ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 33 卷 第 12 期
2012 年 12 月 15 日

目 次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题
序 …… 陈卫平(4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展 …… 陈卫平,张炜铃,潘能,焦文涛(4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究 …… 潘能,侯振安,陈卫平,焦文涛,彭驰,刘文(4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析 …… 潘能,陈卫平,焦文涛,赵忠明,侯振安(4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响 …… 赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥(4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响 …… 吕斯丹,陈卫平,王美娥(4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响 …… 吕斯丹, 陈卫平, 王美娥(4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究 …… 赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥(4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟 …… 王美娥,陈卫平,焦文涛(4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究 …… 王巧环,陈卫平,王效科,任玉芬,张烨(4127)
北京市再生水的公众认知度评估 …… 张炜铃,陈卫平,焦文涛(4133)
研究报告
北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究 …… 陈鹏飞,张蔷,权建农,高扬,黄梦宇(4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究 …… 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华,楼晟荣, 乔利平(4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究 …… 张军科,王跃思,吴方堃,孙杰(4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估 …… 张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛(4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素 …… 刘刚,孙丽娜,李久海,徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性 …… 胡志远,李金,谭丕强,楼狄明(4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 …… 隆茜,周菊珍,孟颉,达良俊(4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征 …… 杨平,仝川,何清华,黄佳芳(4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响 …… 刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅(4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异 …… 孔祥胜, 祁士华,孙骞,黄保健(4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究 …… 马万里,刘丽艳,齐虹,白杨,沈吉敏,陈忠林,李一凡(4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源 …… 周婕成,陈振楼,毕春娟,吕金刚,许世远,潘琪(4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源 …… 周婕成,毕春娟,陈振楼,王璐,许世远,潘琪(4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估 …… 武江越,刘征涛,周俊丽,高富(4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究 …… 裴芳, 罗泽娇, 彭进进,祁士华(4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征 …… 刘庚,郭观林,南锋,魏文侠,李发生,毕如田(4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析 …… 廖小平,张彩香,赵旭,向青清,李佳乐(4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价 …… 吕金刚,毕春娟,陈振楼,周婕成,韩景超(4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价 …… 李瑞利,柴民伟,邱国玉,贺蓓(4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究 …… 张伟,张洪,单保庆(4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征 …… 秦延文,张雷,郑丙辉,曹伟(4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征 …… 朱国锋,蒲焘,何元庆,王培震, 孔建龙,张宁宁,辛惠娟(4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究 …… 周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,毛志刚,高华梅,孙明波(4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究 …… 沈清清,彭谦,赖泳红,纪开燕,韩秀林(4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为 …… 肖萍,肖峰,赵锦辉,秦潼,王东升,冯金荣,许光(4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究 …… 孙荣国,毛雯,马明,张成,王定勇(4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究 …… 李时银,李小荣,朱怡苹,朱江鹏,王国祥(4335)
酰胺咪嗪光降解效能与机制及其影响因素研究 …… 陈超,赵倩,封莉,张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究 …… 王夏琳,李睿华(4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究 …… 郭磊,贾永刚,付腾飞,刘晓磊,赵战坤(4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究 …… 谢杰,王哲,吴德意,李春杰(4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测 …… 季军远,邢雅娟,郑平(4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究 …… 王振,刘超翔,李鹏宇,董健,刘琳,朱葛夫(4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理 …… 庆承松,鲍韬,陈天虎,陈冬,谢晶晶(4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究 …… 钟晨宇,叶杰旭,李若愚,陈胜,孙德智(4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究 …… 季雪元,王毅力,冯晶(4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响 …… 宋宁慧,单正军,石利利,郭敏,许静,孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究 …… 陈广银,郑正,常志州,王海芹,叶小梅(4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为 …… 王兴润,农泽喜,王琪(4412)
国家大气污染物排放标准体系研究 …… 江梅,张国宁,张明慧,邹兰,魏玉霞,任春(4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨 …… 毕岑岑,王铁宇,吕永龙(4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析 …… 傅国伟(4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录 …… (4434)
《环境科学》征订启事(4099) 《环境科学》征稿简则(4166) 信息(4180, 4219, 4225, 4275) 专辑征稿通知(4172)

废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究

王振[1,2],刘超翔[1*],李鹏宇[1,3],董健[1,2],刘琳[1],朱葛夫[1]

(1. 中国科学院城市环境研究所,厦门 361021; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049; 3. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院,西安 710055)

摘要: 对废砖块的物理化学特性进行了分析,并对其进行了磷素吸附能力试验,结果表明,废砖块适于湿地微生物的富集和植物的生长且具有较高的磷素吸附能力. 通过构建以废砖块为填料的垂直流人工湿地系统考察并初步探索了其对生活污水中磷素的去除效果和去除机制. 结果表明,当水力负荷为 5 cm·d^{-1}、运行时间为 1 a 时,湿地系统除磷效率在 90% 以上,且效果稳定; 废砖块的吸附沉淀作用是湿地系统除磷的主要途径,而植物和微生物直接吸收所起的作用不大; 被截留磷素在湿地填料层中具有明显的空间特征,对废砖块中的无机磷形态分析结果表明,废砖块中能与磷素发生沉淀反应的元素含量和其在废砖块中的化学形态是影响其吸附沉淀磷素作用途径的重要因素. 因此,废砖块是人工湿地污水处理系统构建过程中较为理想的填料.

关键词:废砖块; 人工湿地; 磷素; 去除能力

中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)12-4373-07

Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks

WANG Zhen[1,2], LIU Chao-xiang[1], LI Peng-yu[1,3], DONG Jian[1,2], LIU Lin[1], ZHU Ge-fu[1]

(1. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Environmental and municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Physico-chemical properties of broken bricks (BB) were determined, as well as its phosphorus adsorption ability. The results showed that BB was appropriate for enrichment of microorganisms and growth of plants as filter medium in CWs, in addition, BB had high phosphorus adsorption ability. A vertical subsurface flow constructed wetland (VSSF) filled with BB was constructed in order to investigate the phosphorus removal effect of domestic sewage, and the phosphorus removal mechanism of VSSF was also explored. The results showed that the phosphorus removal rate of VSSF was more than 90%, which remained stable when the hydraulic loading rate was 5 cm·d^{-1} and the running time was 1 a; adsorption and precipitation within BB played the greatest role in phosphorus removal; distribution characteristics of total phosphorus in the filter media were attributed to the vertical flow state of wastewater in the system, besides, the contents and chemical forms of elements which could precipitate with phosphorus should be principal factors for the phosphorus removal processes of BB. Therefore, BB might be an ideal filter medium used in CWs.

Key words: broken bricks (BB); constructed wetlands; phosphorus; removal capability

人工湿地污水处理系统作为 20 世纪 70 年代发展起来的一种生态工程技术,目前在各类污染水体(富营养化水体、垃圾渗滤液、畜禽养殖废水、食品废水等)的治理中得到了广泛应用[1]. 在污水处理过程中,人工湿地对污水当中 SS 和有机物的去除率较高,但是对氮、磷元素的去除效果却不理想[2]. 而根据 Liebig 最小定律,磷素被视为是水体富营养化的主要诱导因素之一,所以强化人工湿地系统的除磷效果,对污染水体的修复来说具有十分重要的意义.

人工湿地对污水中磷的去除主要包括 3 种途径:填料的吸附沉淀作用、植物的吸收作用和微生物的转化吸收作用. 其中填料的吸附沉淀作用被认为是人工湿地系统除磷的最主要途径[3]. 因此,填料是人工湿地的重要组成部分,不仅为湿地植物、微生物提供了生长环境,其自身也参与了污水净化的物理化学过程,特别是对污水中磷素的去除发挥着重要作用.

废砖块是中国城市化建设的副产物之一. 近年来,随着中国城市化进程的加快,城市建设大规模开展,建筑垃圾(包括大量废砖块)排放量剧增,已占

收稿日期: 2012-02-28; **修订日期**: 2012-06-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-451); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07302-002); 福建省科技计划重点项目(2012Y0068); 厦门市科技计划项目(3502Z20112018)

作者简介: 王振(1985~),男,博士研究生,主要研究方向为污水生态处理与回用,E-mail:zwang@iue.ac.cn

* 通讯联系人,E-mail:cxliu@iue.ac.cn

到城市垃圾总量的 30% 以上[4]. 大量的建筑垃圾未经任何处理便被运往郊外露天堆放或填埋,造成了严重的环境污染. 在福建省,绝大多数砖块是以红壤烧制而成,其铝、铁元素含量较高[5],具有较高的除磷潜能. 因此,本研究在实验室条件下对废砖块的物理化学特性进行了分析,对其进行了磷素吸附能力测试,并考察和初步探索了废砖块作为湿地填料时对生活污水中磷素的去除效果和去除机制,分析了磷素被湿地系统截留后的分布规律,以期为废砖块在人工湿地系统中的应用提供了一定的理论依据和数据支持.

1 材料与方法

1.1 试验材料

以废砖块为试验材料,将其研磨过筛($\bar{d} \approx 2$ mm)并烘干后备用.

1.2 试验方法

1.2.1 填料对磷素的等温吸附试验

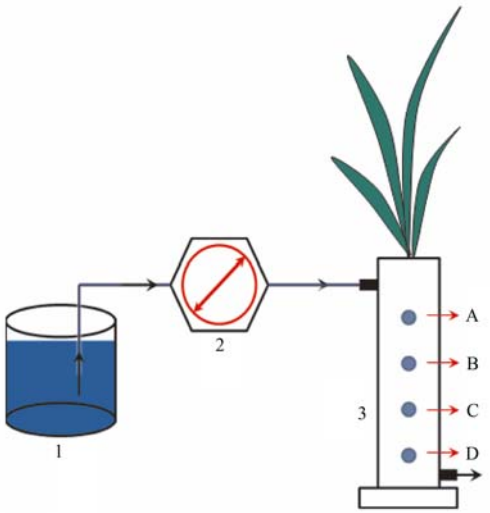
分别准确称取 2.00 g 填料于 150 mL 锥形瓶中,加入由 0.02 mol·L^{-1} KCl 溶液配制的磷素质量浓度(以 P 计,下同)为 6、10、15、24、40、60、80 mg·L^{-1}的 KH_2PO_4 溶液 50 mL,再加入 3 滴三氯甲烷以防止微生物活动对试验结果的影响,然后将锥形瓶置于恒温摇床中在转速 150 r·min^{-1}、温度 25℃条件下振荡 48 h. 振荡完毕后离心并测定上清液磷浓度. 试验设置 2 平行 3 重复.

1.2.2 填料对磷素的动态吸附试验

试验装置采用吸附柱模型(d = 20 mm,h = 400 mm),将废砖块和砾石($\bar{d} \approx 2$ mm)按不同质量比混合(废砖块质量分数分别为 0%、20%、40%、60%、80% 和 100%),并分别称取各混合填料 100 g 于吸附柱中. 进水为 KH_2PO_4 溶液[PO_4^{3-}-P 浓度为(10 ± 3) mg·L^{-1}],水力负荷(HLR)为 5 cm·d^{-1},运行时间为 1 a. 试验装置设置 3 平行.

1.2.3 小试试验

试验装置采用垂直潜流人工湿地模型(d = 20 cm,h = 100 cm),填料层高度为 80 cm,底部填充 10 cm 厚的砾石为集水区(图 1),湿地中种植芦苇(*Phragmites australis*). 湿地模型采用蠕动泵进水,进水为城市环境研究所园区内生活污水,水力负荷为 5 cm·d^{-1},运行时间从 2011-01-03 ~ 2012-01-03. 进水中 COD 浓度为 208.13 ~ 242.28 mg·L^{-1},TN 浓度为 25.41 ~ 42.53 mg·L^{-1},NH_4^+-N 浓度为 22.70 ~ 35.46 mg·L^{-1},TP 浓度为 7.71 ~ 10.67 mg·L^{-1},进水 pH 值变化范围为 7.74 ~ 8.83. 系统运行 1 a 后,对填料层的不同深度进行分析以考察被截留磷素在湿地中的空间分布规律. 不同深度填料样品编号分别为 A(0 ~ 20 cm)、B(20 ~ 40 cm)、C(40 ~ 60 cm)、D(60 ~ 80 cm).



1. 进水箱; 2. 蠕动泵; 3. 垂直潜流人工湿地模型

图 1 垂直潜流人工湿地系统试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of vertical subsurface flow constructed wetland (VSSF)

1.3 分析方法

1.3.1 填料理化特性的分析

填料的孔隙率、真密度和堆积密度均按照文献[6]中的标准方法进行测定; 填料的比表面积、微孔体积和微孔平均孔径采用比表面积分析仪进行测定; 填料 pH 值采用电位法进行测定(以 $CaCl_2$ 溶液为浸提剂,浸提剂与填料的比例为 2.5∶1); 填料水溶性盐总量(EC)采用电导率仪进行测定(以纯水为浸提剂,浸提剂与填料的比例为 5∶1); 填料采用 HF-HNO_3-$HClO_4$ 法消解后,消煮液和滤液中金属含量采用 ICP-MS 进行测定[7].

1.3.2 湿地植物生物量测定

试验结束后对系统内芦苇进行收获. 将芦苇用去离子水冲洗,风干,剪成 20 ~ 30 cm 小段,冷冻干燥至恒重,称量植物生物量. 下文中提到植物质量时均指干质量.

1.3.3 植物全磷的测定

植物样品经烘干并过 100 目筛后,准确称量 0.500 0 g用于植物全磷测定,测定方法采用硫酸/H_2O_2 消解-钼锑抗分光光度法[8].

1.3.4 污水和填料中磷素的测定

污水中 TP 的测定采用过硫酸钾消解-钼锑抗分

光光度法[9]；填料样品经烘干并过 100 目筛后，分别准确称量0.100 0和0.500 0 g 用于填料全磷和有机磷测定，测定方法分别采用硫酸/高氯酸消解-钼锑抗分光光度法和马弗炉灼烧-钼锑抗分光光度法[10].

1.3.5　填料中的无机磷形态分析方法

填料中各种形态的无机磷采用不同化学浸提剂加以逐级分离[10]（表 1）. 测定方法采用钼锑抗分光光度法.

表 1　填料中不同形态无机磷分离方法

Table 1　Chemical extraction scheme for filter medium

磷形态	浸提剂	反应条件
Loosely-P	1 mol·L^{-1} NH_4Cl	50 mL 浸提剂，振荡 0.5 h
Al-P	0.5 mol·L^{-1} NH_4F	50 mL 浸提剂，振荡 1 h
Fe-P	0.1 mol·L^{-1} NaOH	50 mL 浸提剂，振荡 2 h，静置 16 h，振荡 2 h
O-P	$C_6H_5O_7Na_3 \cdot 2H_2O$-$Na_2S_2O_4$-NaOH	50 mL 浸提剂，振荡 0.5 h
Ca-P	0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4	50 mL 浸提剂，振荡 1 h

2　结果与讨论

2.1　填料的物理特性

废砖块的物理特性如表 2 所示. 从中可知，废砖块的孔隙率、比表面积和微孔总体积均较高，在关于湿地填料的同类型研究中[11]，应用于湿地系统的填料堆积密度和孔隙率的范围分别为 0.7 ~ 1.83 g·cm^{-3}和 30.0% ~ 54.4%，而在本研究中，废砖块的堆积密度和孔隙率基本与上述结论一致. 与其他湿地填料相比[11]，废砖块具有较大的比表面积和微孔体积，在湿地系统中可以为生物膜的附着和生长提供足够的空间，也预示它的蓄磷量较大，具有较好的磷吸附能力. 另外，由图 2 可知，废砖块表面“粗糙”，具有多孔结构，特别是以孔径为 2 μm 的微孔居多. Roger[12]研究表明，填料微生物的最佳生长环境为孔径为 1 ~ 3 μm 的微孔，因此，废砖块的表面微结构有利于生物膜的生长，对提高系统的污水处理效果有积极作用.

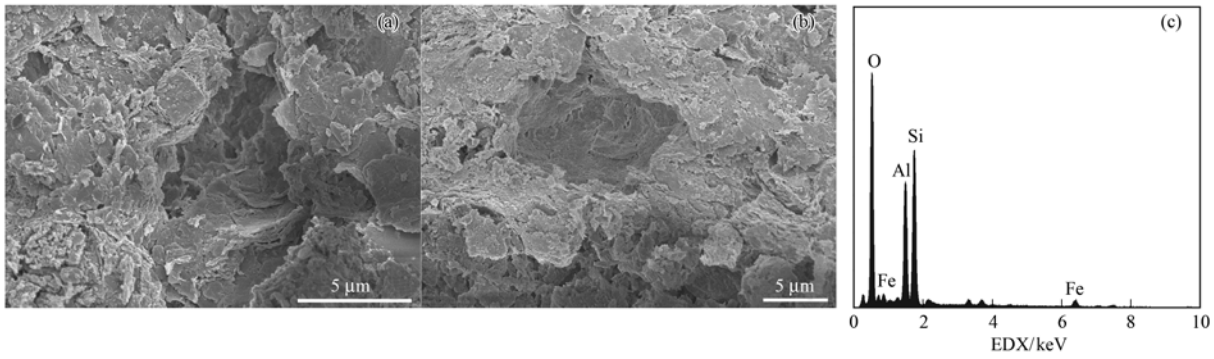


图 2　废砖块的表面微结构与表面主要化学成分

Fig. 2　SEM image and EDX spectrum of BB

表 2　废砖块的物理特性

Table 2　Physical properties of broken bricks

项目	数值
孔隙率/%	65.0
真密度/g·cm^{-3}	2.37
堆积密度/g·cm^{-3}	0.83
比表面积/m^2·g^{-1}	1.78
微孔体积/cm^3·g^{-1}	9.15×10^{-3}
微孔平均孔径/nm	8.53

2.2　填料的化学特性

结合图 2、表 2 ~ 4 可知，废砖块含有较高含量的 Al 和一定量的 Fe，而且其水溶性盐总量（EC）亦较高；废砖块中全磷的本底含量为 0.595 mg·g^{-1}，其中无机磷含量为 0.593 mg·g^{-1}且以 Al-P 和 Fe-P 为主. 当废砖块作为湿地填料时，污水中的磷素可通过与废砖块释放在间隙水中的 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等离子及其水合物、氧化物反应形成难溶性化合物，或污水中带负电的磷酸根与废砖块表面水合的 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 等金属离子发生交换被结合到填料的晶格中. 因此，废砖块的化学成分及其化学形态是影响其磷素吸附能力的主要因素. 由表 4 亦可知，废砖块当中有害重金属离子的种类与含量均较少，且 EC <4 000 μS·cm^{-1}，故其对湿地微生物和植物不会产生危害[13]. 另外，填料的 pH 值对湿地当中的植物和微生物群落也有重要影响，由表 3 可知，废砖块的

pH 值为 7.99,比较而言是较有利于湿地植物和微生物生长的湿地填料[14].

表 3 废砖块的化学特性

Table 3 Chemical properties of broken bricks

项目	数值
水溶性盐总量(EC)/μS·cm^{-1}	1 040
pH	7.99
Total P/mg·g^{-1}	0.595
Organic P/mg·g^{-1}	0.002
Inorganic P/mg·g^{-1}	0.593(100%)
Loosely-P/mg·g^{-1}	0.006(1.0%)
Al-P/mg·g^{-1}	0.413(69.6%)
Fe-P/mg·g^{-1}	0.125(21.2%)
O-P/mg·g^{-1}	0.019(3.2%)
Ca-P/mg·g^{-1}	0.030(5.0%)

2.3 填料的除磷能力分析

2.3.1 填料的磷素等温吸附线

恒温条件下填料表面发生的吸附现象,可采用 Langmuir、Freundlich 和 D-R 方程来表征其表面吸附量和介质中溶质平衡浓度之间的关系.

对于 Langmuir 方程,其线性表达式为:

$$c_e/q_e = 1/K_L + a_L c_e/K_L \quad (1)$$

对于 Freundlich 方程,其线性表达式为:

$$\lg q_e = \lg K_F + \lg c_e/n \quad (2)$$

对于 D-R 方程,其线性表达式为:

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta\varepsilon^2 \quad (3)$$

其中:

$$\varepsilon = RT\ln(1 + 1/c_e) \quad (4)$$

$$E = 1/(2\beta)^{1/2} \quad (5)$$

表 4 废砖块中的主要元素含量

Table 4 Major elemental chemical composition of broken bricks

项目	Al	Fe	Ca	As	Pb	Mg	Mn	Ti	Zn	Cl^-	SO_4^{2-}	SiO_4^{2-}	Total C	Total N	Total S
c/mg·g^{-1}	42.67	9.34	0.82	0.034	0.005	0.237	0.27	0.099	0.03	16.10	8.30	11.20	116.41	25.97	66.34

式中,c_e 为填料吸附平衡时的磷溶液浓度(mg·L^{-1}),q_e 为吸附平衡时填料对磷的吸附量(mg·g^{-1}),K_L 与 K_L/a_L 分别为 Langmuir 方程中与吸附质结合能相关的常数和填料的理论最大吸附量(mg·g^{-1}),K_F 与 n 分别为 Freundlich 方程中的常数,ε 与 β 分别为 D-R 方程中的 Polanyi 势能(kJ)与常数,R 为理想气体常数[8.314 J·(mol·K)$^{-1}$],T 为绝对温度(K),E 为平均吸附能.

废砖块的 Langmuir、Freundlich 和 D-R 等温吸附曲线拟合结果见表 5. 从等温吸附曲线拟合的相关系数来看,Langmuir 和 D-R 方程更适合废砖块的等温吸附过程,相关系数分别为 0.952 和 0.987,达到了显著和极显著水平. 最大理论吸附容量可以初步反映填料对磷素的吸附能力,是人工湿地填料选择时考虑的重要参数. 由 Langmuir 方程可知,废砖块对磷素的理论饱和吸附量为 0.594 mg·g^{-1},比较而言是构建人工湿地比较理想的除磷填料[14]. D-R 等温吸附方程中的平均吸附能 E 是判断吸附类型的重要指标,由表 5 可知,废砖块对磷素的平均吸附能 7.16 kJ·mol^{-1}. 平均吸附能的大小与吸附作用的类型有关,平均吸附能越高,发生化学吸附的可能性越大. 一般认为,化学吸附的平均吸附能在 8 ~ 16 kJ·mol^{-1}之间[15]. 由此可以判断:废砖块对磷素的吸附过程中存在化学吸附作用,即废砖块对磷素的吸附作用力除了普遍存在的范德华力外,还存在配位基交换和化学吸附作用.

表 5 废砖块的等温吸附方程及其相关参数

Table 5 Adsorption isotherms of broken bricks and relevant parameters

填料	Langmuir 方程			Freundlich 方程			D-R 方程	
	K_L	$K_L \cdot a_L^{-1}$/mg·g^{-1}	R^2	K_F	n	R^2	E/kJ·mol^{-1}	R^2
废砖块	2.44×10^{-2}	0.594	0.952	0.046	1.828	0.856	7.16	0.987

2.3.2 填料的动态除磷能力

研究表明[16],填料的磷素吸附等温模型并不能准确评价湿地填料的除磷能力,必须运用吸附等温模型和动态吸附试验相结合的方法来评价湿地填料的除磷能力. 各吸附柱对磷素的去除效果和截留量如图 3 所示. 从中可知,吸附柱的除磷能力随混合填料中废砖块质量分数的升高而增高. 当废砖块质量为 100 g 时,吸附柱的除磷效果最好,运行 234 d 后发生磷素穿透现象,吸附柱截留的磷量为 36.90 mg; 当废砖块质量为 0 g 时,吸附柱的除磷效果最差,运行 17 d 即发生磷素穿透现象,吸附柱截留的磷量为 2.70 mg. 由此可知,在动态吸附试验中废砖块的磷素吸附量为 0.369 mg·g^{-1},小于其理论饱和吸附量. 另外,填料中废砖块的质量分数分别与吸

附柱的穿透时间和磷素截留量呈线性相关关系：$Y = 0.454\,8X - 5.709\,0$（$R^2 = 0.998\,2^{**}$），$Y = 289.533\,7X - 5.931\,9$（$R^2 = 0.998\,0^{**}$），见图 4 和图 5.

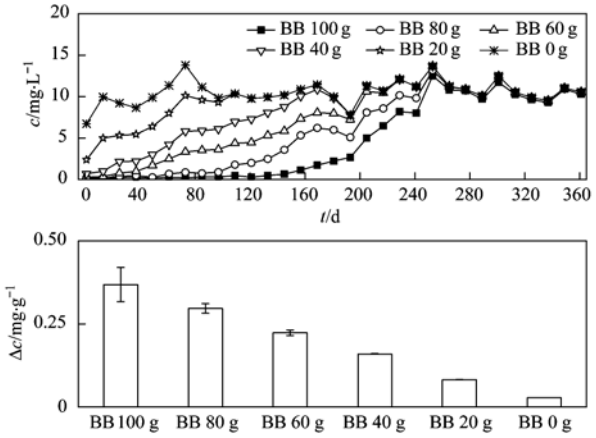


图 3　各吸附柱的除磷效果及截留磷量

Fig. 3　Phosphorus removal effect and retained phosphorus of each column

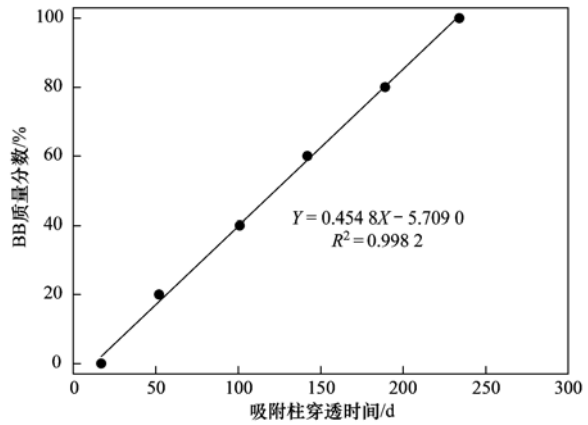


图 4　废砖块质量分数与吸附柱穿透时间的关系

Fig. 4　Relationship between content of BB and saturation time of each column

2.4　湿地系统对生活污水中磷素的去除效果及去除途径

2.4.1　湿地系统对污水中磷素的去除效果

图 6 所示为湿地系统在稳定运行 1 a 内的除磷效果. 从中可知，该湿地系统在运行期间表现出较高的除磷能力，除磷效率 > 90%，出水磷浓度低于 0.20 mg·L^{-1}且除磷效果稳定. 系统运行结果表明，合适的填料是湿地系统高效除磷的重要保障.

2.4.2　磷素在湿地系统中的去除途径

本研究分析并计算了 1 a 内湿地系统对污水磷素的去除量以及湿地植物的磷素吸收量，并评价了湿地系统中各个除磷途径的贡献. 由表 6 可知，湿

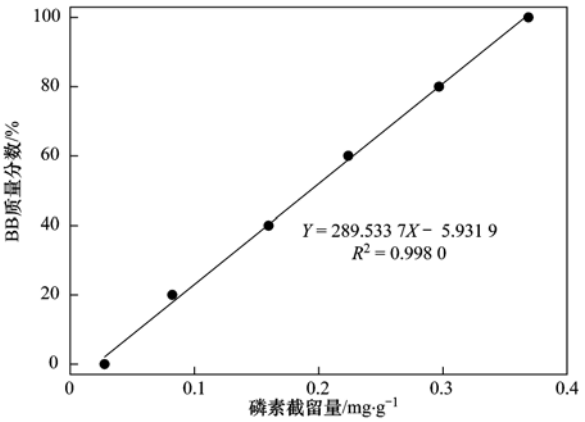


图 5　废砖块质量分数与吸附柱磷素截留量

Fig. 5　Relationship between content of BB and retained phosphorus of each column

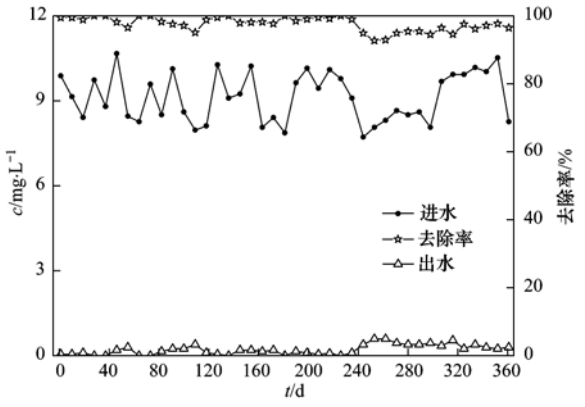


图 6　废砖块填料湿地系统对磷素的去除效果

Fig. 6　Phosphorus removal rate of VSSF filled with broken bricks

地中芦苇的地上/地下质量分别为 110.40/31.32 g，地上/地下芦苇组织中磷的质量分数分别为 2.19/3.10 mg·g^{-1}，即芦苇吸收磷量为 338.87 mg，仅占湿地磷素去除量的 6.56%. 而废砖块的吸附沉淀作用和湿地中的微生物作用去除的磷量则占到了湿地磷素去除总量的 93.44%，是系统磷素去除的主要途径，这和很多学者的研究结果是一致的[17]. 普遍认为，在人工湿地系统中，植物吸磷所起的作用与植物的生长状态、植物种类、湿地类型及运行状况等因素有关. 在本研究条件下，湿地植物直接对磷素的吸收去除作用是很小的，虽然依靠植物直接吸收和存储去除的磷量并不显著，但是植物的输氧作用可以间接影响微生物的生命活动[18]，从而可以间接影响湿地的除磷效果. 而对于湿地微生物，其在生长繁殖过程中可以吸收和利用污水中的无机磷酸盐，聚磷菌的过量摄磷可将磷素合称为 ATP、DNA 和 RNA 等有机成分，但受湿地系统中聚磷菌更新速率慢的限制，聚磷菌吸收对磷的去除贡献较小[19].

Wang 等[20]的研究表明,通过污水进入表面流人工湿地中的磷大约有 14% 被微生物吸收利用,但这部分被微生物吸收利用的磷处在被不断吸收和释放的动态过程中,而且组成微生物细胞体的磷会在微生物死亡后被迅速分解释放回系统中,所以一般认为微生物的活动与总磷的去除率之间无显著相关[21],但是微生物生化作用将有机磷酶促水解无机化,是人工湿地系统中磷素被填料吸附沉淀和植物吸收利用的关键一步. 综上所述,本湿地系统中磷素的去除主要是依靠废砖块的吸附沉淀作用实现的.

表 6 湿地系统中磷素去除途径分析

Table 6 Phosphorus removal pathways of VSSF

植物吸收磷量			填料吸附沉淀及微生物磷量/mg	湿地系统磷素去除总量/mg	植物吸收作用/%	填料及微生物作用/%
地上/地下植物磷含量/mg·g^{-1}	地上/地下生物量/g	植物吸磷总量/mg				
2.19/3.10	110.40/31.32	338.87	4 823.09	5161.96	6.56	93.44

湿地填料层中被截留磷素的分布具有明显的空间特征(图 7),A 段和 B 段填料层中的全磷含量要远远高于 C 段和 D 段,这主要是由系统中污水的水力流态决定的. 另外,填料无机磷的分布特征与全磷一致且含量较高,而填料有机磷空间分布较均匀且含量远远低于无机磷,说明系统对磷素的去除主要是依靠填料的吸附沉淀作用,当填料层上部的填料吸附饱和之后,底层填料中的全磷和无机磷含量才会逐渐上升.

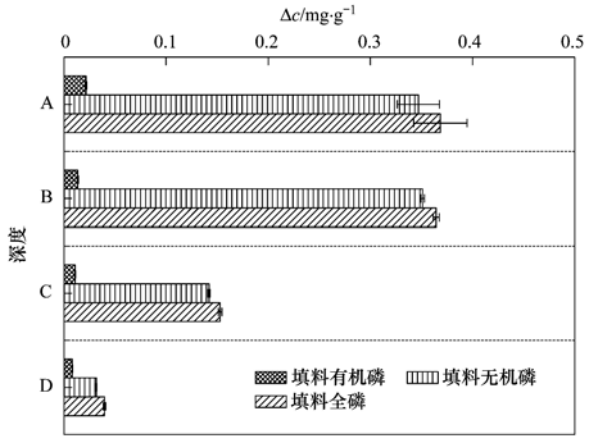


图 7 湿地系统中填料全磷、有机磷和无机磷的空间分布特点

Fig. 7 Spatial distribution of total P, organic P and inorganic P at four depths in VSSF

通过不同的化学浸提剂将填料样品中不同形态的无机磷逐级分离出来,以进一步考察废砖块吸附沉淀磷素的主要途径. 由图 8 可知,废砖块中的无机磷素形态主要以 Al-P 和 Fe-P 为主,且两者的空间分布规律与填料全磷分布规律基本一致. 而 A 段和 B 段填料层中较高含量的 loosely-P 说明废砖块对磷素的去除有一部分是通过物理吸附实现的. 试验结果表明,填料中能与磷素发生沉淀反应的元素含量和其在填料中的化学形态也是影响填料吸附沉淀磷素途径的重要因素. 由于废砖块含有较高含量的 Al 和 Fe,且其水溶性盐总量亦较高,从而致使废砖块在反应溶液体系中释放了较高含量的铝、铁离子而使 Al-P 和 Fe-P 成为其主要沉淀形式. 因此,废砖块由于其磷素吸附能力强、各项理化特性适于微生物和湿地植物生长且成本低廉而成为构建人工湿地系统较为理想的填料.

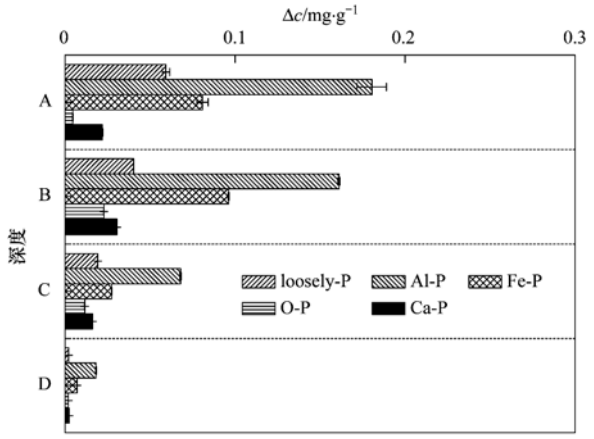


图 8 湿地系统中不同深度填料的无机磷形态分析

Fig. 8 Spatial distribution of loosely-P, Al-P, Fe-P, O-P and Ca-P at four depths in VSSF

3 结论

(1)废砖块的各项物化特性均表明废砖块作为湿地填料时适于微生物的富集以及植物的生长,而废砖块中能与磷素发生沉淀反应的元素含量和其在废砖块中的化学形态是决定其除磷能力的重要影响因素.

(2)填料的磷素等温吸附线试验和动态除磷试验均表明废砖块具有较高的磷素吸附能力,而废砖块的实际磷素吸附量要小于其理论饱和吸附量.

(3)当 HLR = 5 cm·d^{-1}时,以废砖块为填料的垂直潜流人工湿地系统在处理生活污水的过程中表现出较高的除磷能力,除磷效率在 90% 以上且除磷效果稳定.

(4)在湿地系统 1 a 的运行过程中,废砖块的吸附沉淀作用是湿地系统除磷的主要途径,植物和微生物直接吸收所起的作用不大.

(5)被截留磷素在湿地填料层中具有明显的空间特征,填料中的无机磷形态分析结果表明,废砖块中能与磷素发生沉淀反应的元素含量和其在废砖块中的化学形态亦是影响其吸附沉淀磷素作用途径的重要因素. 因此,废砖块是人工湿地污水处理系统构建过程中较为理想的填料.

参考文献:

[1] Buchberger S G, Shaw G B. An approach toward rational design of constructed wetlands for wastewater treatment[J]. Ecological Engineering, 1995, **4**(4): 249-275.

[2] Babatunde A O, Zhao Y Q, Zhao X H. Alum sludge-based constructed wetland system for enhanced removal of P and OM from wastewater: concept, design and performance analysis[J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(16): 6576-6579.

[3] Sakadevan K, Bavor H J. Phosphate adsorption characteristics of soils, slags and zeolite to be used as substrates in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1998, **32**(2): 393-399.

[4] 杨子江. 建筑垃圾对城市环境的影响及解决途径[J]. 城市问题, 2003, (4): 60-63.

[5] 龚子同, 陈志诚, 赵文君, 等. 我国土壤系统分类中富铁铝土壤的分类[J]. 土壤与环境, 2000, **9**(2): 149-153.

[6] 中国人民共和国水利部. 土工试验方法标准(GB/T 50123-1999)[M]. 北京: 中国计划出版社, 1999. 68-74.

[7] 王明海. ICP-MS 法测定金属铝中铜、钛、锌、锰、钴 5 种痕量杂质元素[J]. 冶金分析, 2004, **24**(2): 19-22.

[8] 徐和胜, 付融冰, 褚衍洋. 芦苇人工湿地对农村生活污水磷素的去除及途径[J]. 生态环境, 2007, **16**(5): 1372-1375.

[9] 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. 243-248.

[10] 国家环境保护总局. 土壤农化分析[M]. (第二版) 北京: 中国环境科学出版社, 1986. 122-124.

[11] Babatunde A O, Zhao Y Q, Burke A M, *et al*. Characterization of aluminium-based water treatment residual for potential phosphorus removal in engineered wetlands[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(10): 2830-2836.

[12] Roger R. Shell sand: a new filter medium for constructed wetlands and wastewater treatment[J]. Journal of Environmental Science and Health, 2000, **35**(8): 1335-1355.

[13] Dayton E, Basta N. Characterization of drinking water treatment residuals for use as a soil substitute[J]. Water Environment Research, 2001, **73**(1): 52-57.

[14] Vohla C, Kõiv M, Bavor H J, *et al*. Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands-A review[J]. Ecological Engineering, 2011, **37**(1): 70-89.

[15] El-Shahawi M S, Nassif H A. Retention and thermodynamic characteristics of mercury (Ⅱ) complexes onto polyurethane foams[J]. Analytica Chimica Acta, 2003, **481**(1): 29-39.

[16] 赵桂瑜. 人工湿地除磷基质筛选及其吸附机理研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 17-19.

[17] Kim S Y, Geary P M. The impact of biomass harvesting on phosphorus uptake by wetland plants[J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(11-12): 61-67.

[18] Armstrong W. Oxygen diffusion from the roots of some British bog plants[J]. Nature, 1964, **204**(4960): 801-802.

[19] Richardson C J, Qian S S. Long term phosphorus assimilative capacity in freshwater wetlands: a new paradigm for sustaining ecosystem structure and function[J]. Environmental Science & Technology, 1999, **33**(10): 1545-1551.

[20] Wang N M, William J M. A detailed ecosystem model of phosphorus dynamics in created riparian wetlands[J]. Ecological Engineering, 2000, **126**(2-3): 101-130.

[21] 梁威, 吴振斌, 詹发萃, 等. 人工湿地植物根区微生物与净化效果的季节变化[J]. 湖泊科学, 2004, **16**(4): 312-317.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 12

Dec. 15, 2012

CONTENTS

Preface ····· CHEN Wei-ping (4069)

Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review ····· CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, *et al.* (4070)

Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water ····· PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, *et al.* (4081)

Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment ····· PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, *et al.* (4088)

Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal ····· ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, *et al.* (4094)

Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model ····· LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)

Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model ····· LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)

Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water ····· ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, *et al.* (4115)

Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musks in Soils Input Through Recycle Water Irrigation ····· WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)

Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality ····· WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, *et al.* (4127)

Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing ····· ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)

Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing ····· CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, *et al.* (4141)

Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO ····· WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, *et al.* (4151)

Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station ····· ZHANG Jun-ke, WANG Yue-si, WU Fang-kun, *et al.* (4159)

Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment ····· ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, *et al.* (4167)

Carbon Isotopic Compositions of *n*-Alkanes and *n*-Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw ····· LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, *et al.* (4173)

Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car ····· HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, *et al.* (4181)

Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai ····· LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, *et al.* (4188)

Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary ····· YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, *et al.* (4194)

Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation ····· LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, *et al.* (4205)

Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China ····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, *et al.* (4212)

Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season ····· MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, *et al.* (4220)

Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City ····· ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, *et al.* (4226)

Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City ··· ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, *et al.* (4237)

Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River ····· WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, *et al.* (4244)

Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site ····· PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, *et al.* (4251)

Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China ····· LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, *et al.* (4256)

Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City ····· LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, *et al.* (4263)

Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai ····· LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, *et al.* (4270)

Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China ····· LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, *et al.* (4276)

Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River ····· ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)

Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake ····· QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, *et al.* (4291)

Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1 ····· ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, *et al.* (4300)

Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification ····· ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, *et al.* (4307)

Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on *Microcystis aeruginosa* ····· SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, *et al.* (4316)

A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process ····· XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, *et al.* (4322)

Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body ····· SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, *et al.* (4329)

Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent ····· LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, *et al.* (4335)

Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors ····· CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, *et al.* (4340)

Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS) ····· WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)

Experimental Research on *In-Situ* Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage ····· GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, *et al.* (4352)

Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites ····· XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, *et al.* (4361)

Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters ····· JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)

Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks ····· WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, *et al.* (4373)

Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation ····· QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, *et al.* (4380)

Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge ····· ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruo-yu, *et al.* (4387)

Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field ····· JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)

Effects of Multiple Environmental Factors on Triflulsulfuron-methyl Degradation in Soils ····· SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, *et al.* (4400)

Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested *Spartina alterniflora* ····· CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, *et al.* (4406)

Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste ····· WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)

Study on Emission Standard System of Air Pollutants ····· JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, *et al.* (4417)

Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China ····· BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)

Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals ····· FU Guo-wei (4428)

《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）

2012 年 12 月 15 日　33 卷　第 12 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 33　No. 12　Dec. 15, 2012

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：70.00 元　　**国外发行代号**：M 205

国 内 外 公 开 发 行