，國立宜蘭大學。
- 3.張文凱，2009，工業廢棄物焚化底渣及3C產業廢棄物燒製環保地磚之研究，國立宜蘭大學環境工程學系碩士論文。
- 4.鄭敬融，2010，泥渣類廢棄物與TFT-LCD廢玻璃燒製環保水泥之研究，國立宜蘭大學環境工程學系碩士論文。
- 5.張仁杰，2011，廢玻璃混合廢棄多孔材料燒製多孔陶瓷對環境調濕性能之研究，國立宜蘭大學環境工程學系碩士論文。
- 6.劉毅弘，2003，廢液晶面板處理技術簡報，工研院環境中心，處理技術講習會專題報告。
- 7.蔡獻逸，2006，液晶顯示器用玻璃基板，科學發展，406期。
- 8.Barsoum M. W., Fundamentals of Ceramics, International Editions 2000, McGraw-Hill International Editions, p. 344-348 2000.
- 9.林凱隆、吳弘任、盧博雅、張家祥、陳子傑、陳柏宇，2009，CFB飛灰應用於卜作嵐材料之水化特性研究，第十屆資源與環境學術研討會論文集。

- 10.藍如穎、謝政平、林彥融、陳貞羽、陳怡伶、吳修賢、林凱隆，2010，都市垃圾焚化底渣水洗廠浮渣之卜作嵐材料特性研究，第十屆資源與環境學術研討會。
- 11.Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T., Alkali-activated fly ashes: a cement for the future, *Cement and Concrete Research*, 29, p.1323–1329, 1999.
- 12.Fernando P. T., João C. G., Said J., Alkali-activated binders: a review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products, *Construction and Building Materials*, 22, p. 1305–1314, 2008.
- 13.Davidovits J., Geopolymers: inorganic polymeric new materials, *Journal of thermal analysis*, 16, p. 91–139, 1994.
- 14.Davidovits, J., Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions, Institut Geopolymere, 2005.
- 15.De Vargas A. S. , Dal Molin D. C. C., Antônio Vilela C. F., Da Silva F. J., Pavão B., Veit H., The effects of  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers, *Cement & Concrete Composites*, 33, p. 653–660, 2011.
- 16.Yip C. K., Lukey G. C., Van Deventer J. S. J., The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation, *Cement and Concrete Research*, 35, p. 1688–1697, 2005.
- 17.Rovnaník P., Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer, *Construction and Building Materials*, 24, p. 1176–1183, 2010.
- 18.Temuujin J., Williams R.P., Riessen A. van, Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, p. 5276–5280, 2009.
- 19.FASTS , Federation of Australian Scientific and Technological Societies.  
<http://www.fasts.org/>
- 20.McLellan B. C., Williams R. P., Lay J., Van Riessen A., Corder G. D., Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 19, p. 1080–1090, 2011.

- 21.Zhang Z., Yao X. , Zhu H., Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete I. Basic properties, *Applied Clay Science*, 49, p. 1-6 2010.
- 22.Cheng T.W., Chiu J.P., Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering*, 16, p. 205-210, 2003.
- 23.Bakharev T., Sanjayana J.G., Chengb Y.-B., Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, p. 1619-1625, 1999.
- 24.Zuhua Z., Xiao Y., Huajun Z., Yue C. , Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer, *Applied Clay Science*, 43, p. 218–223 ,2009.
- 25.Xu H., Deventer J. S. J. van, The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars, *Colloids and Surfaces. A, Physicochemical and Engineering Aspects*, 216, p. 27-44, 2003.
- 26.Flanigan E.M., Khatami H., Szymanski H.A., Molecular sieve zeolites, in: *Advances in Chemistry Series*, 101, American Chemical Society, Washington, 201–229, 1971.
- 27.Günzler H., Gremlich, H., *IR Spectroscopy: An Introduction*. Wiley-VCH Verlag GmbH, Germany, 2002.
- 28.Barbosa V., MacKenzie K., Thaumaturgo C., Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymer, *International Journal of Inorganic Materials*, 2, p. 309–317, 2000.
- 29.Rattanasak U. 、Chindaprasirt P., Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22, p. 1073-1078, 2009.
- 30.張祖華、姚曉、諸華軍，2011，矽酸鈉模數對無機聚合物力學性能與微觀結構的影響，*南京工業大學學報（自然科學版）*，第三十三卷，第一期，p.2-56。
- 31.Steveson M.S., Sagoe-Crentsil K., Relationships between composition,structure and strength of inorganic polymers. Part I. Metakaolin-derived inorganic polymer, *Journal of Materials Science*, 40, p. 2023-2036, 2005.
- 32.柯翰勝、鄭大偉，2010，低二氧化碳排放的無機聚合綠色水泥開發研究，*清潔生產暨環保技術研討會論文集*，p. 329-343。



## 本期專題：清潔生產與綠色技術

專題編輯委員 周明顯



學歷：

國立台灣大學化工博士

經歷：

中國石油公司煉製研究所研究員

國立中山大學環境工程研究所副教授、教授兼所長

現任：

國立中山大學環境工程研究所教授兼副總務長

### 專題介紹

本期季刊專題主題為「清潔生產與綠色技術」。所謂「清潔生產與綠色技術」其考量因子為原物料、能資源使用、生產、銷售到回收等環節，均須考量環境因子，將環境衝擊降到最低。

隨著地球資源日漸減少，原料、能源(煤、石油、天然氣等)之成本必日益升高，產品價格亦將隨之提高。為維持或提高既有生活水準，唯有將資源作最大利用，即以零污染、零廢棄為終極目標；另充分利用幾乎取之不盡之太陽能。「清潔生產與綠色技術」即為達此目標之主要手段。

本期 5 篇專文針對「清潔生產與綠色技術」作初步介紹。「清潔生產-綠色企業」一文作為導言；「清潔生產與綠色技術法令之範圍與特性」概述現行相關法令，以為促進或約束政府、企業、人民之法令依據；「清潔生產：創新節能案例-智慧照明所帶來的綠色趨勢」及「綠色技術-藻類生質柴油」則為節能減碳及太陽能利用之具體作法及展望；「清潔生產：一貫作業鋼廠清潔生產技術」提供大型企業之案例，以供各型企業參考。

本專題內容僅為「清潔生產與綠色技術」之初步介紹，期盼政府、企業、各界人士續行朝相關方向努力，以在維持既有生活水準之狀況下，永續地球環境。



## 清潔生產-綠色企業

林俊宏\*、周明顯\*\*

### 摘要

我國綠色產業的發展，將朝向發展永續經濟、永續環境及永續社會的方向邁進。而企業運作隨著綠色產業興起，逐漸朝向綠化方向前進，希望調整企業運作模式，朝向低耗水、低耗能、低污染的綠色產業發展，達成高知識、高技術、高服務為基礎的現代知識經濟。而綠色企業可先檢視其產品生命週期，並運用各種指標評估其綠化程度。政府部門及消費者逐漸建立綠色產業及綠色消費的行政措施，有助於綠色企業藉由推展永續措施，營造正面形象。清潔生產是綠色企業經營的一種方式，可藉由環保材料、製程方法、能資源節約、產品服務、減廢資材化、環境管理等，達到企業綠化的目的，提升產業競爭力。

【關鍵字】永續發展、產品生命週期、製程方法、產業綠化

---

\*南華大學自然生物科技學系 助理教授

\*\*國立中山大學環境工程研究所 教授

## 一、前言

聯合國世界環境與發展委員會於 1987 年發表「我們共同的未來」(our common future)報告，將永續發展(sustainable development)定義為：能滿足當代需求，同時不損及後代子孫滿足其本身需求的發展。聯合國 1992 年 6 月在巴西里約熱內盧召開「地球高峰會議」，揭示地球環境觀念，亦即人類的各種活動必須考慮環境的負荷能力及資源節約與有效利用，使地球上之生態環境能夠永續發展。本項觀念應用於國家政策、企業運作、工廠產品及生產製程等，亦可稱為「永續經營」，以免除或減少人類經濟活動對環境的衝擊。聯合國環境規劃總署(UNEP)於 2008 年提出「綠色經濟倡議(green economy initiative)」，希望藉由推動可降低生態衝擊及環境風險的經濟活動，提高社會公平與人類福祉。經濟及產業的綠化，衍伸出許多綠色組合名詞，例如綠色經濟、綠色產業、綠色能源、綠色管理、綠色企業等，均圍繞著永續發展的理念，應用於各領域。

我國綠色產業的發展，可由行政院經濟建設委員會所訂之「台灣 21 世紀議程國家永續發展願景與策略綱領」<sup>[1]</sup>，窺知我國將朝向發展永續經濟、永續環境及永續社會的方向邁進。希望調整產業結構，朝向低耗水、低耗能、低污染的綠色產業發展，邁向以高知識、高技術、高服務為基礎的現代知識經濟。

## 二、綠色企業

### 1.綠色企業之定義

各界對於「綠色企業」(green business)之定義與說法，目前尚未有一致的名詞與共識。接承綠色產業之概念，綠色企業可以定義為：「對以永續發展為經營目標的企業，利用綠色管理的手段，所提供之盡可能降低產品與服務為環境所帶來的污染及資源消耗的產品、服務，或從事有關社會安全、經濟發展或環境保護等社會性活動所獲得的相關訊息與經驗，而對其形成的一種整體態度與印象」<sup>[2]</sup>。由此可知，綠色企業不只是單純的污染物管末處理或減廢，而是將永續經營之概念融入產品、活動及服務的生命週期中。

## 2. 企業的永續學習

從 20 世紀中期開始，企業及產業經營所面臨不同的環境衝擊，就有不同的因應措施，其永續學習進程如圖 1 所示<sup>[3]</sup>。

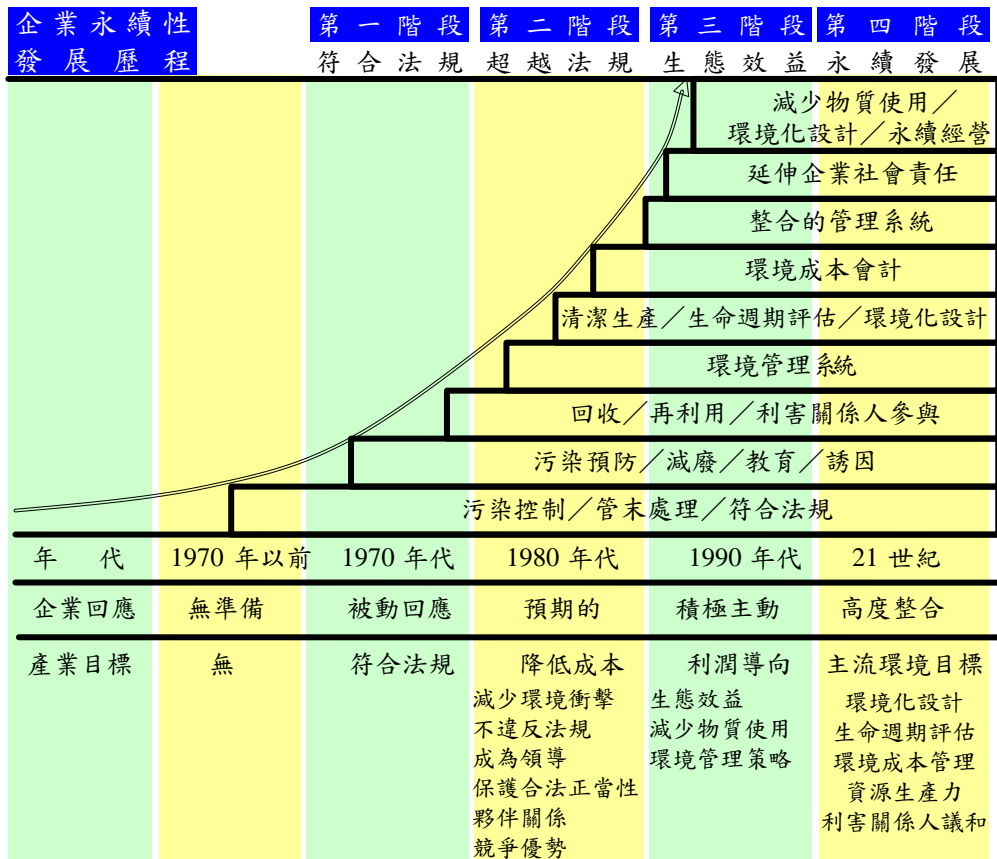


圖 1 企業及產業的永續學習曲線<sup>[2]</sup>

從 1970 年代以前，企業只能被動以污染控制及管末處理等消極方式處理污染物，以求符合環境相關法規。到 1980 年代，開始注意採用污染預防、減廢、教育、回收、再利用等方式，除符合法規之外，亦可減少環境衝擊及成本。1990 年代起，環境管理系統、清潔生產、延伸企業社會責任等概念，逐步引入企業，並積極主動採用各種環境策略，將環境策略內化為企業經營的一環。進入 21 世紀，環境化設

計、產品生命週期評估、減少物質使用、各種國際標準、國家或地區之法規、國際公約、水足跡盤查、碳足跡盤查等各種措施持續整合，並將永續的概念融入企業經營方向及形象，發展出適合企業本身的永續發展特色。

### 3.企業的產品生命週期

隨著環保意識的提高及全球環境永續發展趨勢，對於污染評估方向已朝向全面性的思考模式。即利用產品生命週期觀念，考量整合產品設計、原物料及能源使用、產品生產製造、成品包裝配銷、服務、使用及廢棄等各階段環境產生之影響。因此，在比較產品或製程之永續特性時，應由設計－原料能源使用－生產製造－配銷服務－消費使用－廢棄－再利用等環節全面評估，而非僅由單一環節考量。

產品生命週期與永續議題的涵蓋面，如圖 2 所示。傳統的管末處理，只處理製程所產生的廢棄物或污染物。而減廢則考量製程特性，減少廢棄物或污染物產生，以從污染源頭減少廢棄物產生，再進步到廢棄物再利用，重新創造可再利用的資源之經濟價值。而環境管理系統及清潔生產更考量了原物料、能資源、配銷及服務等環節的環境影響。而環境化設計、延伸企業責任、永續發展及綠色供應鏈等議題，則以不同手法及方式，全面考量企業的永續發展。

由以上可知，綠色企業不等於環保企業。環保企業多是指在產業活動所產生的污染排放到環境中之前，進行所謂污染削減及管末處理的工作，或直接從事環境保護設計施工的企業。而綠色企業則是將環境永續的理念融入到產品生命週期的各個面向，從原料的取得、產品製造、產品配銷、使用及廢棄物處理等過程，均秉持著「可回收、低污染、省資源」的理念<sup>[4]</sup>。

### 4.綠色企業指標

美國綠色商業公司(GreenBiz.com)出版之「2012 綠色企業現況」報告中指出，美國整體企業環保綠化，可採用碳密集度(carbon intensity)、碳透明度(carbon transparency)、清淨科技投資(cleantech investments)、清潔能源專利(clean-energy patents)、公司報告(corporate reporting)、員工通勤(employee commuting)、員工遠距辦公(employee telecommuting)、能源效率(energy efficiency)、環境財務衝擊(environmental financial impacts)、E 化廢棄物(E-waste)、公司車隊衝擊(fleet

impacts)、綠色資訊產品(green IT)、綠色辦公空間(green office space)、綠色能源使用(green power use)、有機農業(organic agriculture)、包裝密集度(packaging intensity)、紙張使用與回收(paper use and recycling)、有毒物質釋放(toxic emissions)、製造業的有毒物質(toxics in manufacturing)、揭示(transparency)等 20 項指標<sup>[5]</sup>，導入企業評鑑概念，以評估企業綠化程度。

我國雖無明確訂定綠色企業指標，但未來可導入相關概念，訂定適合本國國情及產業之指標，以供企業或政府瞭解企業綠化績效。

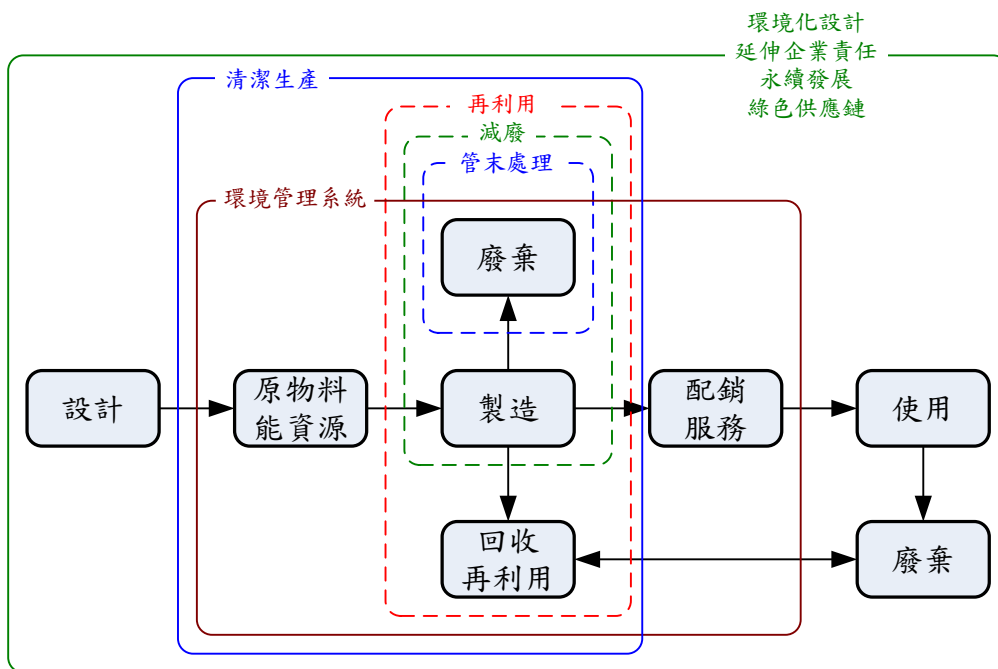


圖 2 產品生命週期與永續議題涵蓋面

## 5.政府部門行政措施

爲了使企業實踐所需的各種永續議題，必將藉助高知識、高技術、高服務爲基礎，透過政府政策推動、培養消費者綠色消費意識，持續改善企業環境並協助永續發展，提升綠色生產競爭力。例如，我國經濟部工業局積極推動產業綠化措施：推動產業節能減碳、發展清潔生產技術、發展能資源循環體系、因應國際環保規範、

推動產品碳足跡揭露、建立綠色工廠標章制度等措施<sup>[6]</sup>。國內各行政單位亦從產品認證著手，例如經濟部能源局推動節能標章、經濟部水利署推動省水標章、內政部建築研究所推動綠建材標章及綠建築標章、環境保護署推動環保標章、碳足跡標籤與環保旅店等，均為透過行政措施，使消費者能夠辨識綠色產品及綠色企業，透過營造企業形象，促進綠色企業發展。

### 三、清潔生產

#### 1. 清潔生產之定義

根據 1997 年初 UNEP 的定義：清潔生產(cleaner production)是指持續地應用整合性及預防性的環境策略於製程、產品及服務上，以增加生態效益和減少對於人類及環境的危害。

行政院經濟建設委員會所訂之「台灣 21 世紀議程國家永續發展願景與策略綱領」中提出，永續經濟需透過綠色消費、綠色產業及清潔生產等三方面達成。其中，在產品的生產方面，要以追求零污染的清潔生產為目標，期在生產過程中，力求減廢；對於資源的投入，力求節約。清潔生產將透過培育高級人力資源、節約資源投入、發展綠色科技、強化廢棄物減量、推動延長生產者責任制等措施達成。希望透過以上各項措施，期達到降低生產成本、提高產品競爭力、提升其商譽及市場競爭力之目的。

#### 2. 清潔生產的方向

綠色企業之運作策略，包括採用清潔生產，而清潔生產方向包含清潔的能源、清潔的生產過程、清潔的產品等三大主題，簡要分類如下<sup>[7]</sup>：

- (1)清潔的能源：可以採行之措施，包括有效率的使用能源、開發新能源及研發節能技術。
- (2)清潔的生產過程：包括原料替代、低風險設計、提高設備效率、操作步驟最適化調整、回收再利用、精進生產管理。
- (3)清潔的產品：節省使用能資源、考量環境衝擊。



### 3.評估規劃方法

產業推動清潔生產製程，在展開具體行動計畫之前，可以分成 5 個評估規劃之步驟，流程如圖 3 所示。分述如下<sup>[8]</sup>：

#### (1) 污染物排放特性

掌握空氣污染物、水污染物、廢棄物排放之種類、特性、數量、排放型態、處理處置方式等資料。

#### (2) 瞭解污染物產生源

需要瞭解：產生污染物的製程單元、如何產生這些污染物、污染物是由哪種原物料轉換而來。應該藉由質量平衡法或排放係數法，推算、釐清及確認原物料、污染物在各製程單元內之流佈。

#### (3) 瞭解為何會產生污染物

檢討原物料、能源、製程方法、製程條件、污染物產生機制、污染物排放特性等，並列出各項影響因子，供清潔生產方案評估。

#### (4) 評估清潔生產方案

根據前步驟所得之各項影響因子，擬清潔生產方案，主要有：製程方法改變、原物料替代、產品設計變更、生產效率提昇等措施。

#### (5) 評估清潔生產效益

評估製程設備變更成本、原物料與生產成本、管末處理成本、製程風險等項目，以決定是否執行。

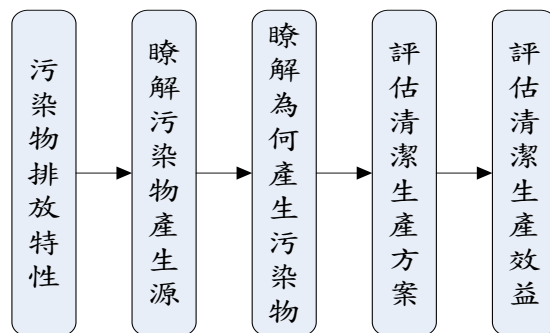


圖 3 清潔生產評估規劃步驟

## 四、清潔生產案例

經濟部工業局蒐集清潔生產及環保技術相關文獻，並於網站建置「產業清潔生產與環保技術知識庫」(<http://proj.moeaidb.gov.tw/eta/knowledge/>)，供各界查詢。其中，將清潔生產分為環保材料、製程方法、能資源節約、產品服務、減廢資材化、環境管理等主題，供各界查閱。

現列舉清潔生產案例數例，以瞭解企業於降低生產成本、提高產品競爭力、提升商譽之努力。

### 1. 案例介紹－製程方法<sup>[8]</sup>

PU 合成皮製作，是我國重要的傳統產業，傳統將多溶劑 PU 以塗佈方式，形成薄膜後烘乾而得。塗佈過程使用大量有機溶劑，多揮發逸散，造成污染且須繳交空氣污染防制費，提高營運成本。

某 PU 合成皮廠之揮發性有機物廢氣排放量約 600 CMM、排放濃度 5,000 ppm (THC)、主要排放成份為甲苯及丁酮，排放量約 600 公噸/年。其製程乃將多溶劑 PU 藉由塗佈技術，塗佈於離型紙形成薄膜後，烘乾而得 PU 合成皮。污染物主要來自接著層、皮膜層與印刷層之塗佈單元，且經由烘乾後，揮發性有機物排放至大氣，造成空氣污染。

探討其原因，發現該業者採用之塗佈技術為刮刀式塗佈。由於刮刀塗佈之濕膜厚度由刮刀間隙控制，若刮刀間隙太薄，容易刮破離型紙接合處，且難以控制塗佈均勻性。刮刀塗佈之濕膜(含溶劑)厚度一般在 100  $\mu\text{m}$  以上，但合成皮所需之乾膜(不含溶劑)厚度一般在 30  $\mu\text{m}$  以下。故，為了產生較薄的乾膜，因此使用大量有機溶劑。合成皮業所使用之接著樹脂、PU 樹脂及印刷油墨中之 VOC 含量一般在 70% 以上。

可改採擠壓式塗佈技術，以克服刮刀式塗佈之濕膜厚度限制。擠壓式塗佈技術之塗膜厚度由模頭狹縫控制，模頭與離型紙可保持 100  $\mu\text{m}$  以上的距離，濕膜厚度可控制在 50  $\mu\text{m}$  以下。採此操作策略，可減少溶劑添加量，烘乾溶劑所需之熱能及排氣得以降低，也可降低由有機溶劑衍生之火災爆炸風險，符合清潔生產訴求。

探討其效益評估可知，設置擠壓式塗佈機之製程變更費用每組約 500 萬元，若有機溶劑得減量 50%，則皮膜層、接著層、印刷層之有機溶劑節省費用分別為每年 195、173、72 萬元。若以回收年限計算，皮膜層及接著層之回收年限在 3 年之內，值得推動本清潔生產。以上估計尚未包含因溶劑減少之能源節省、安全增進及廢氣排放負荷減低等效益。

## 2. 案例介紹－能資源節約

某化學公司，設立汽電共生系統使用汽電共生裝置發電，節省蒸汽用量約 71,594 噸/年、節省蒸汽費用 12 萬元/年、節省鍋爐燃料費用 177,436 萬元/年<sup>[9]</sup>。

正隆紙業為節省照明用電與提高廠區作業環境品質，板橋廠率先將廠區 T8(40 W×2)舊式燈具全面改為 T5(35 W×1)燈管，並搭配高效率反光罩及電子式安定器。此外，針對不同作業區劃分不同迴路，對需局部照明區域拉低燈具高度，以減少燈具使用數目。整體規劃改善後，提高現場照度約 15%，並節省照明用電支出 53%，節省 255,625 元/年，減少碳排放量 65.03 公噸 CO<sub>2</sub>/年<sup>[10]</sup>。

## 3. 案例介紹－減廢資材化

某工廠屬於螺帽製造廠，所需螺帽尺寸均由工廠自行抽線而成。線材盤元可經由抽線機抽線作業，將圓形線材抽成六角型線，以方便後續成型作業。圓形線材通過抽線模時，須添加潤滑粉使抽線作業順利進行，但經過抽線作業後，潤滑粉會殘留於線材上，經螺帽成型機冷鍛時，潤滑粉與切削油接觸後，將使油品劣化並形成油泥。將使切削油沉澱效率降低，並使淨油機負荷過大。經改善後，將抽六角線改為抽圓線，可大量降低潤滑粉使用量，並改用油類潤滑，減少淨油機負擔。其需新設抽線模組 20,000 元、增加模具耗用年成本 600,000 元、增加淨油作業人工年成本 86,400 元。但每月可回收切削油 400 加侖，每年可節省 288,000 元，每年並減少廢油泥清除費用 475,500 元。整體成本比較，螺帽產品可減少 0.61 元/公噸之成本。本案例藉由良好的切削油管理使廢棄物減量，並降低產品成本，達到清潔生產的目的<sup>[11]</sup>。

## 五、結論

我國積極推動企業綠化，但仍需要訂定評估指標，以供公私部門訂定實施策略之參考。清潔生產是達成綠色企業的一種方式，需藉助高知識、高技術、高服務為基礎，透過政府政策推動、培養消費者綠色消費意識、提供廠商內外部改善誘因等，持續改善企業環境並協助永續發展，提升競爭力。

## 參考文獻

- 1.行政院經濟建設委員會，2004年11月，台灣二十一世紀議程國家永續發展願景與策略綱領。
- 2.巫鑫如，企業社會責任、綠色企業形象與求職者應徵意願之關聯性研究，國立中央大學人力資源管理研究所碩士論文，2011年。
- 3.胡憲倫，2010年12月，永續創新管理對產業永續發展的重要性，永續產業發展，第53期，p.3~15。
- 4.張嘉玲、陳明義，2009年，綠色產業發展趨勢，科學與工程技術期刊，第五卷第一期，p.11~17。
- 5.Joel Makower and the editors of GreenBiz.com, state of green business 2012, [www.GreenBiz.com](http://www.GreenBiz.com).
- 6.陳良棟，2011年9月，我國推動產業綠化之歷程與成果，永續產業發展，第56期，p.3~9。
- 7.生技／醫藥業資源化應用技術手冊，2004年，財團法人台灣綠色生產力基金會發行，經濟部工業局出版。
- 8.賴慶智，2003年4月，合成皮業及光電半導體業清潔生產製程之推動，永續產業發展，第8期，p.31~38。
- 9.彭金玉、蔡琦、郭天和、梁文炳，2002年，企業永續經營整合性發展策略之探討，2002 工業減廢暨永續發展研討會。
- 10.陳階陽、黃治清、卓憲騰、司洪濤，2009年11月，正隆紙業推動清潔生產照明設備節能減碳改善案例，產業綠色技術研討會論文集。
- 11.螺絲製造業環境管理技術手冊，2000年，經濟部工業局發行，財團法人中技社綠色技術發展中心出版。

# 清潔生產與綠色技術法令之範圍與特性

顏秀慧\*

## 摘要

清潔生產之議題係涉及環境保護、生產效率與降低人類風險等不同層面，故相關法令之範圍與特性也較傳統環保法令來得更具廣泛性與多樣性。

經由清潔生產之操作定義，分析發現清潔生產涉及範圍甚廣，包括生產效率、環境管理、永續發展、國際公約、多國間環境協定、國際標準、貿易限制、財稅獎勵與資金融通等。

清潔生產推動之法源為環境基本法，所根據之原則為預防原則。因我國目前並未訂定清潔生產專法，故基於比例原則與法律保留原則，目前推動清潔生產之方式仍以引導、鼓勵與自願性為主。

本文將就清潔生產與綠色技術涉及之相關法令進行探討，嘗試初步界定可能之範圍及其特性，以供各界從事清潔生產技術研發或輔導之實務先進參考。

【關鍵字】清潔生產法令、清潔生產法令範圍、清潔生產法令特性

---

\*財團法人台灣綠色生產力基金會 董事長特別助理

## 一、定義

清潔生產(cleaner production)一詞係由聯合國環境規劃署(United Nations Environmental Program, UNEP)於西元 1990 年所定義：「持續應用整合型之環境策略於製程、產品及服務中，以增加效益並降低對人類及環境之風險。」此定義迄今雖已超過 20 年，但目前仍適用於聯合國各相關計畫及活動中。

我國經濟部工業局對於清潔生產亦採與聯合國環境規劃署相同定義，進一步並闡釋：「清潔生產不僅具備污染預防的精神，更延長生產者對產品、環境的責任，並以追求生態效益及永續發展為目標。藉由推動清潔生產，可協助產業有效提高能資源的使用效率、降低對環境的衝擊，同時符合環保法規、國際標準/規範，提升產業綠色競爭力。」

經由國內外官方之定義與說明，可知清潔生產之議題係結合環境保護、生產效率與降低人類風險等不同層面，故而相關法令之範圍與特性也較傳統環保法令來得更具廣泛性與多樣性。

## 二、法源

我國推動清潔生產係基於工業污染防治輔導之必要而始，故於聯合國環境規劃署提出污染預防、清潔生產之概念後，即將此源頭管理之新觀念導入國內，並由初期之推動工業減廢進展到推動污染預防與清潔生產。

環境基本法於民國 91 年 12 月 11 日制定公布後，因其條文中正式宣示清潔生產為事業進行活動時之應考量事項，故目前應認推動清潔生產之法源係來自於環境基本法，相關條文如下：

### 1.環境基本法第 6 條

事業進行活動時，應自規劃階段納入環境保護理念，以生命週期為基礎，促進清潔生產，預防及減少污染，節約資源，回收利用再生資源及其他有益於減低環境負荷之原(材)料及勞務，以達永續發展之目的。

事業應有協助政府實施環境保護相關措施之責任。

## 2.環境基本法第 37 條

各級政府為求資源之合理有效利用及因應環境保護之需要，對下列事項，應採適當之優惠、獎勵、輔導或補償措施：

- (1).從事自然、社會及人文環境之保護。
- (2).研發清潔生產技術、設備及生產清潔產品。
- (3).研發資源回收再利用技術。
- (4).再生能源之推廣及應用。
- (5).研發節約能源技術及設置節約能源產品。
- (6).製造或設置污染防治設備。
- (7).為環境保護目的而遷移。
- (8).提供土地或其他資源作為環境保護之用。
- (9).從事環境造林綠地。
- (10).其他環境保護有關事項。

## 三、範圍及特性

如定義所述，清潔生產牽涉之範圍甚廣，其意涵包括製程、產品及服務等整體流程，亦涉及生命週期之思考，故依其執行步驟考量可能涉及之議題，應至少包括：

- 1.生產效率－原料(物質、能源、水)使用之合理化與無害化，生產流程之最佳化。
- 2.環境管理－包括資訊充分揭露及減少製造、使用及廢棄等過程中對環境造成之不良效應，並應善盡企業社會責任。
- 3.永續發展－在降低人類風險及社會風險之頻率及程度之同時，不應耗費過多成本，以避免阻礙社會與經濟之正常發展，或與其他發展策略產生排擠效應。

同時，由於供應鏈日益全球化及國際資本流動頻繁之影響，對於正式生效之國際環保公約、多國間環境協定(Multilateral Environmental Agreements, MEAs)、國際標準組織(The international Organization for Standardization, ISO)發布之國際標準，以及其他國家或經濟體之貿易限制等相關規範，實不容忽視。

## 112 清潔生產與綠色技術法令之範圍與特性

因我國經濟成長仰賴出口甚多，且為世界貿易組織(World Trade Organization, WTO)會員，因此有關於貿易與環境之議題，尤應特別留意，例如以環境保護為目的之各種技術性貿易障礙(Technical Barriers to Trade, TBT)等。

國際環保公約部分，因環境議題錯綜複雜，時有整併管理之必要，故如巴塞爾公約(Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal)、鹿特丹公約(Rotterdam Convention on the Prior Informed Consent Procedure for Certain Hazardous Chemicals and Pesticides in International Trade)與斯德哥爾摩公約(Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants)<sup>3</sup>公約即持續召開聯合會議，整合相關制度與資源進行管理，且因其管制涉及化學品、商品與廢棄物之越境與貿易問題，故與原產國之清潔生產制度亦有所關連。

又如歐盟所實施之限用特定化學品指令(Directive on the Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment, RoHS)、生態化設計指令(Directive on the Eco-design Requirements for Energy Using Products, EuP)、化學品註冊、評估、授權與限制法規(Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemical Substances, REACH)以及化學品全球調和制度(Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals, GHS)等，均會對輸出產品至歐盟或特定國家之企業造成莫大之影響。

另外，清潔生產涉及原料、製程及產品供應上之變動，通常是一系列能滿足永續發展要求的生產、管理、規劃組合或系統工程，而隨著科技進步，所謂的清潔生產標準也會隨之不斷提升，係屬動態標準。就鼓勵企業從事清潔生產之觀點而言，也應慎重考量適度之財稅獎勵與資金融通措施，以協助企業改進或轉型。

清潔生產之推動應認定係基於環境法中之預防原則。預防原則在環境法規上雖常以不同之管制方式呈現，但在污染防治實務上最為具體之展現，應屬污染預防與清潔生產之推動。

以我國現況而言，雖有環境基本法為推動清潔生產之法源，然迄今未聞主管機關有訂定清潔生產專法之規劃。故基於我國憲法中比例原則與法律保留原則之精神，我國目前推動清潔生產之方式仍以引導、鼓勵與自願性為主，無法具備強制性，不能賦予企業行為或不行為之義務，故亦無可罰性。



## 四、結論

清潔生產之概念甚具前瞻性，係跳脫傳統環保法令之命令暨控制式管理，而以經濟誘因與環境責任為訴求。以我國現況而言，因無清潔生產專法，目前推動清潔生產之方式仍以引導、鼓勵與自願性為主，故而適度之財稅獎勵與資金融通措施是有其必要性。

另外，藉由教育宣導及績優表揚等活動，使企業意識到本身之企業社會責任，亦為可行之方法。而清潔生產技術之日新月異，如能使企業在進行污染預防與清潔生產之同時，可實際獲得經濟利益或減少未來損失，例如明確得知能資源之節省成本或估算日後環境損害賠償額之降低免除等，更可促使企業自動自發實施清潔生產之相關措施。

## 參考資料

- 1.聯合國環境規劃署網頁，<http://www.unep.fr/scp/cp/>。
- 2.經濟部工業局產業製程清潔生產與綠色技術資訊網，  
<http://proj.moeaidb.gov.tw/eta/>。
- 3.經濟部國際貿易局 WTO 入口網，<http://cwto.trade.gov.tw/cwto/>。



## 創新節能案例-智慧照明所帶來的綠色趨勢

陳重叡\*、王壬\*\*

### 摘要

面對全球能源短缺與暖化日益嚴重的問題，節能減碳已不能只再是口號，更需要實際的行動來實踐，而因應國際間綠色經濟的趨勢，智慧照明技術也逐漸成為全球照明市場所共同努力的目標。本文以某公司研發的產品「智慧型-感測調光 T5 日光燈」為例，藉由一般室內外照明常用的 T5 日光燈管，結合「可調光式電子安定器」與「多功能人體紅外線 PIR 感測器(pyroelectric infrared radial sensor)」，使產品可依照照明方向感測附近是否有人員的存在，進而達到自動調控亮度的效果，避免在燈下無人造成電力的浪費，也可減少在長期開關下，燈管壽命的縮短。看好目前全世界面臨能源危機與電價的節節升高，智慧調控產品導入照明領域帶來新的綠色行銷思維，也將進一步創造更環保節能的綠色趨勢。

【關鍵字】智慧照明、感測調光、PIR 感測器、綠色行銷

---

\*工業技術研究院 綠能與環境研究所 副研究員

\*\*工業技術研究院 綠能與環境研究所 經理

## 一、前言

隨著油價與電價的逐步調整，如何使能源更有效率的使用，是迫切需要解決的問題，也因此許多附帶節能效益的產品才能應育而生。在全世界注重節能的趨勢下，LED 燈雖然逐漸在市場上嶄露頭角，但由於價格還普遍較高，無法在短期內佔有照明市場率，完全取代 T5 日光燈成為主流。T5 日光燈不僅燈管省電，所採用的電子安定器亦更為省電。然而只有燈具省電，大眾習慣的不落實與較難監控的公共地區，耗電問題依舊存在。因此，配合感測器產品可自動感應進而調整光的亮度，不僅可兼顧所需要的照明與安全性，同時可將節能的理念徹底落實，其多樣式的設計在未來更可廣泛應用在其他照明產品上。本文以電子公司實際案例，說明產品如何在綠色設計的概念下，執行並改善產品的行銷策略，進一步邁向全球綠色經濟的趨勢。

## 二、智慧型-感測調光 T5 日光燈

目前市面上常見的各式日光燈管，一般是依照直徑來區分，大致有 T5、T6、T8、T10 及 T12 等不同規格，直徑依序分別為 5/8 英吋、6/8 英吋、8/8 英吋、10/8 英吋及 12/8 英吋，如圖 1 所示，各國的使用習慣均不同，其中 T5、T6 及 T8 燈管為世界主流，而台灣正在積極推廣汰換舊有耗能的燈具，全面將 T8 燈管改為較省電的 T5 日光燈，而在 2012 年的台灣國際照明科技展上，更有許多業者開始推出 LED 燈管，搶占節能照明的市場。針對許多辦公地點、工廠或公共場所，因安全性考量是屬於不可關閉燈光照明的地區，而且人員也不可能長時間駐足，屬於潛在性的能源浪費，因此配合可調光電子安定器結合 PIR 感測器產品的功能，即可全面貫徹有人員進入感應區時，自動啓用照明的機制，達到節能的理念。

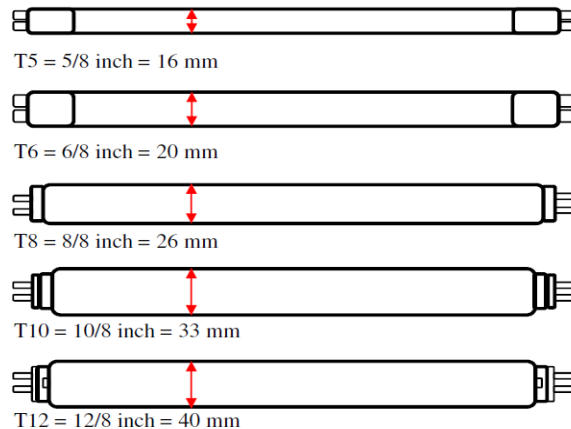


圖 1 日光燈管各式尺寸

## 2.1 電子安定器的節能潛力

安定器是一種由電機電子所構成的零件，使用在放電燈管的點燈裝置(如日光燈、水銀燈等)。主要是提供一個高壓以啟動並點亮燈管，然後再提供燈管穩定的工作電流。而安定器主要有 4 點功能：協助燈管啟動之作用、供給燈絲正常範圍之預熱電流、限制燈管兩極電壓之變化及穩定燈管電流。一般螢光燈管的壽命與性能除了本身設計以外，也與所搭配之安定器品質優劣相關，如果管電流設計過高或過低，將導致水銀蒸氣壓異常，而安定器的磁路設計是否接近飽和，導致波高率過高，也會造成燈管閃爍的現象，這些都是造成燈管壽命與點燈品質不佳的原因<sup>[1]</sup>。

圖 2 為一般常見的電子安定器，與傳統式安定器不同處在於，其更能發揮使用效益且更為省電，重量與溫度也比傳統安定器減少約一半，也不需要加裝啟動器。在燈管搭配電子安定器時，即使處於電力不穩定的條件下，仍可使光的輸出保持恆定，此時燈管的電流約為傳統安定器燈管電流之 75 %，燈管負擔因此減少，更可延長燈管壽命。雖然燈管電流減少 25 %，但光輸出仍維持不變，因此，燈管功率較傳統安定器減少了 25 %，也可省電 20 % 以上<sup>[3]</sup>。



圖 2 一般電子安定器<sup>[2]</sup>

由一般電子安定器所衍生出來的可調光式電子安定器，如圖 3 所示，其與一般燈管的電子安定器不同處在於，是直接將可調光的功能結合在電子安定器上，未來只要使用這類裝有可調光電子安定器的日光燈具時，只需簡單幾個步驟將「PIR 感測器」的連接線與安定器上的接線端接上，再裝上燈管與電源，可自動調光的系統就可開始運行，而未來更可將這個概念應用在其他燈源上。



圖 3 可調光 T5 電子安定器<sup>[4]</sup>

## 2.2 PIR 感測器的多元用途

現在市面上許多產品都是以節能設計為目標，很多電器產品其實並不需要隨時運作，只有在有人員靠近時再開啓即可，因此藉由一個能偵測人體紅外線的感測器，如圖 4 所示，來自動感應即可達到此目的。其原理是透過其外殼有一片多層鍍膜可阻絕大部分的紅外線，只讓溫度接近 36.5℃ 的波長的紅外線通過，藉此來感測人員的移動，進而達到自動控制效果<sup>[6]</sup>。目前紅外線感測器已經很廣泛應用在生活中，從軍事、醫療到日常生活，例：遙控器、電話、感應燈及防盜系統等，用途非常多元，而本文中將 PIR 感測器運用在燈具上，與可調光式電子安定器搭配後，使科技與生活完全接軌，達到隨時隨地，即時省電的目的。

圖 4 PIR 感測器<sup>[5]</sup>

### 三、產品綠色行銷案例

面對愈來愈多綠色設計產品的出現，可以證明全球正逐漸把環保訴求與產品作結合，可見這個綠色行銷未來將帶來極大的影響力，市場也更加廣大。然而大部分業者長期專精於產品技術的研發，容易忽略行銷上的推動，因此本文以某公司為例，針對產品研發後的行銷推廣進行策略的改善，以打入全球綠色貿易的行列。在綠色設計產品的行銷當中，首先必須了解產品自身的綠色特點與市場優勢，才能應用在生活中而達到實際效益，否則就與一般的產品無異。前述的 T5 日光燈是一般日常生活中常見的照明燈具，但與可調控的感測器產品結合以後，於用電上的節約更有助益，因此也就顯現了智慧節能產品的綠色亮點，才能吸引消費者購買。

對於企業而言，除了自家產品特點需要完全了解透徹外，更要懂得了解市場上的競爭優勢。以同類產品的競爭對手來看，小廠容易面臨較大照明品牌的威脅，畢竟國際知名的品牌，因長期的品牌建立，對於末端消費者來說有更強烈的品牌信賴度。而 SWOT 分析更是企業理論中非常實用的策略性規劃，針對內外部環境，依序列出產品的優勢與弱勢、機會與威脅，作為企業擬定的重要參考，其案例分析如表 1 所示。

表 1 某電子公司 SWOT 分析

SWOT 分析	優勢 (strengths)	弱勢(weaknesses)
內部條件	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 可感測調光之節能照明產品</li> <li>● 深厚的研發技術背景</li> <li>● 不斷測試、高品質的產品堅持</li> <li>● MIT 的製造保證與連帶之客戶信賴度</li> <li>● 價格優勢，相較其他知名照明品牌有 3~4 倍之差，運用在大面積時除了可讓客戶省下電與費用，更可減少大筆施工的成本</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 缺乏品牌識別與規範</li> <li>● 新品牌知名度不足，連帶降低消費者的信賴感與選擇</li> <li>● 目前宣傳的表現形式無法清楚傳達產品的實際效益</li> <li>● 現有行銷工具大多強調技術，導致綠色形象與品牌連結度較低</li> <li>● 產品獨特性不明確（類似產品多）</li> <li>● 缺乏標準化的安裝說明、配套措施</li> <li>● 缺乏企業發展藍圖與策略</li> <li>● 缺乏專業行銷、業務人員</li> </ul>
外在環境	機會(opportunities)	威脅(threats)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 未來全球節能、綠色產品的趨勢與市場前景</li> <li>● 國際級企業對於社會責任與綠能投入的需求，藏有大量商機</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 節能產品的實際效益未明朗，市場接受度與購買動機較低</li> <li>● 其他已發展成熟品牌的競爭</li> <li>● 相似產品的競爭</li> </ul>

然而此節能產品是由現有產品發展出來的，因此在銷售價格上相對較一般產品來得高。價格雖是綠色產品的單門，但對於行銷的成功與否，其實影響力不大。針對產品的價格，以此智慧節能產品來看整體效益，或許初設成本較 T8 燈管高，但省下的電費對整體成本的回收卻遠大於支出，因此仍保有一定的銷售市場。表 2 為將 T8 更換為 T5 與感測調光 T5 日光燈，應用在大樓地下停車場的耗電分析比較，在假設 1,000 支燈管的條件下，其結果顯示，使用感測調光型 T5 日光燈相較於 T8 燈管可節省約 48 % 的電費，換算回成本，大約 1.5 年就可回收。由此可知，消費行為不是光靠第一眼的成本價格就可以左右，還需要考量產品所帶來的後續效益。



表 2 耗電分析表<sup>[7]</sup>

1 年 365 天			1 支燈管耗電(註)	1,000 支燈管耗電(註)	節省成本
24 小時全亮	傳統 T8 40W (實際耗電 44W)	度	385	385,000	-
		元	1,540	1,540,000	
	標準 T5 28W (實際耗電 32W)	度	280	280,000	27%
		元	1,120	1,120,000	
8 小時全亮 16 小時省電狀態	感測調光型 T5 日光燈 28W (實際耗電 32W)	度	199	199,000	48%
		元	796	796,000	

註:以每度 4 元計算

以一般燈具類產品而言，常見的各大通路為大賣場、水電行及工程單位。而針對這類可智慧調控照明的產品，特別適用在一些不可關閉燈光照明的地方，例如：地下停車場、樓梯間、騎樓、捷運地下街、地鐵走道區、火車或客運站候車區、公用陸橋、學校走廊、工廠走道、公共廁所及地區景觀照明等，使得這些地方在必須符合光源照明的條件下，又能因此兼顧能源的節約。積極推廣產品的特色並展現出來，才能增加銷售訂單，而最有效的推廣方式，以實際的展示勝過各種平面廣告等推廣工具。配合相關會展或者擴展實體的手法，直接示範並體驗感測調光 T5 日光燈的智慧照明方式，藉由買主自行靠近感應區，讓眼睛直接感受燈具亮滅的程度，更能加深印象。而透過產品的實際架設，不僅可以測試具體的功能，同時讓對產品尚有疑慮的採購者可以實際看到產品效能，業者也可以因此回收有效且更具體的改善建議，進一步提升並改善產品。再透過會展的行銷與報章媒體的資訊傳播，三方面的配合就能有效達到此綠色產品的行銷推廣。

## 四、產品行銷策略的改善

綠色產品與行銷的結合，需要一套完整的配套措施，才能成功。因為市場上許多公家機構已有類似中央電子系統化或紅外線感測之產品，如果產品的獨特性未能突出，在產品優勢與獨特性(調節亮度與延長燈管壽命)更需強化。企業發展藍圖與實行的策略也很重要，因為長期鑽研於研發，獨漏實際市場經驗是一般業者常見的問題。因此本文所舉的案例，對於企業整體的綠色產品行銷包裝，則以下列方式分階段進行改善：

### 階段一 產品競爭力提昇

由於是屬於新研發的產品，因此，仍有完整度與精緻度不足的疑慮，所以在感測器與安定器的設計與組合方式，則請更專業的產品設計指導進行改善。目前也以“擴展實體 show room”的手法，在學校等公家機關大量示範實行，希望藉此獲得意見回饋，來改善產品，並增加實際案例以提昇未來推廣時客戶信賴度。

### 階段二 品牌建立

由於缺乏品牌的識別規範，容易造成品牌的識別不清，因為產品名稱不同，無法建立起對品牌的信賴與一致性的印象。所以該公司評估 hwin 品牌的未來發展性，並考量商標註冊問題，考慮由 T5 產品特色進行新的品牌命名，例如 High 5(將英文片語 high five 與高效能 T5 的意義結合)，由產品的發展連帶將品牌的識別度與知名度建立起來。

在企業形象的定位中，亦將企業的獨特性與優勢作清楚的區隔，例如將品牌在光電領域的專業與節能的綠色貢獻，以利後續品牌形象的發展與推廣。而重新進行 CI 識別元素的設計及規範，包含印刷字體、標準組合、企業標準色系，並發展輔助圖像，也是公司未來提高品牌在國內外市場上的識別度與競爭力的重點。

將品牌規範清楚的建立，會用較一致性的視覺表現與企業形象，應用於品牌對外的所有接觸點，例如名片、基本文書信件、產品外箱等，並作為一系列品牌力量與識別的延伸。

### 階段三 目標客群與市場定義

針對此產品特性，如果能選對適當的地區，將有利於產品的行銷與推廣，例如：

- 組織機構：學校、醫院的照明，如走廊、廁所等
- 大型企業：外商或國際級企業對於環保意識較為重視，藉由投入綠色建築達到互利、共同提昇品牌形象，可發展性較高
- 建商、土木、工程單位：將瞄準未動土的大型建案、預售屋、管委會、或其他可能參與照明施工的單位進行推廣
- 公共空間照明：如停車場、騎樓、候車亭等
- 商業空間照明：如商店櫥窗、餐廳庭院景觀等
- 工廠：在生產線照明上，因機器不能停止運作，將設定在作業員離開後減少亮度

### 階段四 行銷工具建立

以本案例而言，缺乏專業行銷工具、現有產品介紹、DM 等視覺表現與完整度不足以及缺乏品牌形象展現，無法帶給客戶成熟的品牌信賴度。而文宣中省電量、成本的說明大量使用複雜的文字與表格，更無法清楚傳達產品的價值與實際效益，引起客戶的購買動機。且產品沒能展現安裝方式與流程，缺乏標準化的配套措施，也不易引起客戶購買的欲望。

因此對於企業簡介與產品 DM 會有清楚區隔，企業簡介部份將以視覺、圖像化將綠色形象與專業照明的個性凸顯，避免導入過多產品技術訊息，清楚的將企業理念傳達。將複雜的省電效能、場域坪數與回收成本、時間轉換為簡單算式，將“實際效益”清楚讓客戶了解，並藉由專業的視覺設計，準確的傳達產品特色(例如以人離開後的光源變化情境為廣告主題)，以提高客戶對品牌的整體信賴度。而安裝方式的容易度與整體流程對於客戶也是相當重要的疑慮與考量，因此迫切需要建立標準化、系統化的模組。

將案例詳細的紀錄(例如客戶名稱、地點、所需器材、施工過程、成效展示、客戶意見回饋)，口碑具象化，相信可以強化未來客戶對產品的信心，協助業務推廣。網站是讓世界認識企業的大門，更是建立形象的最佳平台，因此在網站的整體

視覺與色彩上，也會呼應品牌形象，並強化與同業間的差異性作為主要訴求。

### 階段五 業務及推廣

藉由業務員與具有較廣人脈之高層人員，共同針對上述目標客群會面洽談，預期可以增加合作的機會。而與媒體建立良好關係、增加報導機會(例如參與綠色、省電等議題)與曝光、廣告刊登(照明雜誌、網路等宣傳媒介)、定期參加國內外展覽(照明展、綠色生活展等)之規劃以及國內外經銷商與 B2C 通路佈局(特力屋、水電行、工程單位等)，未來也都是產品在行銷推廣上的執行重點，預期透過以上各階段的循序漸進推動，將能有效拓展產品無論在國內外的市場銷售實績。

## 五、結論

面對全球能源危機，能隨時節約能源將是所有人面臨此議題的最佳解決方式之一，台灣企業絕對擁有技術研發的潛力，將綠色環保的理念與生活結合，而面對國際間的綠色趨勢，價格也將不再是綠色產品的問題。運用現成的技術，來減少能資源的浪費，更可以幫助企業走向國際趨勢，許多綠色的創新改善都可以讓成本快速回收。台灣的綠能產業眾多，從太陽光電、LED 照明、風力發電、生質燃料、氫能與燃料電池、能源資通訊到現在因油價上漲愈來愈熱門的電動車輛，都是因應內外環境情勢而起的重要新興產業，因此可以預期，能源政策一直再變，科技與產品也會持續往綠色的趨勢邁進。

## 參考文獻

- 1.東亞照明網頁，安定器介紹，[http://www.chinaelectric.com.tw/ballast\\_01.htm](http://www.chinaelectric.com.tw/ballast_01.htm)
- 2.弘進電子股份有限公司網頁，產品型錄，電子安定器，  
[http://www.trade-taiwan.org/Products-Detail-index.asp?t\\_seq=99488](http://www.trade-taiwan.org/Products-Detail-index.asp?t_seq=99488)
- 3.東亞照明 2012 綜合照明型錄，p.380。

- 4.弘進電子股份有限公司，省電王說明使用說明書，p.2。
- 5.弘進電子股份有限公司，智慧型-感測調光 T5 日光燈型錄，p.4。
- 6.幸賀股份有限公司網頁，技術文章，紅外線人體感測器之控制原理與應用，  
[http://www.seraphim.com.tw/upfiles/c\\_supports01326073876.pdf](http://www.seraphim.com.tw/upfiles/c_supports01326073876.pdf)
- 7.弘進電子股份有限公司，智慧型-感測調光 T5 日光燈型錄，p.3。



## 綠色技術-藻類生質柴油

周明顯\*

### 摘要

微藻利用陽光及二氧化碳蓄積高濃度脂肪，以其產製生質柴油之土地需求為植物之 1/10~1/300，不會影響穀物生產。微藻油脂富含不飽和脂肪酸，須先經氫化後方可製造符合美國或歐盟規範的生質柴油，其後產程與傳統製程並無顯著差異。微藻平均倍增時間為 1 天，含油量 20~50%乾重，如以 30%含油微藻產製運輸用油，以台灣地區每人用油量為美國之半計，須土地面積 5,000 平方公里(約當台灣土地面積之 1/7)，即可滿足台灣地區需求。

生產 100 噸微藻約可固定 183 噸二氧化碳，理論上微藻生質柴油屬碳平衡。二氧化碳一般可近乎無償取自燃燒化石燃料之電廠煙道。大量微藻產製使用連續系統，白天生產，夜間維持攪拌，最多有 25%白天產製之藻細胞會因呼吸作用在夜間消失。商業化之大量微藻產製使用迴流池及管式光生化反應器，後者生產所得培養液微藻濃度及體積產力為迴流池之 30 倍，微藻回收成本遠低於迴流池者。

在每年 10,000 噸之微藻(油脂含量 30%)生產規模下，每公斤微藻油脂之油藻成本為 USD 1.41(管式)及 1.81(迴流式)，再加上同數額之製造成本，每公升藻油成本為 USD 2.80，遠高於棕櫚油 USD 0.52。此價格顯然不具競爭力，故除藻油外，微藻可望經基因改造作多角化利用。

【關鍵字】微藻、生質柴油、成本分析、二氧化碳減量

---

\*國立中山大學環境工程研究所 教授

## 一、前言

依據紐西蘭 Massey 大學科技研究所 Yusuf Chisti 教授之論文「以微藻產製生質柴油(Biodiesel from microalgae)」(Yusuf, 2007)，由於日益短缺及燃燒排放二氧化碳，化石燃料被認為是非永續能源，為達環境及經濟永續，可再生(renewable)燃料之發展為刻不容緩之事。生質柴油之產製及使用產生之淨二氧化碳遠低於化石燃料，具二氧化碳平衡(carbon neutral)特性，可望成為主要可再生性替代能源之一。然而，目前生質柴油主要產自能源作物(大豆、菜籽、棕櫚、玉米等)、動物油、廢食用油，其產量僅能供應目前運輸用油之一小部份。就目前所知，微藻利用陽光及二氧化碳蓄積高濃度脂肪，以微藻油脂產製生質柴油最有可能滿足短缺的運輸用油需求。

微藻轉化太陽能及二氧化碳，為製造生質柴油、食物、飼料、高價值生技產品(high-value bioactives)等之原料。經微藻轉化之可能再生能源有甲烷、生質柴油、氫氣等，在使用方面，以液態之生質柴油最為方便。微藻轉化為生質柴油早在 1980 及有相關文獻記載，然因最近之高油價及化石燃料使用導致全球暖化問題而再度獲得重視。

目前，因幾個公司積極嘗試將微藻產製生質柴油之製程商業化，生質柴油主要產自動植物油脂之方式將逐漸轉變。生質柴油之製造技術發展及使用已近 50 年，屬成熟燃料(a proven fuel)，其產程如圖 1 所示，微藻產製生質柴油之產程與圖 1 並無顯著差異。



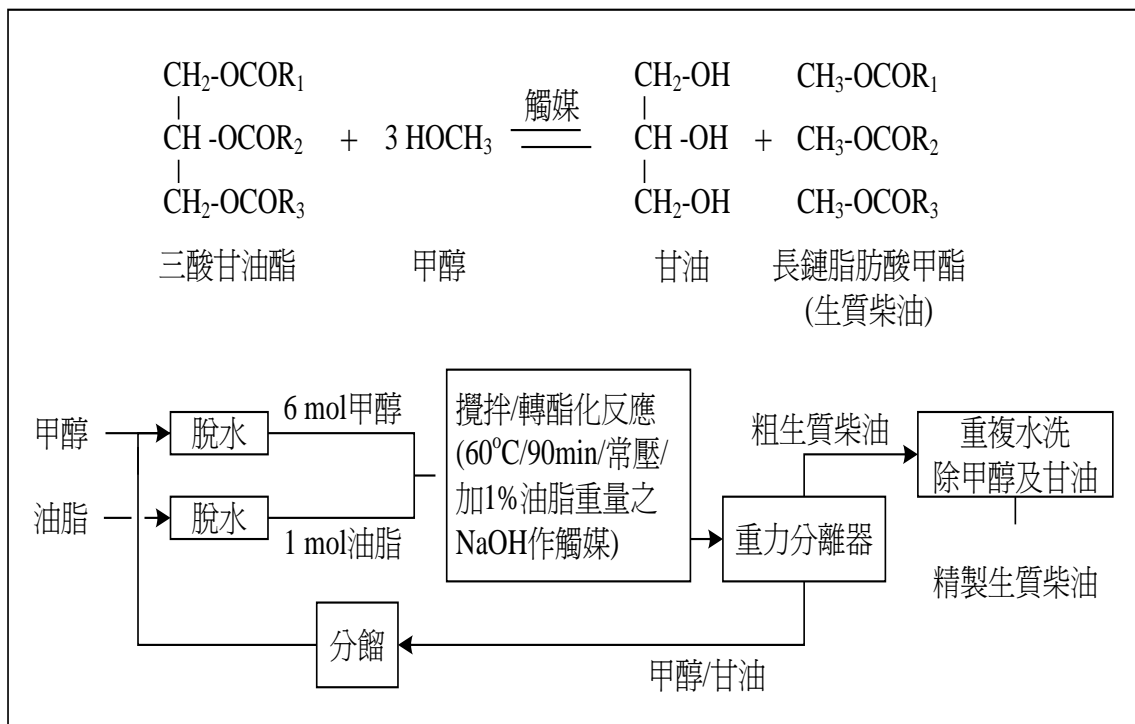


圖 1 通用之生質柴油製程

## 二、以微藻產製生質柴油之潛力

表 1 顯示以各種油脂作物及微藻產製生質柴油所需之土地面積比較。若以生質柴油完全取代目前美國之運輸用油，每年生質柴油需要量為 5.3 億公秉(0.53 billion m<sup>3</sup>)，參考表 1，以植物油作為原料即需美國現有總作物植種面積之數倍至十數倍，顯然無法滿足該需求；若以微藻作原料，則總土地面積需求為 40,000~90,000 平方公里之面積，約當台灣土地面積之 1.1~2.5 倍。

由表 1 知，以微藻產製生質柴油具完全取代化石柴油之潛力。一般而言，在對數生長期，微藻之倍增時間僅為 3.5 小時，平均其倍增時間僅為 1 天。一般微藻含油量為 20~50%乾重(表 2)，視其品種及生長狀況而定。使用微藻產製生質柴油不會影響穀物之生產。

表 1 生質柴油原料產製之土地面積需求比較

作物	油產量 (公升/平方公里)	土地面積需求 (萬平方公里)*	折算美國現有耕地面積之倍數**
玉米	17,200	3,080	16.920
大豆	44,600	1,188	6.520
油菜籽	119,000	446	2.440
椰子	268,900	198	1.080
棕櫚	595,000	90	0.480
微藻(含油 30%)	5,870,000	9	0.050
微藻(含油 70%)	13,690,000	4	0.022

\*產製美國年運輸用油折算為生質柴油需要量 5.3 億公秉

\*\*產製 5.3 億公秉生質柴油所需耕地面積為美國現有耕地面積之倍數

表 2 一些微藻之含油量

微藻	含油量(%乾重)	微藻	含油量(乾重%)
Botryococcus braunii	25~75	Nannochloris sp.	20~35
Chlorella sp.	28~32	Nannochloropsis sp.	31~68
Cryptocodinium cohnli	20	Neochloris oleoabundans	35~54
Cylindrotheca sp.	16~37	Nitzschia sp.	45~47
Dunaliella primolecta	23	Phaeodactylum tricornutum	20~30
Isochrysis sp.	25~33	Schizochytrium sp.	50~77
Monallanthus saline	>20	Teiraelmis sueica	15~23

### 三、微藻生產

微藻生產所需營養源與穀物類似，即陽光、二氧化碳、水、無機鹽等，溫度 20~30°C。

無機鹽包括氮、磷、鐵、矽，最低無機鹽需求可參考微藻之組成公式  $\text{CO}_{0.48}\text{H}_{1.83}\text{N}_{0.11}\text{P}_{0.01}$  (式量 =  $12 \times 1 + 16 \times 0.48 + 1 \times 1.83 + 14 \times 0.11 + 31 \times 0.01 = 23.36$ ，重量成分% = C 51.36、O 32.88、H 7.83、N 6.59、P 1.33%)，磷酸鹽需過剩，因磷

多與金屬結合而僅少量為微藻吸收。海水可提供一些無機鹽，再補充一些硝酸鹽、磷肥及微量營養源(micronutrients)。

一般微藻含有 50%重量的碳，均來自二氧化碳，生產 100 噸微藻約可固定 183 噸二氧化碳(依微藻式量計算，每一 23.36 g 式量微藻需一分子 44 g 二氧化碳，二氧化碳/微藻 =  $44/23.36 = 1.88$ ，即生產 100 噸微藻約可固定 188 噸二氧化碳)，可藉 pH 控制以控制二氧化碳輸入培養液中。理論上，微藻生質柴油屬碳平衡，即取自大氣之二氧化碳與燃燒後釋放回大氣之二氧化碳質量幾乎相等。為提高生產速率，二氧化碳一般可近乎無償取自燃燒化石燃料之電廠煙道。

大量微藻產製使用連續系統，白天連續注入營養源並收取藻細胞，夜間則停注營養源但維持攪拌以免細胞沉澱。因呼吸作用，最多有 25% 白天產製之藻細胞會在夜間消失，其比例視日照時間長短、日照強度、日間溫度、夜間溫度等而異。

目前商業化之大量微藻產製使用大型迴流池(raceway ponds)及管式光生化反應器(tubular photobioreactors)等 2 種，分述如下：

### 3.1 大型迴流池

圖 2 顯示微藻培養用大型迴流，一般液深 0.3 公尺，以水泥或黏土內襯白色塑膠製成。以旋轉槳葉作迴流動力，白天連續於槳葉下游注入營養源，並於槳葉上游收取藻細胞，夜間則停注營養源但維持攪拌以免細胞沉澱。此型系統於 1950 年開始使用，最大型者占地 440,000 m<sup>2</sup>。

大型迴流系統藉水之蒸發冷卻，冷卻蒸發水量相當大，溫度隨氣溫變化。另外，其二氧化碳利用率較管式光生化反應器低，兼有雜藻、細菌及賴藻類維生之生物生長，故整體微藻濃度及產率偏低。

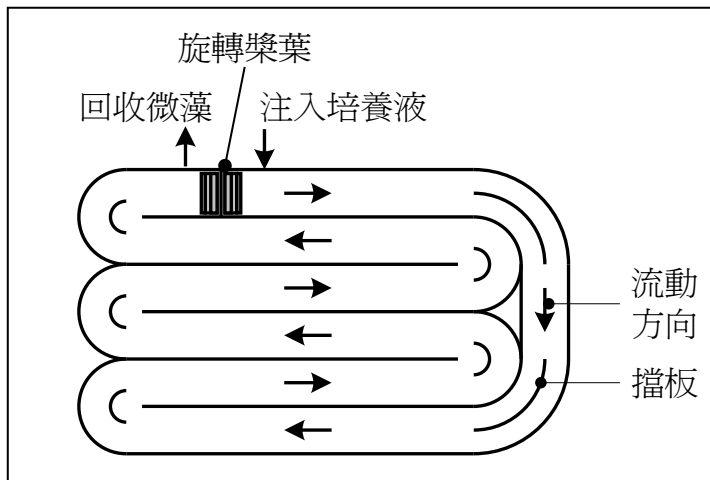


圖 2 微藻培養用大型迴流池

### 3.2 管式光生化反應器

圖 3 顯示管式光生化反應器系統，由於幾近密閉式，可培養單一種微藻。一般反應管為透明壓克力或玻璃材質，直徑在 10 公分以內，以免影響光線透入而降低微藻生產能力。培養液以機械幫浦或氣舉式(air-lift type)幫浦循環，使管中流體成亂流而利於陽光之吸收、藻體之懸浮、氧氣之脫除、二氧化碳之吸收。

循環幫浦以氣舉式或低轉速式機械幫浦為佳，以免剪力傷及藻體。由於光合作用( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{carbohydrates} + \text{O}_2$ )之進行，有些系統之氧氣產力高達  $10 \text{ g/m}^3 \cdot \text{min}$ ，需將培養液導入脫氣槽，通入空氣以吹除反應產生之氧氣，溶氧濃度需降至約  $30 \text{ mg/l}$  以下，以免抑制反應。二氧化碳可於脫氣槽注入或直接注入管中，由於反應消耗二氧化碳，反應液pH會升高，可以pH為指標作二氧化碳添注。在夜間，可以冷卻水通入埋置於脫氣槽中之冷卻管，以降低藻液溫度，進而降低其內呼吸損耗。

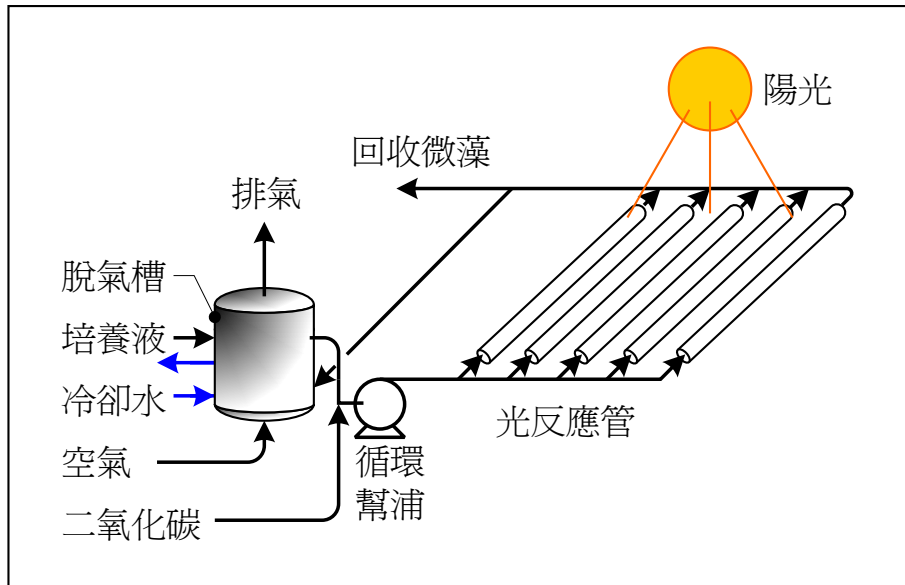


圖 3 管式光生化反應器系統

### 3.3 迴流池與管式反應器系統性能比較

表 3 顯示管迴流池與管式反應器系統性能比較。管式反應器所得之培養液微藻濃度及體積產力為迴流池所得者之 30 倍，由於微藻濃度高，管式反應器所得之微藻回收成本遠低於迴流池者。

表 3 迴流池與管式反應器系統性能比較

參數	管式反應器	迴流池
年微藻產量(kg)	100,000	100,000
體積產力(kg/m <sup>3</sup> .d)	1.535	0.117
面積產力(kg/m <sup>2</sup> .d)	0.048 <sup>[1]</sup>	0.035 <sup>[2]</sup>
	0.072 <sup>[3]</sup>	
培養液微藻濃度(kg/m <sup>3</sup> )	4.00	0.14
稀釋速率(1/d)	0.384	0.250
面積需求(m <sup>2</sup> )	5,681	7,828
產油能力(m <sup>3</sup> /公頃)	137 <sup>[4]</sup>	99.4 <sup>[4]</sup>
	58.7 <sup>[5]</sup>	42.6[5]
年CO <sub>2</sub> 消耗量(kg)	183,333	183,333

表 3 迴流池與管式反應器系統性能比較(續)

參數	管式反應器	迴流池
系統概述	每組有 132 條並排管，每條管長 80 m，管徑 0.06 m，計 6 組	每池面積 978m <sup>2</sup> (12mW×82mL×0.3mD)，計 8 池
成本(USD/kg 微藻) (CO <sub>2</sub> 無償取得)	2.95	3.80

註：[1]以設施面積為準；[2]以真正池面積為準；[3]以管組之投影面積為準；[4]以微藻含 70% 油脂為準；[5]以微藻含 30% 油脂為準。

## 四、微藻生質柴油之適用性

生質柴油須符合 ASTM D6751 之美國規範或 EN 14214 之歐盟規範。如用為加熱燃油，須符合 EN 14213 之歐盟規範。

與一般植物油比較，微藻油脂富含多元不飽和脂肪酸(polyunsaturated fatty acids)，雙鍵數為 4 或 4 以上，如雙鍵數為 5 的 EPA (eicosapentaenoic acid)或雙鍵數為 6 的 DHA (docosahexaenoic acid)。含多元不飽和脂肪酸之生質柴油易於貯存時被氧化而變質，EN 14214 因而規定生質柴油所含之二元不飽和脂肪酸酯(methyl ester of linolenic acid)須在 12 wt.%以下，但 EN 14213 加熱燃油則無此規範。另外，EN 14213、EN 14214 規定每 100 g 生質柴油之不飽和度碘價(iodine value)需分別在 130、120 g iodine 以下；再者，歐盟也規定生質柴油之脂肪酸及其甲酯中，雙鍵數為 4 或 4 以上者不得高於 1 mol %。顯然，微藻油脂須先經氫化處理後才能製造符合美國或歐盟規範的生質柴油。

## 五、經濟評估

如表 3 所示，在每年 100 噸之微藻生產規模下，每公斤油藻之成本為 USD 2.95~3.80；如擴大為每年 10,000 噸，每公斤油藻之成本降為 USD 0.47 (管式)及 0.60 (迴流式)。以後者規模，如微藻油脂含量 30%，每公斤微藻油脂之油藻成本為 USD 1.41 (管式)及 1.81 (迴流式)，再加上同數額之製造成本，每公升藻油成本為 USD 2.80，遠高於最便宜的棕櫚油 USD 0.52。

2006 年，美國化石柴油售價為 USD 0.66~0.79/l，內含稅(20%)、原油(52%)、

煉製(19%)、配售(9%)等費用。如扣除稅及配售費用，平均售價為 USD 0.49/l，內含原油(73%)及煉製(27%)。同時期，每公升棕櫚油製造的生質柴油售價為 USD 0.66，內含棕櫚油(79%)及煉製(21%)。在生質柴油免稅之前提下，每公升棕櫚油成本為 USD 0.48 以下，方能與化石柴油競爭。此意味每公升藻油成本需在 USD 0.48 以下，與每公升藻油成本為 USD 2.80(微藻油脂含量 30%)或 USD 0.72 (微藻油脂含量 70%)比較，藻油生產成本尚需大幅降低。

藻油如欲取代原油，在熱值設為原油之 80%時，其成本控制值與原油價格之相關式：

$$\text{藻油成本(USD/l)} = 0.0069 \times \text{原油價格(USD/桶)}$$

原油價格 100 USD/桶時，藻油成本需在 USD 0.69/l 以下，其成本顯然需設法降低。

## 六、改進微藻生質柴油之經濟競爭力

如前所示，藻油成本(USD 2.80/l)遠高於最便宜的棕櫚油(USD 0.52/l)，以此價格顯然不具競爭力。故除藻油外，微藻需作多角化利用。

除藻油外，微藻尚含蛋白質、碳水化合物及其他營養成分，榨油剩餘之油粕可作飼料或發酵為甲烷，甲烷可發電外售或供微藻培養、榨油、生質柴油製造等程序使用。

另外，微藻經基因改造，可望達成下列目標：(1)增加光合效率以增加微藻產率、(2)增加微藻生長速率、(3)增加微藻油脂含量、(4)增加微藻之耐溫性、(5)增加微藻之耐光性。在工程方面，光反應管之微藻之曝光時間及周期影響微藻生長速率甚為顯著，此應續行研究。

## 參考文獻

1. Yusuf Chisti, Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances* 25, 294-306 (2007).





# 一貫作業鋼廠清潔生產技術

張西龍\*、歐正章\*\*

## 摘要

本文介紹一貫作業鋼廠，為達成清潔生產目標，在環境面向所採行之清潔生產技術。

清潔生產技術包括提高能源使用效率(減少溫室氣體排放)、減少污染物排放、提高用水效率、廢棄物資源化等。提高能源使用效率，乃在能源使用過程中，提昇燃燒效率、加強廢熱回收、整合區域能源與資源，讓能源於使用過程中做最有效地利用。減少排放之污染物包括空氣污染物、廢水、固體廢棄物、溫室氣體等。在降低氮氧化物、硫氧化物及粒狀污染物防制方面，則採行提高低氮低硫之無煙煤用量、增設四號焦爐氣加鹼脫硫設備、低氮氧化物燃燒技術、增設尾氣循環系統及燃煤鍋爐脫硝系統、固定源增設防塵系統、對原料輸送及爐渣冷卻設施等逸散源加強包封等方案。至於減少戴奧辛排放，則分別加裝活性碳噴注設備及換裝脫硝/脫戴奧辛雙功能的選擇性觸媒(SCR)及增建處理固雜料之轉底爐(Rotary Hearth Furnace)。固體廢棄物減量，則透過廠內製程循環再利用，減少廢棄物產出量；亦透過區域資源整合，將整體廢棄物做最有效應用，以達成「生態園區」之目標。

【關鍵字】一貫作業鋼廠、清潔生產、節能減排、能資源整合

---

\*中國鋼鐵公司能源環境事務推動辦公室 副總經理

\*\*中國鋼鐵公司能源環境事務推動辦公室 專業工程師

## 一、前言

一貫作業鋼鐵廠，係指以鐵礦砂、煤礦為原料來進行煉製鋼鐵產品的工廠或製程。清潔生產、永續發展之綠色潮流，已為全球普世價值。鋼鐵業屬於能源密集產業，受到此一世界潮流之壓力，更為明顯。因此，全球鋼鐵業者為符合綠色潮流，無不積極因應，努力規劃、期望達成永續發展之目標。

世界鋼鐵協會(world steel association)在其永續發展執行方針便指出，擬定相關永續發展政策時，應涵蓋環境、社會與經濟 3 個面向。環境面：重視環境保護與鋼鐵回收率之提升，並與相關企業或組織分享鋼鐵永續發展之專業知識內容。社會面：將股東、供應商、勞工、消費者及社區納入考量。經濟面：則以消費者需求為考量，輔以有效率之經營管理手法，達成股東預期獲利標準。世界鋼鐵協會針對清潔永續生產已討論並訂定評量指標，包括單位粗鋼 CO<sub>2</sub> 排放、單位粗鋼能耗、物料使用效率、環境管理系統、傷害頻率、員工訓練、研究及投資額度(針對新製程及新產品)、經濟貢獻等，未來擬再新增水資源利用率、社會責任道德評比、對社區或社會附加價值提升、鋼品對能源節約及 GHG 減量影響等項。

在環境、社會與經濟 3 個面向當中，環境面對於廣泛的社會大眾相關性較高(張西龍 2011)。本文乃針對一貫作業鋼鐵廠為達成環境面清潔生產要求，所採取之技術進行介紹，內容包括提高能源使用效率(減少溫室氣體排放)、減少污染物排放、提高用水效率、廢棄物資源化等。

## 二、提高能源使用效率

提高能源使用效率，則在能源使用過程中，提昇燃燒效率、加強廢熱回收、整合區域能源與資源，讓能源於使用過程中做最有效地利用。在提昇燃燒效率方面，開發引進蓄熱式燃燒系統、高速燃燒器、富氧燃燒器等先進燃燒技術，應用於鋼廠各製程。廢熱回收，則透過廢熱回收潛力調查分析、鋼胚熱進爐、復熱器改造提升廢氣顯熱回收效率、廢熱鍋爐分析與設置、低溫廢熱回收等來提高廢熱回收量及比率。整合區域能源與資源乃充份利用各生產製程產出之副產物理念，減少整體能源

之耗用量，透過將工業區內臨近友廠互通多餘能源，如：蒸汽、焦爐氣、電力、氧氣、氮氣、氫氣、燃料氣及純水等，減少整體能源使用量、進而減少溫室氣體排放量。

### 三、減少污染排放

排放之污染物包括空氣污染物、廢水、固體廢棄物、溫室氣體等，茲針對減少這些污染物排放所採取之措施及技術分述如下：

#### 3.1 空氣污染物減排

空氣污染物主要包括氮氧化物、硫氧化物、粒狀物、揮發性有機污染物、戴奧辛等，在廠區內進行環境監測與檢測，於民國 84 年成立環境監測中心，除針對廠內固定污染源排氣實施連續監測及定期檢測外，並以周界 5 個空氣品質監測系統及 2 個看板連續監測及顯示廠區周遭空氣品質。至民國 97 年止，廠區煙囪總數共 294 支，其中有 27 支設置了連續監測系統，以監控傳統污染物(氮氧化物、硫氧化物及粒狀物)的排放濃度及總量。其中 25 支與高雄市環保局即時連線，接受市政府的嚴格監督。



圖 1 環境監測中心及定期檢測

針對氮氧化物、硫氧化物及粒狀污染物之防制，已採行提高低氮低硫之無煙煤用量、增設 4 號焦爐氣加鹼脫硫設備、低氮氧化物燃燒技術、3 號燒結增設尾氣循環系統及燃煤鍋爐脫硝效率提高、固定源增設集塵系統、對原料輸送及爐渣冷卻設

施等逸散源加強包封等方案。

至於減少戴奧辛排放，資源回收工場已於民國 93 年加裝活性碳噴注設備，可確保戴奧辛排放低於法規要求之  $0.1\text{ng-TEQ/Nm}^3$ 。燒結工場則換裝脫硝/脫戴奧辛雙功能的選擇性觸媒(SCR)，並改善靜電集塵系統，使其戴奧辛排放符合民國 97 年 1 月生效之  $1.0\text{ ng-TEQ/Nm}^3$  法規要求。另為符合民國 99 年平均值低於  $0.5\text{ ng-TEQ/Nm}^3$  的高雄市地方標準，增建處理固雜料之轉底爐(rotary hearth furnace)，以降低燒結工場固雜料的回收量，達到源頭改善的效果。

### 3.2 水污染防治

一貫作業鋼鐵廠從原料製備、煉焦、煉鐵、煉鋼、澆鑄、軋鋼等製程，無一不用到水(劉國欽 2004)。原水進入一貫作業鋼鐵廠，通常會先導入緩衝蓄水池，經石灰軟化處理後，送至全廠各製程水系統。各個水系統的排放水，經由分流式工業下水道收集系統匯集後，送至下游工業廢水處理場進行處理。至於生活污水，包括盥洗和餐廳污水，則透過遍佈全廠各地的衛生下水道收集系統，收集至下游與煉焦製程排放水合流，進入廢水處理工場的二級活性污泥系統進行生化處理。全廠各股廢水經過上述管末處理設施處理後，其處理水再經匯集於放流池淨化後放流。

### 3.3 溫室氣體盤查與減排

我國環保署於民國 101 年 5 月正式公告「二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、六氟化硫及全氟化碳」等溫室氣體為空氣污染物，並將優先推動溫室氣體排放申報法制作業。針對此一趨勢與需求，參考聯合國政府間氣候變遷專家小組(IPCC)、世界鋼鐵協會、世界永續發展協會等國內外機構的盤查指引後制定了專業的溫室氣體盤查系統，與成本會計帳做交叉核對後可確保盤查數據的準確性、可靠性與可查證性。並依 ISO 標準制定了「溫室氣體管理規定」。其架構及重要原則如下圖所示：

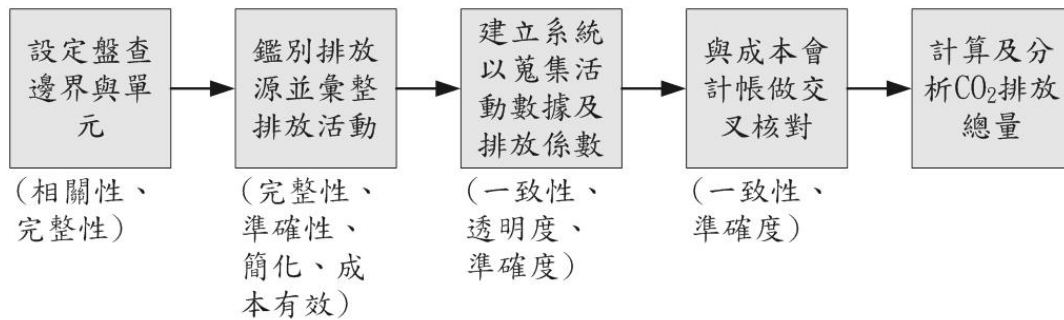


圖 2 溫室氣體排放盤查架構與原則

### 3.4 固體廢棄物減量

一貫作業鋼鐵廠在生產過程中，會伴隨產出高爐石、轉爐石、脫硫渣、集塵灰、礦泥、銹皮、廢耐火材、營建棄土、石灰石泥餅等。為達成固體廢棄物減量，最佳之策略、方案或作法，乃針對製程所產出的固體廢棄物進行資源化再利用。固體廢棄物減量，可透過廠內製程循環再利用，減少廢棄物產出量；也可透過區域資源整合，將整體廢棄物做最有效應用，達成「生態園區」之目標。

### 3.5 土壤及地下水污染預防與整治

為掌握廠區內土壤及地下水品質，落實土壤、地下水污染預防工作，於廠區設有 16 口地下水監測井定期進行採樣檢測，以達成提早警戒作用。歷年分析數據結果均屬正常範圍，可確實掌握地下水品質狀況。在進行土地租賃買賣時，則嚴格進行地下環境調查，以確保無污染糾紛。

## 四、提高用水效率

一貫作業煉鐵製程需大量使用原水作為冷卻、除銹、潤滑、洗塵及環保等用途。以中鋼公司為例，原水來源來自高雄鳳山水庫(目前有效蓄水量為 340 萬噸)，每日工業供水水量約為 30 萬噸。民國 99 年中鋼平均每日原水使用量約 14.2 萬噸，佔鳳山水庫工業供水量的 1/2。中鋼多年來勵行用水管理及回收水再利用工作，用水回收率已高達 97.86%。雖然民國 99 年粗鋼產能較 98 年增加 17%，然整體用水

量只增加 2.2%，單位粗鋼之原水用量由 6.03 噸降至 5.38 噸。

表 1 用水與回收率趨勢

	95 年	96 年	97 年	98 年	99 年
原水補充用水量(萬噸)	5,987	6,134	5,919	5,082	5,200
製程用水回收率(%)	97.94	97.92	97.91	97.88	97.86
製程用水循環量(萬噸)	253,071	255,414	243,038	234,417	237,632
單位粗鋼用水量(m <sup>3</sup> /噸鋼胚)	5.56	5.44	5.52	6.03	5.38

註：中鋼動力工場的發電無法使用海水或河水冷卻，使用的原水量約 1 m<sup>3</sup>/噸粗鋼

為降低原水用量，盡量針對製程廢水進行廢水純化並予以回收再利用。將工業放流水透過超濾(UF)及逆滲透(RO)膜去除水中大部分懸浮微粒及離子物，再經過離子交換系統，使產水水質符合高壓鍋爐用的純水標準，供動力廠鍋爐水使用。此純化場產能為 13,500 m<sup>3</sup> 的 RO 水，其中 9,000 m<sup>3</sup> RO 水再純化成鍋爐用純水。此一計畫除可降低放流量，也能降低原水的使用量，達到減排及提升企業形象之目的。

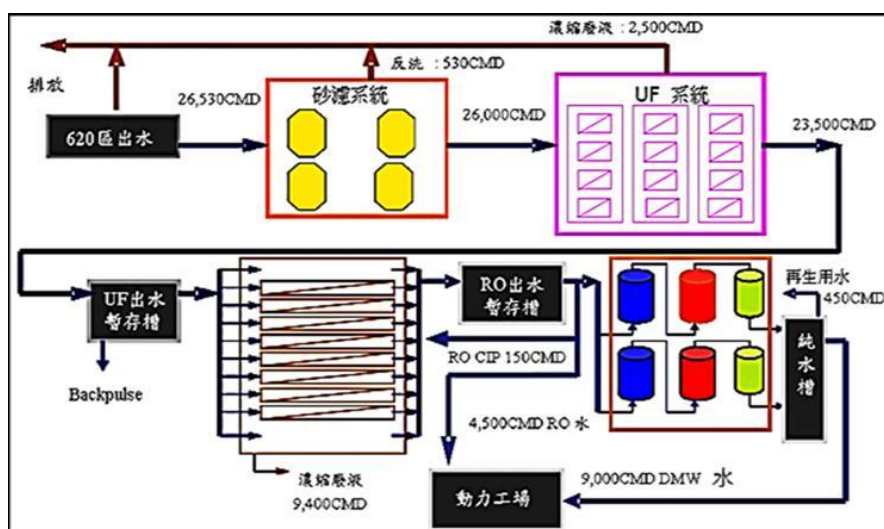


圖 3 製程廢水純化回收再利用

除在製程內部提升水資源利用外，開發新水源也是一項重要環節，以確保水源供應不慮匱乏。擬由目前單一水源，分散至多元化水源，以避免斷水之危機出現。

為達成此一趨勢目標，應積極進行都市污水回收及海水淡化技術開發計畫。

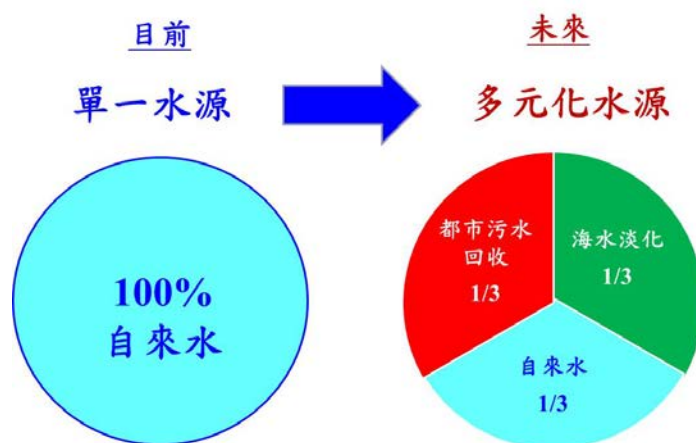


圖 4 掌握水源之策略趨勢

## 五、廢棄物資源化

一貫作業鋼鐵廠在生產過程中，會伴隨產出高爐石、轉爐石、脫硫渣、集塵灰、礦泥、銹皮、廢耐火材、營建棄土、石灰石泥餅等固體廢棄物。針對這些固體廢棄物，所採取回收再利用技術方案，如下表所示。

表 2 一貫作業鋼鐵廠固體廢棄物資源化利用技術方案

種類	資源化利用技術方案
高爐石	水淬後生產爐石粉，或氣冷後作為各類工程材料。
轉爐石	回收殘鋼及部份作為燒結工場原料、高爐助熔劑及盛渣桶墊底料外，其餘作為整地、臨時道路、瀝青混凝土骨材、混凝土助劑。
脫硫渣	回收殘鐵後用於整地、臨時道路、土壤改良材料低強度混凝土及水泥製造原料。

表 2 一貫作業鋼鐵廠固體廢棄物資源化利用技術方案(續)

種類	資源化利用技術方案
集塵灰	除了極少量煤灰與礦泥拌混後作為水泥製造原料外，其餘全部回收做為煉鐵原料。
礦泥	優先在廠內回收做為煉鐵原料，無法回收者外售水泥廠做為水泥生產原料。
銹皮	回收做為煉鐵原料。
廢耐火材	回收殘鋼及部份作為煉鋼助熔劑、渣桶保護材外，其餘供應商逆向回收作為耐火材原料。
營建棄土	全部配合南星計畫填海造陸作為新生地填築材料。
石灰石泥餅	營建材料的摻配料。
其他	供應商逆向回收、外售、廠內回收、執行機關回收及處理廠家處理等。

## 六、結論

全球鋼鐵業者為追求清潔生產、永續發展之綠色潮流，無不努力規劃節能減排行動方案，期望達成永續發展之目標。本文以永續發展之環境面向為基礎，介紹一貫作業鋼鐵廠，為因應綠色潮流所採行之清潔生產技術，內容涵蓋提高能源使用效率(減少溫室氣體排放)、減少污染物排放、提高用水效率、廢棄物資源化等。

提高能源使用效率，乃在能源使用過程中，提昇燃燒效率、加強廢熱回收、整合區域能源與資源，讓能源於使用過程中做最有效地利用。減少排放之污染物包括空氣污染物、廢水、固體廢棄物、溫室氣體等。在降低氮氧化物、硫氧化物及粒狀污染物防制方面，已採行提高低氮/低硫之無煙煤用量、增設四號焦爐氣加鹼脫硫設備、低氮氧化物燃燒技術、增設尾氣循環系統及燃煤鍋爐脫硝系統、固定源增設防塵系統、對原料輸送及爐渣冷卻設施等逸散源加強包封等方案。至於減少戴奧辛排放，則分別加裝活性碳噴注設備及換裝脫硝/脫戴奧辛雙功能的選擇性觸媒(SCR)及增建處理固雜料之轉底爐。

固體廢棄物減量，則透過廠內製程循環再利用，減少廢棄物產出量；也透過區



域資源整合，將整體廢棄物做最有效應用。透過清潔生產技術之推動落實，讓鋼鐵生產之空、水、廢棄污染物排放大幅降低，達成永續發展之目標。

## 七、誌謝

本文撰稿期間，承蒙中鋼公司能源環境事務推動辦公室陳信榮、蕭輝煌專業工程師提供諸多資料與協助，在此特申謝忱。

## 參考文獻

- 1.張西龍，2011，鋼鐵業因應綠色潮流之策略方案，永續產業發展季刊，第 56 期。
- 2.劉國欽，2004 年 4 月，中鋼公司用水效率提昇與未來展望，技術與訓練，第 81-88 頁，29 卷 2 期。



## 「工業污染防治」季刊 徵稿啓事

■依據行政院公共工程委員會(90)工程企字第 90004111 號公告「技師執業執照換發辦法」第 5 條第 1 項第 4 款所訂「國內外專業期刊」一覽表，已將工業污染防治季刊登錄為專業期刊之一，環工技師投稿本刊物將取得高達 60 分積分，歡迎大家踴躍投稿。

### ■徵稿說明

1.本刊闢有下列各欄，凡有工業污染防治之研究、工程實務、個案介紹、技術新知等撰述稿均極歡迎。

- |         |           |              |
|---------|-----------|--------------|
| (1)環境保護 | (4)工程規劃設計 | (7)工業減廢／污染預防 |
| (2)處理技術 | (5)操作維護   | (8)資源回收技術    |
| (3)環境管理 | (6)污染防治實例 |              |

2.稿件請勿一稿兩投，每篇請勿超過兩萬字(含圖表)，請附中文摘要(300 字以內)，並附關鍵字。一經採用酌酬稿費，其版權即歸本刊所有。來稿限未在其他刊物發表過之文稿。

3.來稿請附真實姓名、服務單位、地址及電話，以利聯絡並對讀者負責。(文稿電子檔請逕寄至工業污染防治季刊編輯組)

4.本刊對來稿有刪改權，不採用恕不退稿，如需退稿或不願意被刪改，請在來稿中註明。

5.來稿請寄「工業污染防治」季刊編輯組信箱：[chien-hsiang@ftis.org.tw](mailto:chien-hsiang@ftis.org.tw)，並請將「著作權讓渡同意書」一併回傳。

6.通訊地址：台北市大安區四維路 198 巷 39 弄 14 號 1 樓，財團法人台灣產業服務基金會，凡需詢問本刊相關事宜，請電(02)2325-5223 轉 405「工業污染防治」季刊編輯組。

### ■編寫說明

1.章節編寫系統請如右例：一、

1.1  
1.1.1  
1.  
(1)

2.圖表序號請按照文中順序，圖表需清晰，說明文字請採用中文，編號如表 1，表 2，圖 1，圖 2 等。

3.翻譯名詞採用易通易懂者，首次出現請附原文，如沉澱(sedimentation)

4.原文名詞為首字一般不必大寫，如活性污泥法(activated sludge process)

5.一般通用之縮寫文字不必加點，如 BOD、SS 等(不必寫成 S.S)

6.採用公制單位，如mg/L、m/d、kg/m<sup>3</sup>、d、m、min、°C等。

7.文句中之數字採用阿拉伯數字，如八十八年請寫成 88 年，可量化數字每超過三位數請以逗點區隔，如 1,250。

8.文句簡明，用字通俗即可，請儘可能避免如“的”、“之”混用情形。

9.請用直式 A4 大小由左至右書寫電子檔，圖片請掃描入電子檔。

### ■參考文獻

※文中引用文獻，請註明參考資料出處，並加註編號，例如：.....依據資料顯示<sup>[1]</sup>，造成污泥膨化之原因生物，大致上有Sphaerotilus natans,Bacillus,Thiothrix,Escherichia,Beggiatoa,Geotrichum candidum,絲狀增殖酵母及其他絲狀微生物，.... 活性污泥膨化之原因大致上有：菌種變異、有機負荷及食微比不當、營養劑不足、負荷突變及曝氣流型不良等因素<sup>[2]</sup>.....。

#### 參考文獻

1.陳國城，廢水生物處理學，國立編譯館主編，茂昌圖書有限公司印行，p.52～55，1991。

2.張訓中，活性污泥鬆化現象及其控制，工業污染防治，第 13 期，p.169～176，1985。

※參考資料之書寫順序如下：

期 刊：作者，篇名，出處，卷期，頁數，年月或年。

書 籍：作者，篇名，出處，頁數，年月或年。

研 討 會：篇名，研討會論文集，出版者，頁數，年月或年。

機關出版品：編寫機構，篇名，出版機構，頁數，年月或年。

## 著作權讓渡同意書

作 者：\_\_\_\_\_

題 目：\_\_\_\_\_

服務單位：\_\_\_\_\_

通訊地址：\_\_\_\_\_

電話：\_\_\_\_\_ 手機：\_\_\_\_\_

一、保證本篇文章除本次投稿外，相同內容未投國內外其他有版權之期刊；如有上述情形願抽回本文。

二、同意將本篇文章之著作權自接受刊登日起，讓渡給經濟部工業局，財團法人台灣產業服務基金會因承辦經濟部工業局計畫，有重新製作並將本篇文章置於該會所屬網站及刊物等刊載供外界查詢之權利，但須註明本文章作者。作者保留引用文章在自己的著作的權力。如爾後有版權、著作權等之法律紛爭，文責由作者自負。

三、請於收信後五日內寄回本同意書，以便後續送審編校等事務之進行。

此 致

財團法人台灣產業服務基金會

作者：\_\_\_\_\_簽章

年 月 日