

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征	邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)
亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征	邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)
亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系	袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)
2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析	廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)
在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究	付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)
PM ₁₀ 可替代源成分谱的建立方法及其应用	陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)
夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究	王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)
三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)
浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性	刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)
深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究	赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)
滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性	熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)
金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价	周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)
西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估	谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)
西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析	袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)
城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析	武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)
粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响	陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)
饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究	杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)
压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究	蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)
基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究	王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)
臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究	曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)
电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究	刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)
铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究	张伟, 陈静, 张高生 (4198)
重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究	楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)
光质对蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 生长特征及生化组成的影响研究	唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)
常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响	任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)
Fe ²⁺ 和 Fe ³⁺ 对厌氧氨氧化污泥活性的影响	李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)
CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究	阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)
盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N ₂ O 产生量的影响	王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)
硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析	曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)
利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响	王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)
北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征	苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)
环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响	张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)
稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征	刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)
典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义	靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)
变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响	王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)
铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响	刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)
植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究	卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)
不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征	李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)
不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究	李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)
转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较	潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)
天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集	郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)
1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤	尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)
鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究	卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)
污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究	窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)
上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究	田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)
硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N ₂ O 产生的影响	卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)
中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究	蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)
泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究	赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)
基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究	张雪莹, 温宗国 (4395)
大气棕色碳的研究进展与方向	闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)
《环境科学》征稿简则 (4094)	
《环境科学》征订启事 (4126)	
信息 (4243, 4266, 4274, 4328)	

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响

陈昱霖¹, 李田¹, 顾俊青²

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 上海绿世绿化工程有限公司, 上海 200010)

摘要: 通过模拟降雨实验监测填料组成不同的绿色屋面模拟设施出水水质, 研究粗放型绿色屋面设施填料组成对出水污染物特征的影响. 结果表明, 设施出水中主要的污染物包括不同形态的 N、P 以及 COD; 除 COD 外, 出水中污染物浓度随累积降雨量增加而下降, 具有明显的淋失效应; 所有设施出水中重金属含量均较低, 初期出水的平均浓度均达到饮用水标准. 含有田园土、醋糟的绿化种植土出水营养物质淋失严重, 在累计降雨 150 mm 情况下, 设施出水 TN、TP、COD 平均浓度分别为 2.93、0.73 和 78 mg·L⁻¹, 均超过地表水水质标准 V 类的限值, 添加水厂污泥可以有效地减少绿化种植土中 TP 的淋出且不影响植物对 P 的吸收; 使用无机复合种植土的设施出水水质较好, 但仍需要结合设施对水量削减能力和植物生长状况判断填料是否能够应用于粗放型绿色屋面.

关键词: 绿色屋面; 雨水管理; 填料; 出水水质; 模拟降雨

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4157-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.016

Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality

CHEN Yu-lin¹, LI Tian¹, GU Jun-qing²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Green Roof Engineering Co., Ltd., Shanghai 200010, China)

Abstract: By monitoring the effluent quality from different green roof assemblies during several artificial rain events, the main pollutant characteristics and the influence of substrate composition in extensive green roof on the effluent quality were studied. Results showed that the main pollutants in the effluent were N, P and COD; with the increase of cumulative rain, the concentrations of pollutants in the effluent decreased, which had obvious leaching effect; The average concentrations of heavy metals in the early effluent from all assemblies reached drinking water standard, including the assemblies using crushed bricks; When garden soil and compost were used as organic matter, the assemblies had serious leaching of nutrient substance. After the accumulated rainfall reached 150 mm, the TN, TP and COD concentrations of effluent were 2.93, 0.73 and 78 mg·L⁻¹, respectively, which exceeded the Surface water V class limit. By means of application of the Water Treatment Residual, the leaching of TP from green planting soil was decreased by about 60%. The inorganic compound soil had better effluent quality, however we also need to judge whether the substrate could be applied in extensive green roof or not, by analyzing its ability of water quantity reduction and the plant growth situation.

Key words: extensive green roof; rainwater management; substrate; effluent quality; artificial rain

城市化的推进造成城区不透水铺面的比例大幅提高, 由此加剧了城市内涝、面源污染与区域水文条件的恶化^[1~3]. 上海城区的屋面面积约占城市不透水面积的 50%, 采用绿色屋面技术能够有效吸收消纳部分雨水, 对暴雨径流起到源头控制的作用^[4, 5], 在人口密度极高、土地严重紧缺的中国大中城市, 推广绿色屋面对低影响开发 (LID) 理念的实施具有重要意义^[6~8].

以雨水管理为主要应用目标的绿色屋面称粗放型绿色屋面 (extensive green roof). 理想的粗放型绿色屋面的介质需要满足以下几个条件: 能够有效吸收和滞留雨水, 介质排水性能良好, 提供植物生长基本的养分, 介质比重较轻等^[9, 10]. 粗放型绿色屋面常采用火山岩、膨胀页岩, 以及廉价的碎砖、粗砂等

作为主要种植材料并添加一定比例的有机物质. 添加有机物质是为了保持良好的土壤结构, 为植物生长提供必要的营养物质^[11, 12]. 已有的绿色屋面研究着重探讨其改善水文性能、支持建筑节能的效果, 对绿色屋面出水水质的研究相对较少, 多数研究者认为绿色屋面是径流污染源. Morgan 等^[13]在美国的研究发现绿色屋面设施有明显的 N、P 淋失现象; 瑞典和新加坡的研究得到类似结果, 发现存在金属离子的淋失现象^[14, 15].

为考察粗放型绿色屋面的填料组成对设施雨天

收稿日期: 2014-03-28; 修订日期: 2014-05-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2011ZX07303-001)

作者简介: 陈昱霖 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染, E-mail: tcchxo@gmail.com

出流水质的影响,本研究结合国内的实际情况,选用不同类型、配比填料,通过模拟降雨实验,考察绿色屋面的出水水质及影响因素。

1 材料与方法

1.1 实验装置和填料组成

模拟绿色屋面设施设立在同济大学校园内某建筑屋顶,包括 7 个 1 m × 2 m 的 PVC 盘和相应的角钢支架,PVC 盘深 0.3 m,呈 5% 的倾斜坡度。在模拟

设施较低的一端设有出水口。设施内种植景天科垂盆草 (*Sedum sarmentosum* Bunge);参考德国 FFL (The Landscape Research Development & Construction Society) 的屋顶绿化指南对填料选择的要求,结合长三角地区的绿化种植习惯与材料供应情况,选择了不同特点的填料组成与深度如表 1;底层排水层厚度约为 3 cm,由土工布和排水板组成,土工布的作用是减少填料层中的颗粒进入排水层从而影响出水水质。

表 1 模拟设施的填料组成及主要参数

Table 1 Composition and main characteristics of simulated green roof substrates

编号	填料深度/cm	填料组成(体积比)	堆密度/kg·m ⁻³
I1	10	火山岩 60% + 轻质陶粒 20% + 泥炭土 20%	679
I2	15	同 I1	
C1	10	田园土 45% + 泥炭土 30% + 蛭石 10% + 珍珠岩 10% + 醋槽 5%	831
C2	10	田园土 40% + 泥炭土 30% + 蛭石 10% + 珍珠岩 10% + 醋槽 5% + 给水厂污泥 5%	826
B1	10	碎砖 40% + 分级砂 40% + 泥炭土 20%	1 293
B2	10	碎砖 30% + 分级砂 30% + 泥炭土 40%	1 094
B3	10	碎砖 40% + 分级砂 40% + 醋槽 10% + 泥炭土 10%	1 286

表 1 中填料的组成材料由上海绿世绿化工程公司提供。I1 和 I2 使用无机复合种植土,设置两个深度梯度。火山岩和陶粒属于轻质材料,具有比重小,蓄水能力好的特点,泥炭土在提供有机质的同时,有利于维持介质层的土壤结构。C1 设施填料为屋面绿化常用的种植土,在国内绿色屋面设施中使用较广泛,其中田园土的 N、P 含量符合《屋顶绿化规范》(DB11/T 281-2005) 的要求,而蛭石和珍珠岩可以增加介质层的保水能力并减轻负载。C2 中添加了给水厂污泥以减少填料 P 的淋失。B1、B2 和 B3 利用废砖和分级砂作为主要介质旨在减少设施建造的成本,调整其中有机质的含量和种类,设置了 3 种介质配比。相关介质材料的理化性质见表 2,其中有机质含量采用 TOC 分析仪测定。

1.2 模拟降雨实验操作

为了考察填料的组成和厚度对绿色屋面出水水质的影响,以自来水模拟降雨考察填料组成对出水水质的影响。自来水中的主要监测污染物浓度与天然降雨相近(表 3),仅 NH₄⁺-N 与 pH 差别明显。采用洒水壶模拟降雨,每次降雨实验的降雨量取 25 mm (约 0.25 个空床体积),降雨强度为 10 mm·h⁻¹。出水过程中每 30 min 收集一次设施出水,并记录出水水量,由此计算得到对应降雨过程出水各指标的平均浓度。模拟降雨实验前都保证 7 d 无雨期。设施出水水样在 24 h 内

表 2 介质材料的部分理化性质

Table 2 Several physico-chemical properties of the substrates

材料	有机质 (质量分数)/%	堆密度 /g·cm ⁻³	速效 P /mg·kg ⁻¹	碱解 N /mg·kg ⁻¹
田园土	1.58	1.40	199	113
醋槽	75.44	0.42	215	61.9
泥炭土	61.46	0.50	16.4	8.43
黄砂	0.07	1.68	—	— ¹⁾
陶粒	0.16	0.57	—	—
火山岩	0.37	0.78	—	—
碎砖	1.02	1.31	—	—
蛭石	19.31	0.19	—	—
珍珠岩	0.12	0.13	—	—
给水厂污泥	6.51	1.30	—	—

1) 表示未测定

完成检测,若有特殊情况,则储存于 4℃ 冰箱内,储存时间不超过 48 h。

1.3 水质指标监测

水质检测指标包括金属离子、TSS、COD、TP、PO₄³⁻-P、TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N。根据国家标准,SS 用重量法,TN 用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,TP、PO₄³⁻-P 用过硫酸钾消解-钼锑钨分光光度法,NH₄⁺-N 用纳氏试剂光度法,NO₃⁻-N 采用酚二磺酸分光光度法。COD 采用比色法测定 (HACH DRP2010),金属采用电感耦合等离子质谱法测定 (Agilent 7700),测定元素包括 Zn、Fe、Mn、Cu、Ni、Cr、Cd、Pb。

表 3 实验用自来水水质指标/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Characteristics of tap water used in this study/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

指标	TN	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	TP	$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$	COD	SS	Fe	Mn	Cu	Zn	Ni
浓度	1.93	1.8	0.05	0.02	— ¹⁾	8.5	—	0.02	—	—	0.04	—

1) 表示未检出

2 结果与讨论

由表 3 可知,与天然降雨相比,自来水的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度较高,而 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度比较低. 观测结果表明,所有设施在模拟降雨量小于 10 mm 时,没有产生径流或只有少量出水. 共进行了 6 次模拟降雨淋洗实验,总进水量 150 mm(约 1.5 倍空床体积).

2.1 N 的出水浓度与出流过程

不同设施出水中含 N 化合物的 6 次实验平均浓度,及出水浓度随进水次数的变化过程见图 1. 以 C1、I1、B1 作为 3 类填料的代表,分析不同类型填料的 N 素淋失过程. 结果表明各设施第 1、第 2 次进水的出水中 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度很高,随着进水次数的增加,出水浓度下降明显. I1 和 B1 设施出水中 TN 浓度从 $5.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $7.71 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,低于进水中的 TN 浓度,6 次进水的平均出水 TN 浓度仅略高于自来水中的 TN 含量. 除 B3 外的各个设施自第 2 次进水,出水中 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度就小于自来水,第 6 次出水浓度已小于 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 这可能是因为填料层内形成了缺氧环境, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 在缺氧条件下转换成其他形式的 N, Berndtsson 等在瑞典北部的实验得到了类似的结果^[16]. 各个设施出水中均有明显的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 淋出,随着进水次数的增加,各设施出水的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度没有显著下降. 介质中的有机氮可能逐步氨化,并且随着模拟降雨径流缓慢释放出来.

I2 的 6 次实验出水 N 平均浓度都高于填料组成相同,厚度较小的 I1. 在设施进水量相同的条件下,其出水中淋失物的含量也较 I1 稍高. B2 中泥炭土含量较 B1 增加了 1 倍,但是 B2 出水中 N 浓度均和 B1 接近,这说明泥炭土不是出水中含 N 物质的主要来源. B3 采用醋糟作为有机质材料,出水中 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度较高,随着进水次数的增加, TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度下降明显,第 6 次实验出水 TN 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度已经接近自来水中 N 的含量. C1 设施的介质中含有 5% 醋糟和 45% 的田园土,二者的碱解氮含量远高于泥炭土, C1 的 TN 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的淋出现象比较明显,出水 N 浓度一直高于自来水.

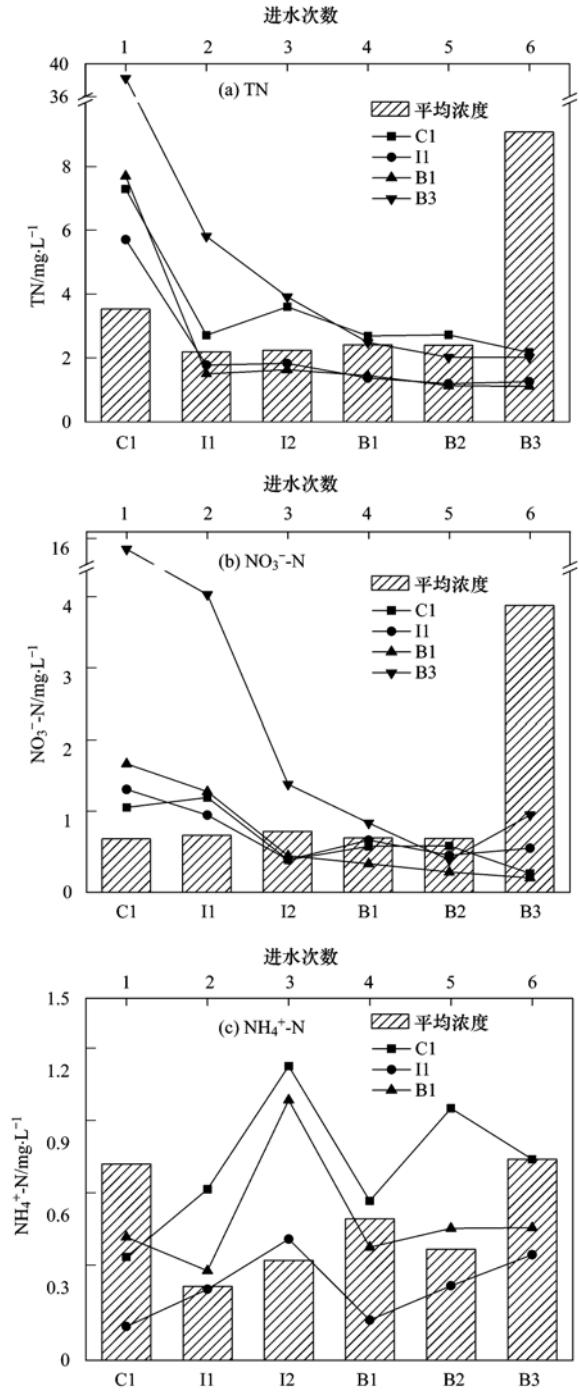


图 1 各设施 6 次出水含 N 物质的平均浓度及淋失过程

Fig. 1 Average concentration and leaching process of nitrogenous compounds in the 6 artificial rain events

2.2 P 的出水浓度与出流过程

各设施 6 次实验出水中 TP 和 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ 的平均浓度,及出水浓度随进水次数的变化过程见图 2. 自来

水中 P 含量非常低,出水中的 P 都来自填料的淋失^[17]. 随着模拟降雨次数的增加,出水中 P 含量的下降幅度不如 N 明显. 结合表 2 对介质理化性质的分析,田园土、泥炭土和醋糟应该是填料磷淋失的主要来源,其中田园土和醋糟的速效磷含量明显高于泥炭土. 以泥炭土作为有机质的 I1、I2、B1、B2 出水的 TP 均小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. C1 和 B3 出水中 P 含量较高,说明田园土和醋糟可以释放较多的水溶性 P,而且短时间内不容易淋洗干净. 在本文实验进水总量相当于 1.5 倍空床体积的条件下,这两种填料出水的 TP 含量不仅超过降雨中的相应值,还超过了多数屋面径流的 TP 含量^[18, 19].

为了保证在一定使用年限内(2~5 a)植物得以

生长良好,粗放型绿色屋面的填料组成也需要考虑营养物质的含量. 针对常用商业绿化种植土 P 淋失严重的现象,本研究采用添加给水厂污泥的方法进行改良. 将 C1 中 5% 体积的田园土以等体积的给水厂污泥替换,形成 C2 填料. 利用给水厂污泥改良耕地土壤,可以有效抑制 P 的淋失,而不影响植物对 P 的吸收^[20];对于生物滞留设施,填料中添加给水厂污泥也可以起到降低 P 淋失的作用^[21, 22]. C2 6 次实验出水中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均浓度为 $0.17 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,与 C1 相比下降了近 60%;TP 浓度为 $0.41 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,较 C1 降低超过 40%;而且没有发现其它监测污染物质的平均浓度增加. 添加水厂污泥对减少绿色屋面 P 的淋失效果明显.

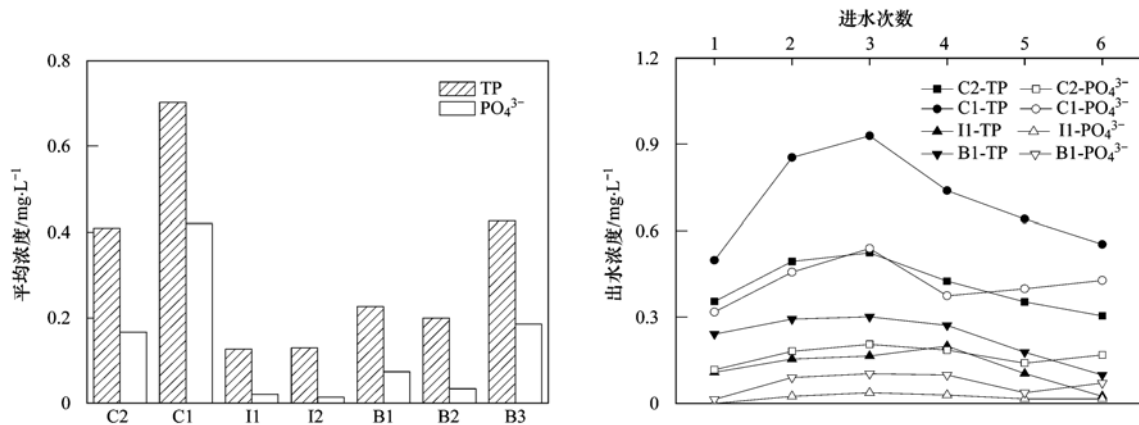


图 2 各设施 6 次出水含 P 物质的平均浓度及淋失过程

Fig. 2 Average concentration and leaching process of Phosphorus substances in the 6 artificial rain events

2.3 COD 及 SS 的出水浓度与出流过程

各设施出水 COD、SS 平均浓度和淋失过程见图 3. 除了 I1 和 I2,其他设施初始阶段出水的 COD 浓度都高于 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 随着淋洗次数增加,C1、I1 和 B1 设施出水的 COD 浓度存在下降的趋势,但是下

降趋势不明显且存在波动. 这与填料中有机质逐渐降解,缓慢淋出过程有关. 其中 B3 和 C1 出水 COD 含量较高,平均浓度分别为 $69.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $84.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这与田园土和醋糟的使用有关. 虽然部分设施的出水 COD 浓度较高,但与国内屋面径流中污

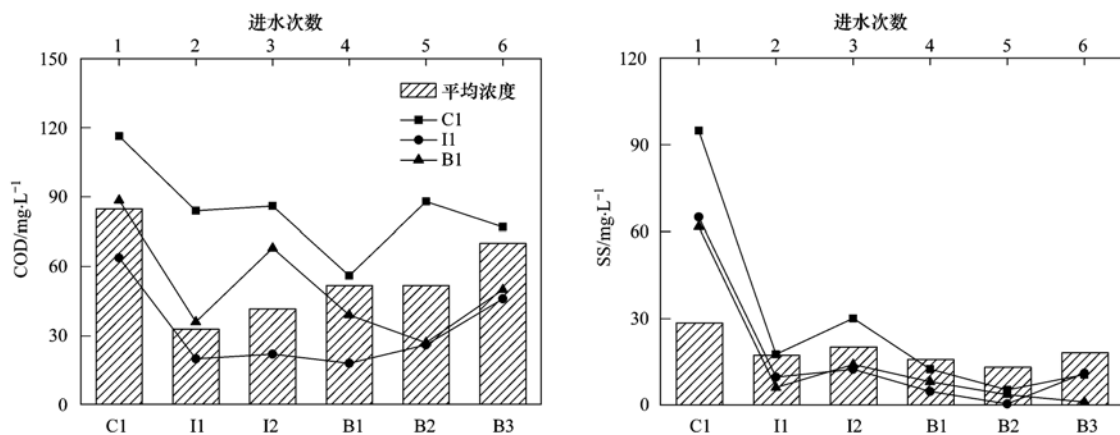


图 3 各设施 6 次出水 COD、SS 的平均浓度及淋失过程

Fig. 3 Average concentration and leaching process of COD and SS in the 6 artificial rain events

染物浓度相比,即使在使用初期粗放型绿色屋面也没有增加耗氧物质的污染^[18, 19]。

各个设施第一次实验出水中 SS 含量均较高,自第 2 次开始 SS 就下降至 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这是由于刚刚投入使用的设施,填料层还没有稳定,其中细颗粒容易随出水流出。当填料层随进水次数增加逐渐稳定之后,颗粒物的流失现象得到明显改善。出水颗粒物的含量与设施使用的过滤层材料有关。本文实验使用的土工布厚度仅 $50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$,就可以较好地控制颗粒物的流失。如果能进一步降低出水的 SS 含量,出水中 TP、COD 等污染物的浓度也有望降低。

2.4 金属离子的出水浓度与出流过程

出水中金属离子的含量及有害金属离子随进水次数的变化过程见图 4。出水中主要的金属离子包括 Mn、Fe、Zn、Pb,没有发现 Cd、Cr、Ni、Cu 淋出。

Fe、Mn、Zn、Pb 等属于有毒或有害物质。各种组成的填料都有少量的 Fe、Mn、Zn、Pb 淋出。各个设施出水 Fe、Mn、Zn、Pb 的浓度随着淋洗次数的增加而降低。模拟降雨实验初期,金属可随颗粒物一起流出,导致出水中金属含量较高;而随着进水次数的增加,易淋失颗粒物和易浸出的金属减少,出水中 Fe、Mn、Zn、Pb 浓度显著下降。在第 6 次实验大多数设施出水中 Fe 浓度小于 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,所有设施出水 Mn 含量小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,Pb 含量均小于或接近 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水 Zn 的含量基本小于 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在进水的累积空床体积不超过 1.5 的条件下,出水中各种金属离子含量均可达到饮用水标准。Ye 等^[23]研究认为利用碎砖为介质的绿色屋面设施存在金属污染的风险,而本研究中 B1 的初期出水金属可以达到饮用水标准,这可能是本研究采用的碎砖其制作粘土的成分与之不同。

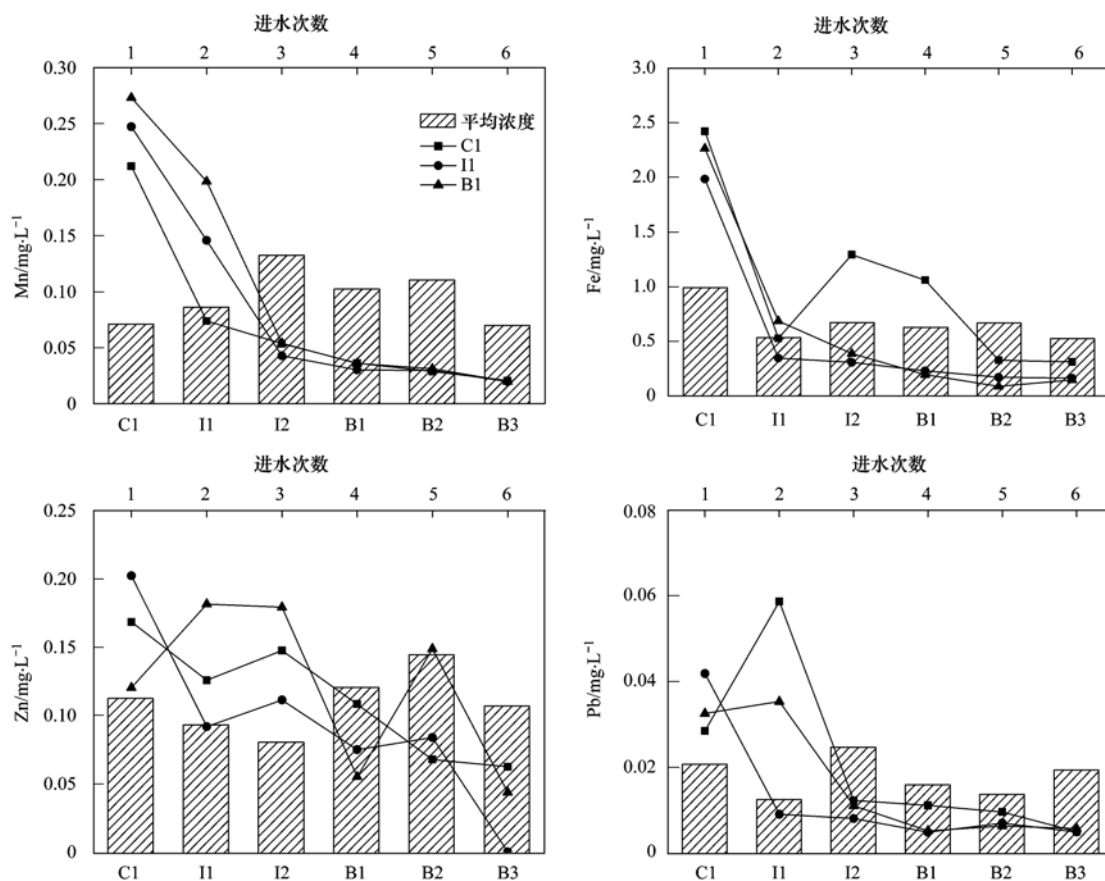


图 4 各设施 6 次出水 Mn、Fe、Zn、Pb 的平均浓度及淋失过程

Fig. 4 Average concentration and leaching process of Mn, Fe, Zn, Pb in the 6 artificial rain events

3 结论

(1)除 COD 之外,不同设施出水中污染物的浓度均随累积进水量增加下降明显,具有明显的淋

失效应;在累积进水量超过 1 倍空床体积后各污染物出水浓度趋于稳定。

(2)包括含碎砖介质在内的所有填料,设施初期出水中重金属的含量均比较低,经过约 1.5 倍空

床体积进水淋洗,出水浓度能够达到饮用水标准。

(3)以醋糟和田园土为绿色屋面填料的有机成分易引起营养物质流失,出水中不同形态的 P、N 及 COD 含量较高,泥炭土相对稳定,适合应用于粗放型绿色屋面设施。

(4)以常用绿化种植土为填料组分的设施 P 的淋出现象严重,填料中添加给水厂污泥可以有效减少 TP 的淋出同时不影响植物对 P 的吸收。

(5)粗放型绿色屋面填料的选择,除了考虑出水水质之外,还需要结合填料支持植物生长能力与削减径流水量的效果综合确定。

参考文献:

- [1] 林莉峰,李田,李贺.上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究[J].环境科学,2007,28(7):1430-1434.
- [2] 王建龙,车伍,易红星.基于低影响开发的城市雨洪控制与利用方法[J].中国给水排水,2009,25(14):6-9,16.
- [3] 白瑶,左剑恶,千里里,等.雨水径流截流渗滤系统控制城市面源污染的中试研究[J].环境科学,2011,32(9):2562-2568.
- [4] Mentens J, Raes D, Hermy M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 77(3): 217-226.
- [5] Gregoire B G, Clausen J C. Effect of a modular extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. Ecological Engineering, 2011, 37(6): 963-969.
- [6] 赵慧恩,魏艳.我国屋顶绿化建设的发展研究——以德国、北京为例对比分析[J].林业科学,2007,43(4):95-101.
- [7] Berndtsson J C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(4): 351-360.
- [8] Dvorak B, Volder A. Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 96(4): 197-213.
- [9] Lin Y J, Lin H T. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries[J]. Building and Environment, 2011, 46(2): 345-355.
- [10] Alsop S, Ebbs S, Retzlaff W. The exchangeability and leachability of metals from select green roof growth substrates[J]. Urban Ecosystems, 2010, 13(1): 91-111.
- [11] Nagase A, Dunnett N. The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 230-236.
- [12] Emilsson T, Czemieli B J, Mattsson J E, et al. Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems[J]. Ecological Engineering, 2007, 29(3): 260-271.
- [13] Morgan S, Celik S, Retzlaff W. Green roof storm-water runoff quantity and quality[J]. Journal of Environmental Engineering, 2013, 139(4): 471-478.
- [14] Teemusk A, Mander U. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events [J]. Ecological Engineering, 2007, 30(3): 271-277.
- [15] 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.
- [16] Berndtsson J C, Emilsson T, Bengtsson L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality [J]. Science of the Total Environment, 2006, 355(1-3): 48-63.
- [17] Wang X C, Zhao X H, Peng C R, et al. A field study to evaluate the impact of different factors on the nutrient pollutant concentrations in green roof runoff [J]. Water Science and Technology, 2013, 68(12): 2691-2697.
- [18] 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.
- [19] 王彪,李田,孟莹莹,等.屋面径流中营养物质的分布形态研究[J].环境科学,2008,29(11):3035-3042.
- [20] Novak J M, Watts D W. An alum-based water treatment residual can reduce extractable phosphorus concentrations in three phosphorus-enriched coastal plain soils [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(5): 1820-1827.
- [21] Oladeji O O, Sartain J B, O'Connor G A. Land application of aluminum water treatment residual: Aluminum phytoavailability and forage yield[J]. Communication in Soil and Plant Analysis, 2009, 40(9-10): 1483-1498.
- [22] O'Neill S W, Davis A P. Water treatment residual as a Bioretention amendment for phosphorus. II: Long-term column studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 138(3): 328-336.
- [23] Ye J J, Liu C Y, Zhao Z C, et al. Heavy metals in plants and substrate from simulated extensive green roofs [J]. Ecological Engineering, 2013, 55: 29-34.

CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM ₁₀	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe ²⁺ and Fe ³⁺ on the Activity of ANAMMOX	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N ₂ O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis(<i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryIAc Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N ₂ O Releases from Bioreactor Landfill	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

《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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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