

不同污染源周邊植物體中多環芳香族碳氫化合物(PAHs) 之 累積量

李貽華¹、徐慈鴻¹、李國欽¹、陳明義²

¹行政院農委會農業藥物毒物試驗所、²國立中興大學生命科學系

摘要

有機污染物為目前環境污染的一個嚴重問題，所有工業化國家的人民均難以避免暴露於這些污染物。有機污染物中之多環芳香族碳氫化合物(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)主要是由含碳化合物不完全的燃燒或石化燃料使用過程所產生。PAHs 為兩個或以上苯環所構成的化學結構物，非常穩定，不易在自然界中自行分解；其脂溶性高，易在生物體中累積，可藉由食物鏈的累積而危害人畜。評估污染物的存在，除利用儀器監測外，具生物累積性之污染物亦可由分析植物體中污染物含量而得知。由植物葉部有機污染物的累積情形，是評估區域性有機污染物之良好指標。本研究建立檢測植物葉部中 PAHs 含量之化學分析法，以探討不同污染源周邊地區植物受 PAHs 污染之情形。

同時檢測植物體中 16 種 PAHs 分析方法之建立，是以二氯甲烷萃取，經 Alumina 分離管柱淨化，以高壓液態層析儀附螢光檢出器檢測。所建立之方法可適用於多種植物葉片之 PAHs 含量分析。垃圾焚化廠周邊植物確有 PAHs 之累積，最常發現之種類為 fluorene、phenanthrene、fluoranthene 及 pyrene，此為三至四個苯環之 PAHs 類。由污染源周邊植物體 PAHs 含量可監測 PAHs 之污染情形，野生植物以大花咸豐草上之累積量較高，構樹葉片上未發現 PAHs 之累積。

前言

有機污染物中之多環芳香族碳氫化合物(PAHs)主要因含碳化合物不完全的燃燒或石化燃料使用過程所產生。PAHs 為兩個或以上苯環所構成的化學結構物，非常穩定，不易在自然界中自行分解，脂溶性高易在生物體中累積，可藉由食物鏈的累積而危害人畜。benzo(a)pyrene 已被証實具致癌性；PAHs 中之 acenaphthene、anthracene、phenanthrene、fluorene、fluoranthene、pyrene、benzo(a)pyrene 等化合物，為目前美國環保署優先列管之毒性物質。

評估污染物的存在，除利用儀器監測外，具生物累積性之污染物亦可由植物體中污染物含量分析得知。具累積性之有機污染物，易隨食物鏈之累積而為害生物，在歐洲即發生雞肉及乳製品受戴奧辛污染之情形，雞肉受污染是因食用了污染之飼料，而飼料是因製造原料牛肉受污染，牛肉則是因食用受污染之

牧草而致，牧草之污染來源是因垃圾焚化廠排放之戴奧辛。即污染物在植物中累積再經由食物鏈進而影響人畜。

Wegener 等(1992) 移植泥炭蘚(*Sphagnum* spp.)至製鋁工廠周邊，分析泥炭蘚，發現植體中有 PAHs 之累積，其累積量與工廠距離呈相關性，認為泥炭蘚可用於主動監測大氣中 PAHs 污染而達監測環境品質之目的。Nakajuma 等(1995) 探討東京二個不同交通狀況地點大氣中及杜鵑花葉片中 PAH 濃度，在杜鵑葉片中發現 perylene 及 benzo(a)pyrene 之累積。Lodovici 等(1998) 於義大利北部 13 個採樣點(包括都市與鄉村)進行採樣分析，於月桂(*Laurus nobilis*)葉片中發現 9 種 PAHs 之累積。Meharg 等(1998)於化學大火(10,000 噸聚丙烯)後，48 小時後調查植被中 PAH 含量，發現牧草上 PAH 量增加 70 倍。由植物葉部有機污染物的累積情形，是評估區域性有機污染之良好指標。本研究由野生植物葉片 PAHs 之累積情形，期能找出具代表性並可作為被動監測指標(passive biononitoring)之指標植物。並由當地植物植體中 PAHs 之累積量來了解 PAHs 污染物擴散之範圍與對環境之影響。

材料與方法

1. 野外植物調查及採樣：

至垃圾焚化廠及工業區周邊採集植物樣品，以了解污染源周邊植物是否有多環芳香族碳氫化合物之累積及可能之污染範圍。本研究選擇中部垃圾焚化廠及石化工業區周邊地區為調查區域；以調查區域普遍常見之野生植物：大花咸豐草(*Bidens pilosa* L. var. *radiata* (Bl.) Sherff)、紫花霍香薊(*Ageratum houstonianum* Mill.)、構樹(*Broussonetia papyrifera* L.)等及作物：水稻(*Oryza sativa* L.)及甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)為調查對象。於 2001 年夏季及冬季各採樣一次，採樣範圍以目標污染源為中心點於半徑 3 公里內沿東、西、南、北方向不同距離採樣。採樣時觀察並記錄植物是否有受害徵狀或生長異常現象，對照組植物採自農藥所周邊或農場。植株採回後取其葉片切碎，混合均勻後裝罐，置於-4℃下冷凍保存，待分析時取出。

2. 體樣品分析：

萃取：取 20g 樣品置於打碎瓶中，以二氯甲烷(CH_2Cl_2)打碎，抽氣過濾除去濾渣，濾液移入分液漏斗中，加 20mL 飽和食鹽水，取 CH_2Cl_2 層，萃取液脫水後以減壓濃縮法濃縮至乾，加 5mL 之正己烷(*n*-Hexane)，待淨化。

淨化：淨化之玻璃管柱上、下層填充無水硫酸鈉(Na_2SO_4)，中層為去活化之 Alumina (75~230mesh)，以 150 mL *n*-Hexane 為淋洗液，收集淋洗液以減壓濃縮法濃縮至乾，以氫甲烷(CH_3CN)將濃縮瓶之抽出物洗至定量瓶中，定量，以高壓液態層次分析儀(HPLC)分析。

儀器分析：

HPLC : 1100

Column : Vydac C₁₈ 5 μ m (4.6mm * 250mm)

Mobile phase :

Gradient : 60% \rightarrow 100% CH₃CN (in H₂O)

Detector : UV(230nm)及 Fluorescence

結果與討論

植物體中 PAHs 分析方法之建立包括檢量線、回收率、精密度及偵測界限之完成。16 個 PAHs 分別以 5 個濃度求之分析儀器之線性關係，相關係數皆大於 0.995。進行 5 種植物(大花咸豐草、紫花霍香薊、水稻、甘蔗及構樹)之回收率試驗，結果見表 1，所建立之分析方法可應用於多種植物植物 PAHs 之檢測。本分析方法可同時檢測 16 種 PAHs 類，對脂溶性高之 PAHs 類回收率尤佳。Benzo(a)pyrene 具致癌性，許多報告認為是 PAHs 類之代表，在測試之五種植物上的回收率試為 78.7~93.4%，因此利用本方法探討具致癌性之 Benzo(a)pyrene 亦可行。本分析方法在五種植物之分析其精密度皆小於回收率之 10% 範圍內，偵測界限介 1.2~7.2 ng/g。所建立之方法適用於多種植物葉部之 PAHs 含量分析。

分析結果列於表 2 及 3。5 種植物之對照組樣品皆未檢測到 PAHs 類，分析樣品中以大花咸豐草植體中 PAHs 之累積量較明顯，是很好的累積者(accumulator)，大花咸豐草在台灣平地分佈極普遍，可考慮作為被動監測指標植物(passive biomonitoring)。構樹葉片未檢測到 PAHs，是否與其表面結構有關，不易吸收累積，抑或其生理機制之影響而可將污染物分解達淨化空氣之效，值得進一步探討。水稻葉片亦發現 PAHs 含量，其含量是否會轉移至可食用部位(穀粒)，影響食用安全，將進一步探討。

垃圾焚化廠周邊植物體中最常發現之 PAHs 種類為 fluorene、phenanthrene、fluoranthene 及 pyrene，這些為三至四個苯環之 PAHs 類。工業區周邊植物體中最常發現之 PAHs 種類為 fluorene、anthracene 及 pyrene。垃圾焚化廠周邊植物體中發現之 PAHs 種類較石化工業區周邊植物為多，不同污染源所產生之 PAHs 類污染物有所不同。

參考文獻

1. Gao, X. P., H. B. Xu, S. Y. Chen, S. X. Zhao, M. Y. Xie and P. Wang. 1992. Screening monitoring plants for fluoride and a study of monitoring indices. J. Plant Resources and Environ. 1(3): 28~34.
2. Holoubek, I., P. Korínek, Z. Šeda., E. Schneiderová, I. Holoubková, A. Pacl, J. Tríska, P. Cudlín and J. Čáslavský. 2000. The use of mosses and pine needles to

- detect persistent organic pollutants at local and regional scales. *Environ. Pollut.* 109: 283~292.
3. Lodovici, M, V. Akpan, C. Casalini, C. Zappa and P. Dolara. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbons in *Laurus nobilis* leaves as a measure of air pollution in urban and rural sites of Tuscany. *Chemosphere* 36(8): 1703~1712.
 4. Lovett, A. A., C. D. Foxall, C. S. Creaser and D. Chew. 1997. PCB and PCDD/DF congeners in locally grown fruit and vegetable samples in Wales and England. *Chemosphere* 34: 1421-1436.
 5. Meharg, A. A., J. Wright, H. Dyke and D. Osborn. 1998. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) dispersion and deposition to vegetation and soil following a large-scale chemical fire. *Environ. Pollut.* 99: 29~36.
 6. Nakajuma, D., Y. Yoshida, J. Suzuki and S. Suzuki. 1995. Seasonal changes in the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in azalea leaves and relationship of atmospheric concentration. *Chemosphere* 30(3): 409~418.
 7. Powell, R. L. 1997. The use of vascular plants as field biomonitors. pp.335~365. *In* Plants for Environmental Studies. Wang, W., J. W. Gorsuch and J. S. Hughes. Eds., CRC Press.
 8. Sabijic, A., H. Gusten, J. Schonherr and M. Riederer. 1990. Modeling plant uptake of airborne organic chemicals. I. Plant cuticle/water partitioning and molecular connectivity. *Environ. Sci. Technol.* 24: 1321-1326.
 9. Simonich, S. L. and R. A. Hites. 1994. Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere. *Nature* 370: 49~51.
 10. Simonich, S. L. and R. A. Hites. 1994. Vegetation-atmosphere partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Sci. Technol.* 28: 939~943.
 11. Viskari, E. L., R. Rekilä, S. Roy, O. Lehto, J. Ruuskanen and L. Kärenlampi. 1997. Airborne pollutants along a roadside: assessment using snow analyses and moss bags. *Environ. Pollut.* 97: 153~160.
 12. Wagrowski, D. M. and R. A. Hites. 1997. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban, suburban, and rural vegetation. *Environ. Sci. Technol.* 31: 279~282.
 13. Wegener, J. W. M., M. J. M. van Schaik and J. Aiking. 1992. Active biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons by means of mosses. *Environ. Pollut.* 76: 15-18.

14. Wenzel, K., L. Weibflog, E. Paladini, M. Gantuz, P. Guerreiro, C. Puliafito and G. Schuurmann. 1997. Emission pattern of airborne pollutants in Argentina and Germany. II. Biomonitoring of organochlorine compounds and polycyclic aromatics. *Chemosphere* 34(12): 2505-2518.
15. Yang, S.Y.N., D. W. Connell, D. W. Hawker and S. I. Kayal. 1991. Polycyclic aromatic hydrocarbons in air, soil and vegetation in the vicinity of an urban roadway. *Sci. Total Environ.* 102: 229~240.

表 1. 不同植物植體 PAHs 含量分析之回收率(%)

PAHs種類	大花咸豐草	紫花霍香薊	水稻	甘蔗	構樹
Naphthalene	50.5 ± 4.9	58.3 ± 4.3	42.3 ± 4.9	48.3 ± 5.0	38.1 ± 4.9
Acenaphylene	57.9 ± 2.1	60.2 ± 3.9	72.7 ± 3.7	66.1 ± 4.4	44.9 ± 2.0
Acenaphthene	63.6 ± 1.9	61.5 ± 4.2	73.4 ± 3.6	62.2 ± 3.1	42.6 ± 1.6
Fluorene	59.8 ± 1.9	63.4 ± 4.4	74.4 ± 3.2	62.5 ± 2.0	46.8 ± 1.9
Phenanthrene	69.1 ± 1.8	71.6 ± 1.9	82.5 ± 2.6	77.1 ± 2.5	53.1 ± 3.2
Anthracene	69.8 ± 2.1	70.9 ± 2.3	90.9 ± 2.4	81.1 ± 4.2	53.1 ± 3.0
Fluoranthene	68.0 ± 2.8	81.2 ± 1.4	81.8 ± 3.0	82.0 ± 5.5	54.3 ± 3.3
Pyrene	69.7 ± 2.2	77.8 ± 1.4	80.3 ± 2.9	82.4 ± 4.4	54.7 ± 3.6
Benzoanthracene	79.9 ± 1.8	82.0 ± 1.2	90.1 ± 1.5	89.8 ± 2.9	78.8 ± 2.5
Chrysene	87.7 ± 1.4	82.2 ± 1.4	92.0 ± 1.6	92.9 ± 4.0	84.3 ± 2.2
Benzo(b)fluoranthene	83.6 ± 2.2	88.3 ± 1.5	89.1 ± 1.6	90.2 ± 3.8	74.1 ± 2.3
Benzo(k)fluoranthene	86.5 ± 1.6	85.6 ± 1.6	92.0 ± 1.3	91.8 ± 4.1	86.6 ± 0.8
Benzo(a)pyrene	82.0 ± 2.5	85.5 ± 1.9	93.2 ± 2.5	93.4 ± 3.6	78.7 ± 2.4
Dibenzoanthracene	90.9 ± 1.0	90.4 ± 1.4	90.9 ± 4.3	94.3 ± 5.9	83.9 ± 2.5
Benzoperylene	88.7 ± 2.1	88.1 ± 2.1	91.1 ± 4.0	90.1 ± 4.6	81.6 ± 4.0
Indenopyrene	84.7 ± 2.8	88.4 ± 1.2	88.4 ± 2.3	89.4 ± 3.5	72.2 ± 3.3

註：回收率試驗之多環芳香族碳氫化合物添加量為 2 μg，回收率為六重複之平均值。

表 2. 垃圾焚化廠周邊植物植體之 PAHs 含量

PAHs種類	大花咸豐草		水稻		構樹		甘蔗	
	測得樣品 數百分比 (%)*	含量範圍 (µg/g)	測得樣 品數百 分比(%)	含量範圍 (µg/g)	測得樣 品數百 分比(%)	含量範圍 (µg/g)	測得樣 品數百 分比(%)	含量範圍 (µg/g)
Naphthalene	15.6	12.4~42.0	15.4	9.0~14.1	0	ND	0	ND
Acenaphylene	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
Acenaphthene	15.6	9.7~22.0	0	ND	0	ND	0	ND
Fluorene	37.5	14.5~47.3	15.4	2.8~9.8	0	ND	0	ND
Phenanthrene	25.0	21.3~70.6	46.2	9.4~18.7	0	ND	36.4	2.6~31.6
Anthracene	0	ND	15.4	2.9~8.6	0	ND	0	ND
Fluoranthene	18.8	84.1~219.6	53.8	2.9~9.2	0	ND	0	ND
Pyrene	43.8	6.3~36.73	46.2	3.9~11.6	0	ND	0	ND
Benzoanthracene	6.3	19.7~22.6	0	ND	0	ND	0	ND
Chrysene	12.5	11.5~18.2	7.7	9.8	0	ND	0	ND
Benzo(b)fluoranthene	9.4	7.5~9.9	0	ND	0	ND	0	ND
Benzo(k)fluoranthene	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
Benzo(a)pyrene	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
Dibenzoanthracene	0	ND	0	ND	0	ND	0	ND
Benzoperylene	3.1	ND	7.7	8.5	0	ND	0	ND
Indenopyrene	6.3	9.9~24.6	0	ND	0	ND	0	ND
分析樣品數	32		13		28		11	

* 測得樣品數百分比(%) = (測得該化合物之樣品數 / 分析樣品數) x 100%

ND：未檢測到此化合物

表 3. 石化工業區周邊植物植體之 PAHs 含量

PAHs種類	大花咸豐草		水稻		構 樹	
	測得樣品數	含量範圍	測得樣品數	含量範圍	測得樣品數	含量範圍
	百分比(%)*	(µg/g)	百分比(%)	(µg/g)	百分比(%)	(µg/g)
Naphthalene	20.0	28.8~77.9	7.1	27.5	0	ND
Acenaphylene	0	ND	0	ND	0	ND
Acenaphthene	16.0	4.5~5.7	0	ND	0	ND
Fluorene	24.0	8.0~120.1	0	ND	0	ND
Phenanthrene	12.0	3.8~404.6	7.1	11.0	0	ND
Anthracene	20.0	4.9~57.7	0	ND	0	ND
Fluoranthene	16.0	3.9~64.2	0	ND	0	ND
Pyrene	28.0	10.4~120.8	0	ND	0	ND
Benzoanthracene	0	ND	0	ND	0	ND
Chrysene	0	ND	0	ND	0	ND
Benzo(b)fluoranthene	0	ND	0	ND	0	ND
e						
Benzo(k)fluoranthene	0	ND	0	ND	0	ND
e						
Benzo(a)pyrene	0	ND	0	ND	0	ND
Dibenzoanthracene	0	ND	0	ND	0	ND
e						
Benzoperylene	0	ND	0	ND	0	ND
Indenopyrene	0	ND	0	ND	0	ND
分析樣品數	25		14		16	

* 測得樣品數百分比(%) = (測得該化合物之樣品數 / 分析樣品數) x 100%

ND：未檢測到此化合物