

泉州市表层土中多环芳烃的含量、来源及其生态风险评价

林纪旺^{1,2,3}, 倪进治^{1,2*}, 杨红玉^{1,2}, 魏然^{1,2}, 陈卫锋^{1,2,3}, 杨玉盛^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 湿润亚热带生态地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007; 3. 福建师范大学化学与材料学院, 福州 350007)

摘要:采集了泉州市不同功能区的33个表层土壤(0~10 cm)样品,利用超高效液相色谱系统(UPLC)-荧光检测器法,研究了土壤中15种优控多环芳烃的含量和分布特征,并利用比值法、因子分析和多元线性回归法对其来源进行了分析,以及采用苯并(a)芘的毒性当量浓度(TEQ_{BaP})评价了土壤中PAHs的生态风险.结果表明,土壤中15种PAHs总量范围为28.2~1432.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,以4~6环PAHs为主.不同功能区土样中PAHs含量高低顺序为工业区>居民区>风景区>农业区.土壤中PAHs主要来源于煤、生物质燃料(秸秆)、液体化石燃料(汽油、柴油)的燃烧.土样中15种PAHs的TEQ_{BaP}范围为1.6~131.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为38.9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.在34.6%的土样中,10种PAHs的总TEQ_{BaP}超过荷兰土壤目标参考值,表明泉州市部分表层土壤中PAHs有潜在的生态风险.

关键词:土壤;多环芳烃;分布;组成;源解析;生态风险评价

中图分类号:X53 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2011)07-2074-07

Concentrations, Sources and Ecological Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Topsoils of Quanzhou City, China

LIN Ji-wang^{1,2,3}, NI Jin-zhi^{1,2}, YANG Hong-yu^{1,2}, WEI Ran^{1,2}, CHEN Wei-feng^{1,2,3}, YANG Yu-sheng^{1,2}

(1. School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-Geographical Process of the Ministry of Education, Fuzhou 350007, China; 3. School of Chemistry and Materials Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: The concentrations of 15 US EPA priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in 33 soil samples (0-10 cm layer) collected from various functional zones in Quanzhou city were analyzed by UPLC coupled with fluorescence detector. The sources of PAHs in the topsoils were apportioned using isomer ratios, and factor analysis and multiple linear regression. The ecological risks of PAHs in the topsoils were evaluated by using benzo[a]pyrene toxic equivalents (TEQ_{BaP}). Results showed that the total concentrations of PAHs in the soils ranged from 28.2 to 1432.3 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, and 4 to 6 ring PAHs were the dominant compounds. The total concentrations of PAHs in soil samples from different functional zones decreased in the order of industrial areas > residential areas > scenic areas > agricultural fields. The PAHs in soils of Quanzhou city mainly originated from the combustion of coal, biomass fuels (straw), and liquid fossil fuels including gasoline and diesel. The TEQ_{BaP} of the 15 PAHs ranged from 1.6 to 131.6 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, with an average value of 38.9 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The total TEQ_{BaP} of 10 PAHs in 34.6% of the soil samples exceeded the Dutch target reference value, suggesting that there are potential ecological risks in the topsoils in some areas of Quanzhou city.

Key words: soils; polycyclic aromatic hydrocarbons; distribution; composition; source apportionment; ecological risk assessment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs),因其致癌、致畸以及能够诱导有机体突变的特性^[1],美国环境保护署(US EPA)已将16种多环芳烃列入优先控制有毒有机污染物黑名单中. PAHs土壤污染是世界各国所面临的重大环境与公共健康问题之一.近年来,国内外科研工作者们对土壤中PAHs的污染问题做了大量的研究工作,主要包括PAHs对土壤污染的过程与机制^[2],土壤中PAHs的源解析^[3,4],区域范围内土壤中PAHs的污染水平及其健康风险和生态风险^[5,6],以及PAHs污染土壤的控制和修复^[7,8].

泉州位于福建省东南部,地理位置介于北纬24°22'~25°56',东经117°34'~119°05'.泉州是福建省三大中心城市之一,经济总量连续11a名列全省第一.随着泉州经济的快速发展和城市化进程的加快,环境问题也日益显现.吴辰熙等^[9]研究发现泉州地区大气降尘已经受到一定程度的重金属污

收稿日期:2010-10-26;修订日期:2010-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(40971265);福建省自然科学基金项目(2007J0124)

作者简介:林纪旺(1985~),男,硕士研究生,主要研究方向为污染土壤的环境风险评估和修复, E-mail: ljw987654@163.com

* 通讯联系人, E-mail: nijz@fjnu.edu.cn

染. 于瑞莲等^[10] 研究发现泉州湾沉积物中重金属元素的综合潜在生态风险水平较高. 王伟等^[11] 对泉州湾沉积物中残留的 DDTs 进行分析, 结果表明其毒性风险已经大于 75%. 然而, 目前有关泉州土壤中 PAHs 的污染现状还鲜见报道.

本研究采集泉州市不同功能区表层土壤样品, 分析了土壤中 PAHs 含量, 同时结合比值法、因子分析和多元线性回归法探讨了 PAHs 的可能来源, 并对其生态风险进行了评估, 以期为区域环境保护和土壤污染治理提供基础数据和资料.

1 材料与方法

1.1 采样点布置与样品采集

2010-03-06 在泉州市采集了 33 个表层土样, 采样点布设在泉州市鲤城区、丰泽区和洛江区. 根据不同的土地利用类型选择了 4 种不同类型的功能区: 风景区、工业区、农业区、居民区, 按功能区设点采样, 其中居民区 10 个, 工业区 8 个, 风景区 9 个, 农业区 6 个. 采样点分布见图 1.

每个采样点设在 100 m × 100 m 的平面上, 按

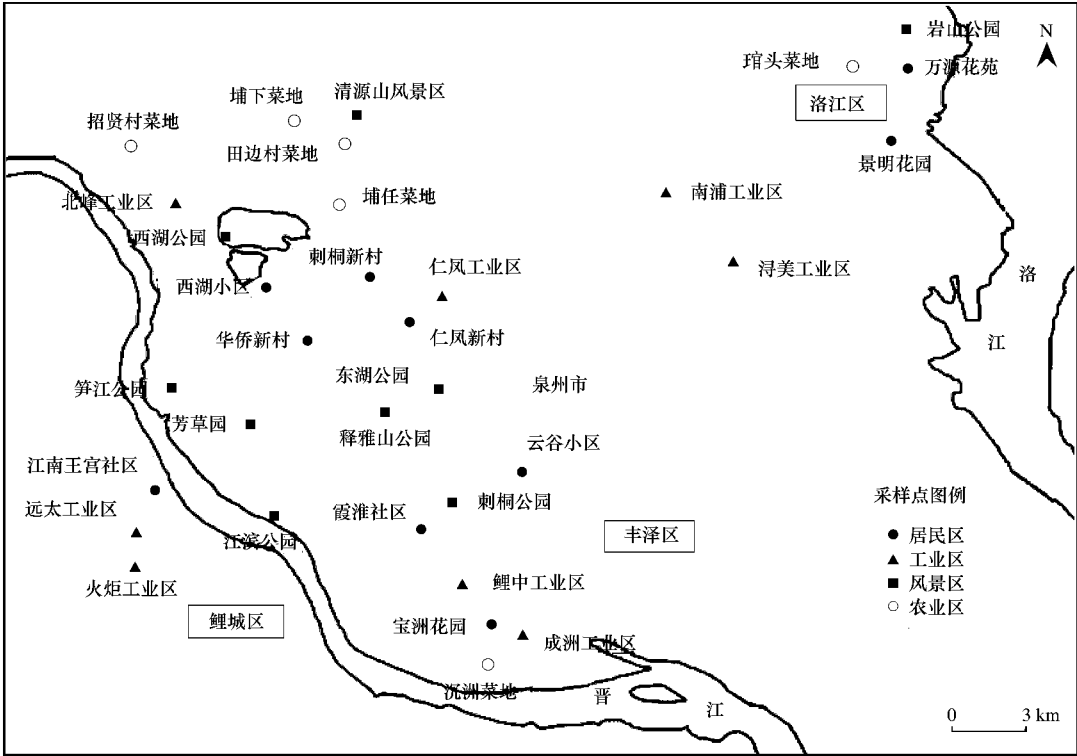


图 1 泉州市区不同功能区采样点分布示意

Fig.1 Schematic map of soil sampling sites from various functional zones in Quanzhou City

对角线法取 5 个点的 0 ~ 10 cm 表层土壤, 混合成一个样品. 采集的土壤样品经冷冻干燥, 剔除石子、树叶、植物根系等杂质后, 过 2 mm 筛, 4℃ 下保存.

1.2 样品前处理及分析方法

准确称取 5.0 g 冷冻干燥后的土壤样品, 加入等量的无水硫酸钠, 拌匀后转移到玻璃砂芯套管中; 将砂芯套管放入索氏抽提器中, 用二氯甲烷抽提 24 h; 提取液于旋转蒸发仪上蒸至 20 mL 左右, 移入 25 mL 容量瓶, 用二氯甲烷定容. 准确吸取 2 mL 提取液于 5 mL 试管中, 纯氮吹干; 用 1 mL 乙腈溶解后, 转移到超高效液相色谱的样品瓶中, 待测. PAHs 的测定采用 Waters 公司的超高效液相色谱系统

(ACQUITY UPLC), 配荧光检测器 (FLR Detector), 色谱柱为 ACQUITY UPLC® BEH Shield RP18 (1.7 μm, 2.1 mm × 150 mm). 柱温为 45℃, 流动相为乙腈和水, 进行梯度洗脱, 流速为 0.4 mL · min⁻¹, 所用的波长程序和流动相程序见表 1.

15 种优控 PAHs 包括萘 (Nap)、蒽 (Ace)、芴 (Flo)、菲 (Phe)、葱 (Ant)、荧葱 (Fla)、芘 (Pyr)、 B[a]A (BaA)、苯并 [a] 荧葱 (BbF)、苯并 [k] 荧葱 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、茚并 [1, 2, 3-cd] 芘 (IcdP)、二苯并 [a, h] 葱 (DahA)、苯并 [ghi] 花 (BgHiP), 文中 PAHs 的总量 ($\sum$ PAHs) 是指 15 种 PAHs 含量的总和.

表 1 波长程序和梯度洗脱程序

Table 1 Wavelength program and gradient elution program of the mobile phase

波长程序			流动相程序			
时间/min	激发波长/nm	发射波长/nm	时间/min	流速/mL·min ⁻¹	乙腈/%	水/%
0	275	325	0	0.4	50.0	50.0
5.5	295	315	6.8	0.4	50.0	50.0
8.8	250	400	8.3	0.4	33.0	67.0
9.4	235	460	10.8	0.4	33.0	67.0
11.0	270	390	14.0	0.4	23.0	77.0
13.0	295	410	18.5	0.4	50.0	50.0
16.1	295	495				

1.3 质量控制

通过添加 PAHs 标准品[PAHs Solution Mix,0.2 mg·mL⁻¹ in CH₂Cl₂:MeOH (体积比,1:1),Accustandard,USA]进行回收率的测定.称取 5.0 g 土壤(PAHs 总量 < 100 μg·kg⁻¹),加入 1 mL 400 μg·L⁻¹或 800 μg·L⁻¹ PAHs 混标,空白不加标,进行萃取和测定.15 种 PAHs 中除了挥发性较强萘的平均回收率较低为 36%,其它 PAHs 组分的平均回收率均在 85% 以上,且平行样品的相对标准偏差均 < 10%.数据处理采用 Origin 7.0 和 SPSS 15.0 软件.

2 结果与讨论

2.1 不同功能区 PAHs 含量

泉州市不同功能区表层土样中 PAHs 含量如图 2 所示.15 种 PAHs 在表土中均有检出,∑ PAHs 范围为 28.2 ~ 1 432.3 μg·kg⁻¹,平均含量为 408.8 μg·kg⁻¹,且 PAHs 主要以 4 ~ 6 环为主.不同功能

区土样中 PAHs 浓度存在较明显差异,平均的 ∑ PAHs 大小顺序为工业区 > 居民区 > 风景区 > 农业区.芦敏等^[12]对厦门土壤中 PAHs 的研究表明,不同功能区土壤中 PAHs 浓度为工业区 > 商业区 > 居民区 > 其它公共区域 > 风景区 > 农业区,这与本研究结果相似.程书波等^[13]研究表明,上海土壤中 PAHs 各组分含量也具有明显的功能区差异,工业区污染最严重,其它依次为交通要道 > 居住区 > 公园 > 大学.Maliszewska-Kordybach^[14]建议将土壤中 PAHs 污染程度分成 4 个水平:无污染 (∑ PAHs < 200 μg·kg⁻¹)、轻微污染 (200 < ∑ PAHs < 600 μg·kg⁻¹)、中等污染 (600 < ∑ PAHs < 1 000 μg·kg⁻¹) 和严重污染 (∑ PAHs > 1 000 μg·kg⁻¹).依据这一划分标准,泉州市工业区土样的 ∑ PAHs 含量范围为 653.5 ~ 1 432.3 μg·kg⁻¹,平均值为 1 041.6 μg·kg⁻¹,属于

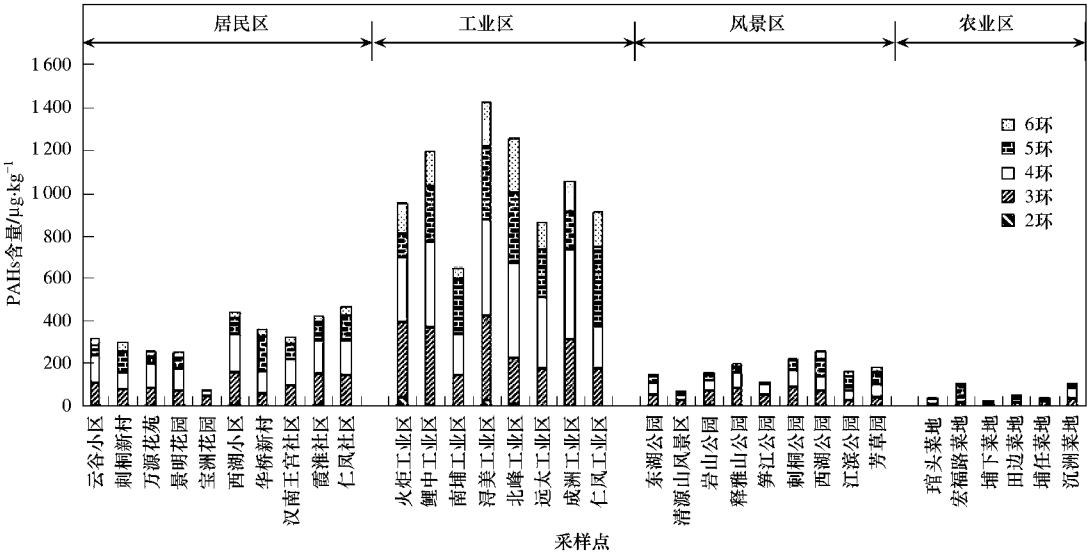


图 2 不同功能区表层土样中不同环数 PAHs 含量

Fig. 2 Composition of PAHs by ring size in topsoil samples from various functional zones

严重污染,处于工业高度发达国家城市土壤背景值 $1 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围之内^[15]. 居民区土样的 $\sum \text{PAHs}$ 含量范围为 $81.8 \sim 467.7 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $324.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 属于轻微污染. 风景区土样的 $\sum \text{PAHs}$ 介于 $74.7 \sim 260.0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 平均值为 $169.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 可以认为基本无污染. 农业区 $\sum \text{PAHs}$ 含量范围为 $28.2 \sim 108.8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 无污染, 在 US EPA 推荐保护健康的容许浓度范围之内^[16].

2.2 PAHs 分布特征及源解析

2.2.1 比值法

环境中的 PAHs 来源主要为燃烧源和石油源, 高环 PAHs 主要来源于煤等化石燃料的高温燃烧, 低环 PAHs 主要来源于有机物的低温转化和石油产品的泄露^[17]. 比值法通常被用来判断 PAHs 的来源, 可以分为 PAHs 环数比值(相对丰度)和 PAHs 组分浓度比值^[18].

从图 3 可以看出泉州市供试土样中 2~3 环 PAHs 所占比例平均为 29%, 4 环以上 PAHs 所占比例平均为 71%, 这说明泉州市表层土壤中的 PAHs 主要来源于煤和石油等化石燃料的高温燃烧.

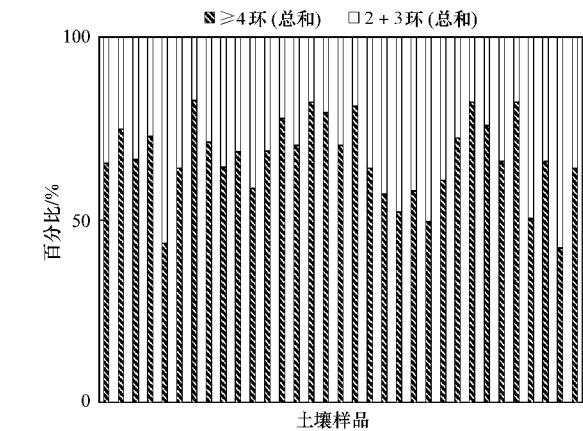


图3 不同环数多环芳烃在土样中的百分比
Fig.3 Percentage of PAHs with different rings in the soil samples

另外,PAHs 组分浓度比值法也是判断 PAHs 来源的常用方法. Yunker 等^[19]认为, $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 比值 < 0.40 , 表明 PAHs 主要来自石油源, > 0.50 表明 PAHs 主要是煤和生物质的燃烧源, 介于 $0.40 \sim 0.50$ 之间则是石油燃烧. $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$ 比值 < 0.20 为石油源, > 0.50 为煤和生物质燃烧源, 介于 $0.20 \sim 0.50$ 之间为石油燃烧源. 由图 4 可知, 所有采样点的 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 值都 > 0.5 ,

表明煤和生物质的燃烧是泉州市表层土中 PAHs 的主要来源. 根据 $\text{IcdP}/(\text{IcdP} + \text{BghiP})$, 除了 2 个土壤样点的比值 < 0.20 , 指示为石油源外, 其它采样点的比值都 > 0.20 , 表明泉州市区土壤中的 PAHs 主要来源于石油、煤和生物质燃烧. 其中, 有 9 个采样点比值介于 $0.20 \sim 0.50$, 为石油燃烧源. 综上所述, 泉州市表土中 PAHs 主要来源于煤、生物质和石油等化石燃料的高温燃烧.

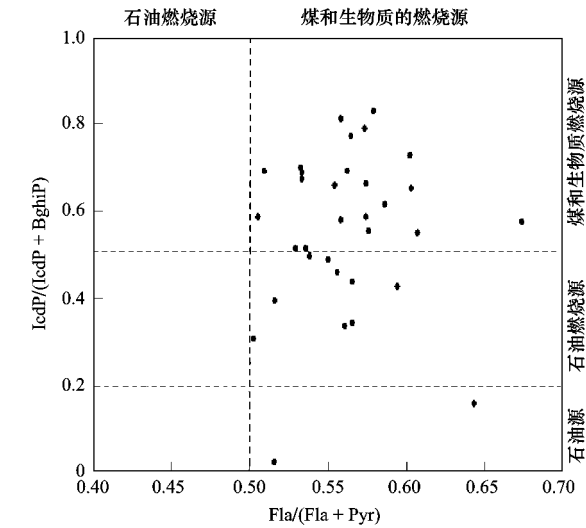


图4 土样中 PAHs 组分浓度比值
Fig.4 Concentration ratios of PAHs in soil samples

2.2.2 主成分分析

运用 SPSS 软件,对泉州市表土的 15 种 PAHs 数据进行因子分析, KMO 检验结果为 $0.730 > 0.5$, 采用主成分分析法结合方差极大正交旋转, 提取累计方差贡献率 $> 85\%$ 的因子, 结果见表 2. 根据 PAHs 组分在 2 个因子中的载荷将其分为 2 类, 载荷都在 0.79 以上的 Phe、Fla、Pyr、BaA、Chr、BkF、Bap、DahA 和 BghiP 这 9 种 PAHs 为第 1 类, 第 2 类为 Nap 和 Ace. 因子 1 中高载荷的 Phe、Fla、Pyr、BaA、Chr、BkF 是煤炭燃烧标记物质^[20], Fla 和 Pyr 是秸、秆燃烧排放的最主要的 PAHs^[21], Chr、BkF、Bap、DahA 和 BghiP 为交通排放源的主要指示物^[22]. 因此, 因子 1 指示了 PAHs 主要来源于煤、秸秆的燃烧以及交通汽油和柴油的燃烧混合源. 因子 2 中载荷较高的 Nap 和 Ace 主要来自石油泄露^[23]. 因此, 因子 2 代表石油泄漏源, 表征了石油生产、运输等过程的 PAHs 泄漏和排放.

利用 SPSS 进行多元线性回归进一步估算每种 PAHs 源的贡献率, 以标准化因子得分作为自变量, 标准化的 15 种 PAHs 总量为因变量, 设定进入方程

表2 主成分中各多环芳烃组分的贡献率

Table 2 Contribution rate of PAHs in main components					
PAHs	主因子1	主因子2	PAHs	主因子1	主因子2
Nap	0.57	0.72	BbF	0.29	0.14
Ace	0.18	0.66	BkF	0.95	0.13
Flo	0.29	-0.14	Bap	0.91	0.24
Phe	0.94	-0.16	DahA	0.79	0.27
Ant	0.24	0.20	BghiP	0.94	0.16
Fla	0.94	0.20	IcdP	0.72	0.35
Pyr	0.97	0.15	特征值	9.89	1.90
BaA	0.97	0.19	贡献率/%	72.4	12.8
Chr	0.87	0.27			

的变量的显著水平 $p = 0.05$, 进行多元逐步线性分析后获得的回归方程为:

$$Z_{PAHs} = 0.973f_1 + 0.200f_2 \tag{1}$$

式中, Z_{PAHs} 为标准化的 15 种 PAHs 总量; f_1 为因子 1 的标准化得分; f_2 为因子 2 的标准化得分. 得到该方程式 (1) 相关系数 $R^2 = 0.986$, 条件概率 $P_{f_1} < 0.01$, 条件概率 $P_{f_2} < 0.01$. 因子贡献率:

$$y = b_i / \sum b_i \tag{2}$$

式中 i 为因子个数; b_i 为因子标准化回归系数. 最后得到燃煤和交通排放混合源的贡献率为 83%, 石油泄漏源的贡献率为 17%. 因子分析进一步证实了泉州市表土中 PAHs 主要来源于煤、生物质燃料(秸秆)、液体化石燃料(汽油、柴油)的高温燃烧.

2.3 PAHs 生态风险评价

目前, 中国土壤质量标准 (GB 15618-1995) 还未对土壤中 PAHs 的含量作出限定. 对于土壤中单个 PAHs 含量来说, 通常采用荷兰农业土壤质量标准中 10 种 PAHs (Nap、Phe、Ant、Fla、BaA、Chr、BkF、BaP、IcdP 和 BghiP) 的目标值进行风险评价^[24]. 根据荷兰的土壤质量目标值(表 3)^[25], 可以

看出 Ant 在所有采样点的含量都未超标, Fla 的超标率最大 (84.8%), 其次是 IcdP (69.7%)、BaA (66.7%)、BghiP (60.6%) 和 Bap (30.3%), Nap 的超标率最低 (3.0%). 因此, 根据荷兰土壤标准, 泉州市表土已经受到一定程度的 PAHs 污染.

表3 泉州市表土中 PAHs 含量和荷兰土壤质量标准中 10 种 PAHs 的目标值以及 PAHs 的毒性当量因子

Table 3 Concentrations of PAHs in topsoil samples of Quanzhou City and Dutch target values of 10 PAHs and the toxic equivalent factor (TEF) for PAHs					
PAHs	PAHs 含量范围 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	PAHs 含量均值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	目标值 / $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	超标率 /%	TEF
Nap	0 ~ 37.2	1.7	15	3.0	0.001
Ace	0 ~ 1.8	0.4			0.001
Flo	0.3 ~ 14.9	2.2			0.001
Phe	4.9 ~ 211.1	48.5	50	36.4	0.001
Ant	1.1 ~ 28.2	10.0	50	0	0.01
Fla	7.2 ~ 205.7	55.7	15	84.8	0.001
Pyr	4.0 ~ 147.0	44.5			0.001
BaA	1.8 ~ 192.9	50.7	20	66.7	0.1
Chr	0.1 ~ 97.0	19.1	20	24.2	0.01
BbF	0.7 ~ 78.1	14.0			0.1
BkF	0.1 ~ 42.7	10.2	25	12.1	0.1
Bap	0.1 ~ 81.4	20.2	25	30.3	1
DahA	0.1 ~ 20.6	2.7			1
BghiP	0.7 ~ 250.8	53.2	20	60.6	0.01
IcdP	4.2 ~ 338.9	75.9	25	69.7	0.1

采用苯并(a)芘的毒性当量浓度 TEQ_{BaP} 评价 PAHs 的生态风险, $TEQ_{BaP} = \sum (\text{组分} i \text{ 的浓度}) \times (\text{组分} i \text{ 的毒性当量因子})$ ^[26]. 表 3 列举了 16 种 PAHs 的毒性当量因子 (toxic equivalent factor, TEF)^[27]. 将 PAHs 浓度及毒性因子代入上式, 计算得到泉州市各采样点的总 TEQ_{BaP} 水平 (图 5). 土

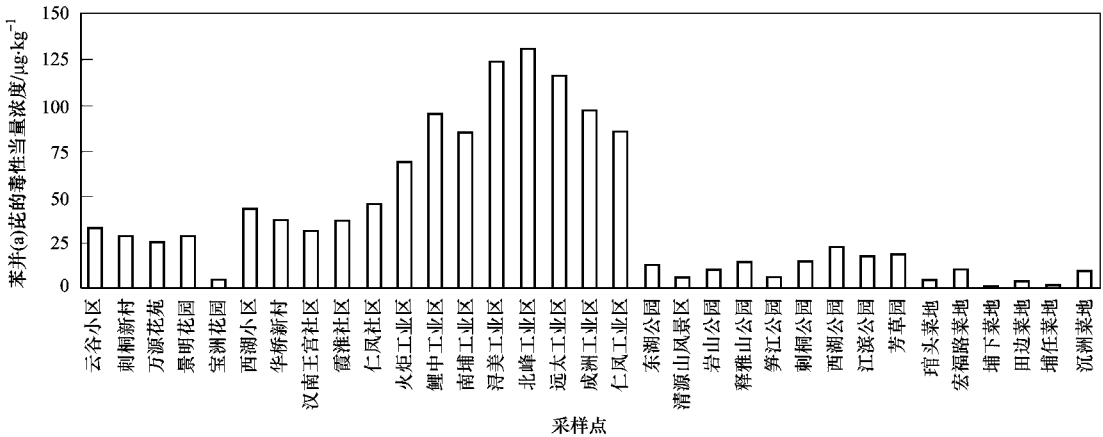


图5 泉州市各采样点的苯并(a)芘毒性当量浓度

Fig. 5 Toxic equivalent concentrations of BaP in the soil samples of Quanzhou City

样中 15 种 PAHs 的总 TEQ_{BaP} 值范围为 $1.6 \sim 131.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值为 $38.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其中, 36.4% 的土样超过荷兰土壤标准目标参考值 ($33.0 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 荷兰土壤标准 TEQ_{BaP} 参考值由 10 种 PAHs 的目标值与其相应的 TEF 计算而得)。工业区土壤的 TEQ_{BaP} 介于 $68.8 \sim 131.6 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是目标值的 2 ~ 4 倍。居民区 10 个土样中有 5 个 TEQ_{BaP} 高于目标值。因此, 泉州市部分表土中 PAHs 有潜在的生态风险。

3 结论

(1) 泉州市不同功能区表层土的 15 种优控 PAHs 含量范围为 $28.2 \sim 1\,432.3 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均含量为 $408.8 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同功能区 PAHs 含量存在较明显差异, 总含量趋势为工业区 > 居民区 > 风景区 > 农业区, 污染物以 4 ~ 6 环的 PAHs 为主。

(2) 比值法、主成分分析和多元线性回归方法分析结果一致表明, 泉州市土样中 PAHs 主要来源于煤、秸秆、汽油和柴油等化石燃料的高温燃烧。

(3) 泉州市土壤的苯并(a)芘的毒性当量浓度平均为 $38.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。36.4% 的土壤样品中 10 种 PAHs 的总 TEQ_{BaP} 超过了荷兰土壤标准 TEQ_{BaP} 参考值。 TEQ_{BaP} 生态风险评估结果显示, 泉州工业区和居民区部分表土中 PAHs 对居民的健康有潜在生态风险。

参考文献:

- [1] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution Sources[J]. Science of the Total Environment, 2006, **366**(1): 112-123.
- [2] Ahn S, Werner D, Luthy R G. Modeling PAH mass transfer in a slurry of contaminated soil or sediment amended with organic sorbents[J]. Water Research, 2008, **42**(12): 2931-2942.
- [3] 段永红, 陶澍, 王学军, 等. 天津表层土壤中多环芳烃的主要来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(3): 524-527.
- [4] 倪进治, 骆永明, 魏然, 等. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 V. 典型地区农业土壤中多环芳烃的污染状况及其源解析[J]. 土壤学报, 2008, **45**(2): 234-239.
- [5] Lu H, Zhu L, Chen S. Pollution level, phase distribution and health risk of polycyclic aromatic hydrocarbons in indoor air at public places of Hangzhou, China[J]. Environmental Pollution, 2008, **152**(3): 569-575.
- [6] Yu Y, Guo H, Liu Y, *et al.* Mixed uncertainty analysis of polycyclic aromatic hydrocarbon inhalation and risk assessment in ambient air of Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2008, **20**(4): 505-512.
- [7] Simmons R N, Meguffin V L. Modeling transport effects of perfluorinated and hydrocarbon surfactants in groundwater by using micellar liquid chromatography[J]. Analytica Chimica Acta, 2007, **603**(1): 93-100.
- [8] Nam J J, Thomas G O, Jaward F M, *et al.* PAHs in background soils from Western Europe: influence of atmospheric deposition and soil organic matter[J]. Chemosphere, 2008, **70**(9): 1596-1602.
- [9] 吴辰熙, 祁士华, 方敏, 等. 福建省泉州湾大气降尘中的重金属元素的沉降特征[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(6): 27-30.
- [10] 于瑞莲, 胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2008, **29**(3): 419-423.
- [11] 王伟, 祁士华, 苏秋克, 等. 泉州湾表层沉积物中残留 DDTs 污染现状及风险评价[J]. 安全与环境工程, 2006, **13**(1): 41-44.
- [12] 芦敏, 袁东星, 欧阳通, 等. 厦门岛表土中多环芳烃来源分析及健康风险评估[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2008, **47**(3): 451-456.
- [13] 程书波, 刘敏, 欧冬妮, 等. 城市不同功能区 PAHs 多介质累积规律研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 409-412.
- [14] Malisewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination[J]. Applied Geochemistry, 1996, **11**(1/2): 121-127.
- [15] U. S. Environmental Protection Agency. Interim sediment criteria values for nonpolar hydrophobic organic contaminants[S]. Washington, D. C.: Office of Water Regulation and Standard, Criteria and Standards Division, 2000.
- [16] Kipoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area[J]. Environmental Pollution, 1996, **106**(3): 369-380.
- [17] Readman J W, Fillmann G, Tolosa I, *et al.* Petroleum and PAH contamination of the Black Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, **44**(1): 48-62.
- [18] Honda K, Mizukami M, Ueda Y, *et al.* Residue level of polycyclic aromatic hydrocarbons in Japanese paddy soils from 1959 to 2002[J]. Chemosphere, 2007, **68**(9): 1763-1771.
- [19] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River Basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition[J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.
- [20] Harrison R M, Smith D J T, Luhana L. Source apportionment of atmospheric. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons collected from an urban location in Birmingham, U.K.[J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(3): 825-832.
- [21] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning[J]. Environmental Science and Technology, 1996, **30**(8): 2462-2469.
- [22] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic

- aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [23] Soclo H H, Garrigues P H, Ewald M, *et al.* 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**(5): 387-396.
- [24] Shen C F, Chen Y X, Huang S B, *et al.* Dioxin-like compounds in agricultural soils near e-waste recycling site from Taizhou area, China: Chemical and bioanalytical characterization [J]. Environment International, 2009, **35**(1): 50-55.
- [25] VROM. Environmental quality objectives in the Netherlands A Review of Environmental Quality Objectives and Their Policy Framework in the Netherlands [M]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 1994.
- [26] Agarwal T, Khillare P S, Shridhar V, *et al.* Pattern, sources and toxic potential of PAHs in the agricultural soils of Delhi, India [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **163**(2-3): 1033-1039.
- [27] Crnkovic D, Ristic M, Jovanovic A, *et al.* Level of PAHs in the soils of Belgrade and its environs [J]. Environmental Monitoring Assessment, 2007, **125**(113): 75-83.