

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N₂O 的分布和海-气交换通量 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究

王建军, 李田*, 张颖

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 通过静态吸附实验研究了土壤、给水厂污泥对磷的吸附特性, 采用生物滞留模拟柱, 考察生物滞留技术对城市径流中磷的去除效果, 评价以给水厂污泥改良填料的可行性。结果表明, 给水厂污泥对磷的吸附能力远大于土壤。在进水磷浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 传统填料模拟柱出水总磷随着进水量的增加浓度逐渐增大, 而改良填料模拟柱表现出稳定的长期去除效果, 经 7 个月的连续运行, 改良填料模拟柱出水总磷的浓度仍小于 $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 满足地表水 III 类水质标准。根据静态吸附实验估算结果, 相同的控制条件下, 添加 4% 给水厂污泥的改良填料对磷的吸附能力约为传统填料的 4 倍。无定型铁铝的沉淀、吸附作用是改良填料截留进水中磷的主要机制, 工程应用中可在填料中添加 4% ~ 5% 比例的给水厂污泥以提高生物滞留设施控制受纳水体富营养化的效果。

关键词: 生物滞留; 径流污染; 给水厂污泥; 除磷; 富营养化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4642-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.030

Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal

WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The characteristics of phosphorus adsorption of both soil and water treatment residual (WTR) were investigated through batch tests. The removal of phosphorus in runoff by bioretention column was evaluated. Furthermore, the feasibility of taking the WTR as a bioretention amendment was discussed. The results indicated that the phosphorus adsorptive capacity of WTR was significantly higher than that of soil. With a high influent phosphorus concentrations ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), the columns with amended media showed a better long-term removal efficiency than the columns with traditional media. The concentrations of TP in effluent from columns with amended media were less than $0.050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ after 7 months' continuous operation. According to batch test results, it was estimated that the phosphorus adsorptive capacity of amended media, which was mixed with 4% of WTR, was 4 times as high as the traditional media under same conditions. Adsorption and precipitation by amorphous iron and aluminum is the main mechanism for phosphorus removal in amended media. It is recommended that the mixture with 4% - 5% of WTR by mass in media would improve the phosphorus removal of bioretention in engineering practice.

Key words: bioretention; runoff pollution; water treatment residual; phosphorus removal; eutrophication

磷是水体富营养化的关键限制因子, 城市地表径流作为城市地表水体的主要水量补给源, 是造成水体富营养化的重要因素, 需要采取措施对相关污染给予控制。生物滞留设施又称雨水花园, 是目前国际上流行的径流管理设施, 具有适应范围广、占地少、环境生态效益显著的特点。通常认为, 生物滞留设施通过填料的截留、吸附、沉淀及植物的吸收作用去除径流中的磷, 填料的组成与性质是决定生物滞留设施除磷效果的关键因素。国外现场实验中发现, 设施对磷的去除率有显著的波动, 甚至出现出水浓度高于进水的现象^[1, 2]。

给水厂污泥作为给水厂净水工艺的副产物, 富含铁或铝的氧化物或氢氧化物, 由于其对磷具有较强的吸附作用而引起学者的广泛关注^[3-5], 其吸附除磷的机制主要包括在固体表面的物理吸附和离子

交换形式的化学吸附以及固体表面的沉积过程^[6]。研究表明, 给水厂污泥对磷的饱和吸附量在 $2.02 \sim 50.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[7, 8]。国外生物滞留设施的实验室和现场研究结果表明给水厂污泥可以有效地改良填料对磷的吸附能力^[9-11]。

本研究在分析给水厂污泥与土壤对磷吸附特性的基础上, 根据国内长三角地区土壤黏粒含量高、径流污染负荷高的特点, 以上海表层土壤作为基础介质, 建筑黄砂、木屑和给水厂污泥作为土壤改良材料, 通过不同设计参数的生物滞留模拟柱实验, 对比分析生物滞留设施对路面径流中磷的去除效果,

收稿日期: 2014-04-26; 修订日期: 2014-07-03

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: 王建军(1989~), 男, 硕士, 主要研究方向为雨水管理, E-mail: wangjianjun08@163.com

* 通讯联系人, E-mail: tianli@tongji.edu.cn

评价给水厂污泥作为填料改良介质, 强化生物滞留设施控制受纳水体富营养化的效果的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

给水厂污泥采自上海市闵行第二自来水厂, 该厂以铝盐作为絮凝剂, 装备污泥脱水设备。样品取

回后风干备用。土壤采自上海宝山区表层土壤, 木屑木质为橡木。土壤与给水厂污泥主要理化性质测定结果见表 1。从中可知, 相对土壤, 给水厂污泥中含有较高的 Al、Fe 含量, 且以无定型的草酸浸出态 Al、Fe (Al_{ox} 、 Fe_{ox}) 为主。研究认为介质对磷的吸附能力与介质中 Al_{ox} 、 Fe_{ox} 含量有关, Al_{ox} 、 Fe_{ox} 含量越高, 介质对磷的吸附能力越强^[12, 13]。

表 1 土壤和给水厂污泥的主要理化性质/ $g \cdot kg^{-1}$

介质	TP	Al_{ox}	Fe_{ox}	Al	Fe	Ca	Mg
土壤	0.65	0.25	0.76	7.03	2.89	3.30	1.28
给水厂污泥	0.48	56.65	8.56	58.70	9.25	5.36	5.45

1.2 静态吸附实验

静态吸附实验中, 以 30% 土壤、65% 建筑黄砂、5% 木屑(质量比) 配制生物滞留传统填料, 改良填料中分别添加 2%、4%、10% 的给水厂污泥(相应减少填料中土壤比例)。称取土壤、给水厂污泥及上述各种填料 1.8 g 于 50 mL 离心管中, 加入 $0.01 \text{ mol} \cdot L^{-1}$ KCl 溶液配置的标准系列浓度磷素 45 mL, 于恒温摇床($30^\circ C$) 中 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡

24 h, 离心后采用钼锑抗分光光度法测定上清液中磷的浓度。

1.3 生物滞留动态模拟实验

生物滞留模拟柱由有机玻璃制成, 内径 15 cm, 模拟柱自下而上分别为砾石层 5 cm, 沙层 5 cm, 填料层, 覆盖层 5 cm, 不同模拟柱填料层深度与组成见表 2。覆盖层上方 15 cm 处设置溢流口, 底部设出水口, 模拟柱内种植鸢尾。

表 2 模拟柱的填料深度与组成

模拟柱编号	填料层深度/cm	装填密度/ $g \cdot cm^{-3}$	填料层组成(质量分数)
1	40	1.42	65% 建筑黄砂, 30% 土壤, 5% 木屑
2	60	1.37	
3	80	1.36	65% 建筑黄砂, 25% 土壤, 5% 木屑, 5% 给水厂污泥
4	60	1.33	
5	80	1.34	55% 建筑黄砂, 40% 土壤, 5% 木屑
6	40	1.39	

实验采用人工进水, 维持模拟柱 15 cm 的水头高度, 分低浓度进水(2013 年 3 月 ~ 2013 年 6 月) 和高浓度进水(2013 年 6 月 ~ 2014 年 1 月) 两阶段。低浓度进水阶段以人工冲洗市政路面获得的模拟径流或实际降雨路面径流作为实验用水, 进水量每次为 6 L, 进水周期为 6 ~ 7 d, 共完成 11 次实验。为了评价 4、5 号改良填料设施对磷的去除效果, 在人工径流中添加 KH_2PO_4 作为实验进水, KH_2PO_4 的添加量(以 P 记) 为 $1.0 \text{ mg} \cdot L^{-1}$, 进水量为 6 ~ 8 L, 进水周期 3 ~ 4d, 此阶段为高浓度进水阶段, 该阶段 6 号模拟柱进水中未添加 KH_2PO_4 以作对照。进水 pH 范围在 6.2 ~ 7.8 之间, 多为中性偏碱性, 本研究主要进水水质见表 3。

为评价填料对磷的吸附机制, 模拟柱运行结束后, 测定了各模拟柱不同深度填料中铁/铝结合态磷

(Fe/Al-P) 的含量。1、2、4 号柱每 20 cm 填料取 1 个混合样品, 1 号柱共取 2 个样品; 2、4 号柱共取 3 个样品; 3、5 号柱 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 及 40 ~ 80 cm 共取 3 个样品。

表 3 主要污染物平均浓度/ $mg \cdot L^{-1}$

污染物种类	TSS	TP	TDP
低浓度进水	268.9 ± 135.0	0.60 ± 0.28	0.20 ± 0.15
高浓度进水	— ¹⁾	1.21 ± 0.28	1.06 ± 0.14

1) 表示未测定

1.4 测定方法

土壤、给水厂污泥中 Al、Fe 等元素含量经酸消解后用 ICP-AES(ICP Agilent 720ES) 测定^[14]; TP 以酸溶法消解后测定^[14]; 草酸浸出态 Al、Fe、P (Al_{ox} 、 Fe_{ox} 、 P_{ox}) 用草酸和草酸铵缓冲液提取后, 以

ICP-AES 测定上清液中 Al_{ox} 、 Fe_{ox} , 以钼锑抗分光光度法测定上清液中磷^[9]; $Fe/Al-P$ 以 SMT 分离法测定^[15]; 进出水中 TSS、TP、TDP、 PO_4^{3-} 均采用国家标准方法测定^[16].

1.5 数据分析方法

1.5.1 静态吸附实验

分别用 Freundlich 和 Langmuir 方程[见式(1)、(2)]拟合静态实验介质或填料对磷的吸附特性(表4、5).

$$q = K_f c_e^n \quad (1)$$

$$q = \frac{K_1 X_m c_e}{(1 + K_1 c_e)} \quad (2)$$

式中, q 为单位质量基质的磷吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; c_e 为磷的吸附平衡浓度, $mg \cdot L^{-1}$; X_m 为 Langmuir 理论饱和吸附量, $mg \cdot kg^{-1}$; K_f 、 K_1 、 n 均为常数.

1.5.2 填料吸附能力的估算

根据生物滞留动态模拟实验出水中 TP 的变化结果, 估算单位面积填料所能处理的径流量 Q_b , 计算方法见式(3).

$$Q_b = N \times H \quad (3)$$

式中, Q_b 为单位面积填料的径流处理量, m ; N 为出水中 TP 浓度超过临界点时进水的空床体积数; H

为生物滞留设施的填料深度, m .

根据静态吸附实验 Freundlich 拟合结果, 以 Zhang 等提出的计算方法^[17]估算 Q_b , 计算方法见式(4).

$$Q_b = \frac{K_f c^n}{c_0 - c} \times \rho \times H \quad (4)$$

式中, ρ 为生物滞留设施填料密度, $g \cdot cm^{-3}$; c 为出水中磷的临界浓度, $mg \cdot L^{-1}$, c_0 为磷的进水浓度, $mg \cdot L^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 磷的静态吸附实验

表4中给出了土壤、给水厂污泥对磷的静态吸附实验拟合结果. 从中可知, Freundlich 和 Langmuir 方程均可很好地拟合两种介质对磷的静态吸附过程, 给水厂污泥、土壤对磷的饱和吸附量分别为 $40.07 g \cdot kg^{-1}$ 和 $0.61 g \cdot kg^{-1}$, 给水厂污泥对磷的吸附能力远大于土壤. 在构建生物滞留设施时, 可以考虑添加一定比例的给水厂污泥以提高生物滞留设施对径流中磷的吸附能力. 表5中给出了添加不同比例给水厂污泥的改良填料对磷静态吸附拟合结果.

表4 土壤和给水厂污泥的吸附方程拟合结果

介质	Freundlich 吸附方程			Langmuir 吸附方程		
	K_f	n	R^2	K_1	X_m	R^2
土壤	117.87	0.37	0.983	0.12	611.34	0.970
给水厂污泥	3.24×10^3	0.33	0.992	7.5×10^{-3}	4.01×10^4	0.988

表5 填料的吸附方程拟合结果¹⁾

Table 5 Parameters of Freundlich adsorption isotherms for bioretention media

填料	Freundlich 吸附方程		
	K_f	n	R^2
传统填料(0)	75.17	0.51	0.996
改良填料(2%)	175.30	0.44	0.952
改良填料(4%)	285.10	0.50	0.941
改良填料(10%)	622.41	0.82	0.941

1) 括号内为给水厂污泥添加比例

2.2 模拟生物滞留设施处理径流实验

2.2.1 低浓度进水阶段磷的去除效果

低浓度进水阶段进水中 TDP 浓度较低, 进水累计 TDP 负荷为 $12.9 mg$. 运行初期生物滞留设施对径流中的磷具有良好的去除效果, 出水 TP 变化不大, 平均去除率均在 86% 以上(图1). 这是因为低浓度进水阶段, 进水中颗粒态磷占 TP 的比例较高,

易随着填料对 TSS 的过滤、沉淀得以去除; 该阶段进水中可溶性磷可以通过填料吸附去除. 在气温较低, 木屑无腐烂淋出时, 填料中磷无明显的淋出现象.

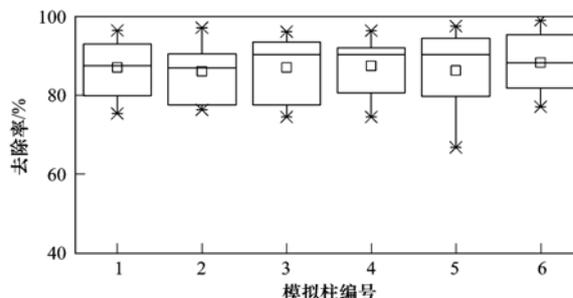


图1 低浓度进水阶段各模拟柱对 TP 的去除效果

Fig. 1 Removal efficiencies of TP by different columns in low influent concentrations

2.2.2 高浓度进水阶段磷的去除效果

高浓度进水阶段初始几次实验出水 TP 较低, 相对较稳定; 随后出水 TP 明显的升高. 图 2 中给出了 6 号模拟柱出水浊度、TP、TDP 随进水的变化过程. 结果表明出水 TP 与浊度变化趋势一致, 是木屑腐烂淋出使得水中 TP 的浓度出现了明显的增加. 此期间出水中 TDP 受木屑淋出影响较小, 6 号模拟柱出水 TP 的平均浓度为 $0.109 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TDP 的平均浓度为 $0.033 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明木屑淋出的磷主要以颗粒态磷为主. 生物滞留设施的工程应用中应选用经充分发酵的硬木屑, 以避免运行过程中木屑腐烂淋出影响出水水质.

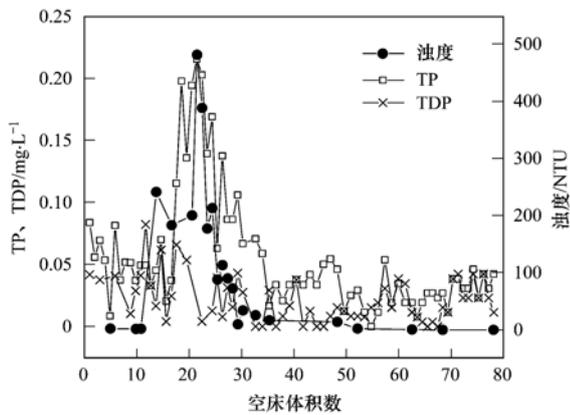


图 2 6 号模拟柱出水中浊度、磷随进水量的变化过程

Fig. 2 Variation of effluent turbidity, P concentration of column 6

填料深度、组成不同的模拟柱出水 TP、TDP 随累积进水量的变化过程见图 3, 其中分别对填料深度、进水空床体积相同的模拟柱作对照分析. 从中可知, 随着气温降低, 后续实验出水浊度降低, 各模拟柱出水 TP 也随之下落, 随累积进水量的继续增加, 传统填料模拟柱 (1~3 号) 因吸附饱和出水 TP 的浓度逐渐增大. 实验结束时 1~3 号模拟柱出水 TP 的浓度分别为 0.365 、 0.200 、 $0.162 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 与 1、3 号柱不同, 2 号柱出水 TP、TDP 变化趋势不稳定, 可能是 2 号柱填料装填不均匀, 存在一定程度的短流现象造成的. 此期间改良填料模拟柱 (4、5 号) 出水 TP 的浓度较稳定, 表现出较好的长期运行效果, 经过 7 个月的高浓度进水运行, 出水 TP 的浓度小于 $0.050 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 仍可满足《地表水环境质量标准》规定的 III 类水体 (湖、库) 标准.

高浓度进水阶段中 1~5 号模拟柱进出水情况统计见表 6. 由于木屑腐烂淋出影响了出水的 TP, 本研究在统计高浓度进水阶段出水 TP、TDP 的平均浓度时, 未计入木屑腐烂淋出时段出水的 TP、

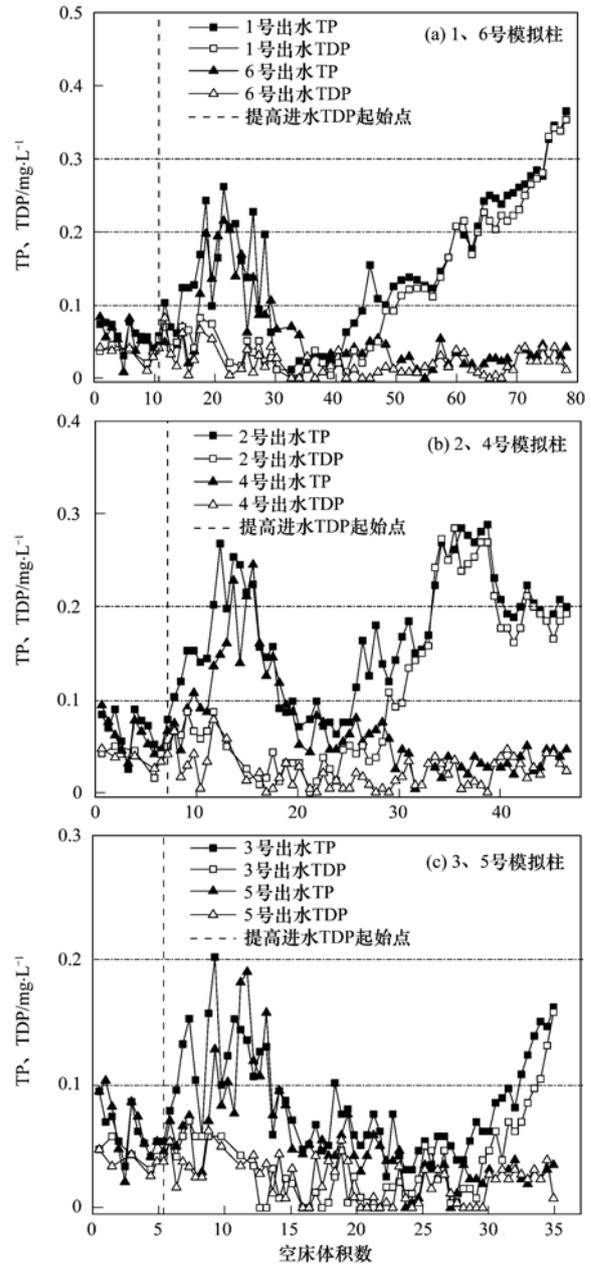


图 3 各模拟柱出水中磷随进水量的变化过程

Fig. 3 Variation of effluent P concentrations of different columns

TDP. 从中可知, 高浓度进水实验中, 1、2 号模拟柱出水中 TP 平均浓度超过 $0.15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 高于 IV 类水质标准的 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (湖、库). 对比进水条件一致的 2 号与 4 号模拟柱可得, 添加给水厂污泥的 4 号模拟柱出水 TP 平均浓度小于 $0.050 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 对比 3 号与 5 号模拟柱可以得到相似的结论.

2.3 填料改良效果评价

2.3.1 填料吸附能力的估算

根据实验结果, 定量的估算了在进水磷浓度 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 单位面积填料所能处理的径流量, 结果见表 7. 其中静态吸附实验的估算中, 1、

表 6 高浓度进水阶段各模拟柱进出水情况统计

Table 6 Statistics of influent and effluent condition of bioretention columns in high concentration phase

项目	模拟柱				
	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号
进水空床体积数	67.4	39.4	29.6	39.4	29.6
进水累计 TP/mg	497.8	440.9	440.9	440.9	440.9
进水累计 TDP/mg	444.2	387.3	387.3	387.3	387.3
出水 TP 平均浓度/mg·L ⁻¹	0.172	0.179	0.071	0.041	0.033
出水 TDP 平均浓度/mg·L ⁻¹	0.153	0.146	0.035	0.019	0.017

表 7 填料的径流处理容量估算结果/m

Table 7 Estimation of treatment capacity of media/m

临界浓度	静态吸附实验		动态模拟实验	
	传统填料	改良填料	1 号	3 号
0.10 mg·L ⁻¹	35.5	137.5	12.9	21.7
0.20 mg·L ⁻¹	57.0	219.2	19.7	—

3 号柱的填料密度取平均装填密度 1.38 g·cm⁻³; 填料深度均按照 1 m 考虑; 根据国家《地表水环境质量标准》Ⅳ、Ⅴ类水体(湖、库)的限值, 分别选择 0.10 mg·L⁻¹、0.20 mg·L⁻¹ 作为出水 TP 计算临界点。

由表 7 可知, 静态吸附实验的估算结果, 在相同控制条件下, 改良填料设施所能处理的径流量远大于传统填料, 约为传统填料的 4 倍。核算动态模拟实验与静态吸附实验的单位面积单位深度填料的径流处理量可知, 按后者计算得到的吸附能力大于前者, 这主要由于相对动态模拟实验, 静态吸附实验中磷可以与填料充分的接触, 且保证充分的吸附时间。由于在实验期内, 改良填料模拟柱出水中 TP 未随累计进水体积的增加而出现明显的升高, 未能根据

动态模拟结果定量估算改良填料吸附能力, 但实验结果已证明添加给水厂污泥可以有效提高填料对磷的吸附能力。

2.3.2 运行后填料分析

经测定, 实验前传统填料及改良填料中 Fe/Al-P 含量分别为 22.6 mg·kg⁻¹、82.8 mg·kg⁻¹, 运行后 1~5 号模拟柱不同深度填料中 Fe/Al-P 含量及 Fe/Al-P 的增量(ΔP) 统计结果见表 8。从中可知, 除 2 号模拟柱外, 各模拟柱填料中 Fe/Al-P 含量变化趋势相似, 深度越小, 填料中 Fe/Al-P 含量越高。表 8 表明 2 号模拟柱产生了短流现象, 径流未能与上层填料充分接触反应。计算得到, 改良填料中 Fe/Al-P 占 TP 截留量的比例可达 85% 以上, 远大于其在传统填料中所占的比例, 这表明改良填料截留的磷主要以 Fe/Al-P 的形态存在, 添加给水厂污泥增加了填料中无定型 Fe、Al 的含量, 从而提高填料对磷的吸附截留能力。改良填料模拟柱 0~20 cm 填料中 Fe/Al-P 增量较大, 中下层填料(20 cm 以下)中 Fe/Al-P 含量与初始含量相比相差不大, 说明进水中磷大部分被上层填料(0~20 cm)所吸附, 中下层填料仍有较大的磷吸附容量。

表 8 填料中 Fe/Al-P 的分布¹⁾

Table 8 Distribution and of Fe/Al-P contents in bioretention columns media

填料深度/cm	1 号		2 号		3 号		4 号		5 号	
	Fe/Al-P /mg·kg ⁻¹	ΔP /mg								
0~20	51.6	145.3	34.4	57.1	49.5	128.8	153.7	334.3	169.9	413.6
20~40	38.7	80.7	39.8	83.2	35.5	61.8	93.5	50.4	79.6	—
40~60/(40~80)	—	—	37.6	72.6	23.7	10.6	80.6	—	81.7	—
TP 截留量/mg	470.4		413.6		445.8		451.5		457.5	
Fe/Al-P 积累量/mg	226.0		212.9		201.1		384.8		413.6	
填料中 Fe/Al-P 占 TP 的比例/%	48.0		51.5		45.1		85.2		90.4	

1) 4、5 号柱下层 Fe/Al-P 含量与填料初始含量相比无增加, 故未计算对应填料的 ΔP

3 结论

(1) 较高的草酸浸出态 Al、Fe 含量使得给水厂污泥对磷的吸附能力远大于土壤, 给水厂污泥和土

壤对磷的饱和吸附量分别为 40.07 g·kg⁻¹、0.64 g·kg⁻¹。

(2) 木屑的腐烂淋出影响了生物滞留设施对进水中磷的去除效果。生物滞留设施的工程应用中应

选用经充分发酵、性质稳定的木屑或其他有机质, 以避免运行过程中有机质腐烂淋出影响出水水质。

(3) 在进水磷浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下, 随着进水量的增加, 传统填料模拟柱出水磷的浓度逐渐增大, 改良填料模拟柱表现出了较好的长期运行效果, 经过 7 个月的连续运行出水磷的浓度仍可满足地表水Ⅲ类水体(湖、库)标准。

(4) 根据静态吸附实验结果估算, 添加 4% 给水厂污泥的改良填料对磷的吸附能力约为传统填料的 4 倍。改良填料主要通过给水厂污泥中无定型 Fe、Al 的吸附沉淀作用截留进水中的磷, 从而提高填料对磷的吸附能力。

参考文献:

- [1] Hsieh C H, Davis A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(11): 1521-1531.
- [2] 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.
- [3] 高思佳, 王昌辉, 裴元生. 热活化和酸活化给水处理厂废弃铁铝泥的吸磷效果[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 606-611.
- [4] 吴慧芳, 胡文华. 聚合氯化铝污泥吸附除磷的改性研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(8): 1289-1294.
- [5] Ippolito J A, Barbarick K A, Heil D M, *et al.* Phosphorus retention mechanisms of a water treatment residual [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(5): 1857-1864.
- [6] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. *Ecological Engineering*, 1999, **12**(1-2): 5-12.
- [7] 王昌辉, 裴元生. 给水处理厂废弃铁铝泥对正磷酸盐的吸附特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2371-2377.
- [8] Razali M, Zhao Y Q, Bruen M. Effectiveness of a drinking-water treatment sludge in removing different phosphorus species from aqueous solution [J]. *Separation and Purification Technology*, 2007, **55**(3): 300-306.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Liu J Y, Davis A P. Phosphorus speciation and treatment using enhanced phosphorus removal bioretention [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(1): 607-614.
- [12] Elliott H A, O'Connor G A, Lu P, *et al.* Influence of water treatment residuals on phosphorus solubility and leaching [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(4): 1362-1369.
- [13] Maguire R O, Sims J T. Soil testing to predict phosphorus leaching [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(5): 1601-1609.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983.
- [15] Ruban V, Lopez-Sanchez J F, Pardo P, *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments-A synthesis of recent works [J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2-3): 224-228.
- [16] 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.
- [17] Zhang W, Brown G O, Storm D E, *et al.* Fly-ash-amended sand as filter media in bioretention cells to improve phosphorus removal [J]. *Water Environment Research*, 2008, **80**(6): 507-516.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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