

# 毒性物質污染防治

## 毒性廢物掩埋場的空氣污染問題

沈 鐸\* 戚 啓 勳\*\*

### 前 言

臺灣目前垃圾處理問題已面臨燃眉之急，因而相對地忽視了毒性廢物堆積場的空氣污染問題。垃圾所含的成份非常複雜，視各該地區的類型而有很大的差別。一般都市廢物含毒性物質較少，而工業廢物則含毒性物質較多。工廠對於這種廢棄物的處理途徑大概有兩種：大量者堆積或貯存在工廠區再作整體性處理，小量者運走作分級處理。

過去我們對工業上導致的污染，大多着眼在煙囪內噴出的濃煙和廢水的排泄，一直到最近才對毒性廢物堆積場或夾雜在垃圾內揮發出來的有毒氣體加以重視。因為近些年來人民生活水準提高，許多食品或用品在製造過程中不得不採用各種有毒的化學原料，由此而產生大量的有毒固體廢物。以美國紐約州來說，大約有四千種工業上的來源產生有毒廢物，每年高達一百萬噸。最近幾年這些廢棄物的陸上堆積場迅速增加，一方面因為經濟上的考慮，另一方面在於美國訂立了許多環境保護法，對有毒廢物的處理有嚴格的規定。由於有毒廢物在陸地上堆積的亟增，引發了一個值得重視的問題！這些有毒物質真是否會產生顯著的空氣污染，足以威脅居民的健康？

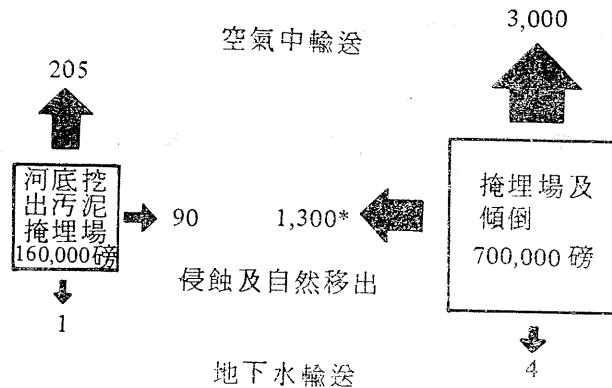
都市垃圾和工業廢棄物在陸地上堆積和掩埋對環境所產生的影響，以往曾經有許多學者加以研究，但重點大都在於會不會引起水污染？這些研究主要探討金屬類廢物的含量和聚積率，可溶毒物的流出，有毒廢物接觸掩埋場淋溶物及各種土壤後的輸送情形；而對工業上有毒廢物堆積場上的空氣污染卻很少注意，也許是因為缺少特定污染物濃度及其對環境影響的可靠資料。

目前已經獲得證據，表明化學品掩埋場上廢棄物的揮發作用和轉化，可以產生毒性蒸氣和氣懸膠，散播入大氣中，對空氣品質具有潛在性的威脅，但詳細情形還不知道。最近在美國紐約州洛夫（Love）運河化學品掩埋場<sup>(15)</sup>和開布多（Caputo）（多氯聯苯）PCB 傾倒場附近進行空氣取樣並且加以分析，已經揭露了確有這種蒸氣和氣懸膠存在，而且毒性物質的濃度還相當高。在赫得遜河流域<sup>(20)</sup>，PCB 從未覆蓋的掩埋場和疏浚污泥場輸入空氣中的

\*美國約紐州環保局高級研究員、哥倫比亞大學兼任教授

\*\*前中央氣象局簡任技正、現淡江大學兼任教授

年量，超過輸入水中的量，見圖一所示：



\* 4 處合計侵蝕損失每年不到20磅，但  
另外有一處估計每年高達 1,280磅。

圖一 赫得遜河流域未覆蓋掩埋場和疏浚污泥場上多氯聯苯類的損耗

本文特地介紹工程師和專家們在這一方面所獲得的研究成果，這些資料對化學品掩埋場的設計和操作，以及有毒廢物的正常處理相信都會有所幫助。

### 化學廢棄物的揮發作用

廢棄物的揮發作用是廢棄物從液態或固態轉變為氣態或蒸氣的一種物理過程。所有掩埋場上都會發生這種揮發作用。掩埋場上的揮發率為決定是否會產生空氣污染問題的關鍵因素。絕大多數氯化污染物，只要有毒，都屬於鹵素有機物和芳香族烴。除了滅蟲鼠藥劑而外，所有已經發表的資料中，很少提到這些廢棄化學品的揮發作用。史賓塞（Spencer）和克立茲（Cliath）曾經研究過這些滅蟲鼠劑在固體與空氣交接面間的輸送情形<sup>(25)</sup>。他們的研究包括實驗室內和實地試驗影響各種滅蟲鼠藥劑揮發率的因素和涉及的機構（mechanism）。他們認為地面堆積物的揮發作用和混入土壤內的滅蟲鼠藥劑，對於這些藥劑如何從固體面上擴散具有重要的關聯。此類藥劑的潛在揮發率與其原有蒸氣壓有關，然而真正的蒸發率卻要由環境情況來決定。

同樣道理，掩埋場上廢棄物揮發率主要看它的物理和化學性質以及周圍環境而定。舉例來說，寧靜空氣中的蒸發率要比強風中低得多。有時候蒸發作用也許很低，但是決不會沒有，因為殘餘物中永遠會有一小部份由廢物內部的化學性吸入所保留。在任何一定溫度下，每種廢棄物都有一定的最大蒸氣壓，隨溫度的增加而增加。如果是混合物，則個別成分的蒸氣壓單獨存在<sup>(25)</sup>。

這些有機化學廢物從掩埋場上的揮發作用，涉及三種彼此有關的過程，各有其公式和控制因子：(1)一種液態有機化學品或者含有它混合物的揮發作用；(2)液態化學廢物自水中的揮發作用；(3)液態化學廢物被各種土壤或固體吸收劑吸入後的揮發作用。

以第一種過程來說，如果溫度和氣流速度保持不變，一種物質或其混合物自其本身的質量蒸發，是它露出面積、時間和質量通量的一函數。在數學上，此種穩定狀態下的行為可以

表一 選擇 PCB 編號的揮發率

編號	含氯量百分比	100°C時的蒸發率，克／公分 <sup>2</sup>
(1)	(2)	(3)
1221	21	0.00174
1232	32	0.000874
1242	42	0.000338
1248	48	0.000152
1254	54	0.000053
1260	60	0.000009
4465	65	0.000007

資料來源：PCBs Criteria Document, EPA 44019-76-021, 1976

用下面這個方程式來表達

式中  $A$  為接觸空氣面； $t$  為時間； $E$  為單位面積和時間內質量通量（mass flux）。質量通量為該化學品或其混合物的蒸氣壓及其穿透周圍空氣擴散率的一種函數。可見質量發射也能用一種擴散係數和穿越一轉移膜（transfer film）的濃度梯度的一種函數來表達。在實驗室內可以準確量出一定露出面積在一定時間內，一種化學品或其混合物已知濃度的質量損失。

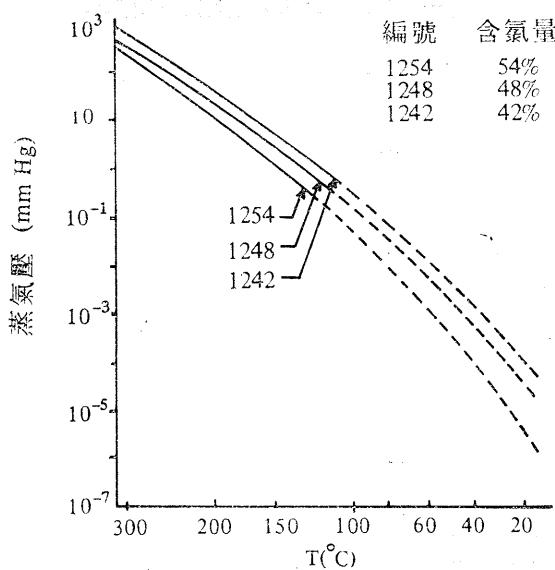
(trifluralin) 在氣流速度為零、溫度為30°C時每天每平方公分的質量通量約為40 $\mu\text{g}$ （微克），而殺蟲劑(dieldrin) 則為6.53 $\mu\text{g}$ <sup>(26)</sup>。有幾種PCB編號的質量通量在100°C寧靜空氣中的蒸發情形見表一<sup>(8)</sup>。

各種化學品的質量通量既然很少資料，所以不妨用下面的方程式根據蒸氣壓和分子量來預測質量通量<sup>(25)</sup>：

式中  $E$  = 質量通量； $P$  = 蒸氣壓； $M$  = 分子量；下標指資料可以採用的化學品。

大多數化學品及其混合物的分子量和蒸氣壓可以在化學及物理手册中找得到。液體和固體的蒸氣壓隨溫度的增加而激增。蒸氣壓隨溫度的變化可以用克萊普隆 (Clapeyron) 方程作定量表達，即： $\log P = A - (B/T)$ ，式中  $P$  為蒸氣壓， $T$  為絕對溫度， $A$  及  $B$  為常數。假定只知道化學品或其混合物的正常沸點和臨界溫度，則  $\log P$  對  $1/T$  連接法通常能得出所需溫度，而且還相當準確。三種PCB編號在溫度200°C至300°C之間的蒸氣壓見圖二<sup>(12)</sup>。圖中可以看出：含氯量較低的編號大都更易揮發。表二內列出某些選定物質和混合物的蒸氣壓，表示它們的相對揮發率<sup>(14)</sup>。

凡分子結構彼此相似者，利用已知混合物的蒸氣壓和質量通量，即能預測一種未知混合物的質量通量。表三顯示採用表一和圖二內的數值預測一種化學品在 100°C 的質量通量。利



圖二 各種 PCB 編號蒸氣壓 (參考文獻(12)第17頁)

用方程式(2)，根據已知 $E_{1248}$ 的蒸發率來預測 $E_{1242}$ 的質量通量，方法如下：

表二 選擇含氯烴的蒸氣壓，20°C時的水銀柱高度公厘數

化 合 物 名 稱	化 學 式	蒸 氣 壓 (Cm-Hg)
(1)	(2)	(3)
氯乙酸 (Chloroacetic Acid)	C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> ClO <sub>2</sub>	94.2
氯二苯基 (Chlorobiphenyl)	C <sub>12</sub> H <sub>9</sub> Cl	151.2~164.2
氯乙基苯 (Chloroethylbenzene)	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> Cl	70.3~ 75.5
氯酚 (Chlorophenol)	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> ClOH	65.9~108.1
二氯苯 (Dichlorobenzene)	C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> Cl	66.2~ 96.3
二氯丙烷 (Dichloromethylpropane)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> Cl <sub>2</sub>	14.6~ 44.8
四氯苯 (Tetrachlorobenzene)	C <sub>6</sub> H <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub>	121.6~131.2
四氯酚 (Tetrachlorophenol)	C <sub>6</sub> HCl <sub>4</sub> OH	
三氯苯 (Trichlorobenzene)	C <sub>6</sub> H <sub>3</sub> Cl <sub>3</sub>	97.2~101.8
PCBs (圖二)	42~54%Cl	10 <sup>-4</sup> ~10 <sup>-8</sup>

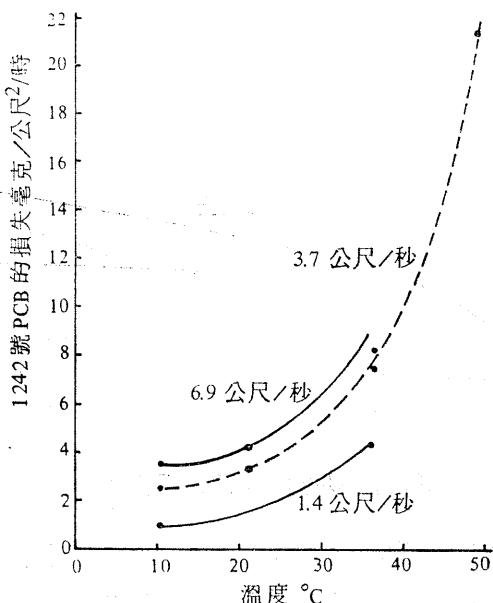
資料來源：Inspection Manual For Toxic Air Pollutant Emissions, EPA 903/9-77-028  
Aug., 1977.

第二種過程（即含氯煙自水溶液的揮發作用）基本上受亨利（Henry）定律常數的影響，然而風速、溫度和液體內的流動情形也是控制變數<sup>(17)</sup>。亨利定律常數M是指化合物的蒸

氣壓和它水中溶解度之比<sup>(17)</sup>。像 PCB 類化合物，蒸氣壓很低，水中溶解度也很低，因而有相當高的 H。雖然苯的蒸氣壓約當 PCB 的一百萬倍，但是苯自水面的質量發射率卻只有 PCB 的兩倍<sup>(17)</sup>。不同系統的膜質量轉移係數（film mass transfer coefficients）也不一樣。以殺蟲劑來說，H 值低，所以由氣體膜控制；至於 PCB 或苯，因為 H 值高，所以由液體膜來控制<sup>(17,24)</sup>。

表三 化學品在100°C時質量通量的預估

編號	蒸發率，每小時每平方公克數	蒸汽壓，水銀柱公厘	分子量 (s) 平均
(1)	(2)	(3)	(4)
1242	0.000338	0.5	258
1248	0.000152	0.2	291
1254	0.000053	0.06	326

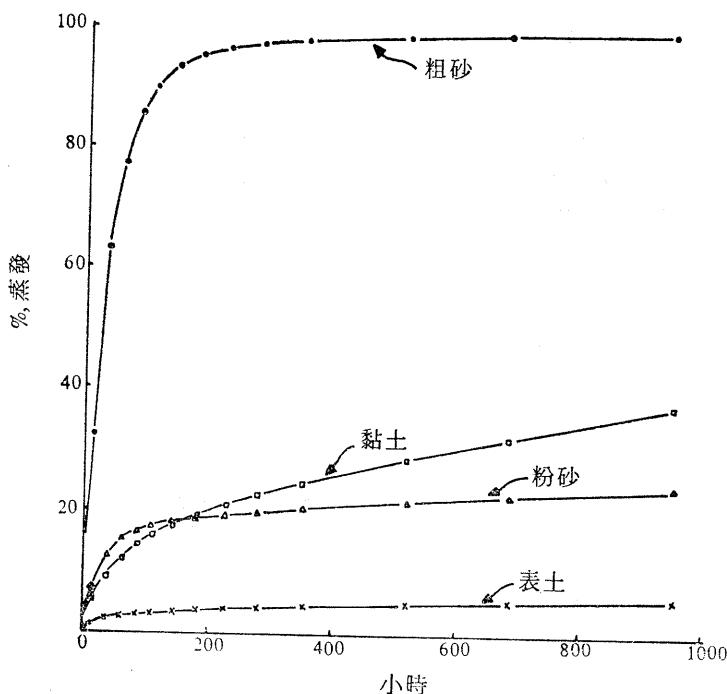


圖三 PCB 自1242飽和水的損失（參考文獻24）

圖三表出在紐約州開耐克台市 (Schenectady) 的通用電器公司研究 PCB 蒸發情形最近所得到的試驗結果<sup>(24)</sup>。該項結果證知揮發的質量損失隨溫度升高和風速加強而增大。編號 142 在 20°C，風速每秒 3.7 公尺每小時損失約 3mg (毫克)；30°C，風速每秒 6.9 公尺則增為 6mg。根據這些資料，只要知道曝露面積、溫度和風速，就能算出 PCB 同分異構物的潛在發射率<sup>(24)</sup>。

第三種過程烃的有效蒸氣壓視吸收劑或土壤吸入強度而減小<sup>(25)</sup>。話雖如此，(desorption) 在沙上有效表面積的增加僅限於液體。土壤能吸入烃的濃度也比溶解在水內為高。

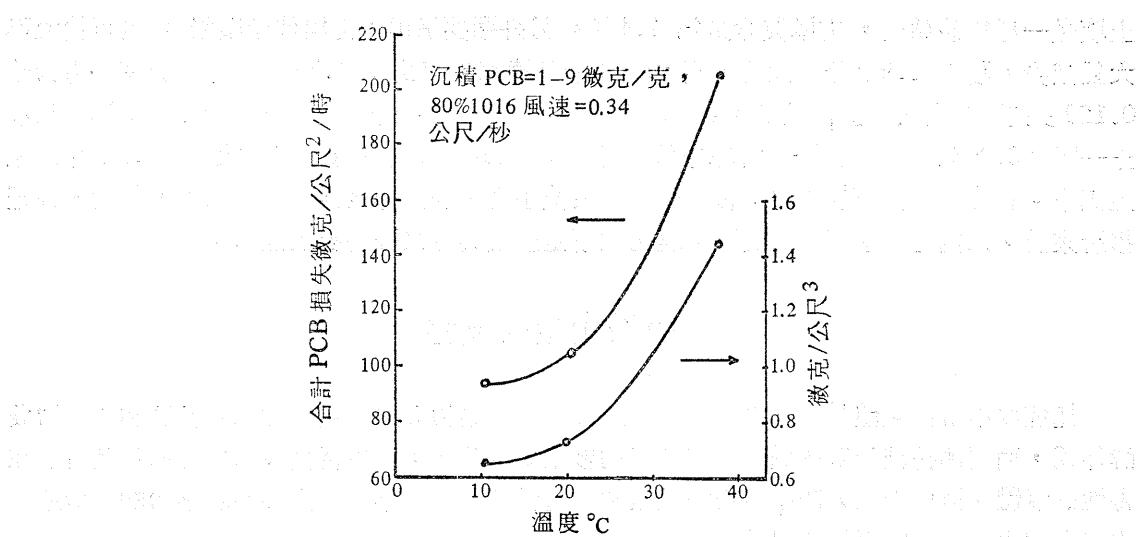
圖四顯示通用電器公司研究所得的結果，足以證知PCB1242的揮發率在有機性表土上要比粗砂上小得多。據此也能證實哈古 (Hague) 等的研究<sup>(11)</sup>。另外還有一些研究證明 PCB 吸入基質內與其碳含量成正比<sup>(5,81)</sup>。有一種常見基質含有機碳很高是一種有機性表土的A層位。在土壤之一表面層內，含氯烴的質量流率隨土壤水氣含量而增加<sup>(25)</sup>。圖五中表出一種含有 PCB6.4μg/g 的砂質沉積物流率，主要為 1016 及 1242。方程(1)可用以計算此種物質的最初質量揮發率。在擴散方程中，流率和 PCB 的濃度成正比，因而假設濃度較大時流率當亦按比例增大。一種黏土沉積物的揮發率勢必較低。液態烴自其本身的揮發率或許能夠作為煙吸在沉積物上最初揮發作用的一上限的數。方程(2)和前面所說的溫度關係對煙吸在土壤上具有若干概略性的準確度<sup>(25)</sup>。



圖四 C-編號1242的蒸發損失

話雖如此，在化學性掩埋廢物場內既然有廢物、水和土壤併在一起，前面所說涉及的三種過程勢必會有一種複雜的組合。由於廢棄物的掩埋有一些深度，它們穿越土壤至空氣的擴散率也必須加以考慮。有時候表面層將煙用完。穿越一假設不吸收的土壤柱，質量流率受土壤滲透性、土壤含水量、氣體壓力、以及空氣的表面擴散率等變數影響。氣體擴散率隨土壤水份含量的減少而增加<sup>(8,19)</sup>。麥可可特 (McCord) 和齊格勒 (Ziegler)<sup>(19)</sup> 對於甲醇通過假想不同滲透率的土壤柱體做過理論上的計算，發現在 25°C 的土壤柱底部有以下的壓力增加。以砂來說，幾乎可以說壓力毫無增加。

	粗砂			黏土		
滲透率 Darcys	1000	10	0.1	0.001	0.0001	0
壓力，大氣壓	1	1.00002	1.002	1.078	1.124	1.132



圖五 沉積物內損失到空氣中的PCB

以 1.132 來說，甲醇的蒸氣壓具有一種 0.159 公分<sup>2</sup>／秒的擴散係數。

法墨 (Farmer) 等<sup>(8)</sup>得到以下的方程式：

式中  $J$  為蒸氣流率； $D^0$  為煙在空氣中的擴散係數； $P_t$  為合計土壤孔隙率； $L$  為發生擴散通過土壤的深度； $C_s$  則為土壤柱底部飽和蒸氣中煙的濃度。根據方程可知我們要求經由增加土壤深度和減少孔隙率來減小流率。擴散率和絕對溫度  $^{\circ}\text{K}$  的關係也有一個公式(8)： $D_2 = D_1(T_2/T_1)^{1/2}$ ；從下面這個公式可以算得  $C_s$

式中  $p$  為蒸汽壓之水銀柱高度公厘； $M$  為分子量之每克分子克數； $R$  為氣體常數（62.3 mmHg-1/°K-mole）， $T$  為溫度°K。

法墨等<sup>(9)</sup>對於六氯苯（HCB）廢棄物上覆蓋各種土壤和物質層後的揮發作用作過一次研究。HCB在25°C時的蒸氣壓大約 $2 \times 10^{-5}$ 公厘水銀柱高度，水中溶解度為每公升6.2微克；空氣中的擴散係數為每天 $1 \times 10^4$ 平方公分；空氣流速每秒21.5公分時，自未覆蓋廢物之蒸氣流率為每天每平方公分8.7微克。加以各種覆蓋物後，在25°C時流率之低減如下：

覆 蓋	HCB蒸氣流率，每年每公頃公斤
無覆蓋	317
1.9公分表土	4.56
0.15公厘塑膠膜	201
1.43公分水	0.38
120公分表土	0.066

土壤是一種粉砂黏土，有機質含量為 1.4%。另外還要指出：土壤倘予壓緊，也可使流率大為減少。覆土 1.9 公分，大約需要 50 天才能到達每年每公頃 4.56 公斤（每天每平方公分 0.120 微克）的最大土壤呼吸量。到了 50 天之後，土壤內顯然已經吸入相當多的 HCB。以覆土一呎 (0.305 公尺) 來說，也許需要 800 天才能使 HCB 到達一每年每公頃不足 0.1 公斤的穩定流率。在實驗室內可以看出：覆蓋表土對於減小含氯烴的揮發作用很有效，但是對一種塑膠膜層來說，只能達到中等有效度<sup>(9)</sup>。理由大概是土壤具有很強的吸收能力。

### 掩埋場產生的氣體

掩埋場中排出氣體是由固體、液體、以及污泥廢棄物經過一連串的化學反應和微生物發酵作用，而逐漸持續分解的過程。掩埋場內廢棄物的分解，可以產生數種惡臭而且具有潛在毒性的氣體。掩埋場的氣體產生得很緩慢要經過幾個月到幾年，一直要到廢棄物的成份達成化學上和生物作用的平衡情況為止。

掩埋場中的氣體偶而也會發生爆炸，只要其中沼氣的濃度達到所有氣體的 4 %至 14%<sup>(27)</sup>。不久前內湖垃圾場因爆炸而起火燃燒達一個月之久，造成嚴重的二次公害，就是場內蘊藏大量沼氣的緣故。一些都市廢物掩埋場的研究報告指出：掩埋場氣體主要含沼氣和二氧化碳，由於有機物生物性淡化而形成，有時候也會含有氫、氨、芳香族烴、鹵素有機物、以及硫化氫<sup>(4,20)</sup>。氣體的發生率和生產量各地都不一樣，要由含水份多少、溫度高低、有機物多寡、以及酸度來決定。酸度介乎6.5至 7.5之間最適於沼氣的發生<sup>(30)</sup>。在實驗室內研究固體廢物的氣體發生<sup>(4)</sup>，顯示在乾燥掩埋場上每天平均在每公斤 0.28ml (千分之一公升) 至 18.1ml；濡濕的掩埋場則為 22ml至45ml。固體廢物整個氣體產生可以從每公斤 2,600ml 到183,000ml 不等。由此可以推想這種氣體在場內的累積就能夠產生壓力，由覆蓋物所形成裂隙而泄出，倘有含氯烴的蒸氣，即可隨之衝出。在表四中試比較 25°C 時生物性和化學性的氣體發生率。

由此可見：以不加覆蓋的廢棄物來說，潛在生物性氣體發生率要比有機化學性氣體發生率小幾個量級；不易滲透的表土覆蓋，至少可以使揮發作用減少99%。縱然是已加適當的表土或黏土覆蓋，化學性氣體發生率仍能超過生物性氣體發生率。生物性氣體發生率乘以方程(5)內的 $C_6$ 值，即可獲得覆蓋後毒性煙通量的低限。

呂氏 (Lu) 和馬吐齊克 (Matuszek)<sup>(16)</sup> 已經發展一種監測氣體發生的作業程序。其中採用達西流方程 (Darcy-flow equation) 來估計自掩埋場的氣體流率，因此

式中  $Q$  為容積流率，每秒之立方公分； $K$  為滲透率； $\mu$  為黏度係數，每公分秒克數； $A$  為有效面積，平方公分； $L$  為土壤層的有效厚度，公分； $\Delta p$  為壓力差，每平方公分達因； $P$  為掩埋場氣體的壓力，每平方公分達因； $P_0$  為大氣壓力，每平方公分達因， $k$  為滲透係數。

滲透係數  $k$  可以從實地測量所得的  $Q$ 、 $p$  及  $P$  值可實地測量。在氣體收集系各設井點用電動換能器或其他儀器，很容易測得掩埋場氣體和大氣的壓力差。

工業上的廢棄物通常都是一種複雜混合物包括固體、液體和污泥，並且還含有相當量的

表四 氣體發生率的比較

廢棄物 (1)	氣體發生率 <sup>b</sup>	
	每天每公升毫公升 (2)	每天每平方公尺公升 (3)
典型固體廢物掩埋場 <sup>a(4)</sup>	0.28~18.1	1.56~10.1
典型濕潤固體廢物掩埋場 <sup>a(4)</sup>	22~45	12.9~25.2
紙類廢物及放射性土壤 <sup>a(16)</sup>	0.072	0.4
甲醇 <sup>(18)</sup>		$8.8 \times 10^5$
六氯苯 <sup>(9)</sup>		
無覆蓋		$2.9 \times 10^5$
1.9公分覆蓋		$4.1 \times 10^3$
30公分覆蓋		900
PCB，編號2242 <sup>(20)</sup>		
砂上6.4ppm		500
紙液		$2.1 \times 10^4$

a 假設廢物深度為 5 公尺，容積密度為每立方公尺1,120公斤。

b 由是  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  為主要氣體，所以假設掩埋場氣體發生率主要為生物性。話雖如此，在掩埋場內也可以產生幾種化學性的氣體。

有毒物質。這些廢棄物除非事先加以處理，否則勢必經由化學性及生物性的腐化而產生有毒氣體。在掩埋場內廢棄物怎樣會逐漸消失迄今並未澈底了解。化學品掩埋場內發生氣體的資料很少。此種氣體發生率，問題很複雜，如果沒有適當的實測資料，勢難評估工業廢物掩埋場上的空氣污染問題。

工業廢棄物和都市廢棄物合併處理，勢必會影響氣體產生的質和量，影響程度要看二者的成份和比例。一般來說，混合處理難以令人滿意，因為掩埋場的設計都不會考慮到工業廢物的需求。化學品掩埋場需要特別的設計和作業，在計畫和規格的指南中均有說明<sup>(10)</sup>。雖說這樣，只要掩埋場能設計得適當，則混合處理亦無不可。

在正常情況下，廢棄物分解所產生的掩埋場氣體會受地形地物所攔阻。陷入氣體產生一種氣壓，使得發生率和排放率達成平衡。此種壓力在掩埋場的約束下，向所有方向加壓，氣體不僅可以向上排放，也能向下或側面滲出。這種氣體壓力使得掩埋場的建造很難做到密不通氣。再者，動物也可能在掩埋場的頂部掘洞，植物根部也能伸入，由此而產生裂縫。掩埋場氣體最後一定經由地面覆蓋層散播至大氣，因為移出氣體的側面運動，經常會受到掩埋場內部的靜壓力以及周圍泥土的阻力所限制。

## 實例研究

洛夫運河 (Love Canal) 事件可以作為廢棄物掩埋場造成嚴重空氣污染的範例，附近民眾至今猶談虎色變。此一掩埋場位於紐約州尼加拉瀑布城的東南角，面積約16畝。此處早在十九世紀末葉挖掘，作為建議運河計畫的一部份，打通尼加拉河和安大略河。洛夫運河計畫隨後被擱置而迄未完成。後來將已經放棄的運河在1930至1953年間作為化學廢物和都市廢物的混合堆積場。不久，這掩埋場上建造了一所小學並有97戶人家將新屋建造在這掩埋場近鄰。1976年以從，這些鄰接垃圾場的人家發現地下室內被毒性化學淋溶物所穿透。淋溶物中經分析得有80種以上的化合物。分析掩埋場附近的空氣取樣，揭露了至少有26種有機化合物存在。結果顯示1978年七月監測取樣分析 10 種選定化合物的最高值（每立方公尺微克）為<sup>(15)</sup>：三氯甲烷 (Chloroform)—24；苯 (Benzene)—270；三氯乙烷 (Trichloroethane)—73；甲苯 (Toluene)—570；四氯乙烷 (Tetrachloroethane)—1,140；氯苯 (Chlorobenzene)—240；氯甲苯 (Chlorotoluene)—6,700；MEP二甲苯 (Mep-xylene)—140；X二甲苯 (X-xylene)—73；三氯苯 (Trichlorobenzene)—74。

紐約州衛生局長勞勃華倫 (Robert Whalen) 將此廢棄物堆積場描述<sup>(6)</sup>：對附近居民的安全和健康具有極端嚴重的威脅和危險。

另外一個例子是在紐約州南格林瀑布 (South Glens Falls) 附近未加覆蓋的卡布多 (Caputo) 垃圾堆積場，1977年的冬季測得 PCB 很濃，介乎每立方公尺 0.05~3 微克，1978 年夏季竟高達 300 微克。按美國政府工業衛生會議 (ACGIH) 採用 PCB 類的極限值 (TLV) 為每立方公尺 500 微克<sup>(28)</sup>。職業安全及健康國家研究所 (NIOSH) 最近建議工作環境內 PCB 類的濃度必須小於每立方公尺 1.0 微克。可見在周圍空氣中冬季測得濃度達每立方公尺 3 微克，夏季為 300 微克，必須視為一嚴重的揮發問題。更有甚者，此種揮發情況很可能從 1900 年以來就已經存在。

## 管制技術

以現有知識來說，採用固化或結合法來減小空氣和廢棄物的接觸面積；在低溫和低風速下作業；廢棄物堆放後立即覆以一層不滲透的泥土，都可以使工業廢物掩埋場中的廢物揮發大為減少。這是因為揮發作用涉及物質自泥土中泄出，移到土壤表面，然後蒸發入大氣。可見只要覆蓋一層不能滲透的泥土，即可減小廢棄物質的揮發作用<sup>(1)</sup>。

解決掩埋場氣體發生，過去一般想法是基於下面這兩個觀念：地表以下的氣體能阻攔並消散；利用不透氣的表面覆蓋物即可予以防止。攔阻掩埋場的氣體並無工程上的問題，然而這些氣體消散入大氣中卻有問題，尤其是氣體從工業廢物掩埋場發出而且還含有毒性物質時，工業廢棄物掩埋場採用覆蓋越來越普遍。常用的覆蓋物質包括：黏土、橡皮、瀝青、混凝土和塑膠，例如：Hypalon 和 PVC。這些襯墊層的相對耐久性，根據使用者的報告按時間的久暫排列如下：混凝土、塑膠層、橡皮和瀝青<sup>(30)</sup>。

前面已經說過，工業廢棄物的上面覆蓋一層很厚的表土或黏土可以將揮發率減低幾個量

級，而塑膠層也許很少幫助。話雖如此，這些蓋子滲透水汽的能力並不相同。根據布脫爾（Butyl）和尼室普尼（Neoprene）的報告滲透率很低<sup>(2)</sup>。但是建造不透氣的掩埋場設施雖然可以減少氣體產生率和排放率，但如長期計算則並不能減少氣體產生量和排放量。可見除非能加建一種氣體收集系，否則潛在的氣體問題依然存在。

目前已經發展幾種改良過去所設計的衛生掩埋場方法，使得工業廢棄物不會發生問題，但結果如何猶待證明。工業廢棄場因為具有潛在危險性，所以必須分開來處理。此類廢物通常在堆置前應該先加處理。處理的方法有：中和：化學性穩定化、容積縮小、固化、消除毒性、固封、或其他方法。

目前已經知道大氣中的落塵是土壤污染和水污染主要原因之一<sup>(7)</sup>。落塵的一種重要過程就是蒸汽化污染物的凝結。在工業廢物掩埋場附近，已經發現氣態和氣懸膠狀態的鹵素有機物和芳香族烴。這些廢物蒸汽和氣懸膠在大氣中的輸送可以將含毒污染物擴散很廣。以氣懸膠來說，顆粒的大小不足一微米，一般都認為含氯烴成為蒸汽狀態幾天之後即可被雨滴沖洗掉，或者吸在比一微米還要小的顆粒上<sup>(18)</sup>。如果原先廢棄物中揮發性有毒物質的濃度很高，這些有毒物質降落到陸地或水面之後還能再揮發。因此，除非加以消除，否則有毒物質將會保留在環境中，從揮發、凝結、吸入、降落到再揮發循環不已，週而復始。

在技術上，掩埋場內的氣體能夠用一種強制通風系予以收集，包括通氣井和穿孔管道。通氣井置在掩埋場內和周圍要有很多通氣井，井的四周圍用石塊或卵石砌成。穿孔管插入井內以資蒐集氣體。這種氣體也可以用泵引進一種毒氣處理系統或者直接通入大氣，要看氣體中所含有毒物質的濃度而定。所以要有一種氣體監測系統來決定有無毒性物質，以及是否需要把氣體予以處理。

掩埋場發出的氣體內既然夾帶揮發性的有機物，而這些有機物還可能很濃，可見最妥善的處理方法是管利式的焚燒。然而焚燒必須完全而且有效，這樣才能澈底消除有毒污染物和惡臭<sup>(23)</sup>。假定有毒蒸氣的濃度很低，掩埋場內的氣體可以不必處理，直接排入大氣中。

## 綱要和結論

過去大家對工業廢物掩埋場的設計和操作所形成的污染了解得不夠，立法上缺少依據。既然沒有法令規定，自然就難以管制，對掩埋場之含有化學性廢物是否會有毒性氣體洩出未加重視。所以我們可以想像得到：在預見的將來，這些堆積場或掩埋場還會經由生物性和化學性的氣體排出，繼續不斷地將毒性污染物輸入大氣中。由於抽樣和分析的欠缺，掩埋場上究竟有沒有毒性氣體和蒸汽很難偵測。所以工業廢棄物大量堆置所導致的空氣污染問題並未受到普遍的重視，雖然它對環境的傷害很大，而且很難補救。事實顯示縱使蒸汽壓很低的含氯烴（例如 PCB 類也能揮發，那麼其他一般化學品的蒸汽壓當然更大，蒸發也越快）。

工業廢物掩埋場的空氣污染問題可以應用健全的工程原理來加以管制。覆蓋表土或黏土能以減低揮發作用，以其可減緩氣體的擴散率，然而不透氣的蓋子並不能減少氣體的發生量及其全部揮發量。掩埋場氣體揮發能由裝設強制誘導井加上穿孔管來蒐集，這種設備既可裝在掩埋場四周圍，也可裝在掩埋場內。如某想要決定在各種不同的情況，自掩埋場中釋出的有毒蒸氣水平是否真正顯著，那麼就必須決定氣體產生，並且監測有毒物質的氣體濃度。

毒性蒸氣在反應、吸入或凝結之前，在大氣中不會停留很久，後來也會降落到陸地或水面上，落塵到達地面或水面之後很容易再揮發。將來如果設計掩埋場而考慮到有毒或危害性廢棄物，必須預想能以避免空氣污染的方法。以臺灣來說，正好是應該考慮的時候。廢物中有毒成份如能真正消除當然要比放在掩埋場內更好，後者畢竟是一顆「定時炸彈」。

## 附錄一：參考文獻

1. Anderson, D. R., and Callinan, J. P., "Gas Generation and Movement in Landfills," Proceedings of the National Industrial Solid Wastes Management Conference, Houston, Tex., Mar., 1970.
2. Cheremisinoff, N. P., et al., *Industrial and Hazardous Wastes Impoundment*, Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Mich., 1979.
3. "Criteria Document of PCBs," *EPA Publication 440/9-76-021*, 1976.
4. DeWalle, F. B., Chian, E. S. K., and Hammerberg, E., "Gas Production from Solid Waste in Landfills," *Journal of the Environmental Engineering Division*, ASCE, Vol 104, No. EE3, Proc. Paper 13819, June, 1978, pp. 415-432.
5. Dester, R. N., "An Application of Equilibrium Adsorption Theory to the Chemical Dynamics of Organic Compounds in Marine Ecosystems," thesis presented to the University of Washington, at Seattle, Wash., in 1976, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
6. "Environment," *Time*, Aug. 14, 1978, p. 46.
7. Epstein, E., and Chaney, R. L., "Land Disposal of Toxic Substance and Water-related Problems," *Journal Water Pollution Control Federation*, Aug., 1978. p. 2037.
8. Farmer, W. J., et al., "Land Disposal of Hexachlorobenzene wastes: Controlling Vapor Movement in Soils," Department of Soil and Environmental Sciences, University of California, Riverside, Calif., Aug., 1978.
9. Farmer, W. J., et al., "Problems Associated with the Land Disposal of an Organic Industrial Hazardous Waste Containing HCB," paper from Department of Soil Science, University of California, Riverside, Calif., July, 1976.
10. "Guidelines for Plans and Specifications of Solid Waste Management Facility," New York State Department of Environmental Conservation, Division of Solid Waste, Aug., 1977.
11. Hague, R., et al., "Aqueous Solubility Adsorption and Vapor Behavior of Polychlorinated Biphenyl Aroclor 1254," *Environmental Science and Technology*. Vol. 8, Feb., 1971, p. 139.

12. Hutzinger, O., Safe, S., and Zitko, V., *The Chemistry of PCBs*, CRC Press Inc., 1974, p. 17.
13. Iannotti, J. E., Knapp, B. W., and Quackenbush, D. M., "An Inventory of Industrial Hazardous Waste Generation in New York State," New York State Department of Environmental Conservation Report (draft), Sept., 1978.
14. "Inspection Manual for Toxic Air Pollutant Emissions," *EPA Publication 903/9-77-028*, Exhibit 4, Aug., 1977.
15. "Love Canal-Public Health Time Bomb," Special Report to the Governor and Legislature prepared by the Office of Public Health, New York State, Sept., 1978.
16. Lu, A. H., and Matuszek, J. M., "Transport through a Trench Cover of Gaseous Tritiated Compounds from Buried Radioactive Wastes," presented at the October 16-20, 1978, International Symposium on the Behavior of Tritium in the Environment, held at San Francisco, Calif.
17. MacKay, D., and Leinonen, P. J., "Rate of Evaporation of Low-Solubility Contaminants from Water Bodies to Atmosphere," *Environmental Science and Technology*, Vol. 9, Dec., 1975, p. 1178.
18. McClure, V. E., "Transport of Heavy Chlorinated Hydrocarbons in the Atmosphere," *Environmental Science and Technology*, Vol. 10, No. 13, Dec., 1976, p. 1223.
19. McCord, A. T., and Zeigler, R. C., "Study of the Rate of Emission of Gasses Leaving Industrial Solid Waste Landfills," available from Calspan Corp., Buffalo, N. Y.
20. Murphy, T. J., et al., "Polychlorinated Biphenols in Precipitation in the Lake Michigan Basin," *EPA 600/3-78-071*, Environmental Protection Agency Laboratory, Duluth, Minn., July, 1978.
21. "Occupational Exposure to PCBs," *DHEW NIOSH Publication No. 77-225*, Sept. 1977, p. 3.
22. Saint, P. K., Straub, C. P., and Pfannkuch, H. O., "Effect of Landfill Disposal of Chemical Wastes on Groundwater Quality," presented at the November 14, 1972, Hydrogeology Section of Annual Meeting, Geological Society of America, held at Minneapolis, Minn.
23. Shen, T. T., Chen, M., and Lauber, J., "Incineration of Toxic Chemical Wastes," *Pollution Engineering*, Oct., 1978. p. 45.
24. Smith, J. H., and Bomberger, "Prediction of Volatilization Rates of Chemicals in Water," paper presented at the June, 1978, 85th National AICHE Meeting, available from SRI International, Menlo Park, Calif.

25. Spencer, W. F., and Cliath, M. M., "Transfer of Organic Pollutants Between the Solid-Air Interface," *Fate of Pollutants in the Air and Water Environments Part I*, I. H. Saffet, ed., John Wiley & Sons, New York, N. Y., 1977, pp. 107-109.
26. Spencer, W. F., and Cliath, M. M., *J. Agr. Food Chem.*, Vol. 22, 1974, p. 987.
27. Stone, R., "Preventing the Undergorund Movement of Methane from Sanitary Landfills," *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 48, No. 1, Jan., 1978, pp. 51-53.
28. "Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents in the Workroom Environment," the ACGIH Publication, 1978, pp. 13 and 26.
29. Tofflemire, T. J., et al., "PCB in the Upper Hudson River: Sediment Distributions, Water Interactions and Dredging," *Technical Paper No. 55*, N. Y. State Department of Environmental Conservation, Bureau of Water Research, Albany, N. Y., Jan., 1979.
30. U. S. Environmental Protection Agency, "Landfill Disposal of Hazardous Wastes: A Review of Literature and Known Approaches," *EPA/530/SW-165*, Sept., 1975.
31. Weston Environmental Consultants, "Migration of PCBs from Landfills and Dredge Spoil Sites in the Hudson River Valley, N. Y., Final Report," Westchester, Pa., Nov., 1978.

## 附錄二：本文中引用之符號

$A = \text{exposed area} ;$	露出面積
$C = \text{concentration} ;$	濃度
$D = \text{diffusion coefficient} ;$	擴散係數
$E = \text{mass flux} ;$	質量通量
$J = \text{vapor flux rate} ;$	蒸氣流率
$K = \text{permeability} ;$	滲透率
$k = \text{permeability coefficient} ;$	滲透率係數
$L = \text{depth of soil through which diffusion is occurring} ;$	有擴散之土壤深度
$M = \text{molecular weight} ;$	分子量
$P = \text{total soil porosity} ;$	合計土壤孔隙率
$p = \text{vapor pressure} ;$	蒸氣壓
$Q = \text{volume flow rate} ;$	容積流率
$R = \text{gas constant} ;$	氣體常數
$T = \text{absolute temperature} ; \text{ and}$	絕對溫度
$t = \text{time.}$	時間