

苏北灌河口工业区土壤 PAHs 富集特征、溯源及风险评价

陈洪全¹, 于英鹏^{1*}, 陈 名²

(1.盐城师范学院 城市与规划学院, 江苏 盐城 224051; 2.南京师范大学 金陵女子学院, 江苏 南京 210097)

摘要: 为系统了解灌河口工业区污染场地表层土壤中多环芳烃(PAHs)的污染特征、污染源及潜在的健康风险, 对 16 种优先控制的单体 PAH 进行了测试分析. 结果表明: T-PAHs 质量分数呈现冬季($3\,971.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>秋季($3\,506.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>春季($3\,504.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>夏季($2\,639.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)趋势. 夏季(2+3)环 PAHs 占比最低(13%), 冬季最高(15%), 春秋两季相同(14%). 不同季节单体 PAH 质量分数以中高环(4、5 和 6 环)为最高, 低环(2 和 3 环)最低. 判源结果表明春夏季煤和生物质、石油类燃烧排放来源特征明显, 冬季石油类燃烧和汽车尾气排放来源占主体, 说明主要污染源存在季节差异. 与国内相关研究相比, 灌河口工业区土壤 PAHs 质量分数处于中游水平. 根据加拿大土壤环境质量标准, 河口工业区不同季节有 13%~23% 的土壤 PAHs 污染超过了安全值, 存在潜在的生态风险.

关键词: 灌河口; 土壤; 多环芳烃; 风险评价

中图分类号: X508

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2020) 01-0019-06

多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)是一类具有“致癌、致畸、致突变”效应的持久性有毒化合物, 主要来源于自然过程和人类活动, 人类排放的 PAHs 进入大气环境中后通过干湿沉降过程进入土壤并不断累积. 目前, 多介质中 PAHs 生物地球化学研究已成为多学科聚焦的热点课题^[1]. 研究认为土壤介质是 PAHs 在地表生态系统中最主要的“汇”^[2], 英国土壤中储存的 PAHs 占到了环境中总量的 90%^[3]. 土壤介质中富集的 PAHs 污染物对生态及人体健康构成潜在的风险, 居住或工作在污染场地的人通过吸入扬尘、皮肤接触和直接摄入被污染的土壤等方式受到 PAHs 污染物对身体的影响. 关于土壤中 PAHs 污染已开展大量研究, 在 PAHs 污染水平和分布模式^[4]、污染物来源^[5]及健康风险评估^[6]等方面取得了大量成果.

苏北滩涂被视为江苏最大的一块后备土地资源, 对江苏沿海经济的发展具有巨大的促进作用, 其特有的演化过程和地理位置在全国海岸带研究中占据重要地位. 2009 年江苏沿海大开发上升为国家战略, 使得江苏沿海特别是苏北地区进入前所

未有的发展阶段. 人类活动产生的 PAHs 通过大气干湿沉降与地表径流等途径进入河口地区并不断累积, 对河口系统和人体健康构成潜在威胁. 关于苏北灌河口环境污染的事件时有报道, 工业区排放的持久性有机污染物进入土壤、水体及大气等环境介质中, 加重了河口地区土壤中 PAHs 的迁移与储存通量. 鉴于此, 开展灌河口污染场地表层土壤中 PAHs 地球化学研究具有重要的理论意义, 有助于揭示 PAHs 污染与人类活动的耦合机制, 在国家战略江苏沿海大开发推进过程中为控制 PAHs 污染、保护生态系统和人身安全提供重要的科学依据和数据支撑, 具有重要的现实意义.

1 材料和方法

1.1 样品采集

采样点区位及分布概况如图 1 所示, 于 2017 年和 2018 年在河口工业区采集 4 个季节土壤样品. 采用多点(5 个点)混合法进行样品采集, 同时记录采样点周边环境及地理坐标. 采集过程中将草根、杂物及较大石块剔除掉, 用透明自封袋装好样品

收稿日期: 2019-09-10.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(41901244); 江苏省自然科学基金(BK20160446); 江苏省环境监测科研基金(1713); 江苏省社会科学基金(17DDB015); 江苏省高校哲学社会科学基金(2019SJA0228).

第一作者: 陈洪全(1963-), 男, 江苏盐城人, 博士/教授, 主要研究方向: 资源开发与生态保护. E-mail: yctechq@163.com

*通信作者: 于英鹏(1985-), 男, 辽宁营口人, 博士/讲师, 主要研究方向: 多介质有机污染物. E-mail: pyy.lzu@163.com

并做好标记,样品采集过程中确保不受污染.将采集好的样品带回实验室进行前处理后待分析.

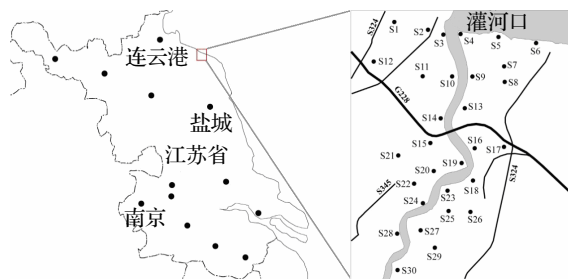


图1 灌河口采样点分布概况

1.2 样品处理

称取经过前处理的土壤样品 5 g, 加入适量铜粉和无水硫酸钠于已净化的滤纸槽内, 同时打入内标标准物质(NaP-d₈、Ace-d₁₀、Phe-d₁₀、Chry-d₁₂和Per-d₁₂, 德国 Dr. Ehrenstorfer 公司), 萃取液为实验室配置的 120 mL 丙酮和二氯甲烷混合溶剂(体积比 1:1), 在索氏抽提器中以平均 4 次·h⁻¹ 的速率连续回流 20 h, 完成土壤中 PAHs 萃取. 萃取液经

旋转蒸发后进行正己烷溶剂置换, 后经硅胶氧化铝复合层析柱(硅胶和氧化铝的体积比为 2:1)对萃取液进行净化洗脱, 分别用 15 mL 正己烷、70 mL 二氯甲烷和正己烷的混合溶剂(体积比为 3:7)淋洗出烷烃和待测组分. 将待测组分经氮吹定容至 1 mL 进行色谱分析, 具体分析方法参见文献[1].

1.3 质量保证和质量控制

16 种单体 PAH 的加标空白实验回收率在 79.6%~105.7%之间; 5 种氘代标准物质的回率分别为 NaP-d₈ 在 81.1%~94.9%之间, Ace-d₁₀ 在 79.7%~95.6%之间, Phe-d₁₀ 在 74.7%~94.9%之间, Chry-d₁₂ 在 77.6%~106.1%之间, Per-d₁₂ 在 80.2%~101.7%之间; 平行样的相对标准偏差低于 10%; 方法检测限为 0.06~0.11 ng·g⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 含量特征

不同季节单体 PAH 质量分数特征见表 1. 从季

表1 不同季节单体 PAH(干重)质量分数特征

ng·g⁻¹

PAHs	春季			夏季			秋季			冬季		
	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
Na	1.7	79.0	17.2	0.2	144.3	32.4	6.7	251.0	53.1	0.1	1 368.0	119.6
Acy	5.2	519.3	43.7	2.0	202.6	33.4	6.2	186.7	46.4	0.1	187.4	51.3
Ace	1.3	86.8	21.5	0.0	68.2	12.1	4.0	73.6	16.0	4.3	93.7	22.4
Fluo	6.9	129.9	36.8	0.7	175.8	35.6	5.2	267.1	48.4	9.9	164.6	44.6
Phe	56.2	915.6	295.7	11.1	1 073.0	198.6	15.6	1 242.3	282.6	48.2	1 620.3	304.6
An	13.1	250.1	68.8	5.8	178.5	38.0	1.4	357.0	61.2	7.7	413.3	71.9
Fl	176.7	2 659.6	681.6	23.5	4 527.7	572.4	94.5	4 158.3	730.2	58.0	3 732.0	781.8
Pyr	189.2	2 173.4	585.5	19.5	2 337.8	419.5	62.3	2 304.6	526.2	40.2	3 450.4	658.0
B[a]A	76.8	1 457.6	290.4	26.8	1 480.0	228.5	42.2	1 767.5	295.1	23.1	3 408.0	348.2
Chry	102.0	1 214.7	308.2	7.6	1 341.7	227.7	67.5	1 763.6	303.7	39.6	2 819.1	368.7
B[b+k]F	108.0	986.0	301.5	34.4	1 602.4	258.8	59.7	2 164.9	333.8	36.4	3 523.9	377.9
B[a]P	89.4	1 737.6	336.6	29.5	1 574.4	251.6	33.3	2 452.5	315.1	28.8	4 667.0	391.7
InP	83.0	556.8	199.3	18.3	616.5	129.8	24.7	1 372.6	184.7	19.0	831.8	156.3
D[ah]A	21.9	287.4	74.4	9.8	277.7	59.4	11.9	1 098.6	102.8	8.5	417.7	68.0
B[ghi]P	93.2	770.2	243.6	13.2	694.6	141.3	29.4	1 404.4	207.2	25.3	1 152.0	206.7
T-PAHs	1 212.8	12 264.5	3 504.8	202.5	16 295.2	2 639.1	464.6	20 864.5	3 506.5	349.5	27 849.2	3 971.7
Σ(2+3)环	102.9	1 359.8	483.8	19.8	1 842.5	350.1	39.1	2 377.6	507.6	70.2	3 847.3	614.4
Σ4 环	621.7	7 237.2	1 865.6	77.4	9 687.2	1 448.1	266.5	9 993.9	1 855.3	161.1	13 409.4	2 156.6
Σ(5+6)环	447.5	3 831.7	1 155.4	105.3	4 765.5	840.9	159.0	8 492.9	1 143.5	118.0	10 592.4	1 200.6
Σ7car PAHs	546.1	5 742.3	1 510.4	126.5	6 892.7	1 155.8	239.3	10 619.6	1 535.2	155.5	15 667.6	1 710.7

节看,春季质量分数范围在 $1\,212.8\sim 12\,264.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $3\,504.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。夏季范围在 $202.5\sim 16\,295.2\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $2\,639.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。秋季范围在 $464.6\sim 20\,864.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $3\,506.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。冬季范围在 $349.5\sim 27\,849.2\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间,平均值为 $3\,971.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。对比不同季节,灌河口表层土壤中 T-PAHs 质量分数呈现出冬季>秋季>春季>夏季的趋势。7 种致癌多环芳烃($\Sigma 7\text{carPAH}$)的质量分数占比不同季节变化较小,可能由于高环 PAHs 性质及污染物来源稳定。我国表层土壤中多环芳烃的平均值为 $730\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ [7],远低于灌河口污染场地土壤的质量分数值,原因是研究区主要受工业区 PAHs 污染物排放的影响,采样点距离污染源较近,分析结果客观反映了实际情况。根据相关研究及与中国其他工业区的 T-PAHs 质量分数相比,灌河口土壤 T-PAHs 质量分数高于沈阳($326.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [8]、邯郸($398.9\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [9]、南京($1\,060\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [10] 和大庆($1\,839\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [11],与济南($2\,700\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [12] 相差不多,但低于大连($6\,440\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [13] 和鞍山($32\,100\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) [14]。

2.2 不同环数 PAHs 组成特征

总体上,4 个季节除个别采样点散点分散外,其余不同环数 PAHs 占比散点相对集中,说明 PAHs 的组成相对稳定(图 2)。具体来看,4 环 PAHs 在不同季节均占比最高($50.76\%\sim 52.40\%$ 之间,平均为 51.45%),季节波动不大,秋季相对最高,而夏季最低;其次为 5+6 环 PAHs ($28.68\%\sim 34.66\%$ 之

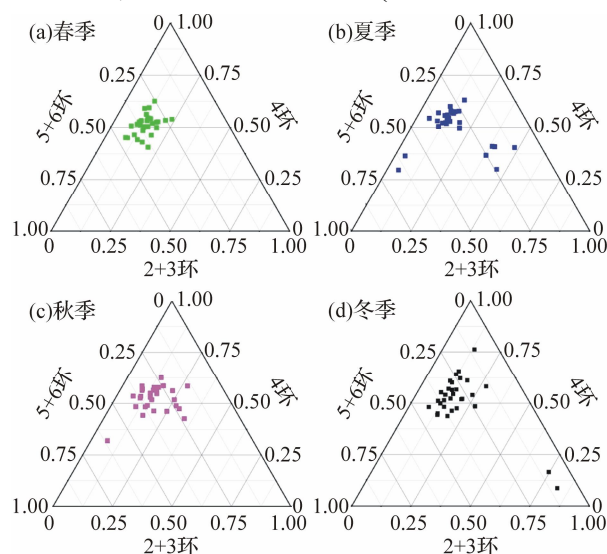


图2 灌河口土壤中不同季节 PAHs 组成特征

间,平均为 31.58%),冬季和春季较夏秋季节差异较大,其中冬季最低,而春季最高;最低为 2+3 环 PAHs ($14.19\%\sim 19.85\%$ 之间,平均为 16.97%),具体季节差异同高环一致。低环 PAHs 主要以气相存在于大气中,具有长程迁移能力。然而,高环 PAHs 主要吸附于大气悬浮颗粒的表面,具有较弱的远程迁移能力 [15-16]。因此,点源污染物排放可能是土壤中高环多环芳烃的主要来源。

2.3 PAHs 污染物来源解析

An/(An+Phe)、Fl/(Fl+Pyr) 和 InP/(InP+BghiP) 常被用作各环境介质中 PAHs 的源解析指标 [17-18]。An/(An+Phe) 小于 0.1 代表石油类泄漏;大于 0.1 代表物质的不完全燃烧。Fl/(Fl+Pyr) 小于 0.4 代表石油类泄漏;大于 0.4 小于 0.5 代表石油类燃烧;大于 0.5 代表生物质和煤的不完全燃烧。InP/(InP+BghiP) 小于 0.2 代表石油类泄漏;大于 0.2 小于 0.5 代表石油类燃烧;大于 0.5 代表煤和生物质的不完全燃烧。

4 个季节 Fl/(Fl+Pyr) 和 An/(An+Phe) 比值散点大部分落于红色圈内,个别点较分散,这说明不同季节灌河口地区土壤中 PAHs 的来源相对稳定(图 3)。具体来说,大部分 An/(An+Phe) 散点值都大于 0.1 (春季: $0.07\sim 0.43$; 夏季: $0.04\sim 0.33$; 秋季: $0.11\sim 0.49$; 冬季: $0.04\sim 0.36$),说明 PAHs 的来源基本为不完全燃烧的排放物;Fl/(Fl+Pyr) (春季: $0.48\sim 0.65$; 夏季: $0.48\sim 0.64$; 秋季: $0.38\sim 0.66$; 冬季: $0.36\sim 0.64$) 比值散点基本落在大于 0.4 的范围内,说明 PAHs 的来源是石油、煤和生物质的燃烧排放,其中煤和生物质的不完全燃烧是主要的排放源。综上,河口工业区土壤中 PAHs 主要来源于煤和生物质的燃烧,其次为石油燃烧。

同样 4 个季节 Fl/(Fl+Pyr) 和 InP/(InP+BghiP) 比值散点大部分落于红色圈内,个别点较分散,也说明不同季节灌河口地区土壤中 PAHs 的来源相对稳定。具体来说,大部分 InP/(InP+BghiP) 散点值都介于 0.2 和 0.5 之间(春季: $0.33\sim 0.52$; 夏季: $0.39\sim 0.66$; 秋季: $0.37\sim 0.53$; 冬季: $0.35\sim 0.55$),说明 PAHs 的来源基本为石油、煤和生物质不完全燃烧的排放物。

2.4 PAHs 生态风险评价

采用 BaP 的毒性当量质量分数 TEQ_{BaP} 评价 PAHs 的潜在风险,公式如下:

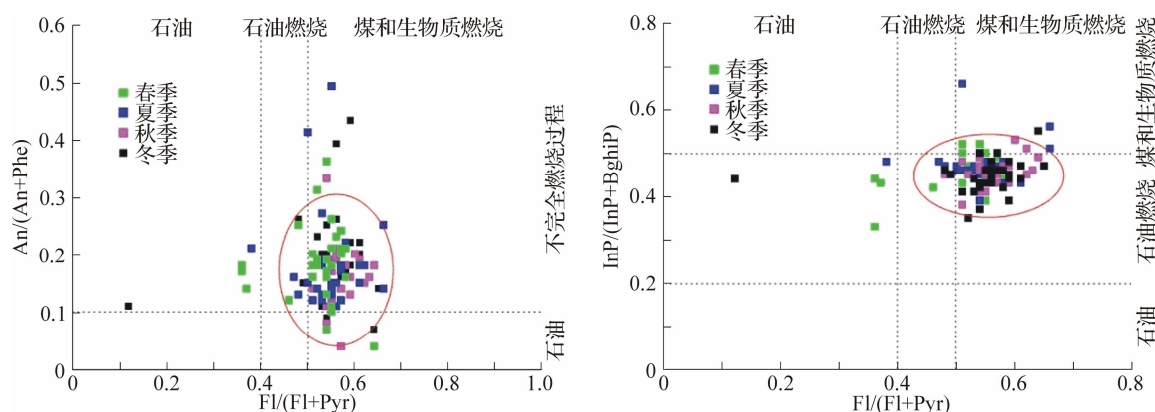


图3 FI/(FI+Pyr)、An/(An+Phe)和 InP/(InP+BghiP)特征比值判源

$$TEQ_{BaP} = \sum (C_i \times TEF_i), \quad (1)$$

式中: C_i 为第 i 种 PAHs 的质量分数; TEF_i 为第 i 种 PAHs 的毒性当量因子(表 2)。

春季 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 的质量分数最高为 $2\,353.92 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最低为 $140.58 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $497.99 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 7 种致癌 PAHs ($\sum 7\text{Car}TEQ_{BaP}$) 的质量分数范围为 $139.07 \sim 2\,337.15 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $493.17 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 的比例高达 99.0%. 夏季 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 质量分数最高为 $2\,252.54 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最低为 $48.35 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,

平均为 $378.01 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 7 种致癌 PAHs 的质量分数范围为 $48.07 \sim 2\,335.39 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $374.92 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 的比例高达 99.2%. 秋季 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 的质量分数最高为 $4\,125.32 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最低为 $89.97 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $506.65 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 7 种致癌 PAHs 质量分数范围为 $89.34 \sim 4\,099.23 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $502.26 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 占 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 的比例高达 99.1%. 冬季 $\sum 16TEQ_{BaP}$ 质量分数最高为 $5\,915.55 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 最低为 $46.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均为 $556.77 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 7 种致癌 PAHs

表2 土壤中 PAHs 的毒性当量质量分数

PAHs	TEF	荷兰标准	加拿大标准	TEQBaP (春季)		TEQBaP (夏季)		TEQBaP (秋季)		TEQBaP (冬季)	
				范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
Na	0.001	15	100	0~0.08	0.02	0~0.14	0.03	0.01~0.25	0.05	0~1.37	0.12
Acy	0.001	—	—	0~0.52	0.04	0~0.08	0.03	0.01~0.19	0.05	0~0.14	0.05
Ace	0.001	—	—	0~0.09	0.02	0~0.07	0.01	0~0.07	0.02	0.01~0.09	0.02
Fluo	0.001	—	—	0.01~0.13	0.04	0~0.18	0.04	0.01~0.27	0.05	0.01~0.16	0.04
Phe	0.001	50	100	0.06~0.92	0.30	0.01~1.07	0.20	0.02~1.24	0.28	0.06~1.62	0.30
An	0.01	50	—	0.16~2.50	0.69	0.10~1.79	0.38	0.10~3.57	0.61	0.22~4.13	0.72
Fl	0.001	15	—	0.17~2.66	0.68	0.02~4.53	0.57	0.09~4.16	0.73	0.09~3.73	0.78
Pyr	0.001	—	100	0.19~2.17	0.59	0.02~2.34	0.42	0.10~2.30	0.53	0.04~3.45	0.66
B[a]A	0.1	20	100	7.68~145.76	29.04	2.68~148.00	22.85	4.22~176.75	29.51	2.31~340.80	34.87
Chry	0.01	20	—	1.02~12.15	3.08	0.08~13.42	2.28	0.68~17.64	3.04	0.46~28.19	3.68
B[b+k]F	0.1	—	100	10.80~98.60	30.15	3.44~160.24	25.88	7.81~216.49	33.38	3.64~352.39	37.88
B[a]P	1	25	100	89.41~1 737.58	336.55	29.51~1 574.40	251.56	57.89~2 452.48	315.08	28.84~4 667.04	391.62
InP	0.1	25	—	8.30~55.68	19.93	2.52~61.65	12.98	2.47~137.26	18.47	1.90~83.18	15.74
D[ah]A	1	—	100	21.86~287.38	74.42	9.84~277.68	59.37	16.27~1 098.61	102.78	8.48~417.74	68.21
B[ghi]P	0.1	20	100	0.93~7.70	2.44	0.13~6.95	1.41	0.29~14.04	2.07	0.25~11.52	2.08
$\sum 7\text{CarPAHs}$				139.07~2 337.15	493.17	48.07~2 235.39	374.92	89.34~4 099.23	502.26	45.63~5 889.34	552.00
$\sum 16TEQ_{BaP}$				140.58~2 353.92	497.99	48.33~2 052.54	378.01	89.97~4 125.32	506.65	46.06~5 915.55	556.77

的质量分数范围为 $45.63\sim 5\,889.34\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均值为 $552\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 占 $\Sigma 16\text{TEQ}_{\text{BaP}}$ 的比例高达 99.1%。

总体上平均质量分数最高的是冬季, 其次为秋季、春季, 最低为夏季。 $\Sigma 7\text{CarTEQ}_{\text{BaP}}$ 不同季节的占比都极高(90%以上), 表明灌河口土壤 PAHs 毒性风险主要来自 7 种强致癌性 PAHs, 特别是 BaP 和 D[ah]A。在加拿大土壤环境质量标准中 TEQ_{BaP} 的安全值为 $600\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。有研究者认为排污较大的工业区周围土壤的 TEQ_{BaP} 应乘以 3 倍系数进行评估^[19], 计算后春季 20%、夏季 13%、秋季 23% 和冬季 20% 的采样点超过了安全值。从个别样点来看, 不同季节 S19 样点的 TEQ_{BaP} 值均为所有样点最高, 主要原因是该样点位于钢铁厂附近, 大量煤炭燃烧造成该样点 TEQ_{BaP} 值最高; S17 样点 4 个季节 TEQ_{BaP} 值均较高, 说明该样点附近有强排放源且排放物相对稳定。S25 样点在春季、夏季和秋季 TEQ_{BaP} 值较高; 而 S14 样点在春季、夏季和冬季较高。此外, 春季的 S18 样点, 夏季的 S27 样点, 秋季的 S16 样点和冬季的 S26 样点 TEQ_{BaP} 值也较高。从空间分布来看 TEQ_{BaP} 值较高的采样点均位于火电厂、钢铁厂和化工厂附近或其下风向地区, 排放的 PAHs 污染物经过短距离迁移便进入土壤, 对土壤中 PAHs 的累积贡献很大, 这些样点附近土壤中 PAHs 的致癌风险需引起关注。

3 结论

(1) 灌河口表层土壤中 T-PAHs 的质量分数呈现出冬季($3\,971.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>秋季($3\,506.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>春季($3\,504.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)>夏季($2\,639.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$)的趋势。单体 PAH 主要以 4 环 PAHs 为主, 其次是 5 环和 6 环 PAHs, 2-3 环 PAHs 含量最低。与国内其他工业区对比, 灌河口土壤 PAHs 质量分数处于中间位置。

(2) $\text{Fl}/(\text{Fl}+\text{Pyr})$ 和 $\text{An}/(\text{An}+\text{Phe})$ 特征比值判源结果表明: 灌河口土壤中 PAHs 主要来自来源于煤和生物质的燃烧, 其次为石油燃烧, 不同季节污染物来源差异不大; 不同季节 $\text{Fl}/(\text{Fl}+\text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP}+\text{BghiP})$ 比值散点相对集中, 说明污染物来源相对稳定, 且主要来源于煤和石油类的不完全燃烧排放。

(3) 灌河口工业区所有采样点土壤均有污染, 不同季节 $\Sigma 7\text{CarTEQ}_{\text{BaP}}$ 占 $\Sigma 16\text{TEQ}_{\text{BaP}}$ 比例均高达 99% 以上, 质量分数最高在冬季, 其次为秋季、

春季, 最低为夏季。参考加拿大土壤质量标准, 灌河口土壤中 TEQ_{BaP} 质量分数超标率分别为春季 20%、夏季 13%、秋季 23% 和冬季 20%。但由于调查数据有限, 对灌河口工业区土壤中 PAHs 生态风险还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Berrojalbiz N, Lacorte S, Calbet A, et al. Accumulation and cycling of polycyclic aromatic hydrocarbons in zooplankton[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(7):2295-2301.
- [2] He F P, Zhang Z H, Wan Y Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Beijing and Tianjin region: Vertical distribution, correlation with TOC and transport mechanism[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(5):675-685.
- [3] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: A preliminary source inventory and budget[J]. Environmental Pollution, 1995, 88(1):91-108.
- [4] Chen R, Lü J G, Zhang W, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) pollution in agricultural soil in Tianjin, China: A spatio-temporal comparison study[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(3):2743-2748.
- [5] Cao H, Chao S, Qiao L, et al. Urbanization-related changes in soil PAHs and potential health risks of emission sources in a township in Southern Jiangsu, China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 692-700.
- [6] Yang W, Lang Y H, Bai J, et al. Quantitative evaluation of carcinogenic and non-carcinogenic potential for PAHs in coastal wetland soils of China[J]. Ecological Engineering, 2015, 74:117-124.
- [7] Cao Y, Liu X, Xie Y, et al. Patterns of PAHs concentrations and components in surface soils of main areas in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1):197-203.
- [8] Zhang Q, Zou H, Zhang T, et al. Status and assessment of soil pollution of a steel plant in Wuxi City[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2012, 25(6):25-30.
- [9] Wu D, Wang Y L, Liu W J, et al. Concentrations and component profiles PAHs in surface soils and wheat grains from the cornfields close to the steel smelting industry in Handan, Hebei Province[J]. Environmental Science, 2016, 37(2):740-749.
- [10] Chung M K, Hu R, Cheung K C, et al. Pollutants in Hong

- Kong soils: Polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(3):464-473.
- [11] 沈菲, 朱利中. 钢铁工业区附近农田蔬菜 PAHs 的浓度水平及分布[J]. *环境科学*, 2007, 28(3):669-672.
- [12] 苑金鹏, 王晓利, 周家斌, 等. 济南市表层土壤中 PAHs 的分布、来源及风险分析[J]. *环境化学*, 2015, 34(1):166-171.
- [13] 田靖, 朱媛媛, 杨洪彪, 等. 大型钢铁厂及其周边土壤多环芳烃污染现状调查、评价与源解析[J]. *环境化学*, 2013(6):1002-1008.
- [14] 冯嫣, 吕永龙, 焦文涛, 等. 北京市某废弃焦化厂不同车间土壤中多环芳烃(PAHs)的分布特征及风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2009, 4(3):399-407.
- [15] Kim K H, Jahan S A, Kabir E, et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects[J]. *Environment International*, 2013, 60(5):71-80.
- [16] Yu X Z, Gao Y, Wu S C, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils at Guiyu area of China, affected by recycling of electronic waste using primitive technologies[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(9):1500-1509.
- [17] Yunker M B, Snowdon L R, Macdonald R W, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon composition and potential sources for sediment samples from the Beaufort and Barents Seas[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, 30:1310-1320.
- [18] Yunker M B, MacDonald R W, Goyette D, et al. Natural and anthropogenic inputs of hydrocarbons to the Strait of Georgia[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, 225:181-209.
- [19] Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian soil quality guidelines for protection of environmental and human health. Canadian soil quality guidelines[EB/OL]. [2017-03-17]. <http://ceqg-rcqe.ccme.ca/download/en/266>.

Enrichment characteristics, traceability and risk assessment of soil PAHs in Guanhe Estuary Industrial Zone of North Jiangsu Province

CHEN Hongquan¹, YU Yingpeng^{1*}, CHEN Ming²

(1.School of Urban and Planning, Yancheng Teachers University, Yancheng 224051, China;

2.Jinling College, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

Abstract: To systematically understand the enrichment characteristics, pollution sources and potential health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of the contaminated sites in Guanhe Estuary Industrial Zone, the concentration of 16 monomer PAH controlled by the US Environmental Protection Agency is tested and analyzed. The results suggest that the concentration of T-PAHs demonstrates a trend of winter ($3\,971.7\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > autumn ($3\,506.5\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > spring ($3\,504.8\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$) > summer ($2\,639.1\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$). The proportion of (2+3) ring PAHs is found to be the lowest in summer (13%), and the highest in winter (15%), the same in spring and autumn (14%). The PAH concentration of monomer in different seasons is identified as the highest in the middle and high rings (4, 5 and 6 rings), and the lowest in the low ring (2 and 3 rings). The characteristics of coal, biomass and petroleum combustion sources is notable in spring and summer, while petroleum combustion and automobile exhaust emissions are the main sources in winter, indicating that there are seasonal differences in the main sources. The concentration of soil PAHs in the Guanhe Industrial Zone stays at the middle level compared with the results from the domestic research concerned. There are 13% to 23% soil exceeding the safety threshold in different seasons according to the Canadian Soil Environmental Quality Standards, thus there exist potential ecological risks.

Key words: Guanhe Estuary; soil; polycyclic aromatic hydrocarbons; risk assessment

(责任编辑 韩 超)