

某氮肥厂场地土壤 PAHs 污染特征研究

李 慧^{1,2}, 蔡信德², 罗 琳¹, 陈来国², 郑政委²

(1.湖南农业大学, 湖南 长沙 410128; 2.环境保护部华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

摘 要 采用现场采样及室内测试方法对广州某氮肥厂原料车间和油库区土壤中 16 种优控多环芳烃(PAHs)的含量进行调查, 分析了 Σ PAHs 含量及其组成特征和垂直分布特征, 并在此基础上进行了源解析。结果表明, 分析样品中 Σ PAHs 范围在 10~7 795 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 原料车间土壤中的 Σ PAHs 小于油库区土壤中的 菲、芘、荧蒹、并(b)荧蒹、苯并(a)芘为主要污染物; 油库土壤 0~40 cm 的样品中 16 种 PAHs 均有检出, Σ PAHs 和单体分布基本一致, 原料车间土壤 Σ PAHs 和单体浓度随着地面深度的增加而减少。通过对单组分比值(菲/蒹、荧蒹/芘)的分析可以看出油库区土壤中 PAHs 来源于石油和燃烧源, 而原料车间污染源主要为燃烧源。

关键词 化工场地; 土壤; 多环芳烃(PAHs)

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)04-0702-05

Characteristics of the PAHs in Typical Chemical Venues in Guangzhou

LI Hui^{1,2}, CAI Xin-de², LUO Lin¹, CHEN Lai-guo², ZHENG Zheng-wei²

(1.Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China)

Abstract Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) are a class of toxic, mutagenic and carcinogenic compounds, and their characteristics such as concentrations, distribution and degradation in the environment caused wide research interest in recent years. The US Environmental Protection Agency has listed 16 PAHs as priority pollutants. In this paper, the concentration and composition of the 16 PAHs in the soil of the raw materials workshop and the oil tank sites at chemical venues of Guangzhou had investigated using gas chromatography and mass spectrometry. The 12 holes with 30 soil samples were completed. 16 USEPA PAHs had detected in all soil samples in depot. The concentrations of Σ PAHs (total of 16 PAH) ranged from 10 to 7 795 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and Σ PAHs in the workshop materials soil samples were lower than that in oil tank site soil samples. The major pollutants in soil samples were phenanthrene, pyrene, fluoranthene, benzo [b]fluoracene and benzo[a]pyrene, their highest concentration was 1 404.2 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 1 229.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 117.7 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 803.1 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 507.0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The distribution of Σ PAHs and monomer were similar, the concentration of Σ PAHs and monomer in the raw materials workshop soils reduced with increasing of the depth. The characteristic ratios of phenanthrene/anthracene and fluoranthene/pyrene indicated that the PAHs pollutants in the soils of oil tank zone was from leakage contamination, and in the soil of materials warehouse mainly from atmospheric deposition.

Keywords chemical venues; soil; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)

多环芳烃(PAHs)是指两个或两个以上的苯环以稠环或非稠环形式连接在一起形成的有机化合物。PAHs 具有致癌、致畸形、致突变的强毒性, 分布广泛, 严重威胁着人类健康和生态环境安全^[1-3]。由于 PAHs 的高辛醇-水分配系数, 这类化合物易于从水中分配

到生物体、沉积物和土壤颗粒中。目前, 国外对土壤中 PAHs 的含量与分布、源解析、迁移转化机理及污染土壤的修复方面取得了一些进展, 有许多研究报道了 PAHs 在水体^[4-8]、土壤^[9-12]、大气^[13-17]的分布情况; 而国内近年来, 也对 PAHs 进行了一些研究, 但大多数集中在河流、湖泊、地下水及河流沉积物中 PAHs 的分布状况以及应用环境地球化学参数分析 PAHs 的来源等方面^[18-23], 也开展了一些土壤中 PAHs 迁移机制、生物降解机理等研究, 但对工业场址土壤 PAHs 的分布及来源等研究较少。PAHs 最重要的两个来源是石油污染和煤等燃料的不完全燃烧^[24]。本研究以典型化

收稿日期 2008-07-06

基金项目 全国土壤现状调查及污染防治项目(1440800011); 广州市二〇〇六年污染防治新技术新工艺推广应用项目

作者简介 李 慧(1984—), 女, 硕士研究生, 研究方向为污染土壤修复。E-mail: jihui235@yahoo.com.cn

通讯联系人 蔡信德 E-mail: xindecai@scies.com.cn

工场地原料车间和油库区土壤为对象,对美国 EPA 规定的 16 种优控 PAHs 的含量及分布特征进行了调查研究,以便了解典型化工场地 PAHs 的分布及其来源,为场地土壤的修复提供依据。

1 样品的采集与分析

1.1 采样

广州某氮肥厂于 1962 年正式投产,2000 年停产。生产所用原材料有混合煤、焦炭、燃料油、工业原煤、工业原油、重油等。为了了解场地多环芳烃污染的现状,在原料车间和储油罐区共设 12 点进行调查,其中原料车间采用网格布点,网格取 10 m×10 m,采集深度为 1.0 m,分 3 层采样(由于表层为水泥,从 40 cm 取样) 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,共 9 个点(A11~A19) 27 个土样;油库区土壤按石油污染程度(低、中、高)分别布点(A21、A22、A23),采集深度为 0~20 cm 和 20~40 cm,共 6 个样;采样时间分别为 2007 年 2 月和 5 月,采回样品置 4℃冰箱保存。

1.2 分析测定

在化学分析前将土样从冰箱取出冷冻干燥,研磨过 100 目筛均质化后取 20 g 样品,加入 PAHs 回收率指示物(PAHs 回收率指示物标样为 5 种混合标样,包括 Naphthalene.d8, Acenaphthene.d10, Phenanthrene.d10, Chrysene.d12 和 Perylene.d12, 购自 ULTRA Scientific (US.108N)), 二氯甲烷索氏抽提 48 h, 提取液浓缩并溶剂替换为正己烷,过硅胶/氧化铝(2:1)层析柱,用 15 mL 正己烷和 70 mL 二氯甲烷/正己烷(3:7)分别淋洗出烷烃和芳烃组分,洗脱液浓缩定容至 0.2 mL,再加入一定量的六甲基苯作内标,进行 GC-MSD 分析。

气相色谱质谱联用仪(HP6890GC/5973MSD), DM-5 柱为 30 m×0.25 mm×0.25 μm(Dikama),使用程序升温 80℃保持 2 min,然后以 4℃/min 升至 300℃,保持 30 min。污染物的定量采用 5 点校正曲线和内标法进行,分析方法和检测限参阅文献[25-26]。校正曲线的相关系数除茚并(1,2,3-cd)芘和苯并(g,h,i)芘的为 0.988 外,其他都在 0.990 以上。整个过程由以下美国 EPA 的质量控制和质量保证(QA/QC)控制样监控:方法空白、加标空白、样品平行样,并用回收率指示物监测样品的制备和基质的影响。

2 结果和讨论

2.1 ΣPAHs 及组成的垂直分布特征

油库区 A21、A22、A23 表层 0~20 cm 土样 ΣPAHs

含量在 1 075~7 200 μg·kg⁻¹ 左右,20~40 cm 土壤 ΣPAHs 含量在 655~7 795 μg·kg⁻¹ 左右,与 0~20 cm 含量相当,这是因为氮肥厂生产时间长达 38 a,污染物已经在一定的土壤层迁移扩散,另外可能是土壤被人为的扰动;由图 1 可知,原料车间 A11~A19 土样 ΣPAHs 含量最高值出现在 0~20 cm 土样,浓度为 145~1 058 μg·kg⁻¹,20~40 cm 土样 ΣPAHs 含量大大降低,浓度在 13~231 μg·kg⁻¹ 左右,40~60 cm 土层浓度在 10 μg·kg⁻¹ 以下。这说明土壤的 ΣPAHs 含量随着地面深度的增加而减少,这与一般土壤中 PAHs 的垂直分布规律一致。

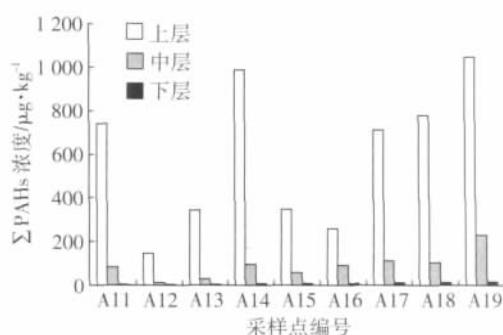


图 1 原料车间各剖面 ΣPAHs 含量随深度的变化
Figure 1 Change of total PAHs with depth in the site of raw materials workshop

表 1 为原料车间和油库区土壤中 PAHs 单体的含量。油库区土壤各类 PAHs 单体化合物在上、中层的含量平均值相当,峰值在两个层面中都有出现,与 ΣPAHs 含量在垂直方向的规律一致,其中 16 种 PAHs 两层均有检出,含量最高的分别为菲和芘,含量最低的是茚和二氢茚,原料车间各类 PAHs 单体化合物在垂直方向的分布也与其 ΣPAHs 含量分布一致:含量随深度增加而降低,个别单体含量在 20~40 cm 土层有所增大,PAHs 含量峰值多集中在 0~20 cm 土层。各层分布较多、含量较高的污染物为荧蒽,苯并(a)芘,与高环 PAHs 溶解度低,lgK 相对较高,生物转化和降解系数等性质一致[27]。茚、二氢茚、茚、苯并(a,h)蒽含量较低,且多数分布在 0~20 cm 土层中,在 20 cm 以下基本无检出,60~80 cm 中各 PAH 单体含量很小,基本在 0.1 μg·kg⁻¹ 以下或未检出。

2.2 ΣPAHs 及组成特征

各采样点的测定结果表明,ΣPAHs 范围在 10~7 795 μg·kg⁻¹,其中原料车间土壤污染程度小于油库附近土壤,这可能是由于水泥层对 PAHs 污染土壤起了减缓作用。油库土壤的 ΣPAHs 含量顺序由大到小

表 1 单体 PAHs 在土壤剖面中的含量($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 1 Concentration of PHAs in different layers($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

污染物/ μg·kg ⁻¹	储油罐区						原料车间						标准值/ mg·kg ⁻¹
	表层(0~20 cm)			中层(20~40 cm)			表层(0~20 cm)			中层(20~40 cm)			
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	
Nap	133.6	442.0	290.4	86.4	373.6	230.8	2.5	25.1	6.9	0.2	2.0	0.5	5 ^a
Ane	14.2	28.4	22.2	3.6	27.2	22.7	N.D	4.0	0.7	N.D	0.3	0.1	0.9 ^b
Any	14.0	38.6	23.9	2.8	51.7	23.2	0.1	1.9	1.1	N.D	0.2	0.1	0.41 ^b
Fle	74.0	121.7	105.7	16.0	117.7	66.8	N.D	2.3	1.5	N.D	0.6	0.1	3.5 ^b
Phe	305.6	1 520.0	797.7	113.7	1 404.2	743.7	2.3	73.0	39.8	0.1	13.5	3.9	10 ^a
An	15.6	96.5	63.5	11.5	106.1	70.97	0.2	13.1	5.6	N.D	1.0	0.4	10 ^a
Fla	91.5	667.5	367.5	60.2	1 014.9	475.37	2.3	173.1	84.1	0.1	37.1	14	10 ^a
Pyr	84.5	926.9	576.8	64.8	1 229.3	740.5	2.1	140.6	69.8	0.1	26.6	10.4	6.65 ^b
Baa	39.3	558.9	230.4	48.1	627.5	357.4	1.0	90.3	41.2	N.D	11.1	3.7	5 ^a
Chr	48.3	417.3	315.0	55.5	713.0	358.9	1.7	120.6	53.3	0.1	26.1	10	5 ^a
Bbf	64.8	835.0	405.0	65.8	803.1	394.9	2.1	121.3	65.5	0.1	37.7	7.9	0.011 ^b
Bkf	16.2	187.0	86.6	15.4	227.7	98.2	0.6	40.0	17.6	N.D	2.6	1.2	5 ^a
Bap	40.1	448.0	275.9	43.8	507.0	309.6	5.9	364.4	134.9	0.5	83.5	27.1	1 ^a
Hp	23.1	203.7	106.1	20.2	168.6	95.4	1.2	54.2	30.3	N.D	5.6	2.2	5 ^a
Daa	10.8	103.8	59.4	12.7	65.7	45.5	2.1	35	27.8	N.D	3.7	1.9	1 650 ^b
Bgp	37.0	621.8	319.3	34.7	369.1	236.4	1.4	101.7	40.4	12.5	231.5	5.1	10 ^a

注 :萘(Nap)、芴(Acey)、二氢芴(Ace)、芴(F1)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Flu)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(IcdP)、苯并[ghi]芘(BghiP)、二苯并[a,h]蒽(DahA);N.D 表示未检出,原料车间底层土壤各 PAH 单体浓度基本在 $0.1\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以下或未检出,省略^a表示荷兰 B 标准,^b表示美国纽约州土壤可容许的有机物浓度。

为 A23、A22、A21 与土壤中油污染程度一致。从组成上来看,菲、芘、荧蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(a)芘含量最高,平均值都在 $100\sim 245\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,这是由于煤炭和石油是化工厂生产的主要原料,在原料的堆放、运输、加工及燃烧过程中引起的扬尘和烟尘沉降或降雨淋滤是化工场地土壤中高环数芳烃相对含量较高的直接原因。我国至今没有制定出土壤中多环芳烃的允许浓度,本次研究采用荷兰土壤修复标准 B 标准来对土壤中多环芳烃的污染状况进行评价,见表 1。该标准没有涉及到苯并[b]荧蒽等其他 6 种 PAH 的允许浓度,采用美国纽约州土壤可容许的有机物浓度标准补充。各 PAH 污染浓度最大值与荷兰土壤修复 B 标准中 10 种 PAH 相比,未有超标现象,其他 6 种 PAH 采用美国纽约州土壤可允许的有机物浓度标准^[28],可以看出油库和原料车间土壤苯并(b)荧蒽含量均超标,最高浓度达 $835\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,是标准值的 83 倍。

图 2 表示了两个采样点的土壤 PAHs 的组成特征,横坐标表示荧蒽与芘的浓度比,纵坐标表示菲与蒽的浓度比。国内外研究表明^[29-31],当菲/蒽 >10 、荧蒽/芘 <1 时代表 PAHs 污染来源于石油污染,即图 2 的左上方区域;当菲/蒽 <10 、荧蒽/芘 >1 时代表 PAHs 污

染来源于燃烧源,即图 2 的右下方区域。由图 2 可以看出油库土样在左上方和左下方区域均有分布,说明其来源为燃烧源和石油源的混合源,而原料车间土样大部分分布于右下方区域,由此判断主要来源为燃烧源,包括工业、生活供热燃煤,以及周边交通污染(主要是尾气排放)通过烟气的干湿沉降进入原料车间的土壤。

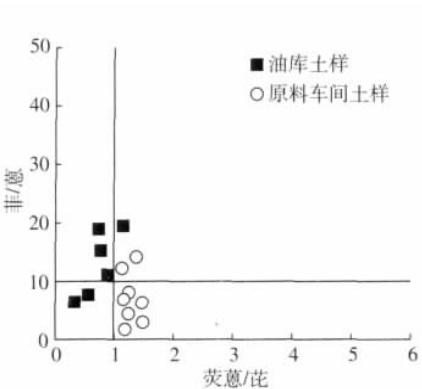


图 2 土样的 PAHs 组成特征
Figure 2 Profiles of PAHs in the soil

据 Junfeng 等人^[32]报道,自然光照条件下菲的半衰期为 72 h,蒽的为 26 h,荧蒽的为 26 h,芘的为 37 h。原

料车间土壤菲/蒽与荧蒽/芘分别是 4~14 和 1.0~1.3, 油库土壤菲/蒽与荧蒽/芘的范围明显偏大, 分别为 8~19 和 0.4~1。这可能与油库土壤在室外受光照条件影响较大, 而原料车间在室内受光的影响较小有关。

3 结论

(1) 油库土壤 0~40 cm 的 16 种 PAH 均有检出, Σ PAHs 和单体分布基本一致, 原料车间土壤 Σ PAHs 和单体浓度随着地面深度的增加而减少, 与一般土中 PAHs 的垂直分布规律一致, 其中芘、二氢芘、苊、苯并(a,h)蒽含量较低, 且多数分布在 0~20 cm 土层中。

(2) 分析结果表明, 油库土壤和原料车间土壤中菲、芘、荧蒽、并(b)荧蒽、苯并(a)芘为主要污染物, 通过对单组分比值(菲/蒽、荧蒽/芘)的分析得知油库土壤 PAHs 污染源为混合源, 原料车间污染源主要为燃烧源。

参考文献:

- [1] Coates J D, Woodward J, Allen J, et al. Anaerobic degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons and alkanes in petroleum contaminated marine bar sediments[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1997, 63: 3589-3593.
- [2] Soclo H H, Garrigues P H, Ewaid M. Origin of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in coastal marine sediments case studies in Cotonou (Benin) and Aquitaine(France) Areas[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40: 387-396.
- [3] 刘明阳, 张文漫. 武汉市东西湖农场表层土壤中多环芳烃的含量分布特征[J]. *中国环境监测*, 2006, 22(4): 74-76.
LIU Ming-yang, ZHANG Wen-man. Characteristics of distribution and concentration of PAHs in the soil from Dongxihu Farm in Wuhan City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, 22(4): 74-76.
- [4] Fernandes M B, Sicre M A, Boireau A, et al. Polyaromatic hydrocarbon (PAH) distributions in the Seine River and its estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*. 1997, 34: 857-867.
- [5] Maldonado C, Bayona J M, Bodineau L. Sources, distribution, and water column processes of aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in the Northwestern Black Sea water[J]. *Environmental Science and Technology*, 1999, 33: 2693-2702.
- [6] Baumard P, Budzinski H, Garrigues P, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in recent sediment and mussels (*mytilus eduli*) from the Western Baltic Sea: occurrence, bioavailability and seasonal variations[J]. *Marine Environmental Research*, 1999, 47: 17-47.
- [7] Tolun L G, Okay O S, Gaines A F, et al. The pollution status and the toxicity of surface sediments in Yzmit Bay (Marmara Sea)[J]. *Turkey Environment International*, 2001, 26: 163-168.
- [8] Michalis L, Eleni S. Evaluating contamination of dredges and disposal criteria in Greek coastal areas[J]. *Chemosphere*, 2008, 72: 811-818.
- [9] Nam J J, Song B H, Eom K C, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in South Korea[J]. *Chemosphere*, 2003, 50: 1281-1289.
- [10] Wilcke W, Muller S, Kanchanakool C N, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok[J]. *Geoderma*, 1999, 91: 297-309.
- [11] Trapido M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Estonian soil: contamination and profiles[J]. *Environmental Pollution*, 1999, 105: 67-74.
- [12] Toril H, Rolf T O, Tore V. Lead and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soil from day care centres in the city of Bergen, Norway[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 266-272.
- [13] Fernandez P, Grimalt J O, Vilanova R M. Gas/particle partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons in high mountain regions of Europe[J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36: 1162-1168.
- [14] Tasdemir Y, Esen F. Urban air PAHs concentrations, temporal changes and gas/particle partitioning at a traffic site in Turkey[J]. *Atmos Res*, 2007, 84: 1-12.
- [15] Cincinelli A, Bubba M D, Martellini T, et al. Gas/particle concentration and distribution of *n*-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of Prato (Italy)[J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 472-478.
- [16] Nedim V, Fatma E, Yücel T. Seasonal concentrations and partitioning of PAHs in a suburban site of Bursa, Turkey[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 155: 298-307.
- [17] 杨敏, 倪余文, 苏凡, 等. 辽河沉积物中多环芳烃的污染水平与特征[J]. *环境化学*, 2007, 26(2): 217-221.
YANG Min, NI Yu-wen, SU Fan, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs) in sediments of Liaohe River, China[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(2): 217-221.
- [18] 郭伟, 何孟常, 杨志峰, 等. 大辽河水系表层沉积物中石油烃和多环芳烃的分布及来源[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(5): 824-831.
GUO Wei, HE Meng-chang, YANG Zhi-feng, et al. Distribution and sources of petroleum hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Daliao River watershed, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5): 824-830.
- [19] 欧寿铭, 郑建华, 郑金树, 等. 厦门港和员当湖表层沉积物的石油烃和多环芳烃[J]. *海洋环境科学*, 2003, 22(4): 49-53.
OU Shou-ming, ZHENG Jian-hua, ZHENG Jin-shu, et al. Petroleum hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments in Xiamen Harbour and Yuandang Lake[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4): 49-53.
- [20] 冯承莲, 夏星辉, 周追, 等. 长江武汉段水体中多环芳烃的分布及来源分析[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(11): 1900-1908.
FENG Cheng-lian, XIA Xing-hui, ZHOU Zhui, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Wuhan section of the Yangtze River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(11): 1900-1908.
- [21] 江锦花. 台州湾近海海水中多环芳烃的浓度水平及源解析[J]. *环境化学*, 2007, 26(4): 551-552.
JIANG Jin-hua. The concentration levels and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Taizhou Bay near sea water[J]. *Environmental Chemistry*, 2007, 26(4): 551-552.
- [22] 张跃进, 朱书全, 肖汝, 等. 浑河沿岸污灌区地下水中 PAHs 分布

- 特征研究[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 7-11.
- ZHANG Yue-jin, ZHU Shu-quan, XIAO Ru, et al. Study on distribution of PAHs in Groundwater in irrigation area along the Hunhe River in Liaoning Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1): 7-11.
- [23] 杨 策, 钟宁宁, 陈党义, 等. 煤矿区表层土壤中芳香烃组成、分布特征及标志化合物研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(3): 445-451.
- YANG Ce, ZHONG Ning-ning, CHEN Dang-yi, et al. Distribution, composition and mark compounds of aromatic pollutants in surface soil samples from coal-mining area—a case study of Shilong, Pingding-shan, Henan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3): 445-451.
- [24] 林 峥, 麦碧娴, 张 干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制[J]. 环境化学, 1999, 18(2): 115-121.
- LIN Zheng, MAI Bi-xian, ZHANG Gan, et al. Quality assurance/quality control in quantitative analysis of polycyclic aromatic hydrocarbons & organochlorine pesticides in sediments[J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(2): 115-121.
- [25] 陈来国, 冉 勇, 麦碧娴, 等. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状[J]. 环境化学, 2004, 23(3): 341-344.
- CHEN Lai-guo, RAN Yong, MAI Bi-xian, et al. Pollution situation of polynuclear aromatic hydrocarbons in vegetable soils around Guangzhou[J]. *Environmental Chemistry*, 2004, 23(3): 341-344.
- [26] 韩 菲. 多环芳烃来源与分布及迁移规律研究概述[J]. 气象与环境学报, 2007, 23(4): 58-62.
- HAN Fei. Review on origin, distribution and translocation of polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs)[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007, 23(4): 58-62.
- [27] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 539-542.
- SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing. Formation theory and remediation technique of soil pollution[M]. Beijing: Science Press, 2005: 539-542.
- [28] Kose T, Yamaoto T, Anegawa A, et al. Source analysis for polycyclic aromatic hydrocarbon in road dust and urban runoff using marker compounds[J]. *Desalination*, 2008, 226: 151-159.
- [29] Amirs S, Hafidi M, Merlina G, et al. Fate of polycyclic aromatic hydrocarbons during composting of lagooning sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2005, 58: 449-458.
- [30] Sicre M A, Marty J C, Salio T A, et al. Aliphatic and aromatic hydrocarbons in different sized aerosols over the Mediterranean Sea[J]. *Atmos Environ*, 1987, 21: 2247-2259.
- [31] Niu J, Chen J, Martens D, et al. Photolysis of polycyclic aromatic hydrocarbons adsorbed on spruce *Picea abies*(L.) Karst. needles under sunlight irradiation[J]. *Environ Pollut*, 2003, 123: 39-45.