

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM_{2.5} 中汞形态污染及其与碳组分的关系 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM_{2.5} 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM_{2.5} 日均值变化分析: 以常州为例 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO₂/膨润土复合材料对 Hg²⁺ 的吸附性能研究 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H₂O₂ 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N₂O 的产生特性 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦硒(VI)吸收、转运和分配的影响 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评价

王静^{1,2}, 刘明丽^{1,2}, 张士超^{1,2}, 鲁垠涛^{1,2}, 姚宏^{1,2*}

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 水中典型污染物控制与水质保障北京重点实验室, 北京 100044)

摘要: 研究了处于城镇化进程中沈抚新城表层土壤多环芳烃的污染水平. 从沈抚新城采集了 54 个土壤表层样品, 包括 4 种不同土地利用类型(城镇用地、农村用地、林地、耕地), 分析了不同土地利用类型中多环芳烃的含量, 利用特征比值法与主成分分析对其进行来源分析, 利用 BaP 毒性当量含量及终生癌症风险增量模型(ILCR)对不同土地利用类型表层土壤内 PAHs 进行风险评价. 城镇用地、耕地、农村用地、林地这 4 种土地利用类型 \sum PAHs 的含量分别为 184 ~ 18 276、230 ~ 14 102、151 ~ 3 205、303 ~ 2 980 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 不同土地利用类型土壤中 PAHs 来源相似, 主要以煤燃烧源与交通源为主; 风险评价表明沈抚地区存在潜在的健康风险, 尤其是城镇用地风险水平最高, 且最易通过皮肤接触途径暴露于土壤 PAHs 中.

关键词: 多环芳烃; 土地利用类型; 土壤; 来源; 风险评价

中图分类号: X53; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0703-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201607096

Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City

WANG Jing^{1,2}, LIU Ming-li^{1,2}, ZHANG Shi-chao^{1,2}, LU Yin-tao^{1,2}, YAO Hong^{1,2*}

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aqueous Typical Pollutants Control and Water Quality Safeguard, Beijing 100044, China)

Abstract: The concentration level of polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in topsoil from Shenfu New City in urbanization was studied. 54 topsoil samples were collected from Shenfu New City and 4 different land uses (urban land, rural land, forest land, cultivated land) were included. The concentration of PAHs in different land uses was analyzed, the sources of soil PAHs were analyzed by using diagnostic ratios and principal component analysis, and the ecological risks were calculated using toxic equivalency concentrations of BaP and the incremental lifetime cancer risk (ILCR) model. Results indicated that the concentrations of \sum PAHs in urban land, cultivated land, rural land and forest land were in the range of 184-18 276, 230-14 102, 151-3 205, 303-2 980 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Four land uses had similar sources, the main sources were coal combustion and traffic emission. According to the calculation of ecological risks, there were potential health risks for residents in Shenfu New City, especially urban land, meanwhile, residents were easily exposed to soil PAHs through dermal contact.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbon(PAHs); land uses; soil; sources; ecological risks

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbon, PAHs) 是一类广泛存在于环境中的持久性有机污染物, 由于其具有致癌、致畸、致突变等特性引起社会广泛关注^[1, 2]. PAHs 可能存在于大气、水、土壤、植物甚至动物血液中, 然而通常由于土壤中 PAHs 含量是其它介质的数倍, 被视为 PAHs 的主要承担者^[3], 虽然土壤发挥着重要的容纳和净化污染物的作用, 但在强烈的环境负荷冲击下, 土壤的缓冲净化功能将接近极限, 从而对人类的健康造成威胁^[4]. 目前, 国内外不少学者对城市不同土地利用类型中土壤 PAHs 的含量、来源及污染程度做了许多研究, 由于不同土地利用类型涉及到的人类活动等不同, 其 PAHs 含量水平、单体组成、来源分布等表现出了明显差异^[2, 3, 5~7]. 本文对正在城镇化进

程中的沈抚新城不同土地利用类型表层土壤 PAHs 污染现状进行了研究, 分析其差异性, 以期在城镇化进程中更好地保护土壤系统、保障人类健康、建造绿色环保城市提供一定的理论基础.

1 材料与方法

1.1 研究区域

沈抚新城位于辽宁省沈阳、抚顺两个城市之间, 是沈阳经济区的中心区域, 有良好的地理位置和优越的交通条件. 新城地处东经 123° 55', 北纬

收稿日期: 2016-07-15; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07202)

作者简介: 王静(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大流域面源污染监测评估, E-mail: bjtawangjing@sina.com

* 通信作者, E-mail: yaohongts@163.com

41°52',地势平坦开阔,由北向南渐高,海拔在 60 ~ 70 m 之间,属中温带大陆性气候,常年主导风向为西南风,冬季为东北风,年平均气温为 7℃. 总规划面积 605.34 km²,由沈阳市 335.54 km² 及抚顺市 258.80 km² 组成.

1.2 样品采集

根据沈抚新城地形状况和土地利用等情况,构建 0.01°×0.01°经纬度网格系统进行布点,均匀选取 54 个样点(耕地 29 个,林地 4 个,农村用地 8 个,城镇用地 13 个). 采样时间为 2014 年 12 月,采样点分布见图 1. 采集的样品经冷冻干燥,去除其中的石子、树叶及树根等杂质,过 100 目筛网后于 4℃ 保存,以待后续处理.

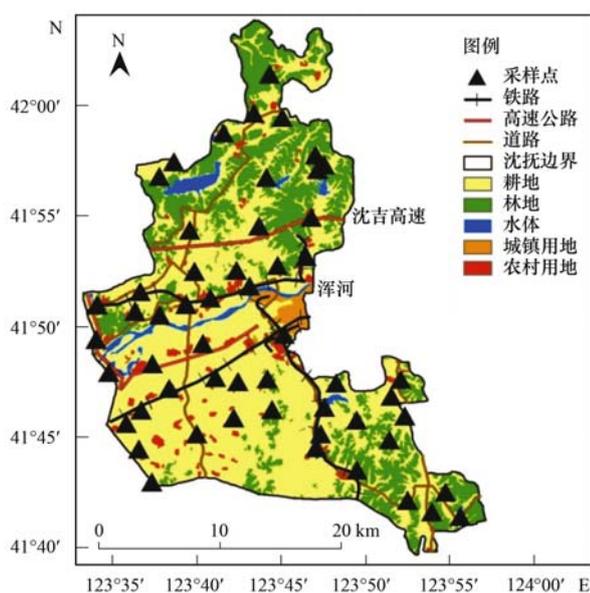


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.3 样品预处理与样品分析

准确称取 10 g 土壤与 10 g 无水硫酸钠混合,并加入 0.2 g 铜粉以去除土壤中硫成分,加入 100 μL 代标 (Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10、Perylene-D12) 后用 150 mL 丙酮/正己烷(1:1) 索氏萃取 24 h. 提取液在加入 4 mL 异辛烷后于旋转蒸发仪上浓缩至 2 ~ 3 mL,之后过硅胶层析柱,用 30 mL 二氯甲烷/正己烷(1:1) 混合溶液淋洗硅胶柱后,加入提取液,再用 120 mL 二氯甲烷/正己烷(1:1) 混合溶液进行洗脱,洗脱液经旋蒸、氮吹、加内标(Phenanthrene-D10) 定容至 1.0 mL,最后转移至色谱样品瓶中待测.

PAHs 的测定采用 Agilent 6890-5975 GC/MS 气质联用仪,色谱柱为 DB-5MS 型柱(30 m×0.1 mm

×0.25 μm). 升温程序为:起始温度 50℃,先以 10℃·min⁻¹ 升温至 180℃,保持 1 min,再以 5℃·min⁻¹ 升温至 280℃,保持 10 min,无分流进样 2.0 μL,载气为高纯氦气(99.999%),流速为 1.0 mL·min⁻¹,离子源为 EI 源,进样口温度 270℃,用内标曲线法对 PAHs 进行定量. 实验分析了包括 16 种 USEPA 优先控制的 PAHs 在内的共 21 种 PAHs.

1.4 质量控制与质量保证

实验过程中 9 个样品作为一批处理,同时处理 1 个空白样、1 个平行样及 1 个加标样,分别监测人为影响情况、实验的重视性及方法的回收率,在各代标指示物回收率差异较大时,用指示物对相应实验结果进行校正,本方法中 4 种代标指示物回收率差异不大,回收范围为 82% ~ 126%.

1.5 数据处理

利用 Excel 2010 与 Origin 7.5 进行数据基本处理,采用 Spss 19.0 进行主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 不同土地利用类型土壤多环芳烃含量及组成

沈抚新城 4 种土地利用类型 PAHs 检测结果见表 1. 不同土地利用类型 ∑PAHs 含量不同,城镇用地 ∑PAHs 含量最高,含量范围为 184 ~ 18 276 μg·kg⁻¹,均值为 3 827.08 μg·kg⁻¹; ∑PAHs 最低值出现在林地,含量范围为 303 ~ 2 980 μg·kg⁻¹,均值为 1 646.33 μg·kg⁻¹. 农村用地与耕地表现出中等的 ∑PAHs 含量水平,农村用地的 ∑PAHs 含量范围为 151 ~ 3 205 μg·kg⁻¹,均值为 2 161.44 μg·kg⁻¹;耕地 ∑PAHs 含量范围为 230 ~ 14 102 μg·kg⁻¹,均值为 2 241.97 μg·kg⁻¹. 与世界其它地区相比(表 2),沈抚新城表层土壤 ∑PAHs 含量相对较高. 在城镇用地范围内,沈抚新城 ∑PAHs 含量与上海、南京相似(含量皆大于 3 000 μg·kg⁻¹),却远远大于北京地区,甚至是韩国蔚山的 25 倍. 在其它 3 种土地利用类型范围内,沈抚新城 ∑PAHs 含量皆大于其它地区.

不同地区由于气候、地形不同,一定程度上也会引起 PAHs 的扩散,造成 ∑PAHs 含量的差异^[5],因此沈抚新城与其他地区 PAHs 含量存在明显差异. 而与沈抚新城附近的辽河流域芦苇湿地相比^[8],沈抚新城 ∑PAHs 含量最低的林地甚至还达

表 1 沈抚新城不同土地利用类型土壤样品中 PAHs 含量¹⁾/μg·kg⁻¹Table 1 Concentrations of soil PAHs in different land uses in Shenfu New City/μg·kg⁻¹

PAHs	环数	城镇用地(13)				农村用地(8)			
		平均值	中间值	标准偏差	含量范围	平均值	中间值	标准偏差	含量范围
Naphthalene(NaP)	2	222.95	101.17	240.94	ND ~ 647.26	338.35	51.89	435.51	7.57 ~ 1 021.80
2-Methylnaphthalene(MNaP2)	2	71.13	60.86	60.05	ND ~ 203.81	80.71	50.32	76.17	ND ~ 188.26
1-Methylnaphthalene(MNaP1)	2	59.29	44.61	59.25	ND ~ 222.37	61.51	41.40	56.81	0.05 ~ 136.51
Acenaphthylene(Acy)	3	24.39	7.83	37.01	0.97 ~ 119.41	7.99	7.46	5.40	1.26 ~ 18.19
Acenaphthene(Ace)	3	10.95	5.29	16.00	0.27 ~ 56.11	5.50	4.24	4.73	0.61 ~ 13.83
Fluorene(Fl)	3	16.27	8.93	20.52	ND ~ 67.13	10.00	10.31	6.32	1.18 ~ 19.55
Dibenzothiopene(Dibt)	3	11.29	3.92	14.82	0.84 ~ 45.64	6.76	5.93	5.25	0.76 ~ 18.06
Phenanthrene(Phe)	3	197.31	77.70	267.32	13.97 ~ 870.83	116.13	124.71	47.67	25.95 ~ 176.67
Anthracene(Ant)	3	42.94	11.18	68.30	1.83 ~ 224.22	16.73	17.57	8.79	1.81 ~ 28.90
Retene(Ret)	3	456.45	119.48	857.92	14.34 ~ 3 016.10	408.77	377.27	341.79	6.80 ~ 1 007.88
Fluoranthene(Fla)	4	305.19	137.41	359.13	22.58 ~ 1 074.91	190.93	204.93	97.14	ND ~ 316.57
Pyrene(Pyr)	4	349.18	114.91	541.46	19.17 ~ 1 917.68	160.45	172.30	84.80	5.46 ~ 261.24
Benzo(a) anthracene(BaA)	4	232.13	69.23	416.00	12.46 ~ 1 500.57	80.72	94.94	44.85	9.71 ~ 128.92
Chrysene(Chry)	4	303.68	131.91	473.23	16.75 ~ 1 698.90	147.80	146.59	61.39	68.08 ~ 255.47
Benzo(b) Fluoranthene(BbF)	5	400.25	174.83	630.42	22.62 ~ 2 288.59	184.58	203.23	108.04	9.38 ~ 322.25
Benzo(k) Fluoranthene(BkF)	5	246.44	48.31	615.50	7.93 ~ 2 272.80	50.10	55.82	26.68	9.40 ~ 85.79
Benzo(a) Pyrene(BaP)	5	260.42	83.54	465.40	11.84 ~ 1 702.31	85.35	102.25	51.50	1.87 ~ 135.65
Perylene(Pery)	5	65.05	19.52	114.19	3.51 ~ 422.10	20.36	24.33	11.69	0.39 ~ 31.99
Dibenzo(ah) anthracene(dBaAnt)	5	45.29	12.94	83.81	2.38 ~ 304.31	13.77	15.26	8.73	1.11 ~ 24.68
Indeno(1, 2, 3-c, d) Pyrene(InP)	6	250.00	80.51	447.45	11.14 ~ 1 628.08	85.36	105.71	54.83	0.09 ~ 152.04
Benzo(ghi) perylene(BghiP)	6	256.51	68.86	482.21	12.11 ~ 1 756.21	89.55	105.83	56.24	ND ~ 152.31
∑ 21PAHs		3 827.08	1 818.14	5 283.15	184 ~ 18 276	2 161.44	2 556.88	1 155.37	151 ~ 3 205
∑ 7PAHs		1 738.19	608.96	3 110.04	85 ~ 11 395	647.69	741.29	349.68	100 ~ 1 085
PAHs	环数	林地(4)				耕地(29)			
		平均值	中间值	标准偏差	含量范围	平均值	中间值	标准偏差	含量范围
Naphthalene(NaP)	2	155.16	20.25	282.32	1.98 ~ 578.17	326.95	407.17	245.26	3.92 ~ 666.27
2-Methylnaphthalene(MNaP2)	2	38.97	17.73	54.17	1.90 ~ 118.51	67.30	82.12	39.74	4.62 ~ 125.12
1-Methylnaphthalene(MNaP1)	2	29.54	9.25	45.56	2.25 ~ 97.42	51.90	60.24	30.84	2.94 ~ 101.48
Acenaphthylene(Acy)	3	10.59	9.94	8.62	1.74 ~ 20.72	13.82	5.54	32.78	0.70 ~ 179.01
Acenaphthene(Ace)	3	3.80	2.06	3.81	1.58 ~ 9.50	5.70	4.44	6.01	0.78 ~ 31.63
Fluorene(Fl)	3	6.75	4.83	7.08	0.82 ~ 16.53	10.35	7.11	13.48	0.12 ~ 74.92
Dibenzothiopene(Dibt)	3	4.49	4.29	3.85	0.02 ~ 9.34	6.36	4.62	7.80	ND ~ 41.89
Phenanthrene(Phe)	3	88.78	88.22	55.82	21.26 ~ 157.42	125.18	79.80	187.75	14.46 ~ 1 023.27
Anthracene(Ant)	3	12.37	11.36	10.01	1.30 ~ 25.47	18.53	8.96	29.39	1.26 ~ 157.28
Retene(Ret)	3	375.53	269.94	423.69	7.63 ~ 954.60	298.36	228.12	307.17	12.69 ~ 1 166.44
Fluoranthene(Fla)	4	168.82	158.29	96.03	70.77 ~ 287.93	189.47	138.12	186.53	13.98 ~ 767.84
Pyrene(Pyr)	4	139.21	129.23	93.55	45.44 ~ 252.97	186.17	111.45	282.12	10.81 ~ 1 497.69
Benzo(a) anthracene(BaA)	4	68.02	57.03	58.61	11.50 ~ 146.54	96.28	50.05	168.32	3.96 ~ 911.11
Chrysene(Chry)	4	114.68	106.60	102.30	ND ~ 245.52	164.07	112.79	226.13	ND ~ 1 237.15
Benzo(b) Fluoranthene(BbF)	5	155.88	117.48	128.00	48.76 ~ 339.82	211.28	136.09	315.78	12.10 ~ 1 734.63
Benzo(k) Fluoranthene(BkF)	5	44.36	32.16	43.01	7.27 ~ 105.88	68.13	36.99	128.21	2.69 ~ 702.68
Benzo(a) Pyrene(BaP)	5	77.94	54.27	73.60	19.93 ~ 183.30	118.25	55.08	252.19	4.31 ~ 1 378.93
Perylene(Pery)	5	16.71	12.10	15.94	3.47 ~ 39.19	26.44	11.07	60.90	0.79 ~ 332.18
Dibenzo(ah) anthracene(dBaAnt)	5	8.58	7.83	5.55	2.99 ~ 15.68	19.81	10.52	40.70	1.37 ~ 224.81
Indeno(1, 2, 3-c, d) Pyrene(InP)	6	52.16	51.50	29.47	19.27 ~ 86.34	119.67	62.43	239.27	5.04 ~ 1 317.11
Benzo(ghi) perylene(BghiP)	6	73.98	53.18	67.49	19.27 ~ 170.27	117.95	62.76	235.50	3.10 ~ 1 297.25
∑ 21PAHs		1 646.33	1 651.11	1 264.27	303 ~ 2 980	2 241.97	1 638.51	2 525.37	230 ~ 14 102
∑ 7PAHs		521.63	426.85	436.06	110 ~ 1 123	797.48	460.85	1 365.98	42 ~ 7 506

1) ND 为未检出, ∑ 21PAHs 为 21 种 PAHs 含量之和, ∑ 7PAHs 为 7 种致癌性 PAHs 之和

表 2 世界不同地区不同土地利用类型表层土壤 \sum PAHs 含量

Table 2 Concentrations of topsoil PAHs in different land uses from different districts

城市/国家	样品数	采样深度/cm	\sum PAHs 数量	土地利用类型	平均含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	文献
上海,中国	55	0~10	22	城镇	3 780	442~19 700	[15]
北京,中国	127	0~20	16	城镇	1 082.6	8.5~13 126.6	[5]
东江流域,中国	30	0~20	16	农村	107	24~238	[16]
德里,印度	—	0~5	16	耕地	1 910	830~3 880	[17]
天津,中国	—	—	16	耕地	1 100	—	[10]
全区域,韩国	226	—	16	耕地	236	23.3~2 834	[18]
江陵,韩国	—	—	16	林地	49	—	[19]
广东,中国	39	0~15	16	农村	690	127~10 600	[20]
蔚山,韩国	25	—	16	城市/农村	150/64	—	[11]
香港,中国	53	0~10	16	城镇与农村	55	7~410	[21]
南京,中国	139	0~5	16	城镇/郊区/农村	3 330/1 680/1 060	—	[12]
沈抚新城,中国	54	0~20	21	城镇/农村/林地/耕地	3 827.08/2 161.44/ 1 646.33/2 241.97	—	本研究

到了辽河芦苇湿地的 2 倍,表明林地土壤很可能在城镇化过程受到了 PAHs 污染. 根据土壤 PAHs 污染标准^[9] (未污染 $<200 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、轻微污染 $200 \sim 600 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、中度污染 $600 \sim 1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、重度污染 $>1\,000 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 沈抚新城表层土壤中 PAHs 已达到重度污染水平,值得引起关注.

从平均值看,不同土地利用类型 \sum PAHs 含量呈现城镇用地 $>$ 耕地 $>$ 农村用地 $>$ 林地的变化趋势,与其他学者研究结果类似^[10~12]. 从单体上看,4 种土地利用类型中单体含量最高的为蒽烯 (Retene), 耕地除外,其蒽烯的含量仅次于萘 (Naphthalene). 3 环的蒽烯 (Retene) 主要来自木材燃烧^[13],其高含量存在与沈抚新城居民冬季取暖方式情况相符合. 不同土地利用类型中相似的单体分布规律进一步表明 PAHs 含量多少会随着土地利用类型变化而变化,但其大致分布规律并无较大差异,即不同土地利用类型 PAHs 的含量差异主要是人类活动引起的^[6].

美国环保署 (USEPA) 将 7 种 PAHs 单体列为人类可能致癌性 PAHs^[14],包括苯并[a]蒽 (BaA)、苯并[a]芘 (BaP)、苯并[b]荧蒽 (BbF)、苯并[k]荧蒽 (BkF)、䓛 (Chry)、二苯并[a,h]蒽 (DBA)、茚并[1,2,3-c,d]芘 (InP). 从表 1 可以看出, \sum 7PAHs 含量分布同样受土地利用类型影响,最大值出现在城镇用地 (均值 $1\,738.19 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 范围 $85 \sim 11\,395 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 最小值出现在林地 (均值 $521.63 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 范围 $110 \sim 1\,123 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 分布规律与 \sum 21PAHs 一致,皆表现为城镇用地 $>$ 耕地 $>$ 农村用地 $>$ 林地,进一步表明城镇用地受 PAHs 污染最

为严重.

PAHs 由于其难降解、持久存在的特性,在不同土地利用类型中表现出不同的富集规律^[22]. 图 2 表明,各个土地利用类型中 4 环 PAHs 含量皆较高,高环 (4~6 环) PAHs 含量分布规律表现为城镇用地 $>$ 耕地 $>$ 农村用地 $>$ 林地,而低环 (2~3 环) PAHs 在各个土地利用类型中分布规律并不明显. 低环 (2~3 环) PAHs 易生物降解,随着时间累积其易于远距离迁移;而高环 (4~6 环) PAHs 难以生物降解、远距离迁移,很容易累积沉淀在源头附近^[5,7],即高环 (4~6 环) PAHs 主要来自区域内部. 城镇用地人类活动相对繁杂,PAHs 输入量最大,表现出较高的 PAHs 含量水平,而林地涉及的人类活动最少,但受大气沉降等的影响,也受到了一定的污染.

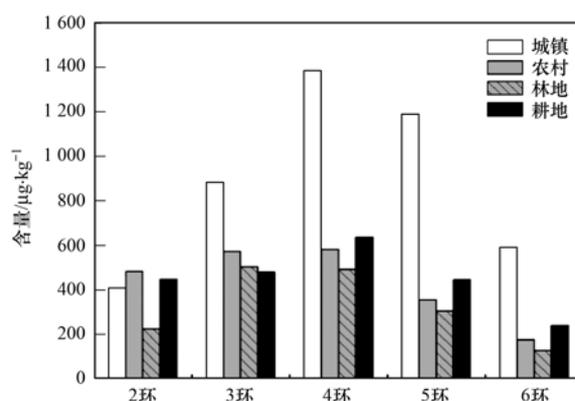


图 2 沈抚新城不同土地利用类型环数分布

Fig. 2 Distribution of soil PAHs with different rings in different land uses in Shenfu New City

2.2 沈抚新城土壤多环芳烃来源

通常来说,高环 (4~6 环) PAHs 主要用来指示燃烧源,包括石油、木材、煤以及生物质的不完全

燃烧,低环(2~3环)PAHs则来自石油泄漏^[6, 23]. 图2可以看出,高环PAHs含量皆超过了总量的50%,说明沈抚新城不同土地利用类型中PAHs有相似的来源,以燃烧源为主.

同分异构体比值法也常用来判断PAHs来源,本文采用 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BaP})$ 、 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr})$ 、 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 等比值法来进行PAHs来源分析. 其中 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BaP}) < 0.2$ 、 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) < 0.2$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) < 0.4$ 以及 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) < 0.1$ 时,主要来源为石油源;

$\text{InP}/(\text{InP} + \text{BaP}) > 0.5$ 、 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) > 0.5$ 、 $\text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) > 0.5$ 时,主要来源为草、木、煤等生物质燃烧源;当 $0.2 < \text{InP}/(\text{InP} + \text{BaP}) < 0.5$ 、 $0.2 < \text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP}) < 0.5$ 、 $0.4 < \text{Flu}/(\text{Flu} + \text{Pyr}) < 0.5$ 时,代表来源为石油燃烧源;另外当 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe}) > 0.1$ 时,代表燃烧源^[2, 3, 7, 24]. 图3为4种同分异构体比值,4种土地利用类型的PAHs来源基本一致,包括草、木、煤燃烧,石油燃烧以及石油输入源,其中草、木、煤及石油燃烧等是沈抚新城PAHs输入的主要源头.

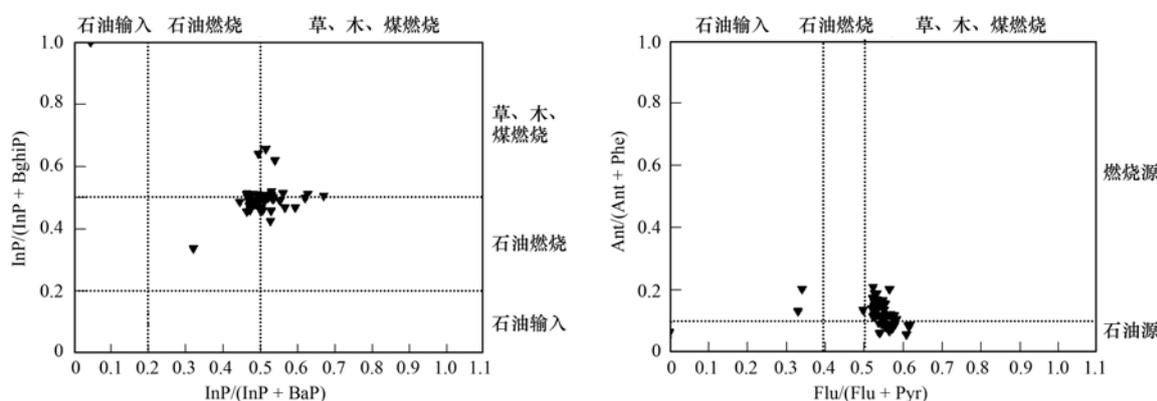


图3 PAHs同分异构体比值

Fig. 3 Diagnostic ratios of soil PAHs

然而PAHs单体从排放源到受体介质的迁移、分配等过程中因自身理化性质的差别和外界条件的差异会发生变化,PAHs的生物降解、挥发、大气沉降等不确定因素皆会影响单体比值法的判断^[7, 25]. 由此,简单利用环数分布及分子比值法判断PAHs来源可能会存在偏差,本文同时利用主成分分析进行PAHs来源判断. 利用Spss 19.0软件进行主成分分析,得到的分析成分矩阵见表3. 数据处理时采用变化数据提取特征值根大于1的主因子以及结合方差极大旋转的方法,沈抚新城表层土壤中PAHs的3个主成分累积解释了方差变量的96.375%. 成分1解释了方差变量的77.081%,其中Acy、Ace、Fl、Dibt、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chry、BbF、BkF、BaP、Pery、dBaAnt、InP、BghiP的载荷较大,Ace、Fl、Phe、Ant、Fla、Pyr、BaA、Chry、BbF、BkF、BaP通常被看作煤燃烧的指示物,Acy、InP、BghiP是机动车源头的标志物^[26, 27],说明成分1代表煤燃烧与机动车排放源. 成分2则解释了方差变量的14.100%,载荷较大的PAHs单体有NaP、MNaP2、MNaP1、Ret, NaP是焦炉燃烧排放源的标志物;除了当地的内部PAHs源头,大气沉降同样会带来土壤中的PAHs^[26],由于成分2主要由低环PAHs确

表3 $\sum 21$ PAHs主成分分析成分矩阵

Table 3 Matrix of principal component about $\sum 21$ PAHs			
成分	1	2	3
NaP	-0.003	0.830	0.541
MNaP2	0.243	0.956	0.142
MNaP1	0.319	0.941	-0.057
Acy	0.940	-0.025	-0.017
Ace	0.964	0.122	0.045
Fl	0.967	0.147	-0.022
Dibt	0.954	0.152	-0.157
Phe	0.974	0.049	-0.046
Ant	0.988	0.020	-0.093
Ret	0.401	0.460	-0.759
Fla	0.876	0.099	-0.247
Pyr	0.990	-0.078	0.013
BaA	0.985	-0.117	0.053
Chry	0.992	-0.066	0.030
BbF	0.991	-0.098	0.033
BkF	0.882	-0.239	0.224
BaP	0.982	-0.141	0.101
Pery	0.977	-0.145	0.108
dBaAnt	0.984	-0.130	0.088
InP	0.984	-0.132	0.083
BghiP	0.982	-0.148	0.089
解释方差变量/%	77.081	14.100	5.194

定,而低环PAHs易扩散、向远处迁移,故成分2代

表焦炉燃烧与大气沉降源。成分3解释了方差变量的5.194%,主要由NaP确定,故成分3代表焦炉燃烧源。

综上所述,沈抚新城表层土壤PAHs来源主要为煤燃烧源与交通带来的石油燃烧源,同时还包括大气沉降源,与沈抚新城附近的辽河区域湿地表层土壤来源相似^[9],与沈抚新城冬季供暖、内部交通工具使用等密不可分。因而,要削减城镇化过程中PAHs的含量,必须从两方面入手,一是改善居民燃料使用情况,寻找绿色新能源,削减煤炭使用量;二是重点关注城镇用地,控制交通量、寻找交通工具清洁能源,减少排气口PAHs排放。

2.3 沈抚新城不同土地利用类型土壤多环芳烃人体健康风险评价

人们主要通过3种方式暴露于土壤中的PAHs:误食土壤、皮肤接触以及呼吸^[24],因此利用终生癌症风险增量模型(incremental lifetime cancer risk, ILCR)可以评估成人与儿童通过该3种方式暴露于沈抚新城土壤PAHs的健康风险^[16],各暴露途径下的癌症风险计算公式如下^[16, 24, 28]。

经口直接摄入PAHs污染土壤:

$$ILCR_{\text{误食土壤}} = \frac{c_{\text{土壤}} \times \text{Ing R} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF} \times \text{CSF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (1)$$

经皮肤接触摄入PAHs污染土壤:

$$ILCR_{\text{皮肤接触}} = \frac{c_{\text{土壤}} \times \text{SA} \times \text{AF}_{\text{土壤}} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CF} \times \text{CSF}}{\text{BW} \times \text{AT}} \quad (2)$$

经呼吸摄入PAHs污染土壤:

$$ILCR_{\text{呼吸}} = \frac{c_{\text{土壤}} \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{CSF}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}} \quad (3)$$

式中, $c_{\text{土壤}}$ 指总BaP等量含量,IngR指土壤摄取速率(成人 $100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,儿童 $200 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$),EF指暴露频率(成人 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$,儿童 $180 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$),ED指暴露年数(成人70 a,儿童6 a),CF指转化因子($1 \times 10^{-6} \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),BW指平均体重(成人60 kg,儿童15 kg),AT指人均寿命(25 550 d),SA指接触皮肤的皮肤面积(成人 $5 700 \text{ cm}^2$,儿童 $2 800 \text{ cm}^2$), $\text{AF}_{\text{土壤}}$ 指土壤附着因子(成人 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$,儿童 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$),ABS指皮肤吸附系数(0.13),InhR指呼吸速率(成人 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,儿童 $5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$),PEF指土壤尘形成系数($1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)^[24]。

其中BaP等量含量的计算公式^[12]:

$$\text{TEQ}_{\text{BaP}} = \sum c_i \cdot \text{TEF}_i \quad (4)$$

式中, c_i 为第*i*种PAHs的含量, $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; TEF_i 为第*i*种PAHs的毒性当量因子,各个PAHs单体毒性当量因子见表4, TEQ_{BaP} 是基于BaP的毒性当量($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)。CSF指致癌斜率因子, $\text{CSF}_{\text{误食土壤}}$ 、 $\text{CSF}_{\text{皮肤接触}}$ 、 $\text{CSF}_{\text{呼吸}}$ 分别为7.3、25、3.9($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)^[16, 24, 28]。

经计算得,城镇用地、农村用地、林地以及耕地的BaP等量含量均值(范围)分别为 $425.74 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($20.00 \sim 2 816.49 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $142.57 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($6.57 \sim 231.67 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $121.15 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($31.96 \sim 271.77 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、 $191.46 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($9.06 \sim 2 101.19 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$),生活在城镇用地的人们存在最大的健康风险,其次是耕地、农村用地及林地,与总含量分布规律一致。BaP等量含量安全值为 $700 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[5],城镇用地内15.4%的样品高于安全值,耕地内有3.4%的样品高于安全值,说明部分城镇用地及耕地已经受到了一定PAHs的污染。

表4 PAHs单体毒性当量因子^[24]

单体	毒性当量因子(TEF)
NaP	0.001
Acy	0.001
Ace	0.001
Fl	0.001
Phe	0.001
Ant	0.01
Fla	0.001
Pyr	0.001
BaA	0.1
Chry	0.01
BbF	0.1
BkF	0.1
BaP	1
dBaAnt	1
InP	0.1
BghiP	0.01

表5为ILCR模型运算出不同土地利用类型内成人与儿童分别于不同暴露途径下的风险水平,无论是哪种暴露途径,成人与儿童在4种土地利用类型内的风险水平从高到低都表现为城镇用地>耕地>农村用地>林地。当癌症风险水平处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间时表明有潜在的健康风险,当癌症风险水平高于 10^{-4} 时表明存在很高的潜在健康风险^[24]。沈抚新城内4种土地利用类型内无论是成人或是儿童,其通过呼吸暴露于土壤PAHs中的风险皆低于

10^{-6} , 几乎不存在风险, 而通过土壤误食及皮肤接触途径暴露于土壤 PAHs 的风险处于 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间, 存在一定的潜在健康风险. 儿童通过 3 种途径

暴露的致癌风险皆低于成人, 而成人与儿童通过 3 种途径暴露的致癌风险大小顺序为皮肤接触 > 土壤误食 > 呼吸.

表 5 终生癌症风险评价

Table 5 Health risks with incremental lifetime cancer risk (ILCR)

类型	土壤误食				皮肤接触				呼吸			
	儿童 $\times 10^{-6}$		成人 $\times 10^{-6}$		儿童 $\times 10^{-6}$		成人 $\times 10^{-6}$		儿童 $\times 10^{-6}$		成人 $\times 10^{-6}$	
	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
城镇	1.75	0.08 ~ 11.59	5.18	0.24 ~ 34.23	2.18	0.10 ~ 14.45	9.2	0.43 ~ 60.87	17.2	0.81 ~ 113.80	0.41	0.02 ~ 2.69
农村	0.59	0.03 ~ 0.95	1.73	0.08 ~ 2.82	0.73	0.03 ~ 1.19	3.08	0.14 ~ 5.01	5.76	0.27 ~ 9.36	0.14	0.0063 ~ 0.22
林地	0.5	0.13 ~ 1.12	1.47	0.39 ~ 3.31	0.62	0.16 ~ 1.39	2.62	0.69 ~ 5.87	4.90	1.29 ~ 10.98	0.12	0.031 ~ 0.26
耕地	0.79	0.037 ~ 8.64	2.33	0.11 ~ 25.56	0.98	0.046 ~ 10.78	4.14	0.20 ~ 45.41	7.74	0.37 ~ 84.90	0.18	0.0087 ~ 2.01

本次采样时期为冬天, 低温不利于土壤内 PAHs 向大气中迁移扩散, 因此通过呼吸途径暴露的致癌风险比较低, 处于安全值范围内. 且由于冬天的严寒条件, 相对于成人来说, 儿童极少会到户外运动, 儿童群体接触土壤 PAHs 的概率极低, 因此儿童的暴露健康风险低于成人. 总之, 无论是从 BaP 等效当量含量还是从致癌风险考虑, 沈抚新城在城镇化过程中还是存在一定的健康风险, 尤其是城镇用地, 表现出最高的风险水平, 值得引起高度关注.

3 结论

(1) 相比于其它地区, 沈抚新城内不同土地利用类型内 \sum PAHs 含量处于较高污染水平, 城镇用地 \sum PAHs 含量最高, 平均含量为 $3\ 827.08 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最低值出现在林地, 平均含量为 $521.63 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 不同土地利用类型 \sum PAHs 含量高低表现为城镇用地 > 耕地 > 农村用地 > 林地.

(2) 不同土地利用类型表层土壤主要富集了 4 ~ 6 环 PAHs, 高达总 PAHs 含量的 50% 以上; 通过同分异构体比值法与主成分分析得知, 4 种土地利用类型 PAHs 有着相似的来源, 主要为煤燃烧源与交通带来的石油燃烧源, 同时还包括一定的大气沉降源.

(3) 根据 BaP 等效当量含量对沈抚新城不同土地利用类型 PAHs 进行风险评价, 结果表明, 沈抚新城内 PAHs 风险水平处于较低水平, 但城镇用地与耕地仍有部分样品超过了安全值.

(4) 运用 ILCR 模型进行癌症风险评价, 人们最易通过皮肤接触途径暴露于土壤 PAHs 中, 成人表现出较高的风险水平, 整个沈抚新城表现出潜在的健康风险, 仍需要引起关注.

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] 赵利容, 孙省利, 柯盛. 湛江市不同土地利用类型土壤的 PAHs 污染特征和来源[J]. 土壤学报, 2012, **49**(4): 830-834.
Zhao L R, Sun S L, Ke S. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils different in land use in Zhanjiang City[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, **49**(4): 830-834.
- [3] Xiao R, Bai J H, Wang J J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wetland soils under different land uses in a coastal estuary: toxic levels, sources and relationships with soil organic matter and water-stable aggregates [J]. Chemosphere, 2014, **110**: 8-16.
- [4] 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 等. 城市土壤环境问题及其研究进展[J]. 土壤学报, 2007, **44**(5): 925-932.
Zhang G L, Zhao Y G, Yang J L, et al. Urban soil environment issues and research progresses [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, **44**(5): 925-932.
- [5] Liu S D, Xia X H, Yang L Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **177**(1-3): 1085-1092.
- [6] 倪进治, 陈卫锋, 杨红玉, 等. 福州市不同功能区土壤中多环芳烃的含量及其源解析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 921-926.
Ni J Z, Chen W F, Yang H Y, et al. Concentrations and sources of soil PAHs in various functional zones of Fuzhou City [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(5): 921-926.
- [7] Zheng W D, Lichwa J, Yan T. Impact of different land uses on polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in coastal stream sediments[J]. Chemosphere, 2011, **84**(4): 376-382.
- [8] Li G L, Lang Y H, Yang W, et al. Source contributions of PAHs and toxicity in reed wetland soils of Liaohu estuary using a CMB-TEQ method[J]. Science of the Total Environment, 2014, **490**: 199-204.
- [9] Maliszewska-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.
- [10] Tao S, Cui Y H, Xu F L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soil and vegetables from Tianjin [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **320**(1): 11-24.
- [11] Kwon H O, Choi S D. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils from a multi-industrial city, South Korea[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **470-471**: 1494-1501.
- [12] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 375-383.
- [13] 田福林, 陈景文, 敖江婷. 受体模型应用于典型持久性有毒物质的来源解析研究进展[J]. *环境化学*, 2009, **28**(3): 319-327.
Tian F L, Chen J W, Ao J T. Research progress on source apportionment of typical persistent toxic substances based on receptor models[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **28**(3): 319-327.
- [14] Suman S, Sinha A, Tarafdar A. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) concentration levels, pattern, source identification and soil toxicity assessment in urban traffic soil of Dhanbad, India [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **545-546**: 353-360.
- [15] Jiang Y F, Wang X T, Wang F, *et al.* Levels, composition profiles and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soil of Shanghai, China [J]. *Chemosphere*, 2009, **75**(8): 1112-1118.
- [16] 郑太辉, 冉勇, 陈来国. 东江流域农村土壤中多环芳烃的分布特征及其健康风险评估[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(4): 657-661.
Zheng T H, Ran Y, Chen L G. Polycyclic aromatic Hydrocarbons in the rural soils of Dongjiang River Basin: distribution and human health risks [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(4): 657-661.
- [17] 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*, 2009, **163**(2-3): 1033-1039.
- [18] 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**(10): 1281-1289.
- [19] Kim E J, Choi S D, Chang Y S. Levels and patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils after forest fires in South Korea [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, **18**(9): 1508-1517.
- [20] Wang Y, Tian Z J, Zhu H L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils and vegetation near an e-waste recycling site in South China: concentration, distribution, source, and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **439**: 187-193.
- [21] Zhang H B, Luo Y M, Wong M H, *et al.* Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong Soils [J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141**(1): 107-114.
- [22] 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.
- [23] Christensen E R, Bzdusek P A. PAHs in sediments of the black river and the Ashtabula River, Ohio: source apportionment by factor analysis [J]. *Water Research*, 2005, **39**(4): 511-524.
- [24] Yu B B, Xie X J, Lena Q, *et al.* Source, distribution, and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust from Tianjin, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(4): 2817-2825.
- [25] 陈卫锋, 倪进治, 杨红玉, 等. 闽江福州段沉积物中多环芳烃的分布、来源及其生态风险[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(4): 878-884.
Chen W F, Ni J Z, Yang H Y, *et al.* Distribution, sources and ecological risks of PAHs in sediment of Minjiang River in Fuzhou City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(4): 878-884.
- [26] Liang J, Ma G J, Fang H L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations in urban soils representing different land use categories in Shanghai [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, **62**(1): 33-42.
- [27] Lee B K, Dong T T T. Toxicity and source assignment of polycyclic aromatic hydrocarbons in road dust from urban residential and industrial areas in a typical industrial city in Korea [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2011, **13**(1): 34-42.
- [28] Peng C, Chen W P, Liao X L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of Beijing: status, sources, distribution and potential risk [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(3): 802-808.

CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (423)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (429)
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM _{2.5} in Shengsi Region	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> (438)
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Mt. Taishan	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> (445)
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> (453)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> (461)
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> (469)
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> (476)
Variation Analysis of Daily PM _{2.5} Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> (485)
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (495)
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> (502)
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> (510)
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> (517)
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (527)
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> (535)
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> (547)
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (555)
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> (563)
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> (572)
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (580)
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> (589)
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> (600)
Experimental Research of Hg ²⁺ Removal by TiO ₂ /Bentonite Composite	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> (608)
Impact of Ammonia and H ₂ O ₂ on Bromate and Disinfection By-products Control	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> (616)
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> (622)
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> (629)
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (640)
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> (647)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (654)
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> (665)
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (672)
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> (679)
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i>	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> (688)
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> (697)
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (703)
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> (711)
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (721)
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> (728)
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> (735)
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> (743)
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> (752)
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (760)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (769)
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> (783)
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> (792)
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> (802)
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> (809)
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (815)
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> (825)
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> (832)
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei (837)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年2月15日 第38卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172