

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM_{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ¹³C观测的大气 CO₂ 来源解析 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N₂H₄ 下 SBR 中硝化微生物特性 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO₂ 排放的综合影响 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果

沈庆然, 侯娟, 李田*

(同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 构建 4 个粗放型绿色屋顶中试设施, 考察不同基质组成的设施在实际降雨条件下出水中 16 种多环芳烃 (PAHs) 质量浓度并与降雨、沥青屋面径流、空白对照设施的出水进行对比。结果表明, 8 场监测降雨事件中, 4 种模拟屋面设施出流 PAHs 的平均质量浓度分别为 145、166、151、160 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 沥青屋面和空白对照设施出流 PAHs 的平均质量浓度分别为 900 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 270 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 4 个模拟设施出流 PAHs 质量浓度显著低于沥青屋面和空白对照设施; 从质量负荷控制的角度, 4 个模拟设施均能有效控制屋面径流 PAHs 负荷, 与空白屋面相比, 平均负荷削减率为 71.76%。绿色屋顶对 PAHs 的去除机制以基质材料的截留及吸附为主, 同样基质配比的情况下, 增加基质层厚度, 能改善设施对 PAHs 的去除效果。将传统沥青屋面改造为粗放型绿色屋顶, 有助于控制屋面径流 PAHs 排放。

关键词: 屋顶径流; 绿色屋顶; 多环芳烃; 海绵城市; 低影响开发

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4700-06 DOI: 10.13227/j.hjks.201606132

Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs

SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian*

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

Abstract: In this study, four pilot-scale extensive green roof facilities with different substrate compositions were developed. In 8 rainfall events, concentrations of 16 kinds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in effluent of these facilities were investigated and compared with effluents of asphalt roofing, the blank control roof and rain water. Average PAHs concentrations in the effluent of these four facilities, asphalt roofing and blank control facilities were 145, 166, 151, 160, 900, 270 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The PAHs mass concentrations discharged by four simulation facilities were significantly lower than asphalt roofing and blank control roof. From the perspective of the mass loading control, all four simulation facilities could effectively control roof runoff PAHs load with an average load reduction rate of 71.76% compared with the blank control roof. Interception and adsorption by green roof substrates was the main removal way for PAHs. Facilities' PAHs removal efficiency could be improved by increasing the substrate thickness with the same substrate composition. Transforming traditional asphalt roofing into extensive green roof was an effective way to control PAHs emissions from roof runoff.

Key words: roof runoff; extensive green roof; PAHs; sponge city; low impact development (LID)

近年来,以径流源头控制为主要目标的海绵城市建设在我国蓬勃兴起。绿色屋顶技术受到广泛关注。主要用于城市雨水管理的粗放型绿色屋顶 (extensive green roof) 的水质控制效果成为研究与应用的热点^[1-6]。

屋面是城市区域不透水下垫面重要组成部分, 屋面径流是城市面源污染的来源之一^[7]。相关的污染物不仅仅包括常规污染物, 还包括有毒有害的多环芳烃 (PAHs) 等持久性有机污染物 (POPs)^[8-10]。Hou 等^[11]的研究表明上海某沥青屋面径流的 PAHs 质量浓度达到 1 743 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。PAHs 具有致癌、致畸、致突变等特性, 对生物体产生遗传毒性^[12]。目前, 国内外已有的粗放型绿色屋顶控制屋顶径流污染效果的研究, 侧重于评价绿色屋顶对营养盐或重金属的控制效果^[1, 13], Gromaire 等^[14]的研究表明绿色屋顶能够很好地控制 PAHs, 但国内外对应用粗放型绿色屋

顶控制持久性有机污染物的研究十分鲜见。

为了研究粗放型绿色屋顶对 PAHs 的控制效果, 搭建了不同基质层组成的粗放型绿色屋顶实验设施, 评价相关设施相对于沥青屋面与对照屋面的 PAHs 的控制效果, 并对影响控制效果的因素和机制进行探讨。

1 材料与方法

1.1 实验装置

模拟绿色屋顶设施设置于同济大学校园内某建筑物屋顶, 包括 5 个 1 m × 2 m × 0.3 m 的 PVC 盘和与之配套的角钢支架, PVC 盘倾斜坡度为 5%

收稿日期: 2016-06-20; 修订日期: 2016-08-01

基金项目: 上海市科委资助项目 (14DZ1208200)

作者简介: 沈庆然 (1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染控制, E-mail: ndiwill@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

(约 3°). 模拟设施较低的一端底部设置有出水口,用于收集雨水出流样品. 模拟屋面设施中有一个不放置基质作为干湿沉降的空白对照. 模拟屋面南侧的一块面积约 200 m² 的平顶沥青屋面 (asphalt roofing) 作为对照屋面,沥青屋面有独立的排水管.

模拟绿色屋顶设施自上至下分别为: 植被层、基质层、过滤层、排水板层和 PVC 板层. 植被层植

物为景天属垂盆草 (*Sedum sarmentosum* Bunge). 参考德国 FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau) 屋顶绿化指南对基质选择的要求^[15],并结合长三角地区的绿化种植习惯与材料供应情况设计 3 种基质,基质层填料的组成见表 1. 过滤层使用 50 g·m⁻² 的透水土工布,用以防止基质层颗粒物随出水流失. 排水层采用厚度约 0.03 m 的塑料排水板.

表 1 模拟设施的基质组成及主要参数

Table 1 Components of pilot-scale green roof substrates and main parameters

设施编号	基质名称	基质层深度 /cm	基质组成(体积比)	堆密度 /kg·m ⁻³
C1	屋顶绿化复合基质	10	田园土 45% + 泥炭土 30% + 蛭石 10% + 珍珠岩 10% + 醋糟 5%	831
I1	无机复合基质	10	火山岩 60% + 轻质陶粒 20% + 泥炭土 20%	679
I2	无机复合基质	15	火山岩 60% + 轻质陶粒 20% + 泥炭土 20%	679
B1	废弃物利用基质	10	碎砖 40% + 分级砂 40% + 泥炭土 20%	1 293
Ref	空白对照	—	无基质层及种植层(空白对照)	—

屋顶绿化复合基质(C1)在国内屋顶绿化中较为常用,特点是有机质含量较高,基质组成中细颗粒比例较大. 无机复合基质(I类)中采用轻质材料火山岩和陶粒,堆密度较小,加入一定比例的泥炭土补充有机质以及维持土壤结构. 废弃物利用基质(B1)使用较为便宜的碎砖和分级沙,并加入泥炭土提供有机质,但是堆密度较大. 空白对照用来平行检测实验场地干湿沉降的污染负荷^[1].

1.2 样品采集

使用 5 L 塑料量杯收集模拟屋面设施出水,不锈钢盆收集雨水样品,100 L 塑料桶收集沥青屋面径流. 所有取样容器均在降雨前用蒸馏水冲洗后晾干. 降雨事件开始后,按照出流量比例收集各装置出水并配置混合样,从不锈钢盆中采集 1 L 水样作为雨水(湿沉降)样品. 待测样品均置于不透明塑料瓶中. 所有样品的萃取处理均在采样后 24 h 内完成. 同时,在屋顶和各设施出流口安装 SL3-1 型翻斗式雨量计(上海气象仪器厂),同步记录降雨特性和设施出流数据,记录频率为 1 次·min⁻¹. 所有绿色屋顶设施在所有降雨事件过程中均没有发生过表面漫流现象,本实验期间,所有设施的植被覆盖率均达到 80% 以上.

1.3 PAHs 分析测定

本研究采用《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》(HJ 478-2009)测定水样中的 16 种多环芳烃(PAHs). 以 25 mL 正己烷萃取 500 mL 水样,萃取液用硅胶柱净化后用旋转蒸发器

浓缩并用乙腈准确定容至 0.5 mL 待测. 用高效液相色谱仪(Shimadzu LC-20A)测定 16 种多环芳烃,包括萘(NaP)、蒽(AcNy)、芴(Fl)、二氢蒽(AcNe)、菲(PhA)、蒽(An)、荧蒽(FlA)、芘(Py)、䓑(BaA)、苯并[a]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)、茚并[1,2,3-cd]芘(IP).

1.4 质量控制

采用加标回收率和重现性的质量控制方法. 在样品萃取前加入十氟联苯(Decafluorobiphenyl,纯度 99%),用于跟踪样品前处理的回收率. 样品中 PAHs 的平均加标回收率范围为 60.9% ~ 110%,满足环境样品中痕量多环芳烃的分析要求. 同一样品的平行样品(n=3)中各种 PAH 具有较好的重现性,相对标准偏差小于 20%.

2 结果与讨论

2.1 监测降雨事件特征

监测过程中设施产生出流的降雨事件共有 8 场(表 2). 其中中雨(10.0 ~ 24.9 mm)5 场,大雨(25.0 ~ 49.9 mm)1 场,暴雨(50.0 ~ 99.9 mm)2 场. 雨量记录无纸记录仪默认的两场降雨的间隔为 6 h,超过 6 h 没有数据输入,自动清零,否则,视为同一场降雨. 已有的研究表明,对于降雨量 ≤ 10.0 mm 的降雨事件,相关绿色屋顶设施一般不产生出流^[1].

表 2 产流降雨事件的降雨特征

Table 2 Characteristics of investigated rainfall events

序号	日期	降雨历时 /min	前期晴天数 /d	降雨量 /mm
1	2015-08-21	504	10.00	46.5
2	2015-08-23	2 315	0.50	98.1
3	2015-09-15	910	9.83	17.7
4	2015-09-28	2 435	5.21	103.5
5	2015-10-04	1 285	3.17	11.4
6	2015-10-29	1 364	2.08	17.8
7	2015-11-12	1 098	2.08	14.0
8	2015-12-05	880	3.08	17.5

2.2 实际降雨下监测对象的 PAHs

表 3 描述了监测的 8 场降雨事件中雨水、沥青屋面径流、C1、I1、I2、B1、空白对照设施的 PAHs 质量浓度的统计值. 使用 Origin 9.0 软件进行正态性测试, 在 0.05 的显著性水平下, 不同设施的出流浓度均符合正态分布. 表 3 中范围指最小和最大质量浓度区间, 若低于检测限, 则以“—”表示, 均值是将 8 次降雨事件每个设施出流的 PAHs 质量浓度按照降雨量进行加权平均的结果.

表 3 不同样品中 PAHs 统计结果¹⁾/ng·L⁻¹

Table 3 Statistical result of PAHs in different samples/ng·L⁻¹

化合物(环数)	沥青屋面		雨水		对照屋面		C1		I1		I2		B1	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
NaP(2)	—~119	50	—~47	23	14~44	30	—~24	11	—~39	24	—~50	26	—~51	29
AcNy(3)	6~112	55	—~14	11	—~48	23	—~29	13	—~18	5	—~14	7	—~12	8
AcNe(3)	17~83	39	—~62	21	—~78	33	—~56	15	—~63	20	—~50	15	—~89	11
Fl(3)	—~108	43	—	0	—~22	8	—~21	9	—~69	28	—~38	15	—~26	11
PhA(3)	18~195	91	16~90	27	20~71	30	—~43	9	12~29	22	—~32	23	—~42	20
An(3)	12~46	26	—~18	9	5~20	8	4~21	13	7~32	14	4~51	13	—~18	8
FlA(4)	102~139	118	8~111	40	18~138	56	7~67	31	9~68	28	8~47	24	9~88	26
Py(4)	18~116	69	—~18	1	—~47	12	—~17	2	—~14	2	—	—	—~70	23
BaA(4)	15~102	55	—~23	10	—~13	7	—	—	—	—	—	—	—~7	3
Chy(4)	32~138	89	—23	3	—~35	4	—~49	3	—~12	1	—~13	1	—~28	2
BbF(5)	39~292	144	7~116	57	6~94	46	—~56	31	—~55	19	—~63	23	—~41	16
BkF(5)	11~46	20	—~30	10	—~112	13	—~14	7	—~15	4	—~10	4	—~7	3
BaP(5)	—~108	53	—~10	1	—~18	1	—	—	—	—	—	—	—	—
DBahA(5)	—~33	12	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
IP(6)	—~65	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
BghiP(6)	—~66	25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
∑ PAHs	900	214	270	145	166	151	160							

1) “—”表示未检出, 下同; ∑ PAHs 表示 16 种 PAHs 的质量浓度均值之和

根据表 3 整理得到不同环数 PAH 质量浓度平均值与不同监测对象的 ∑ PAHs 组成分布(图 1). 沥青屋面(A. R.)的 PAHs 质量浓度远高于其他实

验组, 其中 4 环占比最高, 占到总 PAHs 的 36.79%, 这与张科峰等的研究结果相近^[16]. 除了 A. R. 出流中监测到 6 环 PAHs 以外, 其他设施出流中均未检

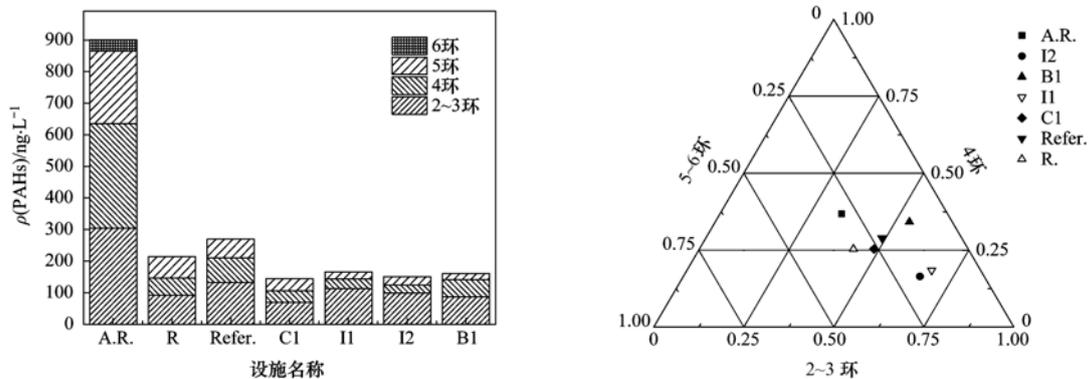


图 1 不同监测样品中 PAHs 平均质量浓度和组分三角图

Fig. 1 Average PAHs concentrations and constitutional ternary diagram of evaluated water samples

出。沥青屋面出流 PAHs 质量浓度分别超过雨水以及绿色屋顶设施出水质量浓度 4 倍及 5 倍,这与沥青屋面的材料本身性质有关^[17]。由于无雨期降尘的作用,空白屋面(Refer.)径流 PAHs 的总平均质量浓度要高于雨水和设施,说明干沉降是屋顶 PAHs 的重要来源^[18]。由组分三角图可知,4 个绿色屋顶设施出流 PAHs 中低环(2~3 环)PAHs 的质量浓度与雨水的相差不大,高环(4~5 环)的质量浓度低于雨水,且均低于空白对照。

图 2 是监测降雨事件设施出流 PAHs 质量浓度分布四分位图,其显示 4 种模拟绿色屋顶设施的出流 PAHs 质量浓度均低于沥青屋面与空白对照(Refer.)径流的质量浓度。使用 Games-Howell 法进行数据分析的结果,在 0.05 的显著性水平下,沥青屋面出水质量浓度均值显著高于其他监测对象,空白对照质量浓度均值则显著高于 4 个设施($P < 0.05$),而 4 个设施之间并没有显著差异($P > 0.05$)。

2.3 模拟绿色屋顶设施对 PAHs 的去除效果及机制探讨

低环 PAHs 主要以溶解态的形式存在^[18],高环 PAHs 易于吸附在颗粒物上,由此推断绿色屋顶设施去除 PAHs 主要是通过基质对颗粒态 PAHs 的过滤和截留。对比表 3 中数据,除 Fl、An 外,设施出水中其他的低环 PAHs 质量浓度均低于空白屋面径流,可见基质能吸附部分低环组分^[19, 20]。所有设施出流中的 PAHs 以 2~3 环为主,占到了 PAHs 总量的 50% 以上。

图 2 中 4 种设施的出流平均质量浓度没有显著性差异,根据生物滞留设施去除 PAHs 的相关报道,基质的粒径、有机物含量以及填料深度影响生物滞留设施对 PAHs 的去除效果^[21, 22]。本研究所采用的

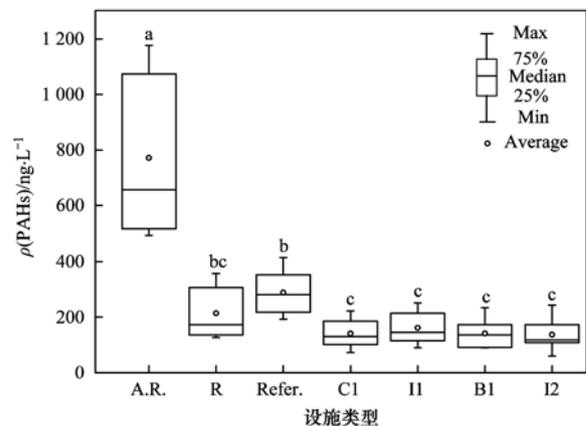


图 2 各监测对象的 PAHs 质量浓度

Fig. 2 Statistical concentrations of PAHs of the evaluated water samples

不同基质组成绿色屋顶出流中的 PAHs 浓度并没有显著差异,这可能与绿色屋顶基质的厚度较薄、各种配比基质的渗透速率都很高,对 PAHs 的总体去除效果不高有关。

图 3 是监测降雨事件降雨量 and 对应事件中不同设施相对于空白屋面出流的去除率。降雨量与 C1、I1、I2、B1 设施去除率的 Spearman 相关系数分别为 -0.571、-0.523、-0.285、-0.714。不同雨量降雨事件设施的出流 PAHs 浓度相差不大,大雨事件空白对照的出流浓度低,因此造成去除率下降。

监测降雨事件中, I1、I2 的平均去除率为 42.61%、49.85%, I2 的去除效果略优于 I1。两个绿色屋顶设施的的生长基质构成相同,但是 I2 的厚度要比 I1 厚约 50%。与生物滞留设施相比,绿色屋顶的基质层厚度很小,且对渗透速率的要求高于其他过滤、吸附型 LID 设施^[15, 23, 24],所以,增加基质层厚度可提高设施对 PAHs 去除能力。

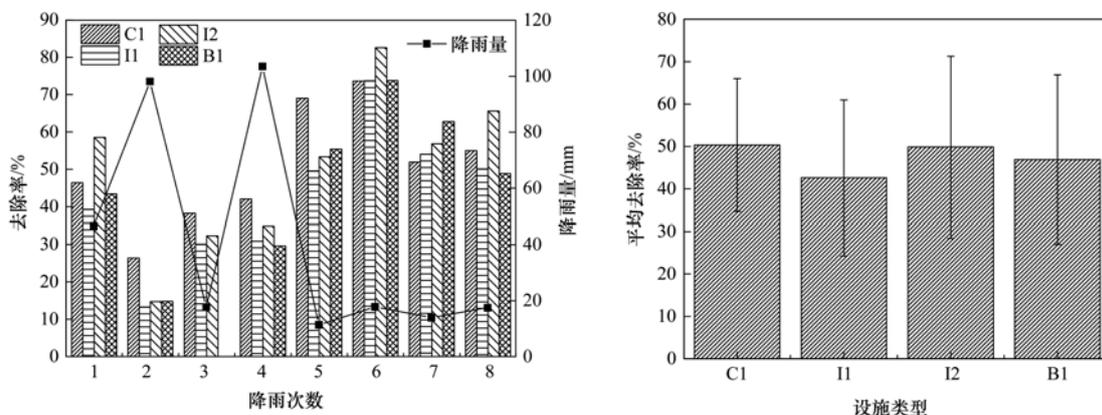


图 3 不同类型设施 PAHs 的去除率

Fig. 3 PAHs removal rate of different facilities

2.4 PAHs 污染负荷控制效果

绿色屋顶具有显著的水文控制效果. 取沥青屋面以及空白屋面的水量径流系数为 0.9, 根据翻斗流量计的实测数据换算得出各个设施的出流量并结合出流 PAHs 质量浓度得到次降雨污染负荷, 对次降雨负荷求和得到各设施的监测期总负荷, 与对照屋面比较得到设施的污染控制负荷(图 4). 本实验期间(2015 年 8 ~ 12 月), CI、I1、I2、B1 设施的平均水量削减率分别为 58.59%、51.48%、55.82%、55.30%. 与对照屋面相比, 4 个设施均有很好的 PAHs 负荷削减效果, 平均负荷削减率为 71.76%. 与沥青屋面负荷相比, PAHs 污染排放削减效果更显著.

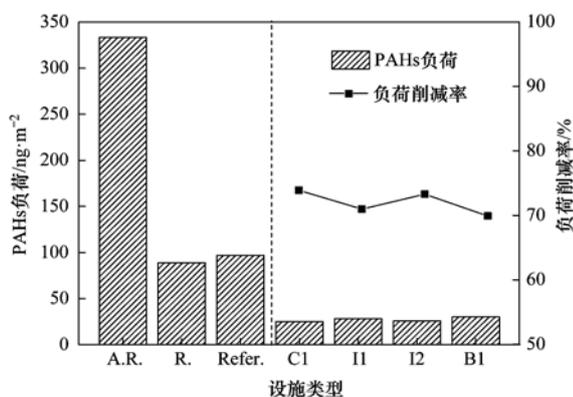


图 4 绿色屋面、沥青屋面及对照设施 PAHs 质量负荷和负荷削减率

Fig. 4 Pollution loads and loads reducing rate of green roofs, asphalt roofing, rain water and the reference

3 结论

(1) 4 种不同基质模拟屋面设施出流中 PAHs 质量浓度显著低于空白对照及沥青屋面, 4 个设施之间并没有显著性差异, 相对空白对照 4 种设施对 PAHs 质量浓度的去除率接近 50%.

(2) 粗放型绿色屋顶对 PAHs 的去除主要以基质对颗粒态 PAHs 的过滤、拦截为主. 增加基质厚度对能改善设施对 PAHs 的去除效果. 降雨量与质量浓度去除率之间呈负相关.

(3) 相对空白屋面, 粗放型绿色屋顶设施出流 PAHs 以低环 PAHs 为主, 高环 PAHs 含量较低, 4 种设施的平均 PAHs 负荷削减率在 71.76%.

(4) 与沥青屋面相比, 粗放型绿色屋顶具有显著的 PAHs 负荷削减能力. 若将已建沥青屋面改造为粗放型绿色屋顶, 能够在削减径流水量的同时, 大幅度削减屋面径流造成的 PAHs 面源污染.

参考文献:

- [1] 李田, 陈昱霖, 顾俊青. 不同介质组成的粗放型绿色屋面降雨出流水质[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, **43**(11): 1722-1727.
Li T, Chen Y L, Gu J Q. Effluent quality of extensive green roofs with different substrates[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, **43**(11): 1722-1727.
- [2] Vijayaraghavan K, Joshi U M, Balasubramanian R. A field study to evaluate runoff quality from green roofs[J]. Water Research, 2012, **46**(4): 1337-1345.
- [3] Vijayaraghavan K, Raja F D. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: plant growth experiments and adsorption[J]. Water Research, 2014, **63**: 94-101.
- [4] Vijayaraghavan K. Green roofs: a critical review on the role of components, benefits, limitations and trends[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, **57**: 740-752.
- [5] Zhang Q Q, Wang X K, Hou P Q, et al. Quality and seasonal variation of rainwater harvested from concrete, asphalt, ceramic tile and green roofs in Chongqing, China [J]. Journal of Environmental Management, 2014, **132**: 178-187.
- [6] 陈昱霖, 李田, 顾俊青. 粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4157-4162.
Chen Y L, Li T, Gu J Q. Influence of the substrate composition in extensive green roof on the effluent quality[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4157-4162.
- [7] 李贺, 李田, 李彩艳. 上海市文教区屋面径流水质特性研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 47-51.
Li H, Li T, Li C Y. Research on the characteristics of urban roof runoff in shanghai cultural and educational area [J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 47-51.
- [8] Wong C S. Environmental fate processes and biochemical transformations of chiral emerging organic pollutants [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2006, **386**(3): 544-558.
- [9] Lye D J. Rooftop runoff as a source of contamination: a review [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(21): 5429-5434.
- [10] Meera V, Ahammed M M. Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review [J]. Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2006, **55**(4): 257-268.
- [11] Hou J, Bian L, Li T. Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in impervious surface run-off in an urban area in Shanghai, China [J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2013, **14**(10): 751-759.
- [12] Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B, Klimkowicz-Pawlas A. Concentrations, sources, and spatial distribution of individual polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in agricultural soils in the Eastern part of the EU: Poland as a case study [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(12): 3746-3753.
- [13] Beecham S, Razzaghmanesh M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate [J]. Water Research, 2015, **70**: 370-384.
- [14] Gromaire M C, Lamprea-Bretauadeau K, Mirande-Bret C, et al. Organic micropollutants in roof runoff-A study of the emission/retention potential of green roofs [A]. In 13th International

- Conference on Urban Drainage[C]. Malaysia: Kuching, 2014. 2516832.
- [15] Russell V. Guidelines for the planning, execution and upkeep of green-roof sites[J]. *Landscape Architecture*, 2005, **95**(10): 180-181.
- [16] 张科峰, 傅大放, 李贺. 不同屋面雨水径流中 PAHs 污染特性对比分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, **42**(1): 99-103.
Zhang K F, Fu D F, Li H. Comparison and analysis characteristics of PHAs pollution for different types of roof runoff [J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2012, **42**(1): 99-103.
- [17] Brandt H C A, De Groot P C. Aqueous leaching of polycyclic aromatic hydrocarbons from bitumen and asphalt [J]. *Water Research*, 2001, **35**(17): 4200-4207.
- [18] 王静, 朱利中. 交通干线空气中多环芳烃的干、湿沉降[J]. *中国环境科学*, 2005, **25**(4): 471-474.
Wang J, Zhu L Z. Preliminary exploration of fate of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air of dry, wet deposit [J]. *China Environmental Science*, 2005, **25**(4): 471-474.
- [19] Krein A, Schorer M. Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments[J]. *Water Research*, 2000, **34**(16): 4110-4115.
- [20] Simonich S L, Hites R A. Importance of vegetation in removing polycyclic aromatic hydrocarbons from the atmosphere [J]. *Nature*, 1994, **370**(6484): 49-51.
- [21] Kipopoulou A M, Manoli E, Samara C. Bioconcentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetables grown in an industrial area [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **106**(3): 369-380.
- [22] Diblasi C J, Li H, Davis A P, *et al.* Removal and fate of polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants in an urban stormwater bioretention facility [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(2): 494-502.
- [23] Davis A P, Hunt W F, Traver R G, *et al.* Bioretention technology: overview of current practice and future needs [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, **135**(3): 109-117.
- [24] Lucke T, Mohamed M A K, Tindale N. Pollutant removal and hydraulic reduction performance of field grassed swales during runoff simulation experiments [J]. *Water*, 2014, **6**(7): 1887-1904.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行