

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f₂ 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪菅雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氮自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中运移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源

边璐, 李田*, 侯娟

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 以上海市内环高架道路径流中的多环芳烃(PAHs)为研究对象, 于 2012 年 7~9 月, 实测了 8 场降雨的道路径流中的 PAHs, 了解了城市交通干道径流中 PAHs 的污染状况, 并采用正定矩阵因子分解(PMF)和主成分分析/多元线性回归(PCA/MLR)两种模型对径流中的 PAHs 进行源解析. 因子分析表明, 径流中 $\sum 16$ PAHs 的浓度范围为 $1.585 \sim 7.523 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 两种模型对于 PAHs 的来源有较为一致的判定. 交通源为高架道路地表径流中 PAHs 的主要来源, PMF 和 PCA/MLR 得到的源贡献率分别为 37.7% 和 44.3%, 其余 3 种来源石油源、燃气源和其他源, PMF 得到的源贡献率依次为 21.9%、26.4%、14.0%; 与之对应, PCA/MLR 得到的源贡献率依次为 28.9%、18.3%、8.5%. PMF 和 PCA/MLR 模型的计算值与实测值拟合较好, 相关系数分别为 0.961 和 0.997.

关键词: 多环芳烃; 地表径流; 源解析; 正定矩阵因子分解; 主成分分析/多元线性回归

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3840-07

Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China

BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Runoff samples of the Shanghai elevated inner highway were collected and analyzed during the rainy season of 2012 to investigate the pollution characteristics of 16 USEPA priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Total PAHs concentrations ranged from 1.585 to $7.523 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. The sources of PAHs in the runoff were determined by using 2 source apportionment models, positive matrix factorization (PMF) and principal component analysis with multivariate linear regression (PCA/MLR). Source profiles and contributions obtained from the two models were comparable. For PMF, PAHs mainly came from vehicle emissions (37.7%), followed by petroleum products (21.9%), combustive gas (26.4%), and other sources (14.0%). As for PCA/MLR, it was 44.3%, 28.9%, 18.3%, 8.5%, respectively. The relation between the modeled total PAH concentrations and the measured concentrations was strong, with the correlation coefficient of 0.961 for PMF and 0.997 for PCA/MLR.

Key words: PAHs; road runoff; source apportionment; PMF; PCA/MLR

多环芳烃(PAHs), 是一类具有致癌、致畸和致突变性的持久性有机污染物. 城市道路交通活动频繁, 汽车尾气排放、燃油泄漏、路面老化、沥青路面与轮胎的摩擦以及大气干沉降, 使得道路表面聚积大量的 PAHs, 随径流冲刷进入水体, 成为水环境中 PAHs 的主要来源^[1~3]. 因此, 了解道路径流中 PAHs 的含量、来源及源贡献率对于控制水体中 PAHs 的污染水平有重要意义. 国内外学者对此展开了一系列研究.

Walker 等^[4]对进入 Passaic 河的 Newark 路面径流进行了调查, 6 种 PAHs 的总浓度达 $28.7 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; Diblasi 等^[5]对美国 Maryland University 的停车场的路面径流中的 16 种优控 PAHs 进行了监测, 浓度范围为 $0.29 \sim 5.16 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; Menzie 等^[6]分

析了 Massachusetts 东部城市路面径流中 39 种 PAHs 的含量, 平均浓度为 $12.1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$; Stein 等^[7]调查了 Los Angeles 地区地表径流中 26 种 PAHs 的污染情况, EMC 值的范围为 $0.14 \sim 5.82 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 张巍等^[8,9]对北京市道路地表径流中 PAHs 的污染特征进行了研究, 并采用 PCA/MLR 分析 PAHs 的来源, 认为机动车排放源和燃煤源是研究区域地表径流中 PAHs 的主要来源; 韩景超等^[10]测得上海大渡河路 2010 年 8 月单场次降雨地表径流中 16 种 PAHs 的

收稿日期: 2012-12-08; 修订日期: 2013-03-26

基金项目: 国家科技支撑计划后世博专项(2010BAK69B16, 10dz1200402)

作者简介: 边璐(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: peggy.bl@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

浓度为 $3.709 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

PMF 和 PCA/MLR 均属于定量源解析方法,已成功应用于大气气溶胶、土壤和沉积物中 PAHs 的源解析。Sofowote 等^[11]采用 PMF 和 PCA/MLR 两种方法解析加拿大 Hamilton 湾沉积物中 PAHs 的来源,两种方法得到的源贡献率相近,但认为 PMF 比 PCA/MLR 可更为有效地进行源识别; Larsen 等^[12]采用 PMF 和 PCA/MLR 法解析美国马里兰州 Baltimore 大气中 PAHs 的来源,指出相较于 PCA/MLR, PMF 可以将交通源分为汽油燃烧源和柴油燃烧源; Cao 等^[13]采用 PMF 和 PCA/MLR 法解析了中国汕头海岸带红树林沉积物中的 PAHs 来源。与其他源解析方法^[9,14~19]相比, PMF 和 PCA/MLR 模型对源成分谱信息依赖性低,在国际上得到了一致认可,但国内对采用 PMF 模型进行 PAHs 源解析的应用较少。

本文以上海市内环高架道路地表径流中的 PAHs 为研究对象,了解了城市交通干道径流中 PAHs 的污染状况,并运用 PMF 和 PCA/MLR 两种模型对 PAHs 进行源解析,求得各来源的贡献率,以期控制上海交通干道地表径流中 PAHs 的污染提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验部分

1.1.1 采样

选择上海内环高架中山北二路某路段排水口设置采样点。该路段为沥青路面,双向四车道,处于道路转弯处,路面雨水径流经道路一侧的落水管排入地面雨水管接口。

在距采样点约 500 m 处设置自计雨量计采集降雨数据。依据降雨情况,每隔若干分钟于高架落水管口取一次样,降雨结束后参照雨量过程配制考虑水量权重的事件平均浓度样品,以此作为该场降雨的径流样品^[20]。2012 年 7~9 月共采集了 8 场降雨的路面径流样品。

1.1.2 样品前处理

径流样品采集后立即进行测定,按照《HJ 478-2009 水质多环芳烃的测定液液萃取和固相萃取高效液相色谱法》进行前处理。500 mL 水样中加入 15 g 氯化钠,25 mL 正己烷进行液液萃取,重复萃取两次,合并萃取液并加入无水硫酸钠脱水,用旋转蒸发器将脱水后的萃取液浓缩至 1 mL。取 1 g 硅胶柱作为净化柱,将浓缩后的 1 mL 样品加到柱上。用 10

mL 洗脱液(1:1,二氯甲烷/正己烷)洗涤净化柱,收集洗脱液并浓缩至 0.5~1.0 mL,加入 3 mL 乙腈,再浓缩至 0.5 mL 以下,转移至 LC 进样瓶中,准确定容到 0.5 mL 待测。

1.1.3 PAHs 分析测定

用 HPLC(Shimadzu,2010)测定 USEPA 公布的优先污染物中的 16 种多环芳烃,即萘(NaP)、二氢萘(AcNy)、芴(Fl)、芘(AcNe)、菲(PhA)、蒽(An)、荧蒽(FlA)、芘(Py)、苯并[a]蒽(BaA)、蒽(Chy)、苯并[b]荧蒽(BbF)、苯并[k]荧蒽(BkF)、苯并[a]芘(BaP)、二苯并[a,h]蒽(DBahA)、苯并[g,h,i]芘(BghiP)和茚并[1,2,3-cd]芘(IP)。

1.2 正定矩阵因子分解法

本研究采用 EPA PMF3.0 模型^[21],基于算法 ME-2. PMF 的基本方程为:

$$X = GF + E \quad (1)$$

式中,样品浓度矩阵(X)为 n 个样品的 m 种化合物的浓度组成($n \times m$), F 表示源成分谱矩阵($p \times m$), G 表示源贡献率矩阵($n \times p$), E 表示残差矩阵($n \times m$)。

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (2)$$

式中, e_{ij} 、 g_{ik} 、 f_{kj} 分别为残差矩阵、源贡献率矩阵和源成分谱矩阵的元素, p 表示 p 个不同的源。

记残差矩阵 E 的目标函数为 $Q(E)$:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

式中, s_{ij} 为第 i 个样品中第 j 种化合物的不确定性。

本研究采用的不确定性计算方法^[21]如下:

$$S_{ij} = \begin{cases} 2 \times \text{MDL} & (x_{ij} < \text{MDL}) \\ \sqrt{(\text{RSD} \times x_{ij})^2 + (\text{MDL})^2} & (x_{ij} > \text{MDL}) \end{cases} \quad (4)$$

$Q(E)$ 采用最小二乘迭代法,同时变换 G 和 F 矩阵,只有当 $Q(E)$ 收敛时才可进一步分析。PMF 通过建立罚函数,在求解过程中对因子载荷做非负约束,使得因子载荷具有可解释性和明确的物理意义。模型采用“Robust”模式进行运算,以消除个别极值对结果的影响。

1.3 主成分分析/多元线性回归

主成分分析,利用“降维”的方法,将原有多个变量线性变换后,转化为数目较少的新变量(主成分),这些新变量两两正交,且最大程度地反映原数据提供的信息。在提取的所有主成分中,第一主成分能解释最多的变量信息,第二主成分能解释次最多的变量信息,最后一个主成分包含了最少的变量

信息. 依据主成分在 PAHs 各组份上的载荷, 推断该主成分所反映的 PAHs 污染来源.

多元线性回归的目的是在源识别的基础上, 进一步确定不同污染源的贡献率. 其基本方程为:

$$y = \sum_1^p m_i X_i + b \quad (5)$$

本研究中, y 表示 $\sum 16\text{PAHs}$, p 表示提取的主成分的个数. X_i 为主成分分析得到的因子得分变量. b 表示未被因子解释的剩余变量信息. 将自变量和因变量标准化, 对标准化后的等式进行回归分析.

$$Z = \sum_1^p B_i X_i \quad (6)$$

B_i 为所求多元线性回归系数, 因此:

$$\text{源 } i \text{ 的平均贡献率 } (\%) = (B_i / \sum B_i) \times 100\% \quad (7)$$

2 结果与分析

2.1 径流中 PAHs 的浓度特征

表 1 为上海市内环高架地表径流中 PAHs 的浓度分布, 除部分场次的 AcNy 低于检出限外, 其余 15 种 PAHs 均被检出. 2012 年 7~9 月 $\sum 16\text{PAHs}$ 浓度范围为 $1.585 \sim 7.523 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 其中, 7 月的平均浓度为 $2.007 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 8 月的平均浓度为 $4.615 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 9 月的平均浓度为 $3.887 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 在采样的 3 个月份中, $\sum 16\text{PAHs}$ 平均浓度的月际变化不大, 这是因为各采样月份均属夏季, 气候、温度、交通、降雨类型等环境特征相似, 因而各月份 $\sum 16\text{PAHs}$ 浓度的平均值并无显著差异.

表 1 上海内环高架道路地表径流中 PAHs 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 PAHs concentrations in runoff from the Shanghai elevated inner highway/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

PAHs	2012 年 7 月			2012 年 8 月			2012 年 9 月		
	min	max	均值	min	max	均值	min	max	均值
NaP	0.064	0.118	0.091	0.067	0.088	0.080	0.075	0.137	0.106
AcNy	ND ¹⁾	0.051	0.026	ND ¹⁾	ND	ND	ND	0.115	0.058
Fl	0.116	0.137	0.127	0.056	0.093	0.079	0.032	0.122	0.077
AcNe	0.156	0.157	0.157	0.086	0.100	0.094	0.131	0.133	0.132
PhA	0.022	0.073	0.048	0.070	0.284	0.158	0.046	0.369	0.208
An	0.157	0.168	0.163	0.080	0.114	0.100	0.045	0.147	0.096
FlA	0.155	0.371	0.263	0.298	1.150	0.627	0.250	1.045	0.648
Py	0.088	0.102	0.095	0.045	0.109	0.085	0.100	0.175	0.138
BaA	0.010	0.177	0.094	0.293	1.324	0.661	0.323	0.597	0.460
Chy	0.034	0.163	0.099	0.078	0.778	0.346	0.084	0.890	0.487
BbF	0.108	0.283	0.196	0.259	0.951	0.515	0.123	0.158	0.141
BkF	0.115	0.131	0.123	0.057	0.545	0.371	0.006	0.093	0.050
BaP	0.028	0.051	0.040	0.020	0.718	0.274	0.036	0.111	0.074
DBahA	0.078	0.151	0.115	0.030	0.264	0.105	0.119	0.148	0.134
BghiP	0.102	0.462	0.282	0.060	0.749	0.377	0.066	0.114	0.090
IP	0.044	0.141	0.093	0.464	0.963	0.747	0.632	1.351	0.992
$\sum 16\text{PAHs}$	1.585	2.428	2.007	2.609	7.523	4.615	3.118	4.655	3.887

1) “ND”表示未检出

2.2 PMF 模型

表 2 为选取 5 个主因子时模型的拟合结果. 其中绝大多数化合物的斜率接近于 1, r^2 较大, 模型的拟合性较好, 表明所选的 5 个主因子能够解释原始数据所包含的信息.

PMF 得到的源成分谱列于表 3. 主因子 1 中, IP 有较高的载荷, IP 是柴油燃烧的特征指示物^[17,22,23], 表明第一主因子为柴油燃烧源; 第 2 主因子在 IP、BaA、BkF、FlA 上有较高载荷, 显示了燃气源特性^[12], 且 BaA 为天然气的特征指示物^[23], 因此主因子 2 代表燃气源; 第 3 主因子中, FlA、Chy

具有较高的载荷, Chy 是石油类挥发的指示物^[24], 因此, 主因子 3 被定义为石油源; 主因子 4 在 BghiP、FlA、BaA、Chy、BbF 上具有较高载荷, 符合汽油燃烧源特征^[12], 且 BghiP 是汽油燃烧的特征指示物^[24], 因此, 第 4 主因子代表汽油燃烧源; 第 5 主因子缺乏特征指示物, 没有明确的解析意义, 被定义为其他源.

由 PMF 得到的 5 个源的贡献率依次是汽油燃烧源 22.3%, 石油源 21.9%, 燃气源 26.4%, 柴油燃烧源 15.4%, 以及其他源 14.0%, 汽油燃烧源和柴油燃烧源合为交通源 37.7%. 由 PMF 模型计算的

表 2 PMF 对 16 种 PAHs 拟合值与实测浓度的相关性

Table 2 Correlation between predicted and observed concentrations of 16PAHs from PMF

PAHs	截距	斜率	r^2
NaP	0.02	0.80	0.86
AcNy	0.01	0.79	0.89
Fl	0.02	0.81	0.89
AcNe	0.00	1.02	0.96
PhA	0.00	0.99	0.98
An	0.00	1.03	0.98
FlA	0.01	0.97	0.99
Py	0.02	0.81	0.69
BaA	0.06	0.83	0.98
Chy	0.00	1.01	0.99
BbF	0.06	0.63	0.53
BkF	-0.01	1.03	0.99
BaP	0.04	0.19	0.76
DBahA	0.04	0.40	0.19
BghiP	0.00	0.98	1.00
IP	-0.04	1.06	0.95

表 3 因子数为 5 的 PMF 源成分谱

Table 3 Source profiles obtained from positive matrix factorization

PAHs	主因子				
	1	2	3	4	5
NaP	0.046	0.020	0.012	0.006	0.064
AcNy	0.001	0.000	0.022	0.000	0.018
Fl	0.038	0.008	0.001	0.029	0.081
AcNe	0.045	0.006	0.018	0.026	0.112
PhA	0.013	0.042	0.078	0.037	0.015
An	0.050	0.006	0.000	0.031	0.117
FlA	0.067	0.162	0.217	0.167	0.102
Py	0.060	0.015	0.014	0.008	0.072
BaA	0.085	0.226	0.143	0.100	0.008
Chy	0.020	0.030	0.213	0.147	0.000
BbF	0.032	0.046	0.030	0.111	0.092
BkF	0.000	0.180	0.017	0.000	0.100
BaP	0.009	0.012	0.026	0.043	0.013
DBahA	0.039	0.000	0.026	0.000	0.084
BghiP	0.000	0.014	0.023	0.258	0.100
IP	0.496	0.235	0.160	0.036	0.023
源识别	柴油燃烧	燃气燃烧	石油类	汽油燃烧	其他

11.8%, IP 载荷较高,类似于 PMF 中的主因子 1,被定义为柴油燃烧源. 同上,将柴油燃烧源和汽油燃烧源合为交通源.

以因子得分变量为自变量,以标准化的 PAHs 总量为因变量,经 SPSS 多元线性回归,得:

$$Z = 0.591FS_1 + 0.629FS_2 + 0.375FS_3 + 0.174FS_4 + 0.278FS_5 \quad (R^2 = 0.994) \quad (8)$$

式中, FS_i 为源 i 的因子得分变量,经式(7)计算,各源贡献率分别为交通源 44.3%,石油源 28.9%,燃气源 18.3%,其他源 8.5%.

为求得源 i 的次降雨径流贡献量,将式(8)变形

各场次降雨的路面径流中不同来源 PAHs 的贡献(图 1)可以看出,不同场次的降雨径流间各 PAHs 源贡献变化较大,同场次降雨径流中各 PAHs 源贡献的相对大小不稳定.

2.3 PCA/MLR 模型

通过 PCA 可以提取出 5 个主成分,总方差贡献率为 96.5%. 各主成分因子载荷列于表 4. 主成分 1 的方差贡献率占总方差的 32.5%, Chy、PhA、FlA、AcNy 因子载荷较高,类似 PMF 法的主因子 3,定义为石油源;主成分 2 解释了总方差的 22.5%, BghiP、BbF、BaP、BaA 载荷较高,类似于 PMF 法的主因子 4,因此,定义为汽油燃烧源;主成分 3 的方差贡献率占总方差的 15.9%,其中 BkF、BaA、BaP、FlA 有较高载荷,与 PMF 中主因子 2 相类似,定义为燃气源;主成分 4 没有明确的解析意义,被定义为其他源;主成分 5 的方差贡献率占总方差的

得到:

$$\sum 16PAHs = 0.591\sigma_{PAH}FS_1 + 0.629\sigma_{PAH}FS_2 + 0.375\sigma_{PAH}FS_3 + 0.174\sigma_{PAH}FS_4 + 0.278\sigma_{PAH}FS_5 + \sum 16PAHs \quad (9)$$

$$\sigma_{PAH} \text{ 为 } 1.817 \mu\text{g}, \sum 16PAHs \text{ 为 } 3.682 \mu\text{g}.$$

根据文献[12]:

$$\text{源 } i \text{ 的次降雨径流贡献量} = \frac{\sum 16PAHs \times (B_i / \sum B_i) + B_i \sigma_{PAH} FS_i}{\sum 16PAHs} \quad (10)$$

图 2 为 PCA/MLR 模型得到的各场次降雨径流

中不同来源 PAHs 的贡献量. 与 PMF 模型得到的贡献量相比,其他源贡献量更为稳定. 同时,个别贡

献量出现负值,这是由于 PCA/MLR 求解过程中无非负约束所导致的,并无实际意义.

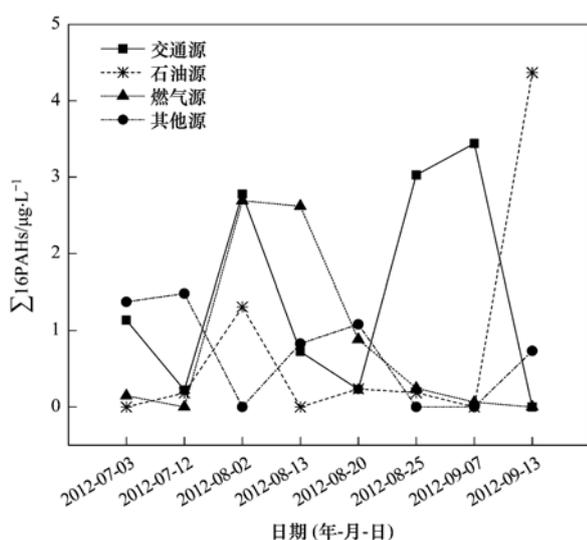


图1 PMF 模型计算的各场次降雨径流中不同来源 PAHs 的贡献值

Fig. 1 Time Series of Source Contributions based on PMF Model

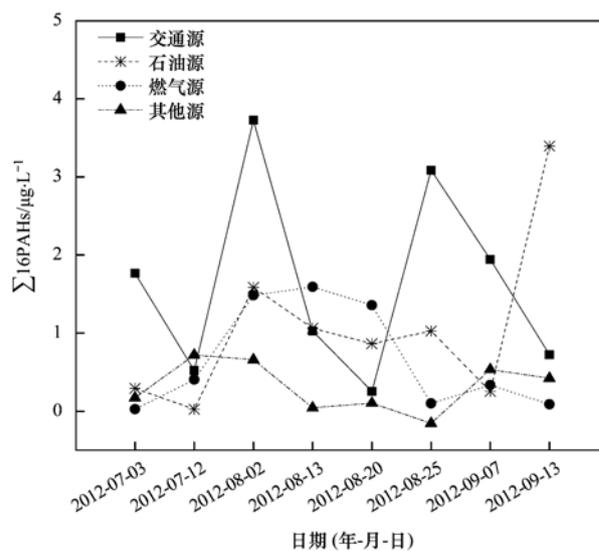


图2 PCA/MLR 模型计算的各场次降雨径流中不同来源 PAHs 的贡献量

Fig. 2 Time series of single rainfall event contributions based on PCA/MLR model

表4 内环高架道路地表径流中 PAHs 的因子载荷

Table 4 Rotated component matrix of PAHs in highway runoff

PAHs	主因子				
	1	2	3	4	5
NaP	-0.421	-0.352	-0.002	0.672	0.483
AcNy	0.670	-0.368	-0.404	0.364	-0.259
Fl	-0.844	0.200	-0.174	0.380	0.037
AcNe	-0.297	-0.291	-0.720	0.381	-0.336
PhA	0.942	0.229	0.139	0.135	0.000
An	-0.935	-0.067	-0.310	0.109	-0.108
FlA	0.824	0.399	0.294	0.184	0.010
Py	-0.274	-0.457	-0.436	-0.104	0.644
BaA	0.522	0.514	0.593	0.193	0.215
Chy	0.882	0.426	-0.036	0.195	0.033
BbF	0.082	0.803	0.150	-0.542	0.045
BkF	0.126	0.214	0.936	-0.029	-0.182
BaP	0.295	0.829	0.373	0.233	0.133
DBahA	0.259	0.095	-0.053	0.924	-0.072
BghiP	0.061	0.963	0.188	-0.041	-0.094
IP	0.170	0.157	0.098	0.028	0.962
方差贡献率/%	32.5	22.5	15.9	13.9	11.8
累计方差贡献率/%	32.5	55.0	70.8	84.8	96.5

3 讨论

3.1 与其他道路径流中 PAHs 含量的对比及来源分析

与国内外相近月份的城市道路降雨径流中的 PAHs 含量相比(见表5)可知,不同城市道路地表径流中 PAHs 污染浓度的数量级基本相同,但内环高

架道路径流中 PAHs 的最大浓度高达 $7.523 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,显著高于其他城市,说明上海市内环高架路受 PAHs 的污染较为严重.

上海内环高架桥是上海市区具有代表性的高流量道路,交通活动频繁,产生大量的汽车尾气,因此,交通源贡献的 PAHs 比重很大. 沥青路面老化及轮胎与路面的摩擦,使石油源贡献的 PAHs 也占相当

数量. 采样点地处居住、商业混合区,餐饮业与家庭烹调贡献了一定量燃气源的 PAHs. 因此,PMF 和

PCA/MLR 模型源解析的结果与采样点附近的情况相符,可以较好地解释 PAHs 的来源.

表 5 国内外城市道路径流中 PAHs 的含量

Table 5 Concentrations of PAHs from urban runoff worldwide

采样时间	研究区域	铺路材料	汇水面积/m ²	EMC 范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	文献
2012 年 7~9 月	上海,内环高架	沥青	300	1.585~7.523	本研究
2010 年 8 月 26 日	上海,大渡河路	沥青	795.6	3.709	[10]
2010 年 7~9 月	温州,锦绣路	沥青	250	3.709~4.606	[10]
2006 年 7~8 月	北京,成府路	沥青	300	0.8~3.2	[8]
2006 年 7~9 月	USA, Maryland	沥青、混凝土	2800	0.29~0.98	[5]

3.2 PMF 和 PCA/MLR 源解析结果比较

表 6 将得到的 PAHs 平均源贡献率进行了比较. 经 PMF 和 PCA/MLR 模型源解析,PAHs 的来源均被分为以下四个:交通源,石油源,燃气源,其他源. 两种分析方法得出的各源平均贡献率有一定差异. 但交通源均具有最高的源平均贡献率,而其他源所占的源平均贡献率均为最低值.

表 6 PMF 和 PCA/MLR 得到的 $\sum 16\text{PAHs}$ 源贡献率

来源	源贡献率/%	
	PMF	PCA/MLR
交通源	37.7	44.3
石油源	21.9	28.9
燃气源	26.4	18.3
其他	14.0	8.5

图 3 为 PMF 和 PCA/MLR 模型得到的 $\sum 16\text{PAHs}$ 浓度的计算值和实际值的拟合,可以看出,两种模型均具有较好的拟合效果,相关系数分别为 0.961 和 0.997. PCA/MLR 模型得到的相关系数更接近于 1,这是因为采用 PCA/MLR 模型时全部数据均参与运算,而 PMF 在运行过程中采用“Robust”

模式,剔除了一部分数据异常值.

4 结论

(1)道路地表径流中 $\sum 16\text{PAHs}$ 的浓度范围为 1.585~7.523 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,7、8、9 这 3 个月份 PAHs 的月际变化不大;与国内外其他城市相比,上海市内环高架受 PAHs 的污染较为严重,且 PAHs 主要来自于交通污染.

(2)PMF 和 PCA/MLR 模型能够有效地用于上海市内环高架道路地表径流中 PAHs 的源解析,两种模型的计算值与实测值拟合良好,相关系数分别为 0.961 和 0.997.

(3)PMF 和 PCA/MLR 模型对于 PAHs 的来源有一致的判定,分别为交通源、石油源、燃气源和其他源. PMF 得到的源贡献率依次为 37.7%、21.9%、26.4%、14.0%;与之对应,PCA/MLR 得到的源贡献率依次为 44.3%、28.9%、18.3%、8.5%.

参考文献:

- [1] Hoffman E J, Mills G L, Latimer J S, *et al.* Urban runoff as a source of polycyclic aromatic hydrocarbons to coastal waters[J]. *Environmental Science and Technology*, 1984, **18**(8): 580-587.
- [2] Motelay M A, Garban B, Tiphagne L K, *et al.* Mass balance for polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban watershed of Le Havre (France): Transport and fate of PAHs from the atmosphere to the outlet[J]. *Water Research*, 2006, **40**(10): 1995-2006.
- [3] Halsall C J, Coleman P J, Davis B J, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in U. K. Urban air[J]. *Environmental Science and Technology*, 1994, **28**(13): 2380-2386.
- [4] Walker W J, McNutt R P, Maslanka C K, *et al.* The potential contribution of urban runoff to surface sediments of the Passaic River: sources and chemical characteristics[J]. *Chemosphere*, 1999, **38**(2): 363-377.
- [5] Diblasi C J, Li H, Davis A P, *et al.* Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater

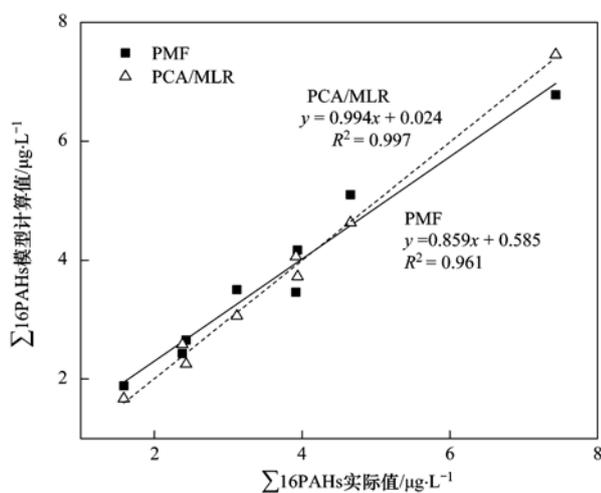


图 3 PMF、PCA 模型计算值和实际值的拟合

Fig. 3 Correlation of modeled results with original measurements

- bioretention facility[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(2): 494-502.
- [6] Menzie C A, Hoepfner S S, Cura J J, *et al.* Urban and suburban storm water runoff as a source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) to massachusetts estuarine and coastal environments[J]. *Estuaries*, 2002, **25**(2): 165-176.
- [7] Stein E D, Tiefenthaler L L, Schiff K. Watershed-based sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban storm water [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2006, **25**(2): 373-385.
- [8] 张巍, 张树才, 岳大攀, 等. 北京城市道路地表径流中 PAHs 的污染特征研究[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 160-167.
- [9] 张巍, 张树才, 万超, 等. 北京城市道路地表径流及相关介质中多环芳烃的源解析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(6): 1479-1483.
- [10] 韩景超, 毕春娟, 陈振楼, 等. 城市交通干道降雨径流中 PAHs 的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(10): 2461-2469.
- [11] Sofowote U M, Mccarry B E, Marvin C H. Source apportionment of PAH in Hamilton Harbour suspended sediments; Comparison of two factor analysis methods [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, **42**(16): 6007-6014.
- [12] 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.
- [13] Cao Q M, Wang H, Chen G Z. Source apportionment of PAHs using two mathematical models for mangrove sediments in Shantou coastal zone, China [J]. *Estuaries and Coasts*, 2011, **34**(5): 950-960.
- [14] 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.
- [15] Li A, Jang J K, Scheff P A. Application of EPA CMB8. 2 model for source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago [J]. *Environmental Science and Technology*, 2003, **37**(13): 2958-2965.
- [16] Bzdusek P A, Christensen E R, Li A, *et al.* Source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago: Application of factor analysis with nonnegative constraints [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, **38**(1): 97-103.
- [17] 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.
- [18] Wang D G, Tian F L, Yang M, *et al.* Application of positive matrix factorization to identify potential sources of PAHs in soil of Dalian, China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(5): 1559-1564.
- [19] Okuda T, Okamoto K, Tanaka S, *et al.* Measurement and source identification of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the aerosol in Xi'an, China, by using automated column chromatography and applying positive matrix factorization (PMF) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(8): 1909-1914.
- [20] Kafi M, Gasperi J, Moilleron R, *et al.* Spatial variability of the characteristics of combined wet weather pollutant loads in Paris [J]. *Water Research*, 2008, **42**(3): 539-549.
- [21] Norris G, Vedantham R, Wade K, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 3.0 Fundamentals and User Guide [EB/OL]. <http://www.epa.gov>.
- [22] Li J, Zhang G, Li X D, *et al.* Source seasonality of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in a subtropical city, Guangzhou, South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 145-155.
- [23] Simcik M F, Eisenreich S J, Lioy 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.
- [24] 胡丹, 欧浪波, 黄晔, 等. 北京城区屋面径流中 PAHs 的污染特征与来源解析[J]. *生态环境学报*, 2010, **19**(11): 2613-2618.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行