

贵阳市表层土壤中多环芳烃的分布特征及来源解析*

胡健^{1**} 张国平¹ 刘頔^{2,3} 张岩林^{1,2} 灌瑾¹

(¹ 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

摘要 运用高效液相色谱仪对贵阳市区及近郊的表层土壤中 16 种多环芳烃 (PAHs) 进行了定量分析, 对其分布特征、污染水平以及来源进行了探讨。结果表明: 土壤中 PAHs 含量为 61 ~ 1560 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 城区土壤样品中 PAHs 含量为 247 ~ 1560 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 郊区土壤样品中 PAHs 含量为 61 ~ 339 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤中 4 环、5 环 PAHs 含量较高, 在土壤 PAHs 含量中占有绝对优势; 参照国外环境标准, 对区域表层土壤 PAHs 的污染现状进行了评价, 结果显示, 贵阳市表层土壤受到一定程度的 PAHs 污染。利用相关系数法和典型源三角图法对 PAHs 的可能来源进行了解析, 发现贵阳市的土壤主要受到燃煤排放以及混合污染源——燃煤与汽车尾气排放 PAHs 的联合污染。

关键词 贵阳; 土壤; 多环芳烃; 来源解析

中图分类号 X142 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2011)9-1982-06

Distribution characteristics and source analysis of PAHs in topsoil of Guiyang City, Southwest China. HU Jian^{1**}, ZHANG Guo-ping¹, LIU Di^{2,3}, ZHANG Yan-lin^{1,2}, GUAN Jin¹ (¹State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(9): 1982-1987.

Abstract: Topsoil samples were collected from the urban and suburban areas of Guiyang City to determine the concentrations of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) by high performance liquid chromatography, with the distribution characteristics, pollution levels, and origins of the PAHs discussed. The total PAHs concentration in the samples varied from 61 to 1560 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, being 247-1560 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for urban and 61-339 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ for suburban soils, respectively. In all the samples, PAHs were dominantly composed of 4- and 5-ring PAH species. Referred to some foreign environmental standards, the topsoil of Guiyang City was PAHs-contaminated to some extent. The analysis with correlation coefficient method and triangle drawing discriminance based on typical sources showed that the possible sources of PAHs in the topsoil of Guiyang were mainly the combustion of coals and the combined contamination of coal combustion and traffic exhaust.

Key words: Guiyang; soil; PAHs; source analysis.

多环芳烃 (PAHs) 是一种广泛分布于自然界中的持久性有机污染物, 许多 PAHs 具有致癌、致畸、致突变性, 并且具有生物累积性, 能长期留存在环境中, 对生态环境和人类健康产生潜在的长期威胁 (Malins & Hodgins, 1981)。环境中的 PAHs 主要来源于人为的排放, 如煤、石油、木材、有机高分子化合

物、烟草和其他碳氢化合物的不完全燃烧。

城市是人口相对比较密集的地方, 工业比较发达, 汽车数量与日俱增, 城市大气、水体、土壤和生物中 PAHs 含量成为人们关注的焦点。城市发展过程中产生的大量工业“三废”、交通废气和生活垃圾, 会直接进入土壤或通过降雨、降雪和降尘进入土壤, 土壤是一种重要的环境物质, 是环境中 PAHs 的储库和中转站, 进入土壤环境中的 PAHs 被生物吸收并通过食物链传递到人体中, 对人体造成危害, 由土壤进入人体的 PAHs 量要高于大气和水 (Menzie et

* 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-EW-102)、公益性行业科研专项项目 (2010009032)、国家自然科学基金项目 (40703021) 和中国科学院“西部之光”人才培养计划项目资助。

** 通讯作者 E-mail: hujian@vip.skleg.cn

收稿日期: 2011-06-24 接受日期: 2011-07-08

al. 1992) 城市土壤 PAHs 污染已经引起了人们的高度重视。天津市塘沽汉沽、市中心近郊和农村的土壤中 PAHs 的平均含量分别为 2430、1840 和 469 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 天津的土壤受到了较为严重的 PAHs 污染(段永红等, 2005)。苏州和嘉兴农田土壤中 15 种 PAHs 的总量范围分别为 45.4 ~ 3703 和 9 ~ 2421 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 2 个地区农田土壤 PAHs 的来源较为相似, 主要为生物质和煤的燃烧以及石油源(刘增俊等, 2010)。杭州市郊的土壤受到的 PAHs 污染处于中等水平, PAHs 主要来源于燃烧源(于国光等, 2009)。深圳市 16 种 PAHs 含量范围在 67.7 ~ 7137.0 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 664.7 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 19.4% 的土壤属重污染, PAHs 主要来源于长距离的大气迁移的燃烧源(张天彬等, 2008)。

贵阳市能源以燃煤为主, 近年来经济和社会的快速发展, 能源消耗的增加和车辆激增, 加上贵阳特殊的地形结构, 使得污染不容易扩散, 燃煤燃烧和车辆尾气排放的大量的 PAHs 进入各种环境介质中, 目前对贵阳市土壤中 PAHs 的研究鲜见报道。本研究对贵阳市区和郊区土壤中 PAHs 含量及其分布特征进行分析, 旨在弄清贵阳市土壤中 PAHs 的来源, 为其防治提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 样品采集

贵阳市地处中国西南部的山间盆地, 位于贵州省中部偏北, 地理位置为 106°27'E—107°03'E, 26°11'N—26°55'N, 全年主导风向北偏东, 年均风速 2.2 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。贵阳市辖 7 区(云岩区、南明区、小河区、金阳新区、白云区、乌当区、花溪区)、1 市(清镇市)、3 县(修文县、开阳县、息烽县), 目前城区人口约 150 万人, 机动车保有量为 35 万辆。

在贵阳市区及近郊采集了土壤样品, 按方位的代表性分别于市区的中部、东部、南部、西部、北部以及东北、西北、西南部采集样品, 并采集了近郊的部分样品(图 1), 样品采集点均选择受人为活动扰动较小的林地或是草地, 同时采样点所处位置均处于居民区人口以及交通流量属于中等水平的地点, 周围没有明显的厂矿污染, 能够代表贵阳市区的一般情况; 同时对工业少以旅游产业的郊区花溪磊庄、以工业为主的清镇以及有部分小型厂矿的郊区小关等进行了代表性采样, 其中城区 8 个、郊区 6 个, 共计 14 个样品, 采样点特征如表 1 所示。每个采样点

用取样铲取土壤表层 0 ~ 25 cm 的土壤 200 g, 样品在野外均匀混合, 铝膜包裹后放入封口塑料袋中带回实验室。采回后立即摊开, 闭光室温条件下自然风干, 然后研磨过 60 目筛。

1.2 主要试剂

正己烷、乙腈、二氯甲烷(均为色谱纯)、超纯水(Millipore)、无水硫酸钠(分析纯)、硅胶(100 ~ 200 目)和氧化铝(80 ~ 100 目)。无水硫酸钠、硅胶和氧化铝使用前均用甲醇和二氯甲烷分别索氏抽提 48 h。实验过程中使用的所有玻璃器皿在铬酸洗液中浸泡后用蒸馏水洗净, 在使用前于 450 °C 的马弗炉中灼烧 4 h, 铝箔包裹备用。16 种优控 PAHs 固体标准: 萘(Nap)、芘(Acy)、芘烯(Ace)、芴(Fle)、蒽(An)、菲(Ph)、荧蒽(Fla)、芘(Py)、苯并[a]蒽(B[a]A)、屈(Chr)、苯并[a]芘(B[a]P)、苯并[b]荧蒽(B[b]FL)、苯并[k]荧蒽(B[k]FL)、苯并[g, h, i]芘(B[g, h, i]p)、茚并[1, 2, 3-c, d]芘(Ind)、

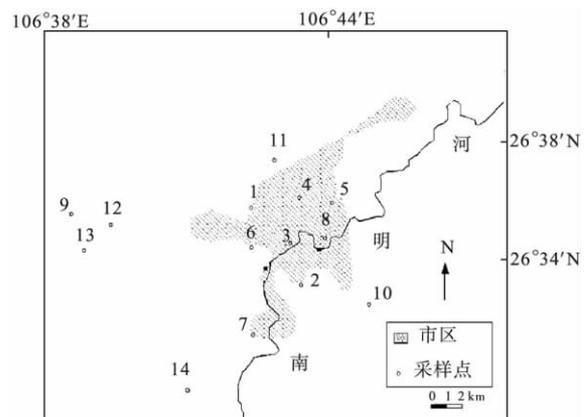


图 1 贵阳市采样点分布示意图

Fig. 1 Map showing the sample sites in Guiyang City

表 1 贵阳市土壤采样点特征

Table 1 Description of sampling sites

样点编号	采样点	位置	土地类型
1	黔灵公园	城区西北部	森林
2	南岳山	城区南部	草地
3	河滨公园	城区中部	草地
4	相宝山	城区北部	草地
5	东山公园	城区东部	森林
6	金顶山	城区西部	森林
7	湘雅村	城区西南部	森林
8	团坡桥	城区东北部	草地
9	大冲村	郊区	森林
10	龙洞堡	郊区	草地
11	小关	郊区	草地
12	大水村	郊区	草地
13	大关村	郊区	草地
14	花溪磊庄	郊区	草地

二苯并[a,h]蒽(DB[a,h]An)(纯度99.5%,购于美国New Haven标准品公司)。

PAHs单一标准溶液的制备:分别准确称量16种标准样品,加乙腈溶解并稀释至 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低温($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)避光保存。PAHs混合标准溶液的制备:将16种PAHs单一标准溶液混合,并用乙腈稀释至 $10, 25, 50, 75, 100, 250, 500, 750, 1000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,低温($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)避光保存。

1.3 主要仪器

HP1100型高效液相色谱仪,配有荧光检测器(FID)和紫外检测器(UV),KQ-250超声波清洗仪;Waters C18 PAH专用色谱柱($5\text{ m}, 4.6\text{ mm}\times 250\text{ mm}$)(德国制造)。

1.4 样品分析

准确称量 5.0000 g 研磨过60目筛后的土壤于100 ml烧杯中,加入 2 g 无水 Na_2SO_4 ,用20 ml的二氯甲烷浸泡,放入KQ-250超声波清洗仪超声萃取20 min,倾出萃取液,重复萃取2次,合并3次萃取液,滤液旋转蒸发至少量,再加入3 ml正己烷,再旋转蒸发至少量后过氧化铝/硅胶层析柱净化,用二氯甲烷/正己烷的混合剂淋洗出样品中的PAHs组分,旋转蒸发至少量,转化溶剂为乙腈,再在室温下用温和氩气吹至近干,用乙腈定容至1 ml,然后用HPLC 1100(使用专属的Waters PAH柱($4.6\times 250\text{ mm}, 5\text{ }\mu\text{m}$))进行测定,选择优化的梯度淋洗程序、可变波长时间程序,使用荧光检测器配合紫外检测器来对样品中的16种优控PAHs进行检测(Hu *et al.*, 2006)。以色谱峰的保留时间定性、外标法峰面积定量,以空白信号的3倍所对应的PAHs含量作为方法的检出限,测定本方法的检出限为 $0.023\sim 0.45\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、方法的加标回收率为78%~111%、平均回收率为96%、日内测定结果的相对标准偏差

$<1.2\text{ } (n=5)$ 、日间相对标准偏差 $<2.3\% (n=5)$ 、标准曲线相关系数均在0.99以上。

2 结果与分析

2.1 土壤中PAHs含量的分布特征

由表2可见,土壤中16种PAHs含量为 $61\sim 1560\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,城区样品与郊区样品中PAHs含量有着明显的差异,城区样品中PAHs含量范围为 $247\sim 1560\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,郊区样品中PAHs含量范围为 $61\sim 339\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。整体上,城区土壤中PAHs含量明显高于郊区土壤中PAHs含量,但是在郊区的个别土壤样品中PAHs含量比市区中一些土壤样品中PAHs含量要高,例如11号点和12号点。如图2所示,贵阳市土壤2环、3环PAHs含量较低,而4环、5环PAHs含量较高,在土壤PAHs中占有绝对的优势,土壤样品中的PAHs呈现出低环数PAHs含量较低,而高环数PAHs含量较高的分布特征。石油来源的PAHs以2~3环为主,而高温燃烧成因的PAHs以4~6环为主,它们是在化石燃料和木材的燃烧过程产生的4环以上PAHs所占比例高,说明在贵阳市表层土壤中的PAHs以高温燃烧来源为主,即该区表层土壤PAHs主要来源于石油和煤等化石燃料的高温燃烧(Edwards *et al.*, 1982)。

2.2 土壤中PAHs的污染评价

2.2.1 土壤中PAHs的风险评价 研究表明,土壤中典型的内源性PAHs范围在 $1\sim 10\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,主要来自植物的分解和自然火灾等(Edwards *et al.*, 1982),贵阳市区及近郊土壤中PAHs含量都明显高于自然值,荷兰政府规定无污染土壤的PAHs值为 $20\sim 50\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Trapido *et al.*, 1999),贵阳市土壤中的PAHs含量超过了荷兰政府规定的无污染土壤中PAHs含量1.22~78倍,即使在距市区较远的土壤

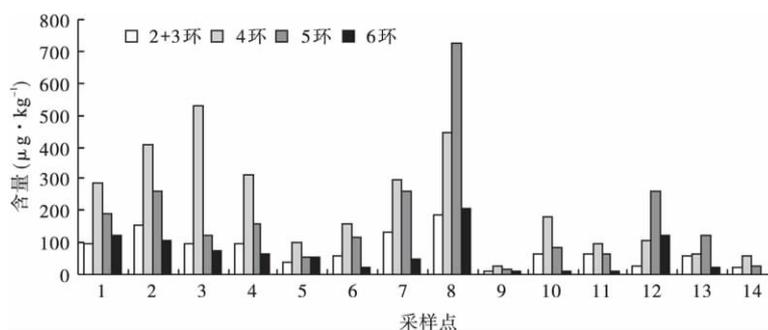


图2 土壤中2+3环、4环、5环、6环的PAHs的含量分布

Fig.2 Composition pattern of PAHs by ring size

表2 贵阳市土壤中16种PAHs的含量($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Concentrations of individual PAH compound in soils of Guiyang City

采样地点	Nap	Acy	Ace	FLe	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA	Chr	BbFL	BkFL	BaP	DBA	BPE	Ipy	16PAHs
1	13.7	11.2	6.9	2.8	58.5	2.8	158	16.0	16.3	95.0	126	42.2	5.8	77.4	16.5	41.9	692
2	4.5	24.6	7.6	1.6	56.3	ND	481	15.3	8.3	28.0	99.0	8.9	1.7	68.8	13.0	7.7	826
3	4.6	17.4	5.1	1.6	60.2	6.0	195	ND	36.2	81.6	92.6	4.4	8.1	40.1	51.6	21.7	626
4	ND	5.2	3.2	2.4	26.9	1.7	41.1	8.3	10.2	42.9	0.5	16.2	18.8	29.2	18.9	21.6	247
5	ND	5.3	6.0	ND	44.5	0.9	91.7	11.0	13.0	42.3	55.5	16.4	ND	21.0	42.9	0.1	351
6	ND	ND	11.8	ND	118	4.7	102	59.9	34.5	100	134	29.7	40.6	49.5	54.5	0.1	739
7	12.6	21.9	103	3.4	5.8	4.1	177	22.5	68.6	138	10.6	57.7	76.5	69.0	116	38.4	926
8	ND	ND	ND	ND	162	22.3	77.3	30.8	182	157	214	124	205	81.7	181	123	1560
9	9.8	5.2	3.2	13.3	31.3	0.7	55.8	6.5	3.0	28.2	35.8	0.9	13.5	12.1	14.3	ND	234
10	ND	1.4	ND	1.2	7.9	ND	8.5	8.5	3.1	5.5	9.9	2.6	3.1	7.9	0.9	ND	61.0
11	3.5	12.0	0.9	13.0	33.6	1.1	86.4	45.6	16.5	30.3	37.1	12.8	13.9	12.2	20.2	ND	339
12	6.1	4.7	5.6	6.1	2.1	ND	16.4	7.8	30.5	51.4	61.3	23.5	3.6	122	170	ND	511
13	ND	3.6	ND	8.5	43.9	0.6	43.9	6.3	8.7	4.2	52.6	1.7	17.7	3.0	49.5	20.2	264
14	2.2	3.4	1.4	7.7	19.4	1.2	32.4	4.6	8.5	11.8	22.6	6.4	17.9	8.0	2.2	ND	149.7
均值	4.1	8.3	11.1	4.4	47.9	3.3	111.9	17.4	31.4	58.3	68.0	24.8	30.4	43.0	53.7	19.6	537.6
最大值	13.7	24.6	103	13.3	162	22.3	481	59.9	182	157	214	124	205	122	181	123	1560
最小值	ND	ND	ND	ND	2.1	ND	8.5	ND	3.0	4.2	0.5	0.9	ND	3.0	0.9	ND	61

ND: 没有检出。

也有轻微污染。

西欧根据其土壤中 PAHs 含量范围、对人类暴露风险的评价(可能积累到食物链的 PAHs)以及土壤的平均吸收率将土壤中 PAHs 的污染程度划分为4个等级(Jones *et al.*, 1989; Maliszewska-Kordybach *et al.*, 1996),当土壤中 PAHs 含量在 $200 \sim 600 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,认为土壤受到了轻度污染,土壤中 PAHs 含量范围在 $600 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则认为土壤受到了中度污染,当土壤中的 PAHs 超过 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则认为土壤受到了重度污染,当土壤中的 PAHs 含量 $<200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,则认为土壤没有受到污染。

参照此标准,可以把贵阳市土壤中的 PAHs 的污染分为4个水平:1) 重度污染——土壤中 PAHs 含量超过 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。结果显示,8号采样点受到了重度污染,8号采样点位于贵阳市中心区团坡桥附近的一个居民区内,居民主要以燃煤进行供暖及日常烹饪,同时在采样点附近曾经有一个居民区供热水的燃煤锅炉,运行了30多年,采样点周边车流量不大,燃煤燃烧排放产生的 PAHs 对周围的土壤显然造成了较大的污染,使得周边土壤受到了重度污染。2) 中度污染——土壤中 PAHs 含量范围在 $600 \sim 1000 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,受到中度污染的土壤包括了4个城区土壤,包括1号、2号、6号和7号采样点,1号采样点位于市中心西北的黔灵公园内,2号、6号、7号采样点位于贵阳市南的军区南岳山山顶、市西的金顶山山顶、市西南的湘雅村后山山顶。3) 轻度污染——土壤中 PAHs 含量范围在 $200 \sim 600 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。包括3号、4号、5号、9号、11号、12号和

13号采样点,受到轻度污染的土壤中主要包括了4个郊区采样点(9号、11号、12号和13号),3个城区采样点(3号、4号、5号),3号采样点位于市中心公园河滨公园内,3号采样点地处交通要道,这个公园的游人很多,车辆也较多,虽然其属于轻度污染水平,但是其土壤中 PAHs 含量($587 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)已经接近中度污染的水平,4号采样点位于贵阳市市北相宝山山顶,周围居民、车辆都很少,5号采样点位于贵阳市东部的东山公园内,公园内游人很少,周围没有居民区,这2个采样点受到的人为影响较小,虽然都位于城区内,但土壤中 PAHs 含量都较低,分别为 220 和 $346 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,9号采样点位于贵阳市西郊清镇附近的一个小村子后山草地,清镇是贵阳一个主要的工业区;11号采样点位于贵阳市北郊一个小村子后山林地,采样点附近没有明显的 PAHs 的污染源,距采样点几公里外有一些小型铁厂等的工厂,这些小厂矿排放的烟尘中的 PAHs 通过短距离的迁移对周边的环境造成了一定的污染,12号采样点位于西郊清镇焦化厂,焦化厂排放的烟尘中的 PAHs 通过短距离的迁移对周边的环境造成了一定的污染,由于存在污染源,使得处于郊区的11号点和12号点土壤中 PAHs 含量比城区中部分采样点 PAHs 高,13号采样点位于贵阳市西郊红枫湖旁,来往游人较多。4) 无污染——土壤中 PAHs 含量 $<200 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,包括10号、14号采样点,无污染的土壤中主要包括了2个郊区采样点(10号、14号),10号采样点位于贵阳市东南郊龙洞堡的一个小村庄后山草地;14号采样点位于贵阳市西南郊磊庄附近的小村庄附近的后山草

地,周围都没有明显的 PAHs 污染源。

2.2.2 与其他城市及地区土壤中的 PAHs 含量的比较 将贵阳市土壤中 PAHs 含量同国内及国外其他地方城市土壤中 PAHs 含量进行比较,发现贵阳市土壤中的 PAHs 含量高于泰国曼谷、西欧、瑞士、马来西亚吉隆坡土壤中 PAHs 含量,但低于美国新奥尔良、爱沙尼亚、广州、北京、天津、杭州土壤中 PAHs 含量,贵阳市土壤中 PAHs 含量处于中等水平(表3)。

2.3 PAHs 的来源解析

PAHs 的来源解析,常使用比值法,如用 ant/(ant&phe)、Flt/(Flt&pyr)、BaA/BaA&Chr、Ipy/(Ipy+bpe)、ph/an、Fla/Py、BaP 和 Ind/BghiP 的比值来指示 PAHs 是来源燃料的高温燃烧产生还是油气的直接排放产生(Yunker et al., 2002; Wang et al., 2004),由于 PAHs 在环境中任何迁移转化都会影响这些值的准确性,因此它们在某些特定的区域是有效的,但并不具有广泛的适用性(Hwang et al., 2003)。本研究发现,这些比值不能明确地指示出 PAHs 的来源,试图从其他途径来对 PAHs 的来源进行解析。

2.3.1 由不同环的 PAHs 组成之间的相关系数进行判别 不同来源的 PAHs 显示出不同的组成特征,本研究统计了不同采样点的 2+3 环、4 环、5 环、6 环的 PAHs 含量之间的相关系数,结果如表 4,由此可以先将不同组成特征的采样点分类。根据相关系数,采样点可以分为 2 组,第 1 组:8 号、12 号、13 号采样点显著正相关,这 3 个采样点土壤中的 PAHs 的含量截然不同,分布属于不同的污染水平(8 号属于重度污染,而 12 号、13 号属于轻度污染),但是有

表 3 贵阳市与其他城市土壤中 PAHs 含量的比较

Table 3 Comparison of PAHs concentrations of soils in Guiyang and other cities

采样点	含量 ($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	参考文献
泰国,曼谷	12 ~ 380	Willeke et al., 1999
西欧	11 ~ 200	Atanassova et al., 2004
瑞士	50 ~ 619	Bucheli et al., 2004
马来西亚,吉隆坡	220±110	Omar et al., 2002
美国,新奥尔良	731 ~ 2927	Mielke et al., 2004
爱沙尼亚,派尔努	7665±4306	Trapido et al., 1999
中国,广州	42 ~ 3077	陈来国等, 2004
中国,北京	1347±950	Ma et al., 2004
中国,天津	1000 ~ 21015	Wang et al., 2004
中国,杭州	59.71 ~ 615.8	Chen et al., 2004
贵阳郊区	61 ~ 339	本研究
贵阳市区	247 ~ 1560	本研究

相似的组成特征,说明它们的来源相似。

第 2 组:另外 11 个采样点显著正相关,大部分的相关系数 $R^2 > 0.7$,这些采样点土壤中的 PAHs 含量也不相同,分别属于 4 个不同的污染水平,但是它们有相似的组成特征,表明它们的来源相似。而这 2 组之间的大部分相关系数 $R^2 < 0.3$,表明这 2 组土壤中的 PAHs 明显来源于不同的污染源。

2.3.2 典型源三角图判别法 在贵阳煤仍然作为最主要能源被广泛用于工业和民用等方面,特别是电力产业、冬季采暖等,贵阳市没有油气田、也没有大型的垃圾焚烧厂等,目前贵阳市最主要的 PAHs 来源是燃煤和汽车尾气。以焦化厂附近采集的大气颗粒物样品中的 PAHs 作为燃煤的典型源,高家岩隧洞中采集的大气颗粒物样品中的 PAHs 作为汽车尾气排放的典型源,建立以 PAHs 的 2+3 环、4 环、5+6 环组分相对于总的 PAHs 百分含量作为端元的三角图(图 3)。同时将典型源及样品根据各自 2+3 环、4 环、5+6 环组分的百分含量投射到三角图中,

表 4 不同采样点的 2+3 环、4 环、5 环、6 环组成的相关系数 (R^2) 矩阵

Table 4 Correlation coefficient (R^2) matrix between samples based on 2+3-ring, 4-ring, 5-ring and 6-ring PAH concentrations

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1													
2	0.94	1												
3	0.83	0.83	1											
4	0.93	0.98	0.93	1										
5	0.90	0.81	0.95	0.89	1									
6	0.85	0.96	0.68	0.90	0.64	1								
7	0.74	0.88	0.52	0.77	0.48	0.97	1							
8	0.34	0.34	0.05	0.22	0.09	0.48	0.59	1						
9	0.93	0.99	0.86	0.99	0.83	0.95	0.86	0.30	1					
10	0.82	0.95	0.87	0.96	0.76	0.90	0.80	0.19	0.96	1				
11	0.51	0.74	0.55	0.72	0.39	0.81	0.81	0.20	0.75	0.86	1			
12	0.11	0.05	0.01	0.01	0.01	0.10	0.16	0.78	0.04	0.01	0.01	1		
13	0.12	0.19	0.01	0.09	0.01	0.36	0.52	0.83	0.17	0.12	0.27	0.71	1	
14	0.88	0.96	0.90	0.97	0.83	0.96	0.92	0.46	0.97	1.00	0.95	0.03	0.40	1

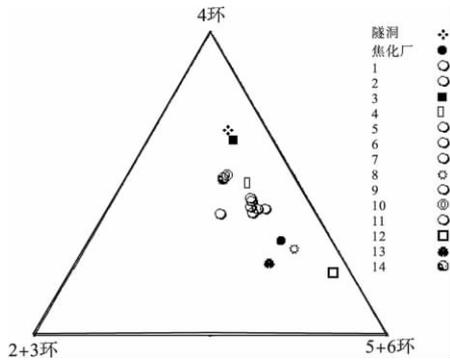


图3 贵阳市土壤中PAHs的来源三角图
Fig.3 Source of PAHs in topsoil of Guiyang City

根据它们在三角图中投点以确定样品来源。由3可以看出 β 、12、13采样点主要受到了燃煤燃烧排的影响;3号采样点主要是受到汽车尾气排放的影响,而其余的1、2、4、5、6、7、9、10、11、14采样点主要是受到燃煤与汽车尾气排放的联合污染,与本文前面初步判断的结论是一致的。

3 结论

从土壤中检出的16种PAHs含量范围为 $61 \sim 1560 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,城区样品与郊区样品中PAHs含量有着明显的差异。城区样品中PAHs含量范围为 $247 \sim 1560 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而郊区样品中PAHs含量范围为 $61 \sim 339 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2环、3环PAHs含量较低,4环、5环的PAHs含量较高,在土壤PAHs中占有绝对的优势。

参照国外的污染判别标准并与国内外其他一些城市土壤中PAHs含量相比,贵阳市土壤中PAHs的污染程度处于中等水平。

贵阳市土壤中的PAHs污染主要来源于燃煤排放以及燃煤与汽车尾气的PAHs混合排放。

参考文献

- 陈来国,冉勇,麦碧娴,等. 2004. 广州周边菜地中多环芳烃的污染现状. *环境化学*, **23**(3): 341-344.
- 段永红,陶澍,王学军,等. 2005. 天津表土中多环芳烃含量的空间分布特征与来源. *土壤学报*, **42**(6): 942-947.
- 刘增俊,滕应,黄标,等. 2010. 长江三角洲典型地区农田土壤多环芳烃分布特征与源解析. *土壤学报*, **47**(6): 1110-1117.
- 于国光,张志恒,叶雪珠,等. 2009. 杭州市郊区表层土壤中的多环芳烃. *生态环境学报*, **18**(3): 925-928.
- 张天彬,万洪富,周健民,等. 2008. 深圳表层土壤中多环芳烃的污染特征及来源. *生态环境*, **17**(3): 1032-1036.
- Atanassova I, Brummer GW. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons of anthropogenic and biopedogenic origin in a collu-

- viated hydromorphic soil of Western Europe. *Geoderma*, **120**: 27-34.
- Bucheli TD, Blum F, Desaulles A, et al. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons, black carbon, and molecular markers in soils of Switzerland. *Chemosphere*, **56**: 1061-1076.
- Chen BL, Xuan XD, Zhu L, et al. 2004. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface waters, sediment and soils of Hangzhou City, China. *Water Research*, **38**: 3358-3568.
- Edwards NT, Ross-Todd BM, Garver EG. 1982. Uptake and metabolism of ^{14}C anthracene by soybean (*Glycine max*). *Environmental and Experimental Botany*, **22**: 349-358.
- Hu J, Zhang G, Liu CQ. 2006. Pilot study of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils of Guiyang City, People's Republic of China. *Environmental Contamination and Toxicology*, **76**: 80-89.
- Hwang HM, Wade TL, Sericano JL. 2003. Concentrations and source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in pine needles from Korea, Mexico, and United States. *Atmospheric Environment*, **37**: 2259-2267.
- Jones KC, Stratford JA, Waterhouse KS. 1989. Organic contaminants in Welsh soils: Polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environmental Science & Technology*, **23**: 540-550.
- Malins DC, Hodgins HO. 1981. Petroleum and marine fishes: A review of uptake, disposition, and effects. *Environmental Science & Technology*, **15**: 1272-1280.
- Ma LL, Chu SG, Wang XT, et al. 2004. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soils from outskirts of Beijing, China. *Chemosphere*, **58**: 1355-1363.
- Maliszewska-Kordybach B. 1996. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: Preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination. *Applied Geochemistry*, **11**: 121-127.
- Menzie CA, Potocki BB, Santodonato J. 1992. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment. *Environmental Science & Technology*, **26**: 1278-1284.
- Mielke HW, Wang G, Gonzales CR, et al. 2004. PAH and metal in the soils of inner-city and suburban New Orleans, Louisiana, USA. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, **18**: 243-247.
- Omara NYMJ, Abasa MRB, Ketulya KA, et al. 2004. Concentrations of PAHs in atmospheric particles (PM-10) and roadside soil particles collected in Kuala Lumpur, Malaysia. *Atmospheric Environment*, **36**: 247-254.
- Trapido M. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in Estonian soil: Contamination and profile. *Environmental Pollution*, **105**: 67-74.
- Wang XJ, Chen J, Zhang ZH, et al. 2004. Distribution and source of PAHs in soil profiles of Tianjin area, People's Republic of China. *Environmental Contamination and Toxicology*, **73**: 739-748.
- Wileke W, Muller S, Kanchanakool N, et al. 1999. Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok. *Geoderma*, **91**: 297-309.
- Yunker MB, Macdonald RW, Vingarzan R, et al. 2002. PAHs in the Fraser river basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition. *Organic Geochemistry*, **33**: 489-515.

作者简介 胡健,女,1978年11月生,博士。主要研究方向环境中有机污染物迁移转化行为的研究。E-mail: hujian@vip.skleg.cn
责任编辑 魏中青