

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第7期

Vol.36 No.7

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

2013年12月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析	李莉, 蔡蓓琳, 周敏 (2327)
长三角冬季一次霾过程气溶胶及其水溶性离子的区域分布特征	王曼婷, 朱彬, 王红磊, 薛国强, 何俊, 徐宏辉, 曹锦飞 (2337)
北京城区大气 PM _{2.5} 主要化学组分构成研究	刘保献, 杨懂艳, 张大伟, 陈添, 赵红帅, 陈圆圆, 陆皓昀 (2346)
2014年春季山东省 PM _{2.5} 跨界输送研究	贾海鹰, 程念亮, 何友江, 陈云波, 杜晓惠, 单晓丽 (2353)
燃煤电厂产生和排放的 PM _{2.5} 中水溶性离子特征	马子珍, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥, 邓建国, 段雷 (2361)
南京夏季城市冠层大气 CO ₂ 浓度时空分布规律的观测	高韵秋, 刘寿东, 胡凝, 王淑敏, 邓力琛, 于洲, 张圳, 李旭辉 (2367)
北京市机动车尾气排放因子研究	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 曲松 (2374)
北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力	张维康, 王兵, 牛香 (2381)
长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算	丁青青, 魏伟, 沈群, 孙予罕 (2389)
基于区域循环模型 IAP-N 的安徽省农用地 N ₂ O 排放量估算	韩云芳, 韩圣慧, 严平 (2395)
不同源汇信息提取方法对区域 CO ₂ 源汇估算及其季节变化的影响评估	张芳, 周凌晔, 王玉诏 (2405)
实测/预测辽河铬(VI)水生生物基准与风险评估	王晓南, 闫振广, 刘征涛, 张聪, 王伟莉 (2414)
博尔塔拉河河水、表层底泥及河岸土壤重金属的污染和潜在危害评价	张兆永, 吉力力·阿不都外力, 姜逢清 (2422)
岩溶泉水化学性质及 δ ¹³ C _{DIC} 影响因素	赵瑞一, 吕现福, 刘子琦, 吕春艳 (2430)
柳江流域柳州断面水化学特征及无机碳汇通量分析	原雅琼, 何师意, 于爽, 孙平安, 王艳雪, 武招云, 李新桂, 谢明鲜, 刘文, 李瑞, 张华生 (2437)
重庆市主城区次级河流总氮总磷污染特征分析及富营养化评价	庆旭瑶, 任玉芬, 吕志强, 王效科, 庞容, 邓睿, 孟龄, 马慧雅 (2446)
三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征	王法, 王强, 木志坚, 杨志丹, 宋娇艳 (2453)
干湿循环对三峡支流消落带沉积物中可转化态氮及其形态分布的影响	林俊杰, 张帅, 杨振宇, 何立平, 周依, 张倩茹 (2459)
天山天池夏季叶绿素 a 的分布及富营养化特征研究	王斌, 马健, 王银亚, 尹湘江 (2465)
西大海湖沉积物营养盐垂直分布特征变化分析	段木春, 肖海丰, 臧淑英 (2472)
草街水库蓄水后嘉陵江浮游植物群落特征及水质评价	杨敏, 张晟, 刘朔孺 (2480)
宁波三江口水域原核生物群落结构分析	胡安谊, 李姜维, 杨晓永, 王弘杰, 于昌平 (2487)
全氟化合物对表层沉积物中细菌群落结构的影响	孙雅君, 王铁宇, 彭霞薇, 王佩 (2496)
蓝藻腐解-金鱼藻生长耦合作用对水质及植物生长的影响	马月, 王国祥, 曹勤, 王小云, 马杰 (2504)
生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究	李立青, 龚燕芳, 颜子钦, 单保庆 (2511)
复合填料生物渗滤系统处理城市雨水径流的研究	王晓璐, 左剑恶, 千里里, 邢薇, 缪恒峰, 阮文权 (2518)
3种典型消毒副产物对细菌抗生素抗性的影响	吕露, 张梦露, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (2525)
基于透射光法探讨水流流速对 DNAPL 运移分布的影响	高燕维, 郑菲, 施小清, 孙媛媛, 徐红霞, 吴吉春 (2532)
BDD 和 PbO ₂ 电极电化学氧化苯并三氮唑的对比研究	伍娟丽, 张佳维, 王婷, 倪晋仁 (2540)
开放系统下方解石对邻苯二甲酸的吸附	李振炫, 黄利东, 陈艳芳, 缪晔, 刘大刚, 许正文 (2547)
碳纳米管-羟磷灰石对铅的吸附特性研究	张金利, 李宇 (2554)
刚果红分子印迹聚合物纳米微球的合成及吸附性能	常自强, 陈复彬, 张玉, 时作龙, 杨春艳, 章竹君 (2564)
碱热-酸热法合成二氧化钛-钛酸纳米管复合纳米材料对 Cd(II) 和苯酚的同步去除	雷立, 晋银佳, 王婷, 赵泉, 晏友, 刘文 (2573)
固定化菌剂对污水和牛粪中雌二醇和己烯雌酚的去除作用	李欣, 凌婉婷, 刘静娴, 孙敏霞, 高彦征, 刘娟 (2581)
PN-ANAMMOX 一体化反应器处理电子行业 PCB 废水	袁琬, 李祥, 周呈, 陈宗姮 (2591)
Fenton 氧化深度处理石化废水厂二级出水研究	王翼, 吴昌永, 周岳溪, 张雪, 董波, 陈学民 (2597)
制革废水和印染废水的综合毒性评估及鉴别	黄利, 陈文艳, 万玉山, 郑国娟, 赵远, 蔡强 (2604)
不同溶解氧条件下 A/O 系统的除碳脱氮效果和细菌群落结构变化	陈燕, 刘国华, 范强, 汪俊妍, 齐鲁, 王洪臣 (2610)
利用主要缺氧段 ORP 作为连续流单污泥污水脱氮除磷系统调控参数	王晓玲, 宋铁红, 殷宝勇, 李静文, 李紫棋, 余勇 (2617)
连续流态下以实际低基质生活污水培养好氧颗粒污泥及其脱氮性能	姚力, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建 (2626)
广东清远电子垃圾拆解区农田土壤重金属污染评价	张金莲, 丁疆峰, 卢桂宇, 党志, 易筱筠 (2633)
山东省临沂市土壤有机氯农药滴滴涕残留量与空间分布特征	喻超, 王增辉, 王红晋, 代杰瑞, 庞绪贵, 赵西强, 刘华峰 (2641)
金华市萤石矿区土壤氟污染评价	叶群峰, 周小玲 (2648)
土壤碳收支对秸秆与秸秆生物炭还田的响应及其机制	侯亚红, 王磊, 付小花, 乐毅全 (2655)
黄土区果园和刺槐林生态系统土壤有机碳变化及影响因素	李如剑, 王蕊, 李娜娜, 姜继韶, 张彦军, 王志齐, 刘庆芳, 吴得峰, 郭胜利 (2662)
缙云山土地利用方式对土壤轻组及颗粒态有机碳氮的影响	雷利国, 江长胜, 郝庆菊 (2669)
塔里木河上游典型绿洲土壤酶活性与环境因子相关分析	朱美玲, 贡璐, 张龙龙 (2678)
不同部位玉米秸秆对两种质地黑土 CO ₂ 排放和微生物量的影响	刘四义, 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 贾淑霞, 陈学文, 张士秀, 孙冰洁, 陈升龙 (2686)
1株对叔丁基邻苯二酚降解菌的筛选鉴定及响应面法优化其降解	贺强礼, 刘文斌, 杨海君, 彭晓霞, 关向杰, 黄水娥 (2695)
耐高浓度沼液产油小球藻的分离鉴定与特征分析	杨周, 王文国, 马丹炜, 汤晓玉, 胡启春 (2707)
水介质中 C ₆₀ 纳米晶体颗粒与 Cu ²⁺ 对小鼠腹腔巨噬细胞的复合毒性研究	于叶, 卞为林, 张慧敏, 张波, 何义亮 (2713)
地表水体中同时分析 18 种糖皮质激素方法的建立	郭文景, 常红, 孙德智, 吴丰昌, 杨浩 (2719)
《环境科学》征订启事 (2553) 《环境科学》征稿简则 (2640) 信息 (2546, 2609, 2616, 2647)	

生物滞留设施对城市地表径流低浓度磷吸附基质研究

李立青¹, 龚燕芳¹, 颜子钦¹, 单保庆²

(1. 中国地质大学环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 城市地表径流是淡水水体磷的重要来源之一。国际上生物滞留设施被广泛应用于城市地表径流污染的控制, 其中基质组成是影响生物滞留设施除磷效果的主要因素。本研究探讨了紫色土与河砂混合作为生物滞留设施基质吸附去除城市地表径流低浓度磷的可行性。结果表明: 山地城市重庆不透水地表 (包括居住区道路、商业区道路、停车场以及交通干道) 径流 TP 浓度变化范围为 $0.04 \sim 7.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.75 \pm 1.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TDP 浓度变化范围为 $0.02 \sim 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.15 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。根据重庆降雨特征与不透水地表径流磷污染特征, 生物滞留设施规模为 10% 不透水面积, 预期服务时间 10 a, 基质对城市地表径流 P 的预期吸附量需达到 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。中、酸性紫色土草酸浸提态 Fe、Al 含量影响 P 吸附能力, 紫色土 P 吸附能力与草酸浸提态 Fe 和 Al 含量与磷含量之比 (OR) 呈显著正相关, 20% 紫色土与 80% 河砂混合基质可以满足重庆生物滞留设施基质对城市地表径流 P 的预期吸附量要求。20% 紫色土与 80% 河砂混合基质 (厚度 60 cm) 对 P 浓度 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的进水长期模拟运行, 出水 P 浓度均低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。利用紫色土和河砂混合基质吸附去除水文过程与水质变化情况下的城市地表径流低浓度 P 是可行的。

关键词: 城市地表径流; 磷; 生物滞留设施; 紫色土; 吸附

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)07-2511-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.07.025

Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater

LI Li-qing¹, GONG Yan-fang¹, YAN Zi-qin¹, SHAN Bao-qing²

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Urban runoff is an increasingly important source of excess phosphorus (P) to local receiving waters. Bioretention, a promising technology for urban stormwater pollution treatment, was investigated to determine whether the mixture of purple soil and sand could adsorb sufficient P at low concentrations in urban stormwater. The TP concentrations of urban runoff from variously impervious areas in Chongqing City ranged from 0.04 to $7.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (mean $\pm$ S. D. = $0.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); the TDP concentrations ranged from 0.02 – $0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (mean $\pm$ S. D. = $0.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). The media adsorption benchmark was determined for a bioretention facility sized at 10% of the 100% impervious catchment area and having 10 years of capacity according to annual rainfall pattern and the runoff TDP range. The media benchmark for adsorption was calculated as $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ at soluble P concentration of $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ which provided the necessary stormwater treatment. The oxalate-extractable aluminum and iron content influenced the P sorption capacity for neutral and acid purple soils. A strong positive linear relationship was observed between the oxalate ratio [OR = $(\text{Al}_{\text{ox}} + \text{Fe}_{\text{ox}})/\text{P}_{\text{ox}}$] and media P sorption capacity. The media mixture of 20% purple soil and 80% sand showed excellent P removal, meeting the developed benchmark for adsorptive behavior. The media mixture in a large-scale (60 cm) column consistently produced soluble reactive phosphorus effluent event with mean concentrations $< 0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The media mixture of purple soil and sand can be used as a bioretention media to treat low-concentration phosphorus in urban runoff under various hydrologic and pollutant concentration conditions.

Key words: urban stormwater runoff; phosphorus; bioretention facilities; purple soils; adsorption

过量磷输入是引起淡水水体富营养化的主要原因^[1]。随着点源污染治理的深入, 城市地表径流已成为淡水水体磷的重要来源。国际上通过多年的研究探索与实践, 逐渐形成了以低影响发展措施 (low impact development, LID) 为代表的城市雨水可持续管理与控制的理念与技术体系^[2]。其中生物滞留设施是低影响发展技术中应用最为广泛的城市地表径流污染控制措施。

生物滞留设施是指由 $0.7 \sim 1 \text{ m}$ 深的砂质壤土或壤质砂土及其种植其上的植物组成, 用以处理城市地表径流, 在径流渗透过程中, 通过沉淀、过滤、吸附以及生物过程达到对地表径流的滞留与净化作

收稿日期: 2014-11-29; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07307001)

作者简介: 李立青 (1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为城市地表径流污染控制, E-mail: li-liqing@163.com

用^[3]. 大量室内与野外研究表明生物滞留设施可以有效去除城市地表径流中悬浮颗粒物、重金属、PAHs 和磷^[4-10]. 其中沉淀、过滤与吸附是生物滞留设施除磷的主要机制^[11]. 生物滞留设施基质对磷的吸附性影响对地表径流磷的去除效果. 选择含磷量低、黏粒含量高、富含铁、铝的材料作为生物滞留设施的基质组成,可提高其对城市地表径流磷的去除能力^[12]. 但是当基质黏粒含量高时,削弱入渗能力,降低生物滞留设施的水力负荷,不能满足对城市地表径流的处理要求. 通常生物滞留设施基质的入渗能力要求在 2.5 ~ 10 cm·h⁻¹ 范围内^[12]. 因此,在生物滞留设施基质筛选过程中,保证基质水力负荷高的情况下,提高基质磷吸附能力是关键. O'Neill 等^[13, 14] 通过室内研究向生物滞留设施基质添加一定比例的水厂混凝沉淀物提高其对磷的去除能力,并将其应用在野外现场生物滞留设施基质的改造,通过为期 2 a 的监测,在不降低水力负荷的前提下,出水磷酸盐均 < 0.10 mg·L⁻¹ ^[15]. 国内对生物滞留设施控制城市地表径流污染的研究与工程应用起步较晚,主要是一些对技术特点、组成及应用

的综述性报道^[16-18]. 另外也开展了部分生物滞留技术填料组成对地表径流氮、磷去除效果影响的室内与中式规模的研究^[19-21].

紫色土黏粒含量高、富含 Fe/Al 等特点,因而对 P 的吸附性高,可能作为生物滞留设施基质的组成,提高对城市地表径流中 P 的吸附. 但是紫色土黏粒含量高,水力传导性差. 因此本研究根据城市地表径流中 P 浓度其形态组成,在确定生物滞留设施基质对城市地表径流磷目标吸附量的基础上,筛选研究紫色土与河砂混合基质对 P 的吸附特征,并通过模拟研究其对城市地表径流磷的吸附去除效果,以期构建以除磷为主要目标的生物滞留设施基质组成选择提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试土壤/基质

本实验所选的紫色土和河砂均取自重庆渝北区. 紫色土采集于重庆龙景湖流域,共采集 6 个紫色土样品,紫色土 pH、粒径、有机质含量、草酸浸提 Fe、Al、P 以及全磷含量见表 1.

表 1 供试紫色土基本理化特征
Table 1 Characteristics of the investigated purple soils

土壤	采样点(深度)	pH	粒径分布/%			OM /%	草酸浸提/mg·kg ⁻¹			全磷 /mg·kg ⁻¹
			黏粒 (< 0.002 mm)	粉砂 (0.002 ~ 0.02 mm)	砂粒 (0.02 ~ 2 mm)		P	Fe	Al	
S1	园区坡脚荒地(0 ~ 100 cm)	7.80	11.7	42.3	46.0	0.52	20	854	137	90
S2	园区坡中林地(30 ~ 50 cm)	5.51	4.8	17.1	78.1	0.83	9	337	413	128
S3	园区坡中林地(0 ~ 30 cm)	5.11	15.6	39.1	45.3	0.79	6	429	402	108
S4	流域坡顶林地(0 ~ 30 cm)	5.88	14.5	49.5	36.1	1.56	39	1 564	453	403
S5	坡脚岸边林地(0 ~ 50 cm)	5.37	14.1	45.2	40.7	0.73	40	582	414	166
S6	坡脚岸边林地(0 ~ 20 cm)	7.51	14.5	58.0	27.4	0.56	90	231	469	469

1.2 土壤/基质等温吸附实验

紫色土吸附实验的目的是研究紫色土对低浓度磷的吸附特征. 紫色土风干,过 2 mm 筛. 分别称取紫色土 2.00 g 于 50 mL 离心管中,加入由 0.01 mol·L⁻¹ KCl 溶液配制的磷浓度为 0、0.10、0.30、0.50、1.00、3.00、7.00 和 10.00 mg·L⁻¹ (以 P 计)的 KH₂PO₄ 溶液 40 mL. 在 25℃、120 r·min⁻¹ 下振荡至吸附平衡(24 h); 然后取出在 2 000 r·min⁻¹ 下离心分离 13 min,将离心后的上清液用 0.45 μm 的滤膜过滤,待测,实验重复 1 次. 在紫色土吸附特征的研究基础上,筛选了 1 个相对吸附能力强的紫色土,开展了紫色土与河砂混合对低浓度磷的等温吸附特性,分别考察了河砂添加 20%、40% 和 60% 紫色土情况下对低浓度磷的吸附特征.

1.3 混合基质吸附柱模拟实验

本次实验室模拟装置自行设计,由上海同广科教仪器有限公司生产. 4 根过滤吸附柱内径 19 cm,高度 120 cm. 吸附柱由流量计控制进水流量; 吸附柱顶端设置多孔布水漏斗,以保证水流较大时可以均匀下落. 4 根吸附柱分别考察 30 cm 深河砂(编号 A,对照)、30 cm 深 20% 紫色土与 80% 河砂(编号 B)、30 cm 深 40% 紫色土与 60% 河砂(编号 C)和 60 cm 20% 紫色土与 80% 河砂(编号 D)对城市地表径流低浓度磷的吸附去除效果. 吸附柱的模拟用水采取人工配置的方法制备,根据重庆市地表径流磷的污染特征,由 0.01 mol·L⁻¹ KCl 溶液配制的磷浓度 0.30 mg·L⁻¹ (以 P 计)的 KH₂PO₄ 作为模拟进水,因生物滞留设施对 SS 及颗粒态磷的去除效果很

好,所以配水中没有添加颗粒态的污染物.

4 根吸附柱填料装填完毕后,进入启动阶段,其主要目的是冲洗填料并使之装填均匀,同时测定饱和入渗率. 吸附柱 A、B、C、D 的入渗率分别为 28.2、4.9、1.5 和 4.9 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$,20% 紫色土与 80% 河砂混合可满足生物滞留设施除磷入渗率(2.5 ~ 10 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)的要求. 4 根吸附柱模拟水量、水质运行条件见表 2,分为①恒定流量与恒定 P 浓度的模拟;②根据地表径流污染特征,设置变流量与 P 浓度变化条件的模拟;③考察在流量不变的情况下,增加 P 浓度与两次降雨间隔时间对 P 吸附去除的影响. 每次模拟运行 6 h,进、出水每 2 h 分别采集样品 1 个. 试验 14 和 17 为变流量与变 P 浓度模拟. 实验 19 和 20 为模拟运行 3 h. 所有采集水样用 0.45 μm 的滤膜过滤,待测.

1.4 分析方法与数据处理

土壤/基质 pH 水土比 2.5:1 电极法测定,土壤粒径分布采用激光粒度分析仪测定,有机质采用水合热重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定^[22]. 草酸浸提态 P(P_{ox})、Al(Al_{ox})和 Fe(Fe_{ox})采用 0.1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 草酸(HCO_4) + 0.175 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 草酸铵 $[(\text{NH}_4)_2\text{CO}_4]$ 溶液浸提(水土比:40:1,暗处振荡,离心过滤)ICP-

AES 测定,土壤全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消解钼锑抗分光光度法测定^[23]. 水样中 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的测定采用钼锑抗分光光度法测定^[24].

对于等温条件下固体表面的吸附现象,常用 Langmuir 方程和 Freundlich 方程描述. 本研究选取 Freundlich 方程描述紫色土/混合基质对低浓度磷的吸附特征. Freundlich 方程表达为:

$$\ln Q_e = \frac{1}{n} \ln c_e + \ln K$$

(1)

式中, c_e 为土壤/基质吸附平衡时溶液磷浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q_e 为吸附平衡时吸附量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); K 、为常数, K 反映基质的吸附能力 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), $1/n$ 反映基质的吸附强度. 许多研究表明土壤草酸浸提态 Fe 和 Al 的含量($Fe_{\text{ox}} + Al_{\text{ox}}$)与磷吸附能力或磷释放风险具有很强的相关性^[25]. 本研究采用草酸浸提态 Fe 和 Al 含量与磷含量之比(OR)评价土壤/基质的磷吸附或释放能力.

$$\text{OR} = \frac{Al_{\text{ox}} + Fe_{\text{ox}}}{P_{\text{ox}}}$$

(2)

式中草酸浸提态 P(P_{ox})、Al(Al_{ox})和 Fe(Fe_{ox})单位为 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. 通常当 $\text{OR} < 10$ 时,酸性到中性土壤存在磷释放风险^[25, 26].

表 2 吸附柱模拟实验水文水质运行条件

Table 2 Hydrological conditions and phosphorous concentrations for column tests								
实验编号	进水流量条件					P /mg·L ⁻¹	流量分布	间隔时间 /d
	流量变化	时间/min	流量/mL·min ⁻¹					
			A	B/D	C			
1 ~ 11,13,16,21	—	360	133	23.7	7.3	0.32	均匀流	3
12	—	360	133	23.7	7.3	0.30	均匀流	7
14	1	15	50	10	3	0.43	对数正态分布	3
	2	25	167	33	10	0.43		
	3	60	233	50	20	0.35		
	4	80	167	38	10	0.29		
	5	90	133	16	8	0.25		
	6	90	50	10	3	0.18		
15	—	360	133	23.7	7.3	0.63	均匀流	3
17	1	15	50	10	3	0.96	对数正态分布	6
	2	25	167	33	10	0.88		
	3	60	233	50	20	0.77		
	4	80	167	38	10	0.65		
	5	90	133	16	8	0.53		
	6	90	50	10	3	0.44		
18	—	360	133	23.7	7.3	0.20	均匀流	3
19	—	180	133	23.7	7.3	0.30	均匀流	3
20	—	180	133	23.7	7.3	0.30	均匀流	3

2 结果与分析

2.1 山地城市地表径流 P 污染特征

图 1 是山地城市重庆江北区 8 个采样点(包括

居住区道路、商业区道路、停车场以及交通干道)地表径流总磷(TP)和溶解性总磷(TDP)总体污染特征. TP 浓度变化范围为 0.04 ~ 7.00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均值为 $(0.75 \pm 1.08) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; TDP 浓度变化范围为

0.02 ~0.46 mg·L⁻¹,均值为(0.15 ± 0.10)mg·L⁻¹. TDP 占 TP 40% ~50%的数据比例最高为 19%. 生物滞留设施对地表径流 TP 的去除过程包括沉淀、过滤和吸附^[11],对 TDP 主要通过基质的吸附. 本次对生物滞留设施基质的研究主要针对 TDP 的去除. 因此,选择 TDP 为 0.30 mg·L⁻¹代表城市地表径流 TDP 浓度,开展模拟研究.

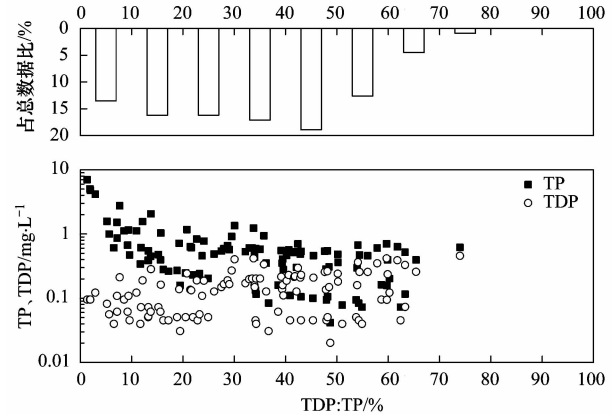


图 1 重庆城市地表径流 P 污染特征
Fig. 1 Distribution of phosphorus in urban runoff from Chongqing City

2.2 生物滞留设施基质 P 目标吸附量

生物滞留设施基质对城市地表径流中 P 的预期吸附量(q)可由下式来计算:

$$q = \frac{V_R c_P t}{V_M \rho} \tag{3}$$

式中, V_R 为城市地表年径流量(m^3), c_P 为城市地表径流 P 浓度($mg \cdot L^{-1}$), t 为生物滞留设施预期服务时间(a), V_M 生物滞留设施基质体积(m^3), ρ 为基质容重($kg \cdot m^{-3}$). 重庆年降雨量1 200 mm,日降雨量大于 10 mm 的天数为 30 d,累积降雨 890 mm(图 2),以截流不透水地表初期 15 mm 径流为标准,地表径流溶解性 P 浓度为 0.30 $mg \cdot L^{-1}$. 基质 P 目标吸附量按设施占地面积为10%不透水地表面积,预期服务时间 10 a. 因此,生物滞留设施基质对城市地表径流中 P 的预期吸附量(q)的计算结果为 7.5 $mg \cdot kg^{-1}$.

2.3 紫色土/基质对低浓度 P 吸附特征

6 种紫色土对低浓度 P 的等温吸附过程见图 3,对磷的吸附过程表现出一定的差异. 采用 Freundlich 等温吸附曲线拟合结果见表 3. Freundlich 方程中 $1/n$ 可大致反映磷的吸附强度, $1/n$ 值变化不大(0.47 ~0.60), K 值反映了紫色土图吸附磷能力的大小, K 值越大,表明紫色土对磷的吸

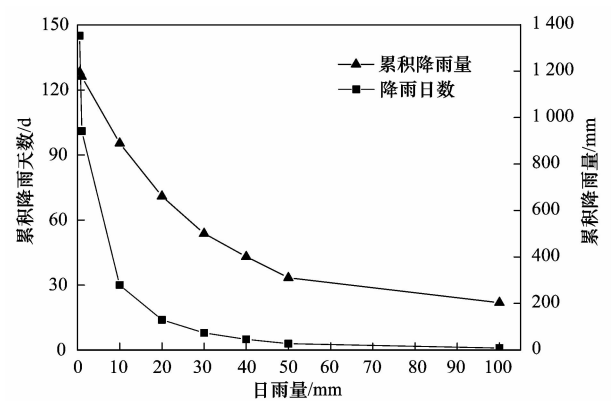


图 2 重庆市日降雨量分布特征
Fig. 2 Distribution of daily rainfall from Chongqing City

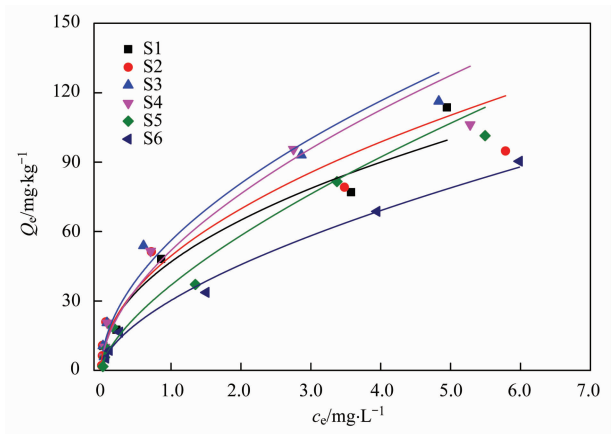


图 3 6 种供试紫色土对低浓度 P 等温吸附过程比较
Fig. 3 Comparison of P adsorption isotherms for six purple soils

表 3 测试土壤/基质 Freundlich 方程常数统计

Table 3 Freundlich equation constants for investigated purple soils and mixtures				
土壤/基质	K / $mg \cdot kg^{-1}$	$1/n$	R^2	$Q_e/mg \cdot kg^{-1}$ (0.30 $mg \cdot L^{-1}$)
S1	46.9	0.47	0.96	26.6
S2	49.5	0.50	0.90	27.1
S3	56.1	0.53	0.90	29.8
S4	51.8	0.56	0.92	26.4
S5	36.9	0.66	0.92	16.6
S6	30.2	0.60	0.99	14.7
100% 河砂	9.1	1.00	0.98	2.7
20% 紫色土 S1	22.8	0.71	0.90	9.7
40% 紫色土 S1	30.2	0.55	0.99	15.6
60% 紫色土 S1	38.4	0.59	0.98	19.0

附能力越强. 6 种紫色土 K 值大小依次为 $S3 > S4 > S2 > S1 > S5 > S6$. 其中 S1、S2、S3、S4 对磷的吸附能力相当,都强于 S5、S6.

对于中、酸性紫色土草酸浸提态 Fe、Al 和 P 的含量影响其对 P 的吸附能力. 水中磷素可以与

Fe^{3+} 、 Al^{3+} 等离子及其水合物、氧化物反应形成难溶性化合物. S1、S2、S3 和 S4 的 Fe_{ox} 和 Al_{ox} 含量相对高于 S5 和 S6 的 Fe_{ox} 和 Al_{ox} 含量,而 P_{ox} 低于 S5 和 S6(见表 1),所以 S1、S2、S3、S4 对磷的吸附能力显著高于 S5 和 S6. 图 4 反映了紫色土 P 吸附能力 K 与草酸浸提态 Fe 和 Al 含量与磷含量之比 (OR) 呈显著正相关,随着紫色土 OR 值的增加,对磷吸附能力 K 相应升高. 因此 OR 可以用来评价生物滞留系统土壤/基质的磷吸附能力.

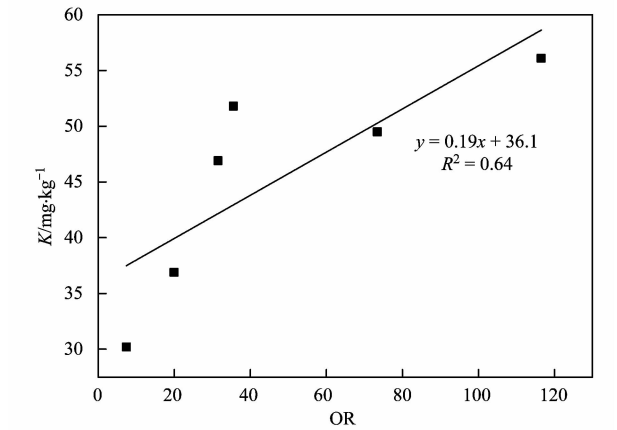


图 4 紫色土 P 吸附能力 K 与草酸浸提态 Fe 和 Al 含量与磷含量之比 (OR) 相关性

Fig. 4 Relationship between the purple soil P adsorption capacity and measured oxalate ratio (OR)

鉴于紫色土 S1、S2、S3、S4 对低浓度 P 吸附能力相当,选择紫色土 S1 为生物滞留设施基质的组成,但是紫色土黏粒含量高(见表 1),不能满足处理城市地表径流高水力负荷的要求. 因此采用紫色土与河砂混合作为生物滞留设施的基质组成. 图 5 是不同比例河砂与紫色土 S1 混合基质对低浓度 P 等温吸附过程. 随着紫色土比例的增加(20% ~ 60%)混合基质对 P 的吸附能力(K)升高(表 3). 利用 20% 紫色土与 80% 河砂混合基质当 P 平衡浓度(c_e)为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,P 平衡吸附量(Q_e)为 $9.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 3),可以满足重庆生物滞留设施基质对城市地表径流 P 的预期吸附量要求 ($7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). 因此 20% 紫色土与 80% 河砂混合基质可作为以除磷为目的的生物滞留设施基质.

2.4 紫色土与河砂混合基质对低浓度 P 吸附去除效果

图 6 是 4 根过滤吸附柱 21 次(历时 3 个月,每次运行 6 h 或 3 h)对模拟城市地表径流低浓度 P 的吸附去除过程,图 7 是 4 根过滤吸附柱 21 次模拟运行的平均去除效果. A 柱为对照(30 cm 河砂),在

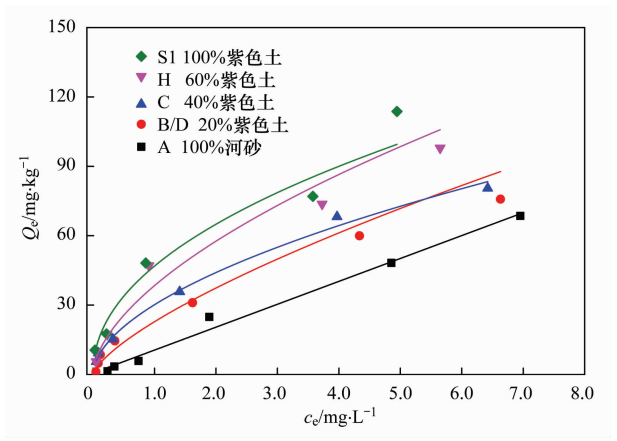


图 5 不同比例河砂与紫色土混合基质对低浓度 P 的等温吸附曲线

Fig. 5 Comparison of P adsorption isotherms for five media amended with various amounts of purple soil

进水 P 浓度为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 情况下,出水始终在 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,从第 6 次实验开始出水 P 浓度接近进水,基本穿透. B 柱(30 cm 深 20% 紫色土与 80% 河砂)、C 柱(30 cm 深 40% 紫色土与 60% 河砂)、D 柱(60 cm 深 20% 紫色土与 80% 河砂)在进水 P 浓度为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 情况下,21 次实验出水 P 浓度基本处于同一水平. B 柱 21 次运行 P 浓度基本处于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,C 柱和 D 柱 21 次运行 P 浓度基本处于 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此,向河砂添加 20% 紫色土,尽管渗透系数从 $28.2 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$ 降低到 $4.9 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$,但可以使出水 P 浓度满足《地表水环境质量标准》湖库Ⅳ类要求($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). B 柱和 C 柱出水中磷的变化趋势一样,但 B 柱出水 P 浓度普遍高于 C 柱,这说明磷的吸附与紫色土含量的多少有关,紫色土含量高的,对磷的吸附效果越好. 另外 D 柱出水浓度低于 B 柱,说明当紫色土含量相同时,基质的深度也是影响 P 吸附的一个重要因素,基质较深的,对 P 的吸附去除效果好.

对于变流量与变 P 浓度的第 14、17 次运行,B、C、D 柱出水 P 浓度没有表现出波动,说明基质对水文、水质的变化过程具有很好的缓冲性. 在流量不变的情况下,第 15 次运行增加进水 P 浓度($0.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),B、C、D 柱出水 P 浓度同样没有表现出波动,说明基质对进水 P 负荷增加的情况下,仍然能够保证出水水质的稳定. 另外对缩短运行时间的第 19、20 次实验(3 h),B、C、D 柱出水 P 浓度同样与其他实验保持一致. 因此,利用紫色土和河砂混合基质吸附去除水文过程与水质变化情况下的城市地表径流低浓度 P 是可行的.

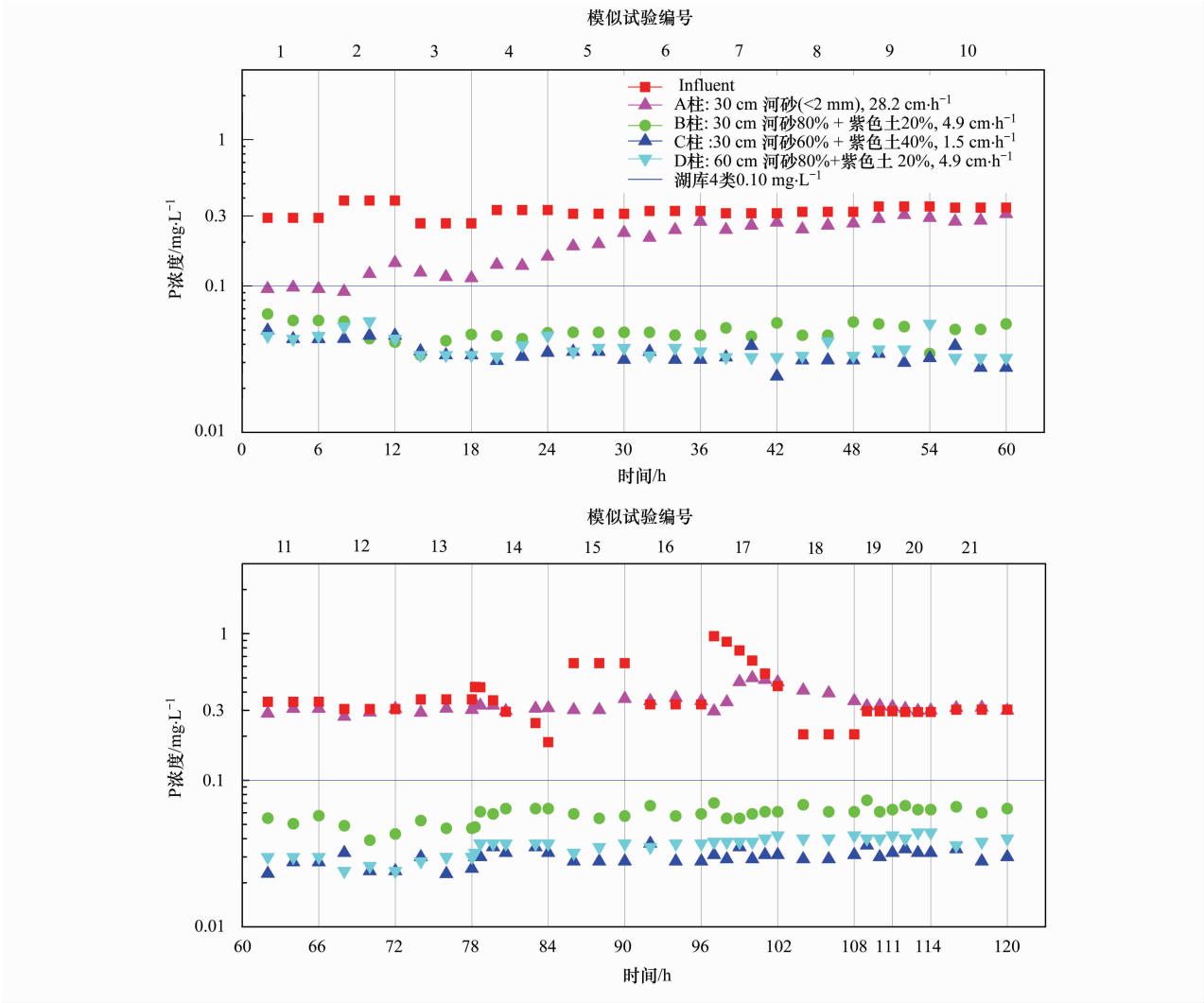


图 6 紫色土与河砂混合基质对模拟城市地表径流低浓度 P 的吸附过程去除效果

Fig. 6 Effluent P concentration as a function of cumulative run time for 4 columns runs with different mixtures of sand and purple soils

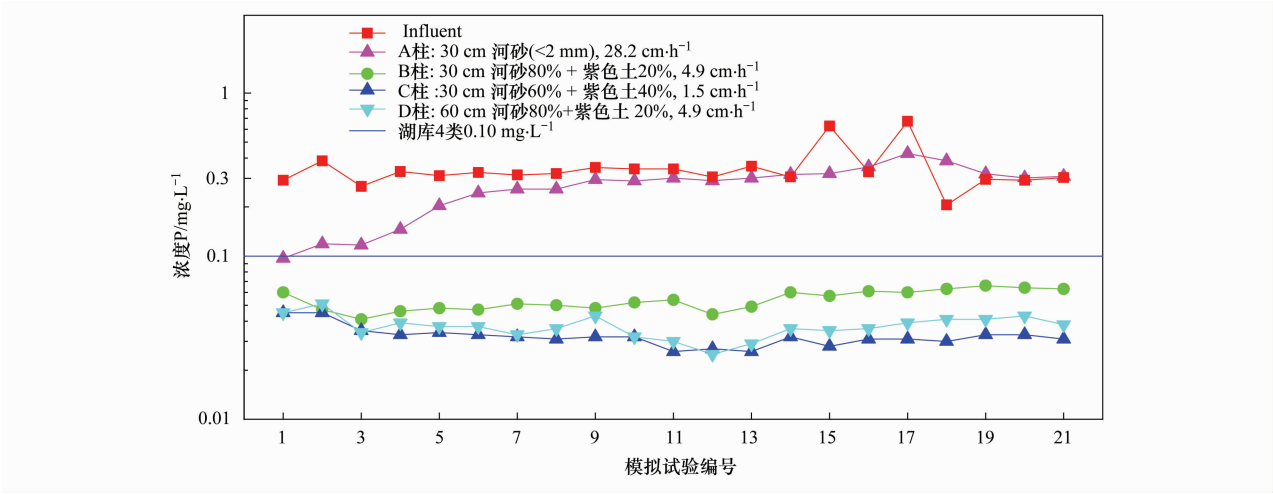


图 7 紫色土与河砂混合基质对模拟城市地表径流低浓度 P 的平均吸附去除效果

Fig. 7 Influent and effluent average P concentrations of 4 columns for 21 test runs

3 结论

(1)山地城市重庆不透水地表(包括居住区道路、商业区道路、停车场以及交通干道)径流 TP 浓度变化范围为 $0.04 \sim 7.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.75 \pm 1.08) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; TDP 浓度变化范围为 $0.02 \sim 0.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 均值为 $(0.15 \pm 0.10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2)根据重庆降雨特征与不透水地表径流磷污染特征,生物滞留设施规模为 10% 不透水面积,预期服务时间 10 a,基质对城市地表径流中 P 的预期吸附量需达到 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

(3)中、酸性紫色土草酸浸提态 Fe、Al 含量影响 P 吸附能力,紫色土 P 吸附能力与草酸浸提态 Fe 和 Al 含量与磷含量之比(OR)呈显著正相关. 20% 紫色土与 80% 河砂混合基质可以满足重庆生物滞留设施基质对城市地表径流 P 的预期吸附量要求.

(4)20% 紫色土与 80% 河砂混合基质(厚度 30 cm)对 P 浓度 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的进水长期模拟运行,出水 P 浓度在 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,可满足《地表水环境质量标准》湖库Ⅳ类要求($0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 利用紫色土和河砂混合基质吸附去除水文过程与水质变化情况下的城市地表径流低浓度 P 是可行的.

参考文献:

- [1] Stumm W, Morgan J J. Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters[M]. (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc, 1996.
- [2] Davis A P. Green engineering principles promote low-impact development[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(16): 338-344.
- [3] 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.
- [4] Davis A P, Shokouhian M, Sharma H, *et al.* Water quality improvement through bioretention media: Nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Environment Research, 2006, **78**(3): 284-293.
- [5] Hunt W F, Jarrett A R, Smith J T, *et al.* Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in North Carolina[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, **132**(6): 600-608.
- [6] Sun X L, Davis A P. Heavy metal fates in laboratory bioretention systems[J]. Chemosphere, 2007, **66**(9): 1601-1609.
- [7] Li H, Davis A P. Water quality improvement through reductions of pollutant loads using bioretention[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, **135**(8): 567-576.
- [8] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale[J]. Journal of Hydrology, 2009, **365**(3-4): 310-321.
- [9] 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.
- [10] Li H, Davis A P. Heavy metal capture and accumulation in bioretention media[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(14): 5247-5253.
- [11] Roy-Poirier A, Champagne P, Filion Y. Bioretention processes for phosphorus pollution control[J]. Environmental Reviews, 2010, **18**(NA): 159-173.
- [12] Hunt W F, Davis A P, Traver R G. Meeting Hydrologic and Water Quality Goals through Targeted Bioretention Design[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, **138**(6): 698-707.
- [13] O'Neill S W, Davis A P, Asce F. Water treatment residual as a bioretention amendment for phosphorus. II: long-term column studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, **138**(3): 328-336.
- [14] O'Neill S W, Davis A P. Water treatment residual as a bioretention amendment for phosphorus. I: evaluation studies[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, **138**(3): 318-327.
- [15] Liu J Y, Davis A P. Phosphorus Speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention[J]. Environmental Science & Technology, 2014, **48**(1): 607-614.
- [16] 李家科, 刘增超, 黄宁俊, 等. 低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(3): 431-439.
- [17] 李海燕, 罗艳红, 马玲. 生物滞留设施对地表径流中磷去除效果的研究述评[J]. 中国水土保持, 2014, **6**: 26-31.
- [18] 胡爱兵, 张书函, 陈建刚. 生物滞留池改善城市雨水径流水质的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(1): 74-82.
- [19] 孟莹莹, 王会肖, 张书函, 等. 基于生物滞留的城市道路雨水滞蓄净化效果试验研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2013, **49**(2-3): 286-291.
- [20] 胡爱兵, 李子富, 张书函, 等. 模拟生物滞留池净化城市机动车道路雨水径流[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(13): 75-79.
- [21] 侯立柱, 冯绍元, 丁跃元, 等. 多层渗滤介质系统对城市雨水径流氮磷污染物的净化作用[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 960-967.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [24] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [25] Kleinman P J A, Bryant R B, Reid W S, *et al.* Using soil phosphorus behavior to identify environmental thresholds[J]. Soil Science, 2000, **165**(12): 943-950.
- [26] Agyin-Birikorang S, O'Connor G A. Lability of drinking water treatment residuals (WTR) immobilized phosphorus: Aging and PH effects[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(4): 1076-1085.

CONTENTS

Potential Source Contribution Analysis of the Particulate Matters in Shanghai During the Heavy Haze Episode in Eastern and Middle China in December, 2013	Li Li, CAI Jun-lin, ZHOU Min (2327)
Composition and Regional Characteristics of Atmosphere Aerosol and Its Water Soluble Ions over the Yangtze River Delta Region in a Winter Haze Period	WANG Man-ting, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (2337)
Chemical Species of PM _{2.5} in the Urban Area of Beijing	LIU Bao-xian, YANG Dong-yan, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2346)
Numerical Study on the Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Shandong Province During Spring in 2014	JIA Hai-ying, CHENG Nian-liang, HE You-jiang, <i>et al.</i> (2353)
Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} Emitted from Coal-Fired Power Plants	MA Zi-zhen, LI Zhen, JIANG Jing-kun, <i>et al.</i> (2361)
Direct Observation on the Temporal and Spatial Patterns of the CO ₂ Concentration in the Atmospheric of Nanjing Urban Canyon in Summer	GAO Yun-qiu, LIU Shou-dong, HU Ning, <i>et al.</i> (2367)
Emission Factors of Vehicle Exhaust in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2374)
Adsorption Capacity of the Air Particulate Matter in Urban Landscape Plants in Different Polluted Regions of Beijing	ZHANG Wei-kang, WANG Bing, NIU Xiang (2381)
Major Air Pollutant Emissions of Coal-Fired Power Plant in Yangtze River Delta	DING Qing-qing, WEI Wei, SHEN Qun, <i>et al.</i> (2389)
Estimation of N ₂ O Emission from Anhui Croplands by Using a Regional Nitrogen Cycling Model IAP-N	HAN Yun-fang, HAN Sheng-hui, YAN Ping (2395)
Evaluation on the Impacts of Different Background Determination Methods on CO ₂ Sources and Sinks Estimation and Seasonal Variations	ZHANG Fang, ZHOU Ling-xi, WANG Yu-zhao (2405)
Measured and Predicted Aquatic Life Criteria and Risk Assessment of Chromium (VI) in Liaohe River	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, LIU Zheng-tao, <i>et al.</i> (2414)
Pollution and Potential Ecology Risk Evaluation of Heavy Metals in River Water, Top Sediments on Bed and Soils Along Banks of Bortala River, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwalili, JIANG Feng-qing (2422)
Influencing Factors for Hydrochemistry and δ ¹³ C _{DIC} of Karst Springs	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, LIU Zi-qi, <i>et al.</i> (2430)
Hydrochemical Characteristics and the Dissolved Inorganic Carbon Flux in Liuzhou Section of Liujiang Basin	YUAN Ya-qiong, HE Shi-yi, YU Shi, <i>et al.</i> (2437)
Characteristics of Total Nitrogen and Total Phosphorus Pollution and Eutrophication Assessment of Secondary River in Urban Chongqing	QING Xu-yao, REN Yu-fen, LÜ Zhi-qiang, <i>et al.</i> (2446)
Static Migration and Release of Dibutyl-Phthalate in the Fluctuating Zone of Three Gorges Reservoir	WANG Fa, WANG Qiang, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (2453)
Effect of Drought and Subsequent Re-wetting Cycles on Transferable Nitrogen and Its Form Distribution in the Sediment of Water Level Fluctuating Zone in the Tributary of Three Gorge Reservoir Areas	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, YANG Zhen-yu, <i>et al.</i> (2459)
Distribution of Chlorophyll-a and Eutrophication State in Tianchi Lake of Tianshan Mountains in Summer	WANG Bin, MA Jian, WANG Yin-ya, <i>et al.</i> (2465)
Vertical Distribution Characteristics and Analysis in Sediments of Xidaihai Lake	DUAN Mu-chun, XIAO Hai-feng, ZANG Shu-ying (2472)
Phytoplankton Community Structure and Water Quality Assessment in Jialing River After the Impoundment of Caojie Reservoir	YANG Min, ZHANG Sheng, LIU Shuo-ru (2480)
Analysis of Prokaryotic Community Structure in River Waters of the Ningbo Sanjiang Mouth	HU An-yi, LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, <i>et al.</i> (2487)
Effects of Perfluoroalkyl Substances on the Microbial Community Structure in Surface Sediments of Typical River, China	SUN Ya-jun, WANG Tie-yu, PENG Xia-wei, <i>et al.</i> (2496)
Coupling Effects of Decomposed <i>Potamogeton crispus</i> and Growing <i>Ceratophyllum demersum</i> on Water Quality and Plant Growth	MA Yue, WANG Guo-xiang, CAO Xun, <i>et al.</i> (2504)
Bioretention Media Screening for the Removal of Phosphorus in Urban Stormwater	LI Li-qing, GONG Yan-fang, YAN Zi-qin, <i>et al.</i> (2511)
Treatment of Urban Runoff Pollutants by a Multilayer Biofiltration System	WANG Xiao-lu, ZUO Jian-e, GAN Li-li, <i>et al.</i> (2518)
Effect of Three Typical Disinfection Byproducts on Bacterial Antibiotic Resistance	LÜ Lu, ZHANG Meng-lu, WANG Chun-ming, <i>et al.</i> (2525)
Laboratory Investigation of DNAPL Migration Behavior and Distribution at Varying Flow Velocities Based on Light Transmission Method	GAO Yan-wei, ZHENG Fei, SHI Xiao-qing, <i>et al.</i> (2532)
Comparative Study of Benzotriazole Electrochemical Oxidation at Boron-doped Diamond and PbO ₂ Anodes	WU Juan-li, ZHANG Jia-wei, WANG Ting, <i>et al.</i> (2540)
Sorption of <i>o</i> -Phthalate onto Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, HUANG Li-dong, CHEN Yan-fang, <i>et al.</i> (2547)
Adsorption Behaviors of Lead on Multi-Walled Carbon Nanotube-Hydroxyapatite Composites	ZHANG Jin-li, LI Yu (2554)
Synthesis and Study on Adsorption Property of Congo Red Molecularly Imprinted Polymer Nanospheres	CHANG Zi-qiang, CHEN Fu-bin, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2564)
Simultaneous Removal of Cd(II) and Phenol by Titanium Dioxide-Titanate Nanotubes Composite Nanomaterial Synthesized Through Alkaline-Acid Hydrothermal Method	LEI Li, JIN Yin-jia, WANG Ting, <i>et al.</i> (2573)
Immobilization of Estrogen-degrading Bacteria to Remove the 17β-estradiol and Diethylstilbestrol from Polluted Water and Cow Dung	LI Xin, LING Wan-ting, LIU Jing-xian, <i>et al.</i> (2581)
Optoelectronic PCB Wastewater Treatment by Partial Nitrification-ANAMMOX Integrative Reactor	YUAN Yan, LI Xiang, ZHOU Cheng, <i>et al.</i> (2591)
Treatment of Petrochemical Treatment Plant Secondary Effluent by Fenton Oxidation	WANG Yi, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (2597)
Comprehensive Toxicity Evaluation and Toxicity Identification Used in Tannery and Textile Wastewaters	HUANG Li, CHEN Wen-yan, WAN Yu-shan, <i>et al.</i> (2604)
Carbon/nitrogen Removal and Bacterial Community Structure Change in an A/O Activated Sludge System Under Different Dissolved Oxygen Conditions	CHEN Yan, LIU Guo-hua, FAN Qiang, <i>et al.</i> (2610)
ORP in the Main Anoxic Stage as the Control Parameter for Nitrogen and Phosphorus Removal in the Single Sludge System with a Continuous Flow	WANG Xiao-ling, SONG Tie-hong, YIN Bao-yong, <i>et al.</i> (2617)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Real Low Concentration Domestic Wastewater and Its Denitrification Performances Under the Continuous Flow	YAO Li, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (2626)
Heavy Metal Contamination in Farmland Soils at an E-waste Disassembling Site in Qingyuan, Guangdong, South China	ZHANG Jin-lian, DING Jiang-feng, LU Gui-ning, <i>et al.</i> (2633)
Residues and Spatial Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides DDTs in Soil of Linyi City, Shandong Province	YU Chao, WANG Zeng-hui, WANG Hong-jin, <i>et al.</i> (2641)
Assessment of Soil Fluorine Pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas	YE Qun-feng, ZHOU Xiao-ling (2648)
Response of Straw and Straw Biochar Returning to Soil Carbon Budget and Its Mechanism	HOU Ya-hong, WANG Lei, FU Xiao-hua, <i>et al.</i> (2655)
Changes of Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors of Apple Orchards and Black Locusts in the Small Watershed of Loess Plateau, China	LI Ru-jian, WANG Rui, LI Na-na, <i>et al.</i> (2662)
Impacts of Land Use Changes on Soil Light Fraction and Particulate Organic Carbon and Nitrogen in Jinyun Mountain	LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2669)
Soil Enzyme Activities and Their Relationships to Environmental Factors in a Typical Oasis in the Upper Reaches of the Tarim River	ZHU Mei-ling, GONG Lu, ZHANG Long-long (2678)
Effects of Different Residue Part Inputs of Corn Straws on CO ₂ Efflux and Microbial Biomass in Clay Loam and Sandy Loam Black Soils	LIU Si-yi, LIANG Ai-zhen, YANG Xue-ming, <i>et al.</i> (2686)
Isolation, Identification of a <i>p</i> - <i>tert</i> -Butylcatechol-Degrading Strains and Optimization for Its Degradation by Response Surface Methodology	HE Qiang-li, LIU Wen-bin, YANG Hai-jun, <i>et al.</i> (2695)
Isolation, Identification and Characteristic Analysis of an Oil-producing <i>Chlorella</i> sp. Tolerant to High-strength Anaerobic Digestion Effluent	YANG Chuang, WANG Wen-guo, MA Dan-wei, <i>et al.</i> (2707)
Coupled Cytotoxicity of C ₆₀ Nano-Crystal Particle with Cu ²⁺ to the Mouse Peritoneal Microphage RAW 264. 7	YU Ye, BIAN Wei-lin, ZHANG Hui-min, <i>et al.</i> (2713)
Simultaneous Analysis of 18 Glucocorticoids in Surface Water	GUO Wen-jing, CHANG Hong, SUN De-zhi, <i>et al.</i> (2719)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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 7 月 15 日 第 36 卷 第 7 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 7 Jul. 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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 国内邮发代号: 2-821
CN 11-1895/X

国 内 定 价: 120.00 元 国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行