

地下水有機汙染之去除
ON REMOVAL OF ORGANIC POLLUTANTS
FROM GROUNDWATER

蔡國鈞

K. C. Tsai

原著載於地下水資源研討會論文集
1988年12月，343 - 356頁

*Reprinted from Proceedings,
Seminar on Groundwater Resources, Taipei
December 1988,
pp. 343 - 356*

地下水有機污染物之去除

*
蔡 國 鈞

摘 要

地下水有機污染物之去除，用空氣提除法（針對VOC而言），或用液相活性碳吸附法，均經證明甚為有效。若有機污染物除VOC外，尚有其他揮發性低或非揮發性者，則空氣提除法與液相活性碳吸附法兩者合併使用，常可獲得最佳之效益。

在空氣污染物排放標準甚為嚴格之地區，由空氣提除設備所排出之廢氣，常須進一步加以淨化，最有效之廢氣淨化法為氣相活性碳吸附。

* 亞新工程顧問公司環境保護工程部經理

一 前 言

地下水為吾人主要水資源之一，其用途甚為廣泛，如公共給水、工廠製程用水、鍋爐用水、冷卻用水及農業灌溉用水等，因此，在某些地方，地下水之重要性，實較地面水有過之而無不及。是故，地下水如受到有害物質之污染時，則在使用前，須視其用途所要求水質之不同，而做各種不同程度之處理，蓋可斷言。

地下水之污染來源甚多，其主要者有地面廢水蓄水池之滲透、廢棄物掩埋場之滲漏、儲油槽之洩漏，以及地下廢棄物儲存桶之銹裂等。地下水之水質，視各種滲漏水水質與水量之不同，而有很大的差異。如滲漏水水質良好且滲漏水量不多，則地下水仍能保持其良好之水質，供高品質之用途，如公共給水或工廠製程用水等；反之，若滲漏水水質不好且滲漏水量甚多，則地下水將遭受高度的污染，須經繁雜之處理才能使用。

地下水之污染物以有機物為大宗，而有機物中又以揮發性有機化合物 (Volatile Organic Compounds, VOC) 最為人們所關心，因為，許多 VOC 在動物實驗中均經證實為具有致癌性 (Carcinogenicity)。揮發性有機化合物普遍含於各種有機溶劑與去油劑中，經由滲透，滲漏等管道而進入地下水者。

地下水中有機污染物之去除，現今以用空氣提除法（ Air Stripping ）與活性碳吸附法（ Activated Carbon Adsorption ）兩種最為有效，可行而被普遍採用。在通常之情況下，兩種方法合併使用，常可獲得最佳之效益（ Cost-effectiveness ）。

本文將就空氣提除法與活性碳吸附法之理論及應用，詳加闡釋，並將進一步探討影響處理系統設計之因素，以供有意整治地下水污染者之參考。

一、空氣提除法

地下水有機污染物，如其本身之蒸氣壓（ Vapor Pressure ）甚高，在水中之溶解度（ Solubility ）甚低，則可很容易地利用空氣與其接觸而提除之。某一物質被空氣提除之難易度，常用亨利定律常數（ Henry's Law Constant ）來衡量之；一物質之亨利定律常數愈高，表示其揮發性（ Volatility ）亦愈高，故其被空氣提除之效率將愈高，反之，將愈低。一般而言，亨利定律常數高於 0.1 之物質，可稱為易被空氣提除者，亨利定律常數在 0.02 至 0.1 間之物質，可稱為可被空氣提除者，而亨利定律常數低於 0.02 者，則為難被空氣提除者。⁽¹⁾

表一列舉常見地下水有機污染物之亨利定律常數。由該表可知， Vinyl chloride 和 1,1-Dichloroethylene 係易被空氣提除者， 1,2-Dichloroethane 和 1,1,2-Trichloroethane 為可被空氣提除者，而 Lindane 和 Phenol 則為難被空氣提除者。

最普遍之空氣提除設備為填充塔空氣提除器（ Packed-tower

(3)

Air Stripper)。圖一為一填充塔空氣提除器之示意圖。廢水係自塔之上端，經過比表面積甚大之填充料，滴流而下，空氣則用送風機將其自塔之下端，逆水流而上昇，如此，使水流與氣流形成逆向而行(Counter Current Flow)，以增加廢水與空氣間之密切接觸，而提高污染物被氣提之效率。影響填充塔空氣提除效率之因素，計有廢水污染物之特性及其濃度，填充料之比表面積，填充料之深度，空氣/液體比等，其中尤以後兩者最為重要。一般言之，對亨利定律常數高於0.1之污染物而言，填充料深度3公尺，空氣/液體比20:1之填充塔式空氣提除器，約可去除90-95%之揮發性有機污染物。將填充料深度增加至5公尺及空氣/液體比增加至100:1，雖然填充料之費用增加67%，空氣量增加五倍，送風電力費用增加十二倍，但所增加之去除率甚為有限。

最近美國有一種新的空氣提除設備問世，稱為噴水式空氣提除器(Induced-draft Air Stripper)⁽⁴⁾。圖二為一噴水式空氣提除器之示意圖。此式係用高壓之噴嘴，將廢水以霧狀之小水滴噴入一密閉之提除器，在噴入之同時，速度甚高之霧狀水滴，會將大量之空氣，挾帶吸入(Induced Air Draft)提除器，使水滴與空氣間形成密切之接觸，而達到空氣提除污染物之效果。噴水式空氣提除器因其內部沒有填充料，故影響其操作效率之因素，除廢水之特性及濃度與填充塔式相同外，最重要者為噴嘴的壓力。壓力愈高，霧狀水滴愈小，且吸入的空氣量愈多，故污染物之去除率將愈高；反之，則愈低。一般而言，噴嘴壓力為15 psig時，約可去除75%之Trichloroethylene (TCE)，如將壓力增加至55 psig時

，雖然電力費用增加了65%，但TCE之去除則僅增加5%左右，甚不划算。因此，通常噴水式空氣提除器之噴嘴壓力均在15-20 psig間，鮮有超過25 psig者。

綜上所述，雖然噴水式空氣提除器之污染物去除效率不如填充塔式高（噴水式約為75%，填充塔式約為90%），但噴水式提除器初設費較為低廉（因不用填充料），且操作費亦較低（因無需送風機），因此，若處理水之要求不高（如做為冷却用水或灌溉用水），或處理成本為一大問題時，則可考慮採用噴水式提除器。又若地下水處理係空氣提除與活性碳吸附兩者合併採用時，則可用噴水式空氣提除做為前處理，先去除約70%之VOC，再用活性碳去除剩餘之VOC及一些難被空氣提除之有機污染物。如此，常可節省龐大之地下水處理費用，而獲得甚高之經濟效益。

空氣提除法實際上並沒有解決污染問題，因其不過是將水中之污染物轉換成空氣污染物，經由提除器之上方或一邊排入大氣中。雖然，由空氣提除器所排出之空氣污染物（即廢氣），經大氣稀釋後，通常均不致造成嚴重之空氣污染，吾人可不必太過掛慮，但在空氣污染物排放標準非常嚴格的地方，吾人為達到空氣排放標準，故須將由提除器排出之廢氣，加以進一步之淨化，始能圓滿達成污染防治之全部目標。最常用之廢氣淨化方法為氣相之活性碳吸附（Vapor Phase Activated Carbon Adsorption），將於下節一同說明之。

三、活性碳吸附法

利用活性碳以淨化水質，業已行之有年，且經證實效果甚佳。

例如，歐美各國之製造工業界，尤其是飲料食品界，自1930年代即曾利用活性碳來淨化其產品；給水工程界，自1960年中葉，亦曾利用活性碳以去除水中之臭味與色度，均曾得到令人滿意之成果。自1970年代以後，地下水污染漸受重視，活性碳再被利用以去除含於地下水中之有機污染物，成效亦甚為卓越。活性碳有顆粒狀活性碳（Granular Activated Carbon，GAC）與粉末狀活性碳（Powdered Activated Carbon，PAC）兩種，對地下水處理而言，以GAC較為普遍。

活性碳吸附係屬於物理性之表面吸附作用；活性碳因其內部之孔隙結構擁有龐大之表面積（每公克可高達 1000m^2 之表面積），故具有優良之表面吸附力，以吸着大量之有機性污染物。通常，污染物之分子量愈高，分子結構支鏈（Branch Chain）愈多，或水溶性愈低者，其被活性碳吸着之效率將愈佳；例如，地下水中常見之含氯芳香族溶劑，因其水之溶解度甚低，且其分子結構形狀支鏈較多，故易於被活性碳之表面所吸着而去除之。

活性碳吸着有機污染物之能力（Adsorption Capacity）通常係用等溫吸附試驗（Adsorption Isotherm Test）求得之，由該試驗所獲得之數據，可求出污染物平衡濃度（Equilibrium Concentration）與活性碳吸附力之間的關係。活性碳吸附力一般係以每公克活性碳所能吸着有機物之毫克數，即 mg/g 表示之。表二⁽²⁾列舉常見有機污染物之活性碳吸附力。由該表可知，Heptachlor和Endrin係屬易被活性碳吸附者；Chlordane和PCB-1221則為可被活性碳吸附者；而1,3-Dichlorobenzene和Diethyl

Phthalate 則較難被活性碳吸着。

影響活性碳吸附效率之因素，除上述之活性碳吸附力外，活性碳與廢水之接觸時間 (Contact time) 亦甚重要。⁽⁵⁾ 因影響接觸時間之因素，非常複雜，因此，活性碳與廢水之實際接觸時間，非常不容易確實求得，故在工程設計時，通常慣例均用空床接觸時間 (Empty Bed Contact time) 表示之。所謂空床接觸時間，即處理容器中活性碳所佔有之總體積 (為活性碳實體體積加上活性碳空隙體積之和) 除以流經處理容器之廢水流量而算得之時間，亦即通常所稱之水力停留時間是也。此項接觸時間之計算，可說是將活性碳視若無物，故稱為「空床」接觸時間，雖然不甚合理，但因計算方便，人人愛用，於是相沿成俗，代代相傳而成慣例。一般而言，15-30 分鐘之空床接觸時間，常可獲得良好之處理效果。

設計活性碳處理容器時，另外應考慮之一個因素為水力負荷率 (Hydraulic Loading Rate)，即單位容器剖面積所能處理之廢水流量，其通用之英制單位為 gpm/ft^2 ，公制則以 $\text{m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ 表示之。

活性碳處理容器可分重力式與壓力式兩種；重力式通常係垂直之容器，廢水係以自然重力的方式流經處理容器，有如通常之重力式沙濾池；壓力式通常為水平放置之圓形密閉金屬容器，利用壓力將廢水送經容器。重力式容器之初設費及操作維護費，均較壓力式為低，但其活性碳之深度及水力負荷率，均不能太高，乃其缺點。重力式容器活性碳之深度約 1 - 2 公尺，水力負荷約在 $4.5\text{-}7.0 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ 間，而壓力式容器之活性碳深度可達 5 公尺，其水力負荷則

可高達 $24 \text{ m}^3/\text{hr}\cdot\text{m}^2$ ⁽¹⁾。

四 空氣提除法與活性炭吸附合併使用

在某些情況下，處理地下水，若空氣提除法與活性炭吸附法兩者併用，常可得到最佳之效益。例如，地下水若做為高品質之用途時，其處理水有機物之含量，常須降低至無法測出 (Non-Detectable) 之程度，在此種情況下，雖然空氣提除法或可去除95%或以上之VOC，但其剩餘之有機物濃度，常尚無法達到高品質之要求，故須再進一步用活性炭吸附法，以去除空氣難以提除 (亨利定律常數低於 0.02 者) 或非揮發性之有機化合物，而使最後處理水達到所要求之水質。圖三⁽⁴⁾示一典型之兩法合併使用流程圖。

用空氣提除法做為活性炭吸附法之前處理，尚有一個好處，即將大部之VOC先用空氣提除法去除後，常可大量降低活性炭之用量。此外，如空氣提除法與活性炭吸附合併使用時，因有活性炭做為後盾，故做為前處理之空氣提除設備，其要求可不必太過嚴格，例如，其容量可酌予減小，空氣 / 液體比亦可酌予降低，而水力負荷則可酌量增高，如此，常可節省一筆甚為可觀之初設費與操作維護費。

五 空氣提除法之廢氣處理

前曾言及，利用空氣提除法去除地下水中之VOC，只是將液相 (Liquid Phase) 之VOC轉變為氣相 (Vapor Phase) 之VOC，其廢氣經排出後，很可能會造成空氣污染，因此，在空氣污染物排放標甚為嚴格之地區，常須將空氣提除設備所排出之廢氣，再做進一步之淨化處理。用顆粒狀活性炭來處理此種VOC廢氣，多年來迭

經證明，效果甚佳，其成功之案例，與用活性碳做溶劑回收與臭味去除之案例相較，毫無遜色。

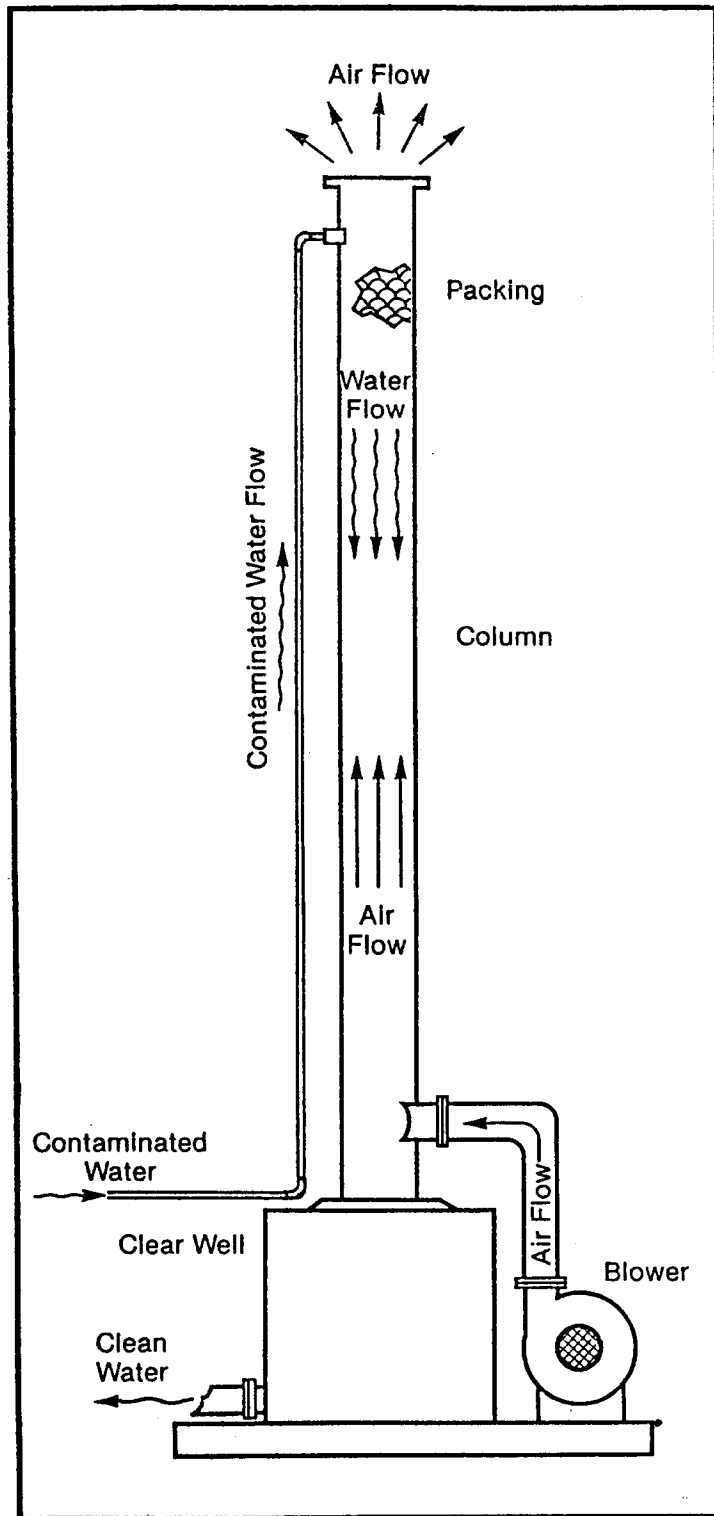
由於對常見之地下水有機污染物而言，活性碳氣相吸附力常遠較液相吸附力為高，因此，在空氣提除法與活性碳吸附法（屬液相吸附）合併使用以處理地下水時，為減少活性碳之總用量（Total Carbon Usage），設計者常儘量提高空氣提除設備之VOC去除率，再用效率較高之氣相活性碳吸附，去除廢氣中高量之VOC，如此，將可減少液相活性碳吸附所須去除之VOC量，因而達到減少活性碳總用量之經濟目的。但若提高空氣提除效率所多花之成本高於因活性碳用量減少所節省之成本時，則上述之設計安排即不適用，故須先做好經濟分析，始能決定是否經濟可行。

用氣相活性碳吸附淨化空氣提除廢氣之系統，有再生系統（Regenerable System）與非再生系統（Non-Regenerable）兩種。一般而言，如地下水之VOC含量不高，或所須處理之水量不多時，則以用非再生系統較為經濟，因活性碳再生系統之初設費與操作維護費均甚龐大，故如無必要，以儘量少用為宜。

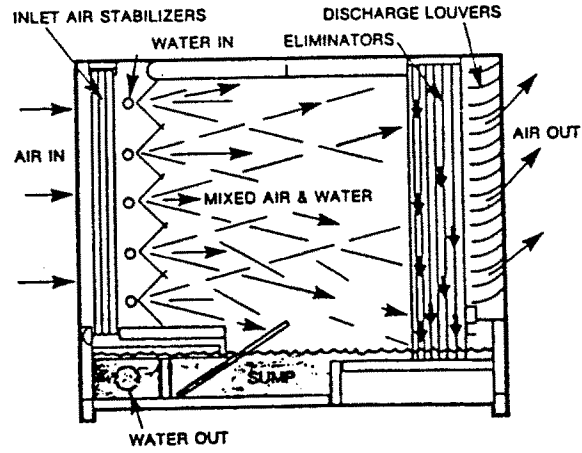
六 結 語

地下水有機污染物之去除，用空氣提除法（針對VOC而言），或用液相活性碳吸附法，均經證明甚為有效。若有機污染物除VOC外，尚有其他揮發性低或非揮發性者，則空氣提除法與液相活性碳吸附法兩者合併使用，常可獲得最佳之效益。

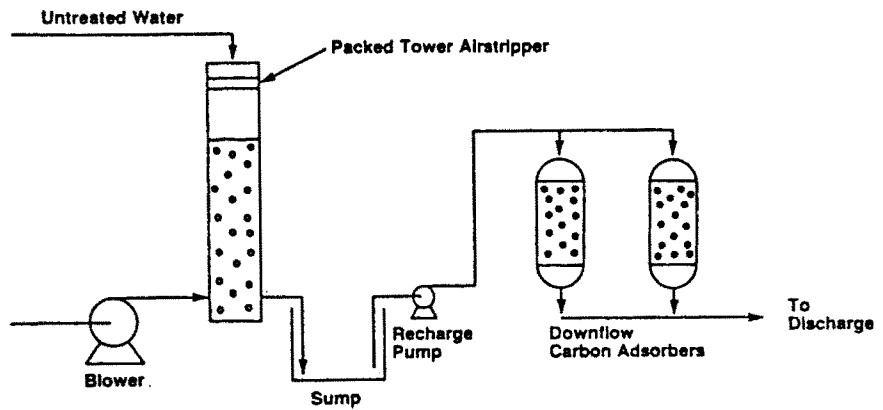
在空氣污染物排放標準甚為嚴格之地區，由空氣提除設備所排出之廢氣，常須進一步加以淨化，最有效之廢氣淨化法為氣相活性碳吸附。



圖一 填充塔式空氣提除器示意圖



圖二 噴水式空氣提除器示意圖



圖三 空氣提除法與液相活性碳合併使用之流程圖

参 考 文 献

1. Stenzel, M.H. and Gupta, U.S., "Treatment of Contaminated Groundwaters with Granular Activated Carbon and Air stripping", Presented at Air Pollution Control Association 78th Annual Meeting (June 19, 1985).
2. Weast, R.C. (editor), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 61st ed. (1980).
3. NEPCCO, "Air Stripping Systems for the Removal of Volatile Organic contamination from Water", Unpublished promotion bulletin, NEPCCO Equipment Division, Foxboro, MA (1986).
4. O'Brien, R.P. and Stenzel, M.H., "Combining Granular Activated Carbon and Air Stripping," Public Works (December, 1984).
5. O'Brien, R.P. and Fisher, J.L., "There is an Answer to Groundwater Contamination", WATER/Engineering & Management (May, 1983).

表一 常見有機污染物之亨利定律常數

Compound	H $\frac{\text{mg/m}^3}{\text{mg/m}^3}$	Compound	H $\frac{\text{mg/m}^3}{\text{mg/m}^3}$	Compound	H $\frac{\text{mg/m}^3}{\text{mg/m}^3}$
Vinyl chloride	270	1,1-Dichloroethane	$2,1 \times 10^{-1}$	1,1,2-Trichloroethane	$3,2 \times 10^{-2}$
1,1-Dichloroethylene	7,1	Benzene	$1,9 \times 10^{-1}$	1,1,2,2-Tetrachloroethane	$1,7 \times 10^{-2}$
Carbon tetrachloride	1,0	Chlorobenzene	$1,7 \times 10^{-1}$	Naphthalene	$1,5 \times 10^{-2}$
Tetrachlorotethylene	$9,6 \times 10^{-1}$	1,1,1-Trichloroethane	$1,5 \times 10^{-1}$	Acrylonitrile	$2,6 \times 10^{-3}$
Trichloroethylene	$4,2 \times 10^{-1}$	Chloroform	$1,4 \times 10^{-1}$	Pentachlorophenol	$8,7 \times 10^{-5}$
Methyl chloride	$3,3 \times 10^{-1}$	Heptachlor	$9,6 \times 10^{-2}$	Dimethyl phthalate	$1,7 \times 10^{-5}$
Ethylbenzene	$2,4 \times 10^{-1}$	Anthracene	$5,8 \times 10^{-2}$	Lindane	$1,3 \times 10^{-5}$
Toluene	$2,4 \times 10^{-1}$	1,2-Dichloroethane	$4,6 \times 10^{-2}$	Phenol	$1,1 \times 10^{-5}$

表二 常見有機污染物之活性炭吸附力

Compound	Adsorption* Capacity, mg/g	Compound	Adsorption* Capacity, mg/g	Compound	Adsorption* Capacity, mg/g
Heptachlor	1,220	3,3-Dichlorobenzidine	300	1,2,4-Trichlorobenzene	157
Endrin	666	gamma-BHC (lindane)	256	Pentachlorophenol	150
Aldrin	651	Chlordane	245	2,6-Dinitrotoluene	145
PCB-1232	630	PCB-1221	242	Naphthalene	132
Dieldrin	606	N-Butylphthalate	220	1,2-Dichlorobenzene	129
Anthracene	376	Phenanthrene	215	Diphenylamine	120
DDT	322	Acenaphthene	190	1,3-Dichlorobenzene	118
alpha-BHC	303	2,4-Dichlorophenol	157	Diethyl phthalate	110