

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第4期

Vol.36 No.4

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中美空气质量指数(AQI)对比研究及启示 高庆先,刘俊蓉,李文涛,高文康(1141)

2013年1月北京市PM_{2.5}区域来源解析 李璇,聂滕,齐珺,周震,孙雪松(1148)

2013年1月北京市一次空气重污染成因分析 程念亮,李云婷,张大伟,聂滕,邱启鸿,徐文帅(1154)

上海大气总悬浮颗粒物中金属的可溶性特征 常燕,冯冲,瞿建国,张经(1164)

厦门春季PM₁₀中PAHs成分谱特征及其与气象要素相关性分析 张健,樊曙先,孙玉,张悦,魏锦成(1173)

硫氧同位素示踪南京北郊大气PM_{2.5}中硫酸盐来源 魏英,郭照冰,葛鑫,祝胜男,姜文娟,石磊,陈姝(1182)

结合激光雷达分析2014年春季南京地区一次大气污染过程 包青,贺军亮,查勇,程峰,李倩楠(1187)

春季华东高山背景区域PM_{2.5}和PM_{2.5-10}中水溶性无机离子特征 苏彬彬,张智胜,陶俊,许榕洋,纪贤鑫,刘心东,张若宇(1195)

落叶燃烧排放的颗粒物及有机碳、元素碳的研究 杨伟宗,刘刚,李久海,徐慧,吴丹(1202)

四川省秸秆露天焚烧污染物排放清单及时空分布特征 何敏,王幸锐,韩丽,冯小琼,毛雪(1208)

深圳市船舶排放清单与时空特征研究 杨静,尹佩玲,叶斯琪,王水胜,郑君瑜,区家敏(1217)

超细颗粒通过建筑狭缝的传输特性 孙在,陈秋方,蔡志良,杨文俊,汪晗(1227)

空调病房真菌气溶胶浓度及粒径分布特征 张华玲,冯鹤华,方子梁,王本栋,李丹(1234)

基于氢氧稳定同位素的黄土高原云下二次蒸发效应 靳晓刚,张明军,王圣杰,朱小凡,董蕾,任正果,陈粉丽(1241)

黄河小浪底水库水沙调控对DOC输送的影响 张永领,王明仕,董玉龙(1249)

调水调沙工程长期实施对黄河口近岸沉积物粒度分布与黏土矿物组成特征的影响 王苗苗,孙志高,卢晓宁,王伟,王传远(1256)

春季生物作用对山地岩溶池水地球化学特征的影响 于正良,杨平恒,赵瑞一,李林立,张琳,童小容,罗刚(1263)

降雨期间岩溶城镇区地下水重金属变化特征及来源解析 任坤,杨平恒,江泽利,王尊波,师阳,王凤康,李晓春(1270)

北江和珠江广州河段水体的三卤甲烷风险评价 钟惠舟,韦朝海(1277)

丰水期洪湖水水质空间变异特征及驱动力分析 李昆,王玲,李兆华,王祥荣,陈红兵,吴忠,朱鹏(1285)

三峡库区典型干-支流相互作用过程中的营养盐交换:以梅溪河为例 操满,傅家楠,周子然,邓兵,王雨春,汪福顺(1293)

营养盐输入对太湖水体中磷形态转化及藻类生长的影响 王睿喆,王沛芳,任凌霄,王超,王颖(1301)

一小型藻华池塘浮游植物群落动态及其影响因子研究 杨文,朱津永,张克鑫,万莉,陆开宏(1309)

昌黎生态监控区夏季浮游植物群落年际变化特征分析 梁晓林,杨阳,王玉良,张月明,赵志楠,韩晓庆,张鉴达,高伟明(1317)

河道曝气提升河流水质的WASP模型研究 朱文博,王洪秀,柳翠,张建,梁爽(1326)

γ辐射降解水中的盐酸环丙沙星的研究 祝胜男,郭照冰,赵永富,葛鑫,魏英,陈姝,王静(1332)

电化学氢化物发生法处理含镉废水及对镉的回收 陈京晶,张国平,李海霞,付志平,欧阳小雪,吴琼(1338)

Fe-MCM-41催化臭氧氧化间甲酚废水 孙文静,王亚曼,卫皇墨,王森,李旭宁,李敬美,孙承林,安路阳(1345)

生物阳极及其反转为生物阴极降解氯霉素 孔德勇,梁斌,云慧,王爱杰,任南琪(1352)

308 nm光作用下α-Fe₂O₃表面HNO₃的光解 陆军,孙云东,谢晶晶,赵军,邹家骥,朱承强(1359)

L-组氨酸-赤藓红复合膜修饰电极同时检测对苯二酚、邻苯二酚 何家洪,徐强,丁武泉,李强(1365)

酞基功能型高分子生物载体(PET-AQS)制备及催化生物反硝化特性研究 许晴,侯正浩,田秀蕾,牛春梅,郭延凯,廉静,郭建博(1374)

枯草芽孢杆菌对土臭素和2-甲基异冰片的降解动力学特性 马念念,罗国芝,谭洪新,姚妙兰,王晓用(1379)

嗜咪降解菌筛选及其对焦化废水强化处理 李静,李文英(1385)

Fe³⁺对同步硝化反硝化过程氮元素迁移转化及N₂O释放的影响 李浩,闫玉洁,谢慧君,贾文林,胡振,张建(1392)

内循环半短程亚硝化工艺运行条件与微生物群落研究 赵志瑞,焦海华,崔丙健,黄迪,曹世超,王云,刘上千,马斌,白志辉(1399)

利用处理含4-氯苯酚模拟废水的剩余污泥培养普通小球藻 王璐,陈秀荣,闫龙,何怡萱,施震东(1406)

进水渗滤液总氮和BOD₅/TN对填埋场反应器反硝化和厌氧氨氧化协同脱氮的影响 杨盈盈,陈奕,李明杰,谢冰(1412)

重庆金佛山土壤中PAHs含量的海拔梯度分布及来源解析 师阳,孙玉川,梁作兵,任坤,袁道先(1417)

湖南攸县典型煤矿和工厂区水稻田土壤镉污染特征及污染途径分析 张敏,王美娥,陈卫平,牛俊杰(1425)

沟渠化对三江平原湿地铁元素沉积过程的影响 苏文辉,于晓菲,王国平,栾金花,邹元春(1431)

施用磷酸盐和沸石对土壤镉形态转化的影响 王秀丽,梁成华,马子惠,韩月(1437)

不同条件下皂苷对污染壤土中Cu、Pb的淋洗修复 邓红侠,杨亚莉,李珍,许岩,李荣华,孟昭福,杨亚提(1445)

陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价 齐雁冰,楚万林,蒲洁,刘梦云,常庆瑞(1453)

有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响 王菲,袁婷,谷守宽,王正银(1461)

玉米对铅胁迫的响应及体内铅化学形态研究 程海宽,张彪,景鑫鑫,杨素勤,赵鹏,孙晓雪,周志云(1468)

硼镉交互作用对水稻吸收积累镉和硼的影响 向猛,黄益宗,蔡立群,保琼莉,黄永春,王小玲,乔敏,胡莹,金姝兰,李季,王斐(1474)

丛枝菌根真菌对不同含盐量湿地土壤中芦苇生长的影响 郭江源,郭伟,毕娜,付瑞英,赵文静,赵仁鑫,王立新(1481)

滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究 陈友媛,孙萍,陈广琳,王宁宁(1489)

不同温度下的土壤微生物呼吸及其与水溶性有机碳和转化酶的关系 吴静,陈书涛,胡正华,张旭(1497)

工业VOCs经济手段和工程技术减排对比性分析 王宇飞,刘昌新,程杰,郝郑平,王铮(1507)

《环境科学》征订启事(1216) 《环境科学》征稿简则(1248) 信息(1163,1194,1248,1424)

重庆金佛山土壤中 PAHs 含量的海拔梯度分布及来源解析

师阳^{1,2}, 孙玉川^{1*}, 梁作兵¹, 任坤¹, 袁道先^{1,3}

(1. 西南大学地理科学学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部, 广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004)

摘要: 高海拔山区的冷凝效应使其成为了持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 的储存库. 利用气相色谱-质谱联用仪 (GC/MS) 测定了重庆金佛山南坡不同海拔高度 10 个表层土壤样品中多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 的含量和组成, 运用比值法和主成分分析法解析其污染来源, 采用 BaP 毒性当量浓度 (TEQ_{BaP}) 评价其生态风险. 结果表明, 土壤中 16 种优控 PAHs 的含量范围是 240 ~ 2 121 ng·g⁻¹, 平均值为 849 ng·g⁻¹, 并以 2 ~ 3 环为主, 7 种致癌性 PAHs 的含量平均占到了总 PAHs 的 17.8%. 研究区土壤中不同环 PAHs 和 PAHs 的总量都随着海拔的升高有增加的趋势, 其中低环的增加趋势最显著, 而高环的波动性较大, 但不同环 PAHs 占总 PAHs 的比例并未随着海拔的升高表现出一定的规律性. 研究区土壤中 PAHs 主要来自于石油源, 石油产品以及煤炭和生物质的燃烧源. 研究区土壤已受到一定程度的污染, 但毒性风险较小.

关键词: 多环芳烃; 土壤; 海拔高度; 源解析; 生态风险评价

中图分类号: X131.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)04-1417-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.04.039

Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing

SHI Yang^{1,2}, SUN Yu-chuan^{1*}, LIANG Zuo-bing¹, REN Kun¹, YUAN Dao-xian^{1,3}

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir, Ministry of Education, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation & Research Base of Karst Eco-Environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resource, Chongqing 408435, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources & Guangxi; Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: The condensation effect has made high mountains the storage vault of durable organic pollutants. This research measured the content and constitutes of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in 10 topsoil samples collected at different altitudes from the south slope of Chongqing Jinfo Mountain by gas chromatograph-mass spectrometer (GC/MC). And the pollution source of PAHs was analyzed by ratio method and principal component regression. The ecological risk of PAHs was evaluated using BaP toxic equivalents (TEQ_{BaP}). The results showed that the concentrations of 16 priority PAHs in topsoil ranged from 240-2 121 ng·g⁻¹. The average value of PAHs was 849 ng·g⁻¹, and 2 to 3-ring PAHs were the dominant compounds. The concentrations of 7 carcinogenic PAHs accounted for 17.8% of total PAHs averagely. In the research area, various-ring PAHs and gross PAHs increased with the rise of altitude. The increase of low-ring PAHs was most obvious, and the volatility of high-ring PAHs was relatively high. But the ratio of different-ring PAHs in gross PAHs showed no regularity with the rise of altitude. The PAHs of soil in the research area mainly came from the oil sources, oil products, and combustion sources of coal and biomass. In the research area, the soil has been polluted to a certain extent, but the toxicity risk is relatively low.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons; soils; altitude; source apportionment; ecologic risk assessment

多环芳烃 (PAHs) 是指由两个或两个以上苯环以线状、角状或簇状排列的一类碳氢化合物, 具有致癌性、致畸性和致突变性. PAHs 具有半挥发性, 在大气中的半衰期较长, 可随气团运动进行长距离传输, 使远离污染源的清洁地区也受到 PAHs 污染. 高山环境由于具有低温、高大气干湿沉降率、山谷风及冬季冰雪覆盖的特点, 是 PAHs 的重要聚集地^[1,2], 已经有研究表明高山湖泊比同一区域的其

他湖泊有更高的 PAHs 沉降量^[3], 且高山湖泊中鱼类的有机污染物含量甚至比低海拔湖泊中高^[4]. 同

收稿日期: 2014-09-26; 修订日期: 2014-11-28

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (XDJK2013B021); 西南大学博士基金项目 (SWU110258); 应对全球气候变化调查综合研究项目 (12120113006700); 重庆市科委院士专项 (cstc2013jcyjys20001)

作者简介: 师阳 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶学与环境变化, E-mail: lastsunny@163.com

* 通讯联系人, E-mail: sunyc@swu.edu.cn

时,高山环境由于气温随海拔的变化,降雨量也明显变化,植被覆盖出现垂直分带,使其不同海拔高度植被对大气中污染物的捕获和污染物的干湿沉降量有所区别.因此一些学者对高山积雪^[5]、动植物^[6,7]和土壤^[8,9]中 POPs 的海拔梯度分布模式进行了研究,发现 POPs 的含量随海拔的升高而成增加趋势,高山生态系统对于污染物具有环境脆弱性.

土壤是环境中 PAHs 的重要储存库和中转站^[10].本文通过测定重庆金佛山南坡不同海拔高度表层土壤中 PAHs 的含量和组成特征,研究 PAHs 随海拔高度的变化趋势,并运用比值法和主成分分析法对研究区 PAHs 污染源进行解析,通过了解 PAHs 在区域内的迁移行为,以期为人类生活所依赖的环境和从中获取的资源保护以及污染治理提供依据.

1 材料与与方法

1.1 研究区概况

金佛山位于四川盆地南缘川黔交界地带,重庆市南川区境内,是一个典型的高山岩溶区,地理坐标为北纬 28°50′~29°20′,东经 107°00′~107°20′,属于亚热带湿润季风气候,湿润多雨、少日多雾.由于山体垂直高差较大,垂直气候分带明显,从山脚到山顶温度差可达 8~10℃,山体上部多年平均气温 8.3℃,降雨量 1 396 mm,并集中分布在 4~10 月,约占全年降水量的 83%;山体下部平均气温为 16.6℃,降雨量 1 287 mm,且土壤和植物分布也具有明显的垂直分带性^[11].

南川区经济发展迅速,铝工业和煤化工是重点打造的两大产业,且在过去很长一段时间里电力能源以火电为主,这些都是 PAHs 的主要污染源^[12].

1.2 样品采集

本研究以金佛山为对象,沿金佛山南坡以 100 m 左右的高程差设置了一共 10 个表层土壤取样点,每个取样点距离公路 100 m 以上,以尽量减少汽车尾气对 PAHs 沉降规律和环境行为分析的影响(图 1).用洁净的不锈钢铲取 0~15 cm 表层土壤,每个样品由 3~5 个点混合,并带回实验室内除去杂物后自然风干,风干后的土样研磨过 60 目筛,置于聚乙烯封口袋内,放入 -20℃ 冰箱保存待测.

1.3 试剂与材料

样品分析所用正己烷、二氯甲烷试剂均为农残级(购自美国 Fisher 公司).无水硫酸钠(分析纯)在马弗炉中于 550℃ 灼烧 8 h 后置于干燥器内冷却

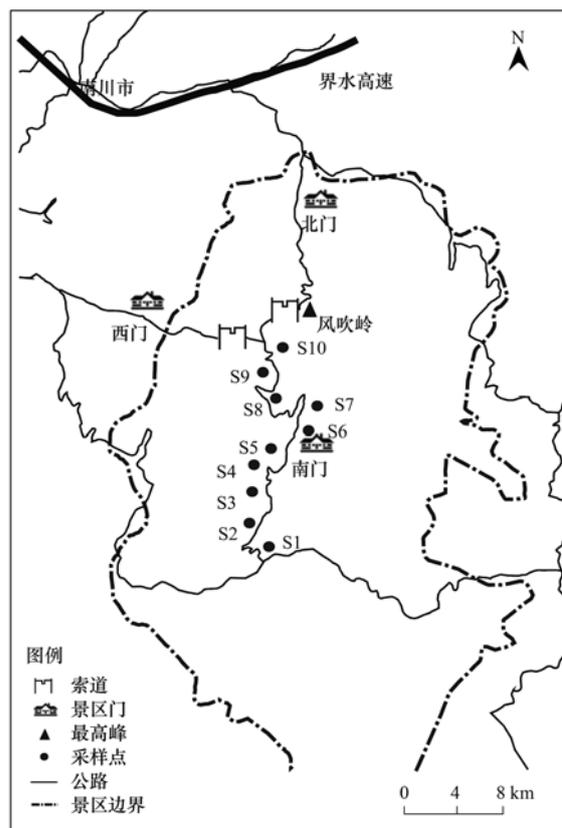


图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Map of the sampling sites

备用,硅胶和氧化铝经抽提、活化和降活平衡后,加入正己烷置于干燥器内备用.滤纸和脱脂棉经抽提风干后干燥备用.

16 种 PAHs 混标:萘(Nap)、苊(Acy)、二氢苊(Ace)、芴(Flu)、菲(Phe)、蒽(Ant)、荧蒽(Fla)、芘(Pyr)、苯并[a]蒽(BaA)、䓛(Chry)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DaA)、苯并[g,h,i]芘(BgP),购自德国 Dr. Ehrenstorfer 公司;5 种回收率指示物:氘代萘(Nap-D₈)、氘代二氢苊(Ace-D₁₀)、氘代菲(Phe-D₁₀)、氘代䓛(Chry-D₁₂)、氘代芘(Per-D₁₂),内标物六甲基苯(HMB),均购自美国 Supelco 公司.

1.4 样品处理与分析

准确称取 10 g 土壤样品,加入 10 g 无水硫酸钠粉末,混匀后用滤纸包样,加回收率指示物,放入索氏抽提器中抽提 24 h.提取液在旋转蒸发器上浓缩后转入硅胶/氧化铝层析柱(层析柱采用湿法装柱,由下至上依次装入 1 cm 无水硫酸钠、8 cm 硅胶、4 cm 氧化铝、2 cm 无水硫酸钠.)分离净化.最后用 70 mL 正己烷和二氯甲烷(7/3,体积比)混合液淋洗样品经

过的层析柱,收集的液体浓缩转移至 2 mL 细胞瓶中,用高纯氮气吹至 0.5 mL,加入内标物待测.

检测仪器为气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS), 色谱柱为 HP-5MS 毛细管柱 (30.0 m × 0.32 mm × 0.25 μm). 载气为高纯氮气,流速为 1 mL·min⁻¹, 进样口温度为 280℃,升温程序为初始温度 50℃,保持 1 min 后以 20℃·min⁻¹升温至 200℃,然后再以 10℃·min⁻¹的速度升温至 290℃,保持 15 min. 无分流进样,进样量 1 μL. EI 电离源 70 eV,离子源温度 300℃,同时采集全扫描数据和选择离子扫描数据,以全扫描数据定性,选择离子扫描数据定量. 使用内标法和多点校正曲线对多环芳烃进行定量分析.

1.5 质量保证与质量控制

每分析 10 个样品同时做空白样品、加标样品、加标平行样品和样品平行样,每个样品在抽提前加入回收率指示物,用于检测实验过程中的损失情况,空白样用于确认实验结果的再现性. 该方法除 Nap 的回收率较低外(平均值为 62%),其他 PAHs 的回收率介于 76%~115% 之间. 以 10 g 土壤样品计算的方法检出下限范围为 0.5~3.1 ng·g⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 土壤中 PAHs 的含量及组成特征

检测发现除 BaA 和 Chry 在 S4 (海拔 1315 m) 取样点土样中未被检出外,16 种美国环境保护署严控的 PAHs 在其他 9 个取样点均被检测到. 表 1 所示,不同海拔高度表层土壤中 ∑₁₆PAHs 含量变化较大,范围为 240~2121 ng·g⁻¹,平均值为 849 ng·g⁻¹. 7 种致癌性 PAHs 的含量也呈现较大的变化,范围为 24.7~526 ng·g⁻¹,平均占到了 ∑₁₆PAHs 的 17.8%.

从组成来看,2~3 环的 PAHs 含量最高,平均为 512 ng·g⁻¹,最高值达 1235 ng·g⁻¹,占总量的质量分数为 41.9%~85.6%,平均值为 65.8%;其次是 5~6 环,平均含量为 279 ng·g⁻¹,最高值为 735 ng·g⁻¹,平均占到总量的 27.7%;最低为 4 环,平均

只占总量的 6.5%. 从 PAH 单体来看,Nap 含量最高,占到总量的 19.4%,紧随其后的是 Flu 和 Phe,分别占总量的 18.6% 和 16.7%;其次,高环的 BgP 的含量也较高,达到 12.7%.

表 1 金佛山南坡表层土壤中 PAH 单体的含量及百分比¹⁾

Table 1 Concentrations and contributions of individual PAHs in surface soil from the south slope of Jinfo Mountain

PAHs	含量/ng·g ⁻¹		占 ∑ PAHs 质量分数/%	
	范围	平均值	范围	平均值
Nap	37.9~494	165	13.3~26.3	19.4
Acy	8.8~27.7	13.7	1.1~4.1	2.1
Ace	23.2~160	63.1	5.0~11.9	8.1
Flu	62.3~289	135	9.9~29.9	18.6
Phe	50.0~248	128	10.3~24.5	16.7
Ant	2.0~17.3	7.8	0.4~2.9	0.9
Fla	5.8~44.1	18.7	1.2~3.4	2.3
Pyr	2.2~31.8	12.7	0.7~2.3	1.3
BaA*	N.D~12.9	3.4	0~0.9	0.3
Chry*	N.D~62.7	23.7	0~4.0	2.5
BbF*	8.3~142	48.3	2.1~9.9	5.1
BkF*	8.7~139	47.7	2.1~9.8	5.1
BaP*	1.8~44.8	14.1	0.4~3.2	1.4
InP*	0.1~123	22.4	N.D~5.8	1.7
DaA*	N.D~62.1	15.1	N.D~5.6	1.7
BgP	2.2~363	132	0.9~38.6	12.7
2+3 环	203~1235	512	41.9~85.6	65.8
4 环	7.9~151	58.5	2.7~10.5	6.5
5+6 环	21.2~735	279	8.8~52.5	27.7
∑ ₇ PAHs	24.7~526	175	7.2~36.5	17.8
∑ ₁₆ PAHs	240~2121	849		

1) * 表示致癌性 PAHs, ∑₇PAHs 为 7 种致癌性 PAHs 总量, ∑₁₆PAHs 为 16 种 PAHs 总量, N.D 为低于检测限

2.2 土壤中 PAHs 含量随海拔高度的变化

把土壤中 PAHs 的含量与土壤有机碳 (TOC) 进行相关分析,结果见表 2. 从中可知,除 DaA 和 BgP 外,其余的 PAH 化合物及 PAHs 总量均与土壤 TOC 显著相关,表明土壤 TOC 是影响 PAHs 含量的一个重要因素. 有研究表明,高环的 PAHs 由于强亲脂性、难降解性比挥发性较高、溶解性较大的中低环更易被土壤有机质吸附^[13]. 但研究区土壤中高环的 PAHs 并没有表现出与 TOC 更强的相关性,所以山区土壤 PAHs 含量除受土壤 TOC 影响外,还受到海拔高度等其他多因素的影响.

表 2 表层土壤中 PAH 化合物与土壤 TOC 相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient between PAH and TOC in surface soil

	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	BaA
TOC	0.775**	0.867**	0.890**	0.869**	0.857**	0.886**	0.845**	0.715*	0.832**
	Chry	BbF	BkF	BaP	InP	DaA	BgP	∑ ₁₆ PAHs	
TOC	0.817**	0.788**	0.787**	0.668*	0.840**	0.393	0.217	0.809**	

1) * 为 $P < 0.05$ 显著相关, ** 为 $P < 0.01$ 显著相关

如图 2 所示,对不同环数 PAHs 的含量与海拔高度进行相关分析,可看出土壤中各环 PAHs 的含量都与海拔呈正相关,即随着海拔的升高各环 PAHs 的含量均增加. 但不同环的 PAHs 随海拔变化的相关系数表现为 2~3 环 > 4 环 > 5~6 环,且 5~6 环的统计分析值 $P > 0.05$,说明 2~3 环 PAHs 随海拔增加趋势最明显,而 5~6 环的 PAHs 与海拔的相关性不显著.

据报道^[14],燃烧排放源中 Phe 和 Ant 的含量相近,石油源中的 Phe/Ant 值则相对较高,一般大于 10,而在环境中 Ant 更易光解,所以可用 Phe/Ant 的值来判断 PAHs 是来自于大气远距离传输还是本地排放. 南坡土壤的 Phe/Ant 平均值为 24,说明 Ant 已经发生了大量光降解,而金佛山常年少日多雾,平均每年有 263 个雾天,所以金佛山的 PAHs 极可能主要来自大气的远距离传输,在传输过程中已经发生降解,同时本地石油源也可能有部分贡献. Fla/Pyr 值也是判断 PAHs 是否进行了长距离迁移的指标,Fla 在热力学上比 Pyr 稳定,石油裂解物中 Fla/Pyr 小于 1^[15],而南坡土壤的该比值在 1.4~3.1 之间,说明本地石油源不是 PAHs 的主要污染源,大气传输才是主要贡献者. 一般来说,分子量较小的 PAHs 多以气态形式存在于大气中,它们相对更易挥发,更易随大气发生长距离传输,在高海拔处累积;而随着环数增加,分子量较大的 PAHs 更趋向于吸附在大气颗粒物表面,由于自生重力作用易于在较低海拔处沉降,所以 5~6 环 PAHs 含量随海拔的递增变化不显著. 有研究指出 BgP 是交通排放的特征 PAHs^[16,17],BbF 和 InP 是以汽油或柴油为燃料的机动车尾气排放物^[18,19]. 表 1 中显示 6 环的 BgP 含量较高,平均占 \sum_{16} PAHs 含量的 12.7%,同 5 环的 BbF 和 InP 一起占了 5~6 环 PAHs 含量的 70% 以上,它们含量的变化对 5~6 环 PAHs 总含量的变化趋势影响显著. 所以 5~6 环 PAHs 含量随海拔的波动性较大,相关性不显著,可能与公路车辆的尾气排放有密切关系.

研究区不同海拔高度土壤中 16 种 PAHs 总含量 (\sum_{16} PAHs) 和 7 种致癌性 PAHs 含量 (\sum_7 PAHs) 的分布见图 3. 从中可以看出:土壤中总 PAHs 含量沿海拔变化波动性较大,在 S5 (1 417 m) 和 S10 (1 978 m) 两个采样点 \sum_{16} PAHs $> 1 000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,在 S9 (1 856 m) 采样点 \sum_{16} PAHs

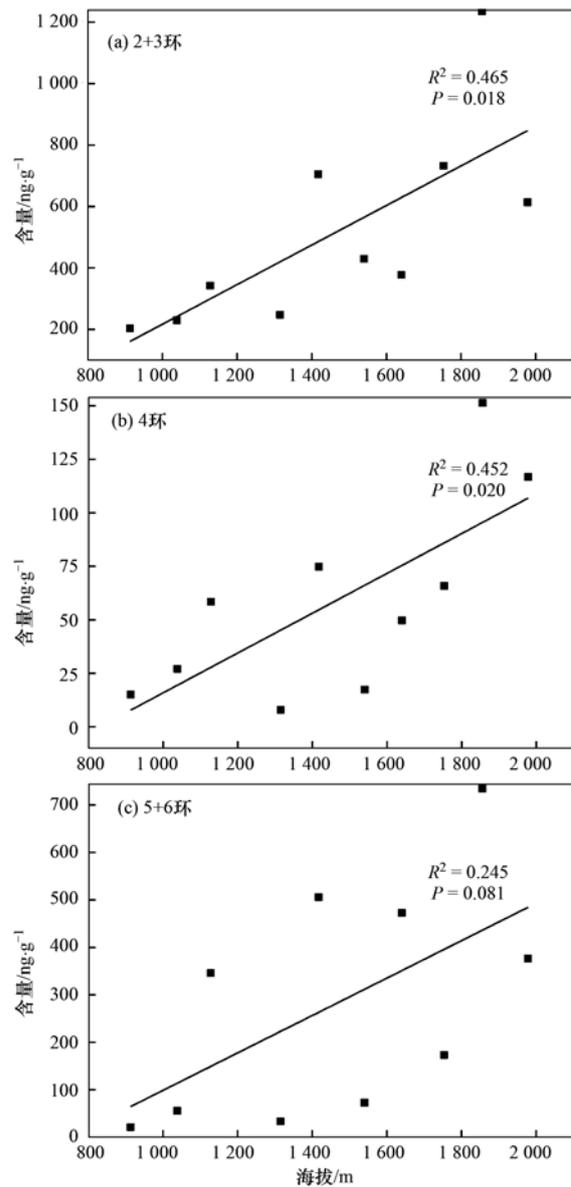


图 2 土壤中不同环 PAHs 随海拔的变化趋势

Fig. 2 Change trend of different-ring PAHs in soil with altitude

$> 2 000 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$,而在 S1 (913 m)、S2 (1 038 m) 和 S4 (1 315 m) 采样点 \sum_{16} PAHs $< 500 \text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$. 在 S3、S5 和 S9 采样点,PAHs 总含量出现锐增,这主要是由于在 S3 周围有部分居民居住,以木材、秸秆等生物质和煤为主要燃料,这些物质在燃烧过程中释放了部分 PAHs. 由于金佛山盛产方竹笋,在 S5 采样点附近每年都会有当地居民烘烤竹笋,燃烧释放 PAHs,并经过多年累积使表层土壤的 PAHs 含量达到较高浓度. S9 采样点土壤中 PAHs 含量的异常高值可能与所处的地形有关,在群山的作用下形成封闭环流,使 PAHs 不易扩散,并在高海拔地区的强降水条件下冲刷到地表富集^[20]. 有研究发现金佛

山水房泉泉域土壤剖面中表层土壤的 PAHs 含量低于 30~50 cm 土层中的 PAHs 含量,也即 PAHs 向土壤深部传输的速率较快^[21],所以土壤的这种漏渗现象也可能是造成山顶 S10 采样点 PAHs 含量低于 S9 的原因. 整体来说,PAHs 总含量随海拔高度的增加呈上升的趋势 ($R^2 = 0.43$),表明高山地区有利于 PAHs 的累积,自然环境更易受到污染物的影响. 致癌性 PAHs 含量随海拔高度的变化并不明显,说明即使在高山地区 \sum_{16} PAHs 在不断的累积,但相对而言致癌性 PAHs 不易累积.

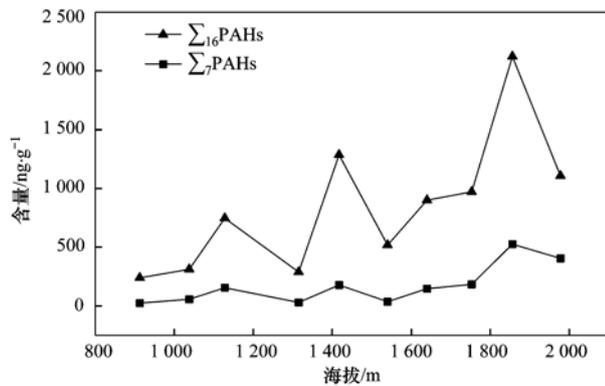


图3 土壤中 PAHs 含量随海拔的变化趋势

Fig. 3 Change trend of PAHs content in soil along with the change of altitude

图4为PAHs组成特征随海拔高度的变化,可以看出不同环PAHs占总PAHs的比例并未随海拔的升高表现出一定的规律性,这与王小萍等^[9]在研究珠穆朗玛峰地区土壤中PAHs的海拔梯度分布时低环PAHs的比例随海拔升高而增大的研究结果不同. 主要原因可能在于珠穆朗玛峰地区几乎无人活动,PAHs基本都来自于大气的远距离传输和沉降,本研究区内还有部分居民和驾车游客,PAHs除了主要来自大气沉降外,他们的燃烧活动和汽车尾气的排放是另外的PAHs源.

2.3 土壤中 PAHs 的来源解析

环境中 PAHs 主要来自于人为源,包括化石燃料、生物燃料的不完全燃烧和汽车尾气的排放,以及原油在开采、运输、生产和使用过程中的泄漏及排污^[22]. 由于 PAHs 来源复杂,不同的成因,其结构和组分也存在差异性,所以可用同分异构体比值法^[23]来分析环境中 PAHs 的来源. 本研究选取了分子量相同且具有一定热力学稳定性的 Fla/(Fla + Pyr)和 InP/(InP + BgP)比值来判断 PAHs 来源. 分析结果如图5,除一个点外 Fla/(Fla + Pyr)的比值均

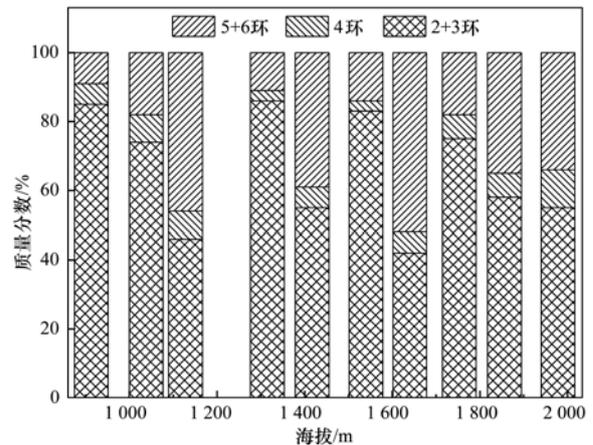


图4 PAHs 组成随海拔高度的变化

Fig. 4 Change trend of PAHs composition in soil along with the change of altitude

大于 0.5, 指示 PAHs 主要来自煤和生物质燃料的燃烧. InP/(InP + BgP) 比值在小于 0.2、0.2~0.5 和大于 0.5 区间都有分布,并主要集中在小于 0.2 段,表明土壤样品中的 PAHs 包括石油源,石油、煤和生物质的燃烧源.

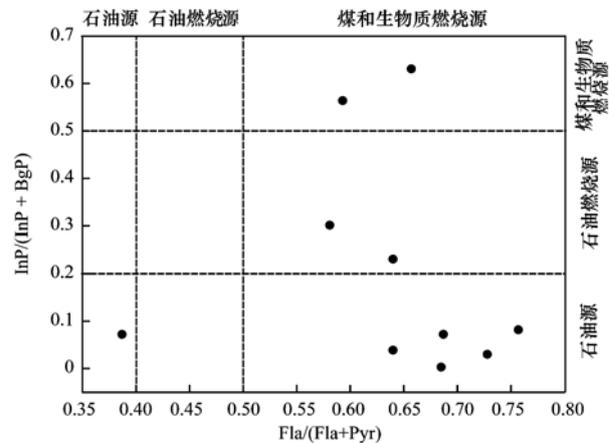


图5 研究区土壤中 PAHs 来源诊断

Fig. 5 Source diagnosis of PAHs in soil of the study area

为了更准确地分析研究区土壤中 PAHs 的来源,对 10 个土壤样品中的 16 种 PAHs 进行了主成分分析 (PCA),分析提取了 3 个主成分,累积方差贡献率为 88.15% (表 3). 主成分 1 的方差贡献率为 64.50%,主要为 3 环和 3 环以上的 PAHs. 其中 Flu、Phe、Ant、Fla、Pyr、BkF、BaP 是煤炭燃烧的指示产物^[16,18,24,25]; BaA、BbF、InP 是以柴油或汽油为燃料的机动车尾气排放物^[18,19]; Ace 是焦炉的主要指示物^[16]. 因此,主成分 1 反映土壤中的 PAHs 主要来源于煤炭和石油产品的燃烧与炼焦的混合源. 主成分 2 的方差贡献率为 14.86%,主要包

括 Nap 和 Acy. Acy 主要存在于焦炭中,且焦炉燃烧会产生大量的 Nap^[16]. 因此,主成分 2 指示焦炭源. 主成分 3 的方差贡献率为 8.79%,主要包括 BgP. BgP 主要来自石油的高温燃烧^[26],指示了石油燃烧源.

表 3 表层土壤中各 PAHs 的因子载荷¹⁾

PAHs	主成分		
	1	2	3
Nap	0.614	0.712	-0.172
Acy	0.598	0.707	-0.067
Ace	0.843	0.407	0.164
Flu	0.891	0.315	0.233
Phe	0.943	-0.028	0.133
Ant	0.813	-0.293	0.253
Fla	0.973	-0.145	-0.117
Pyr	0.957	-0.143	0.019
BaA	0.626	-0.555	0.298
Chry	0.926	0.107	-0.312
BbF	0.600	-0.508	-0.149
BkF	0.932	0.068	-0.296
BaP	0.875	-0.057	-0.395
InP	0.755	-0.428	0.275
DaA	0.868	-0.230	-0.042
BgP	0.257	0.394	0.817
方差贡献率/%	64.50	14.86	8.79
累积方差贡献率/%	64.50	79.36	88.15

1) 黑体数据为各主成分中的主要 PAH 单体因子载荷

结合研究区的环境背景,南川区在过去很长一段时间内电力能源以火电为主,虽然现已停止火力发电,但在火电厂旁的表层土壤中 PAHs 平均含量仍大于 $1000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,区内的焦化厂和铝矿厂常年进行着大量的生产活动,燃烧产生的 PAHs 随浓烟排入大气中,其周边土壤的 PAHs 含量相对比已经停工的火电厂高出一倍多 ($>2000 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$),其次还有砖厂等小规模以煤炭为燃料的厂排放着 PAHs.

表 4 PAHs 土壤质量标准和 PAHs 毒性当量因子

PAHs	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr
荷兰控制标准	15	—	—	—	45	50	15	—
加拿大控制标准	100	—	—	—	100	—	—	100
TEFs	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.01	0.001	0.001
PAHs	BaA	Chry	BbF	BkF	BaP	InP	DaA	BgP
荷兰控制标准	20	20	—	25	25	25	—	20
加拿大控制标准	100	—	100	100	100	—	100	100
TEFs	0.1	0.01	0.1	0.1	1	0.1	1	0.01

3 结论

(1) 金佛山土壤中不同环 PAHs 和 PAHs 的总

这些源排放进入大气的 PAHs 除少量在周围发生沉降外,大部分随大气迁移. 在金佛山上还有部分居民居住,不管是平常的生活燃烧活动还是方竹笋成熟季节的烤笋都会产生 PAHs,当然大量自驾游汽车尾气的排放也是 PAHs 的污染源. 此外,还有与南川紧邻的贵州省和重庆其他区县通过大气长距离传输带入的 PAHs.

2.4 土壤中 PAHs 的生态风险评价

中国目前尚未对土壤中 PAHs 的含量做出限定,本研究采用荷兰和加拿大土壤质量评价标准中的限值对 PAH 单体进行污染程度的评价. 结合表 1 和表 4 可以看出:相对于荷兰控制标准^[27],研究区各采样点土壤中的 Nap 和 Phe 都已超标,且超标严重,其次, BkF 和 BgP 也多处超标严重. 同样,相对加拿大控制标准^[28], Nap、Phe 和 BgP 也多处超标,其余 PAH 单体则少量超标或未超标. 表明研究区表层土壤已受到一定程度的 PAHs 污染.

低分子量 PAHs 通常呈现急剧毒性,而某些高分子量的 PAHs 具有潜在致癌性^[29,30]. 为了评价环境的生态风险,常以 BaP 为标准来计算样品中 PAHs 的总毒性当量浓度 (TEQ_{BaP})^[31],计算公式如下:

$$\text{TEQ}_{\text{BaP}} = \sum_{i=1}^n (c_i \times \text{TEF}_i)$$

式中, c_i 是每个 PAH 单体的质量浓度, $\text{ng} \cdot \text{g}^{-1}$; TEF_i 是其所对应的毒性当量因子(列于表 4). 本研究计算了 10 个采样点荷兰土壤质量标准中规定限制的 10 种 PAHs(包括 Nap、Phe、Ant、Fla、BaA、Chry、BkF、BaP、InP、BgP)的总毒性当量浓度,范围是 $2.9 \sim 76.7 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 $23.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$. 按荷兰标准所计算的 $\text{TEQ}_{\text{BaP荷}} = 33.0 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,其中,只有两个采样点土壤样品的 TEQ_{BaP} 值超过此标准,所以研究区土壤的毒性(致癌)风险较小.

量都随着海拔的升高有增加的趋势,但致癌性 PAHs 含量随海拔高度的变化并不明显,说明高山地区有利于 PAHs 的累积,自然环境更易受到污染物的影

响,但相对而言致癌性 PAHs 不易累计。

(2)金佛山土壤中 PAHs 主要来自于石油源,石油产品以及煤炭和生物质的燃烧源,其中大气沉降是主要贡献者,其次是当地居民的燃烧活动和汽车尾气排放。

(3)依照荷兰和加拿大的土壤质量评价标准,金佛山土壤已受到一定程度的 PAHs 污染,但毒性风险较小。

致谢: 江泽利、于正良、王尊波在野外采样和实验室内分析中给予了帮助,在此表示由衷的感谢!

参考文献:

- [1] Franz T P, Eisenreich S J. Snow scavenging of polychlorinated biphenyls and polycyclic aromatic hydrocarbons in Minnesota [J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32** (12): 1771-1778.
- [2] Wania F, Semkin R, Hoff J T, *et al.* Modelling the fate of non-polar organic chemicals during the melting of an Arctic snowpack [J]. *Hydrological Processes*, 1999, **13**(14-15): 2245-2256.
- [3] Muri G, Wakeham S G, Faganeli J. Polycyclic aromatic hydrocarbons and black carbon in sediments of a remote alpine lake (Lake Planina, northwest Slovenia) [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(5): 1009-1016.
- [4] Donald D B, Syrgiannis J, Crosley R W, *et al.* Delayed deposition of organochlorine pesticides at a temperate glacier[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33** (11): 1794-1798.
- [5] Blais J M, Schindler D W, Muir D C G, *et al.* Accumulation of persistent organochlorine compounds in mountains of western Canada[J]. *Nature*, 1998, **395**(6702): 585-588.
- [6] Blais J M, Wilhelm F, Kidd K A, *et al.* Concentrations of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in amphipods (*Gammarus lacustris*) along an elevation gradient in mountain lakes of western Canada[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(11): 2605-2613.
- [7] Davidson D A, Wilkinson A C, Blais J M, *et al.* Orographic cold-trapping of persistent organic pollutants by vegetation in mountains of western Canada [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(2): 209-215.
- [8] Migaszewski Z M. Determining organic compound ratios in soils and vegetation of the Holy Cross Mts, Poland[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1999, **111**(1-4): 123-138.
- [9] 王小萍,姚檀栋,丛志远,等. 珠穆朗玛峰地区土壤和植被中多环芳烃的含量及海拔梯度分布[J]. *科学通报*, 2006, **51**(21): 2517-2525.
- [10] Cousins I T, Beck A J, Jones K C. A review of the processes involved in the exchange of semi-volatile organic compounds (SVOC) across the air - soil interface[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **228**(1): 5-24.
- [11] 杨平恒,章程,孙玉川,等. 土壤环境因子对土下岩溶溶蚀速率的影响——以重庆金佛山国家自然保护区为例[J]. *中国地质*, 2007, **34**(5): 920-926.
- [12] 孙玉川,沈立成,袁道先. 表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2091-2098.
- [13] 蓝家程,孙玉川,师阳,等. 岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 2937-2943.
- [14] Gschwend P M, Hites R A. Fluxes of polycyclic aromatic hydrocarbons to marine and lacustrine sediments in the northern United States[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, **45** (12): 2359-2367.
- [15] Simó R, Colom-Altés M, Grimalt J O, *et al.* Background levels of atmospheric hydrocarbons, sulphate and nitrate over the western Mediterranean[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1991, **25**(8): 1463-1471.
- [16] Simcik M F, Eisenreich S J, Liou P J. Source apportionment and source/sink relationships of PAHs in the coastal atmosphere of Chicago and Lake Michigan [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(30): 5071-5079.
- [17] Nielsen T, Jørgensen H E, Larsen J C, *et al.* City air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons and other mutagens: occurrence, sources and health effects[J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **189-190**: 41-49.
- [18] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: A comparison of three methods[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(9): 1873-1881.
- [19] Li C K, Kamens R M. The use of polycyclic aromatic hydrocarbons as source signatures in receptor modeling [J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1993, **27** (4): 523-532.
- [20] 柯艳萍,祁士华,陈静,等. 四川绵竹—阿坝剖面土壤中多环芳烃含量和来源及其生态风险[J]. *安全与环境工程*, 2013, **20**(4): 79-83.
- [21] 孙玉川,沈立成,袁道先. 多环芳烃在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移及控制因素[J]. *土壤学报*, 2014, **51**(4): 795-805.
- [22] Wilcke W, Amelung W, Krauss M, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons(PAH) patterns in climatically different ecological zones of Brazil [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, **34** (10): 1405-1417.
- [23] 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.
- [24] Kannan K, Johnson-Restrepo B, Yohn S S, *et al.* Spatial and temporal distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from Michigan Inland Lakes [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(13): 4700-4706.
- [25] Zuo Q, Duan Y H, Yang Y, *et al.* Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil in Tianjin, China [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 303-310.
- [26] 王震. 辽宁地区土壤中多环芳烃的污染特征、来源及致癌风

- 险[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [27] VROM. Environmental quality objectives in the Netherlands. A Review of Environmental Quality Objectives and Their Policy Framework in the Netherland [M]. The Hague: Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, 1994.
- [28] 高媛, 祁士华, 许峰, 等. 成都经济区土壤中多环芳烃的含量及其分布特点[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(1): 11-14.
- [29] Douben P E T. PAHs: An Ecotoxicological Perspective [M]. New York: Wiley, 2003.
- [30] Witt G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 31(4-12): 237-248.
- [31] Nadal M, Schuhmacher M, Domingo J L. Levels of PAHs in soil and vegetation samples from Tarragona County, Spain [J]. Environmental Pollution, 2004, 132(1): 1-11.
-

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjxx.ac.cn>)。该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用。目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行。作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可。如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系。

邮政地址:北京市海淀区双清路18号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:hjxx@rcees.ac.cn

网 址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Comparative Analysis and Inspiration of Air Quality Index Between China and America	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, LI Wen-tao, <i>et al.</i>	(1141)
Regional Source Apportionment of PM _{2.5} in Beijing in January 2013	LI Xuan, NIE Teng, QI Jun, <i>et al.</i>	(1148)
Formation Mechanism of a Serious Pollution Event in January 2013 in Beijing	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i>	(1154)
Soluble of Metals within TSP in Shanghai	CHANG Yan, FENG Chong, QU Jian-guo, <i>et al.</i>	(1164)
Analysis of Component Spectral Characteristics of PM ₁₀ -Bound PAHs and the Influence of Weather Conditions During Spring in Xiamen	ZHANG Jian, FAN Shu-xian, SUN Yu, <i>et al.</i>	(1173)
Tracing Sources of Sulfate Aerosol in Nanjing Northern Suburb Using Sulfur and Oxygen Isotopes	WEI Ying, GUO Zhao-bing, GE Xin, <i>et al.</i>	(1182)
Analysis of an Air Pollution Process Using LiDAR in Nanjing, Spring of 2014	BAO Qing, HE Jun-liang, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(1187)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM _{2.5-10} in Mountain Background Region of East China in Spring	SU Bin-bin, ZHANG Zhi-sheng, TAO Jun, <i>et al.</i>	(1195)
Emission of Particulate Matter, Organic and Elemental Carbon from Burning of Fallen Leaves	YANG Wei-zong, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i>	(1202)
Emission Inventory of Crop Residues Field Burning and Its Temporal and Spatial Distribution in Sichuan Province	HE Min, WANG Xing-rui, HAN Li, <i>et al.</i>	(1208)
Marine Emission Inventory and Its Temporal and Spatial Characteristics in the City of Shenzhen	YANG Jing, YIN Pei-ling, YE Si-qi, <i>et al.</i>	(1217)
Characteristic of Ultrafine Particles Transferring Through Building Envelopes	SUN Zai, CHEN Qiu-fang, CAI Zhi-liang, <i>et al.</i>	(1227)
Airborne Fungal Aerosol Concentration and Distribution Characteristics in Air-Conditioned Wards	ZHANG Hua-ling, FENG He-hua, FANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1234)
Effect of Below-cloud Secondary Evaporation in Precipitations over the Loess Plateau Based on the Stable Isotopes of Hydrogen and Oxygen	JIN Xiao-gang, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i>	(1241)
Effect of the Runoff-sediment Control of the Xiaolangdi Reservoir on DOC Transport	ZHANG Yong-ling, WANG Ming-shi, DONG Yu-long	(1249)
Effects of Long-term Implementation of the Flow-Sediment Regulation Scheme on Grain and Clay Compositions of Inshore Sediments in the Yellow River Estuary	WANG Miao-miao, SUN Zhi-gao, LU Xiao-ning, <i>et al.</i>	(1256)
Influences of Biological Processes on Geochemical Characteristics: An Example of a Mountain Karst Pool in Spring Season	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, ZHAO Rui-yi, <i>et al.</i>	(1263)
Variation Characteristics and Sources of Heavy Metals in an Urban Karst Groundwater System during Rainfall Event	REN Kun, YANG Ping-heng, JIANG Ze-li, <i>et al.</i>	(1270)
Risk Assessment of Trihalomethane Production Using the Beijiang River and the Pearl River, Guangzhou as Drinking Water Sources	ZHONG Hui-zhou, WEI Chao-hai	(1277)
Spatial Variability Characteristics of Water Quality and Its Driving Forces in Honghu Lake During High Water-level Period	LI Kun, WANG Ling, LI Zhao-hua, <i>et al.</i>	(1285)
Nutrient Exchange Between Meixi River and Yangtze River Due to the Typical Interaction Process of the Three Gorges Reservoir and Its Tributary	CAO Man, FU Jia-nan, ZHOU Zi-ran, <i>et al.</i>	(1293)
Effects of Nutrient Inputs on Changes of Phosphorus Forms and Phytoplankton Growth in Taihu Lake	WANG Rui-zhe, WANG Pei-fang, REN Ling-xiao, <i>et al.</i>	(1301)
Community Dynamics of Phytoplankton and Related Affecting Factors in a Eutrophicated Small Pond	YANG Wen, ZHU Jin-yong, ZHANG Ke-xin, <i>et al.</i>	(1309)
Yearly Changes of Phytoplankton Community in the Ecology-monitoring Area of Changli, Hebei in Summer	LIANG Xiao-lin, YANG Yang, WANG Yu-liang, <i>et al.</i>	(1317)
Improvement of River Water Quality by Aeration: WASP Model Study	ZHU Wen-bo, WANG Hong-xiu, LIU Cui, <i>et al.</i>	(1326)
Radiolytic Decomposition of Ciprofloxacin Hydrochloride in Aqueous Solution Using γ Irradiation	ZHU Sheng-nan, GUO Zhao-bing, ZHAO Yong-fu, <i>et al.</i>	(1332)
Removal of Antimony in Wastewater by Electrochemical Hydride Generation and the Recovery of Antimony	CHEN Jing-jing, ZHANG Guo-ping, LI Hai-xia, <i>et al.</i>	(1338)
Degradation of <i>m</i> -Cresol with Fe-MCM-41 in Catalytic Ozonation	SUN Wen-jing, WANG Ya-min, WEI Huang-zhao, <i>et al.</i>	(1345)
Bioanode and Inversion of Bioanode to Biocathode for the Degradation of Antibiotic Chloramphenicol	KONG De-yong, LIANG Bin, YUN Hui, <i>et al.</i>	(1352)
Photolysis of Gaseous HNO ₃ on the α -Fe ₂ O ₃ Films Under 308 nm UV Light	LU Jun, SUN Yun-dong, XIE Jing-jing, <i>et al.</i>	(1359)
Simultaneous Determination of Hydroquinone and Catechol Based on L-Histidine-Erythrosine Composite Film Modified Glassy Carbon Electrode	HE Jia-hong, XU Qiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i>	(1365)
Preparation and Characterization of Quinone Functional Polymer Biocarrier (PET-AQS) for Bionitrification Catalysis	XU Qing, HOU Zheng-hao, TIAN Xiu-lei, <i>et al.</i>	(1374)
Kinetic Characteristics of Degradation of Geosmin and 2-Methylisoborneol by <i>Bacillus subtilis</i>	MA Nian-nian, LUO Guo-zhi, TAN Hong-xin, <i>et al.</i>	(1379)
Screening of a Highly Efficient Quinoline-degrading Strain and Its Enhanced Biotreatment on Coking Waste Water	LI Jing, LI Wen-ying	(1385)
Effect of Ferric Iron on Nitrogen Immigration and Transformation and Nitrous Oxide Emission During Simultaneous Nitrification Denitrification Process	LI Hao, YAN Yu-jie, XIE Hui-jun, <i>et al.</i>	(1392)
Running Condition and Bacterial Community Associated with the Partial Nitritation System	ZHAO Zhi-rui, JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, <i>et al.</i>	(1399)
Using Excess Activated Sludge Treated 4-Chlorophenol Contained Waste Water to Cultivate <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Lu, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i>	(1406)
Effects of Total Nitrogen and BOD ₅ /TN on Anaerobic Ammonium Oxidation-Denitrification Synergistic Interaction of Mature Landfill Leachate in Aged Refuse Bioreactor	YANG Ying-ying, CHEN Yi, LI Ming-jie, <i>et al.</i>	(1412)
Altitudinal Gradient Distribution and Source Analysis of PAHs Content of Topsoil in Jinfo Mountain, Chongqing	SHI Yang, SUN Yu-chuan, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i>	(1417)
Characteristics and Inputs of Cd Contamination in Paddy Soils in Typical Mining and Industrial Areas in Youxian County, Hunan Province	ZHANG Min, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1425)
Effects of Canalization on the Iron Deposition in Sanjiang Plain	SU Wen-hui, YU Xiao-fei, WANG Guo-ping, <i>et al.</i>	(1431)
Effects of Phosphate and Zeolite on the Transformation of Cd Speciation in Soil	WANG Xiu-li, LIANG Cheng-hua, MA Zi-hui, <i>et al.</i>	(1437)
Leaching Remediation of Copper and Lead Contaminated Lou Soil by Saponin Under Different Conditions	DENG Hong-xia, YANG Ya-li, LI Zhen, <i>et al.</i>	(1445)
Accumulation Characteristics and Evaluation of Heavy Metals in Soil-Crop System Affected by Wastewater Irrigation Around a Chemical Factory in Shenmu County	QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, <i>et al.</i>	(1453)
Effects of Organic and Inorganic Slow-Release Compound Fertilizer on Different Soils Microbial Community Structure	WANG Fei, YUAN Ting, GU Shou-kuan, <i>et al.</i>	(1461)
Response of Maize to Lead Stress and Relevant Chemical Forms of Lead	CHENG Hai-kuan, ZHANG Biao, JING Xin-xin, <i>et al.</i>	(1468)
Effect of Boron-antimony Interaction on the Uptake and Accumulation of Antimony and Boron by Rice Seedling	XIANG Meng, HUANG Yi-zong, CAI Li-qun, <i>et al.</i>	(1474)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth of Reeds in Wetland Soils with Different Salt Content	GUO Jiang-yuan, GUO Wei, BI Na, <i>et al.</i>	(1481)
A Contrastive Study on Salt-alkaline Resistance and Removal Efficiency of Nitrogen and Phosphorus by <i>Phragmites australis</i> and <i>Typha angustifolia</i> in Coastal Estuary Area	CHEN You-yuan, SUN Ping, CHEN Guang-lin, <i>et al.</i>	(1489)
Soil Microbial Respiration Under Different Soil Temperature Conditions and Its Relationship to Soil Dissolved Organic Carbon and Invertase	WU Jing, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i>	(1497)
Comparison Analysis of Economic and Engineering Control of Industrial VOCs	WANG Yu-fei, LIU Chang-xin, CHENG Jie, <i>et al.</i>	(1507)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2015年4月15日 第36卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 4 Apr. 15, 2015

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行