

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌Methylobacterium rhodesianum H13的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究

张菁,李睿华*,李杰,胡俊松,孙茜茜

(南京大学环境学院,污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京 210023)

摘要: 利用石灰石和黄铁矿-石灰石水平潜流人工湿地处理受到污染的河水,了解它们对河水中污染物,尤其是对氮和磷的去除效果,并分析这些矿物的作用,考察了水力停留时间变化对2种人工湿地污染物净化效果的影响. 结果表明,污染物去除效果的最佳停留时间出现在3 d左右,COD、TN和TP的平均去除率分别达到51%、70%和95%. 在相同进水水质和水力负荷运行条件下,石灰石和黄铁矿-石灰石这2种人工湿地对COD的平均去除率分别为53.93%和51.66%,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均去除率分别为82.13%和77.43%,对TN的平均去除率分别为66%和72.06%,对TP的平均去除率分别为50.9%和97.35%. 2种人工湿地对COD的去除效果差距不大,黄铁矿-石灰石人工湿地的脱氮除磷效果优于石灰石湿地,对磷有较好的去除效果,不受温度影响且净化效果稳定,适宜长期稳定运行.

关键词: 人工湿地;水力停留时间;石灰石;黄铁矿;河水净化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3445-06

Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water

ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, HU Jun-song, SUN Qian-qian

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Polluted river water was treated with limestone and pyrite-limestone subsurface horizontal constructed wetlands. The aims were to know the performance of two wetlands on removal of common pollutants, especially nitrogen and phosphorus, and analyze the actions of these minerals. The relationship between hydraulic retention time and purification performance of two constructed wetlands was studied. The optimal hydraulic retention time for pollutant removal was about 3 d. The average removal efficiency of COD, TN and TP were 51%, 70% and 95%, respectively. With same influent and hydraulic loading, the average removal efficiency of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP were 53.93%, 82.13%, 66%, 50.9%, and 51.66%, 77.43%, 72.06%, 97.35% for limestone and pyrite-limestone constructed wetlands, respectively. There were few differences between limestone and pyrite-limestone wetlands on COD removal, but the nitrogen and phosphorus removal of pyrite-limestone constructed wetland was higher than that of limestone constructed wetland. The phosphorus removal of pyrite-limestone wetland was more efficiency and stable, not affected by temperature.

Key words: constructed wetland; hydraulic retention time; limestone; pyrite; river water purification

人工湿地是一种建造、运行费用低,运行、维护方便的生态治理污水的技术,可作为传统污水处理技术的一种有效替代方案,对于节省资金、保护水环境以及进行有效的生态恢复具有十分重要的现实意义,所以人工湿地技术越来越受到世界各国的重视和关注^[1~3]. 近年来随着我国经济的不断发展,生活污水和工业废水的大量排放,导致我国诸多河道受污染,很多河流已经丧失了其应有的功能. 污染河水与生活污水不同,它的有机污染物浓度低、氮磷等营养盐浓度相对较高(COD一般为10~50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN为2~20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TP为0.5~5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),针对这种低碳氮比的河水,主要采取生态修复技术^[4,5]. 目前利用人工湿地技术进行河道治理的研究已有报道,人工湿地用于地表水水质的改善并取得了一定的效果,对COD的去除效果达到

36%~60%, TN、TP的去除效果达到20%~60%和30%~60%^[6,7]. 人工湿地主要由植物、填料以及生长在填料表面和植物根际的微生物组成,填料不仅可以为植物和微生物的生长提供适宜的条件,还可以通过自身的物理化学作用去除污染物,所以人工湿地中填料的选取意义重大,常见的人工湿地填料有石灰石、页岩、沸石、砾石和粉煤灰等^[8~11].

黄铁矿(FeS_2)是自然界资源很丰富的一种硫化物矿物,由于其表面活性、晶体结构等物理特性,使其对重金属和一些阴离子有较好的吸附效果. 有研究发现黄铁矿可以促进含氮水体的反硝化^[12~14],

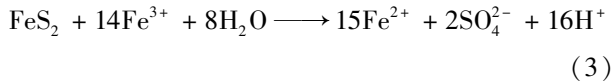
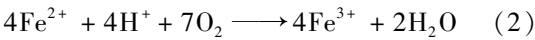
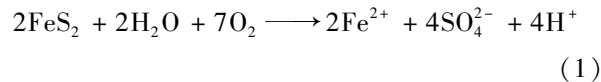
收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(50978133)

作者简介: 张菁(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制, E-mail: zj397646201@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liruihua@nju.edu.cn

而且黄铁矿在有氧条件下容易氧化,反应式如下:



其主要氧化产物 FeSO_4 、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 是水处理中常用的混凝剂,可用于降低水体中的浊度和磷含量^[15],目前将黄铁矿作为人工湿地填料的研究还鲜有报道. 本研究分别选取石灰石和黄铁矿作为人工湿地填料,分析了栽有芦苇的两种潜流型人工湿地一年多来的运行效果,比较两种湿地对污染物的净化效果,以期为人工湿地长期稳定运行提供依据. 由于黄铁矿易氧化产酸,不适于单独作为人工湿地填料,所以选择黄铁矿和石灰石混合填料.

1 材料与方法

1.1 试验材料

黄铁矿为天然的硫铁矿,产自广东云浮,石灰石购自安徽铜陵. 将基质粉碎,经预处理后筛选 30 ~

40 目的石灰石和黄铁矿备用,采用 X 射线荧光光谱仪(ARL-9800,瑞士 ARL 公司)测定石灰石和黄铁矿的化学组成. 石灰石的主要化学组成如下(质量分数): CaO 55.29%, MgO 0.68%, SiO_2 0.04%, SrO 0.01%, Fe_2O_3 0.01%; 黄铁矿的主要化学组成如下(质量分数): S 50.62%, Fe 38.56%, SiO_2 9.16%, Al_2O_3 0.93%, K_2O 0.39%, MgO 0.14%, TiO_2 0.1%.

1.2 试验装置

试验在南京大学景观河(九乡河支流)旁进行,采用潜流型人工湿地系统,试验的人工湿地模型如图 1 所示. 2 套装置均由砖砌,底部铺设一层混凝土防渗漏,处理单元尺寸为 $5\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$,每个系统都分为进水区、填料区和出水区. 填料区分别铺设 0.7 m 厚、粒径 5 ~ 20 mm 的石灰石和黄铁矿-石灰石,填料区上放铺设 0.2 m 土壤层,种植芦苇,芦苇的种植密度为 $8 \sim 10\text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$. 进水区铺设 0.5 m 厚、粒径 5 ~ 20 mm 的石灰石,用于截留大分子悬浮物,以避免湿地运行后期造成堵塞. 填料区沿程铺设多孔 PVC 管,用于定期冲洗填料区.

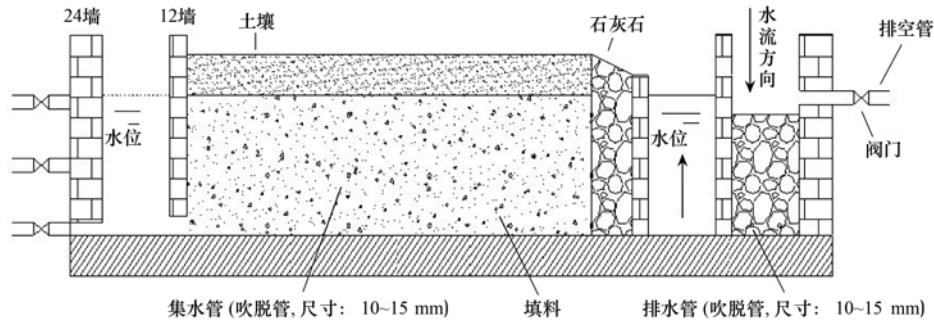


图 1 水平潜流人工湿地结构示意图

Fig. 1 Structure of horizontal subsurface constructed wetland

1.3 湿地运行及分析方法

人工湿地从 2011 年 8 月开始启动,试验用水为南京大学校园景观河水. 水质如表 1 所示,运行期间水温变化如图 2 所示,采用连续进水方式,系统分别经历了启动阶段和稳定运行阶段. 启动期主要以

植物生长和提高微生物活性为目的,进水添加外来氮磷($\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $30\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, TP 为 $6\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右),以驯化填料区微生物. 2012 年人工湿地进入稳定运行阶段,对石灰石湿地和黄铁矿-石灰石湿地的去除效果进行连续性试验研究.

表 1 人工湿地进水水质

Table 1 Water quality of constructed wetland inlet

COD/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
20 ~ 70	1 ~ 35	1 ~ 8	3 ~ 40	0.1 ~ 5.6	7 ~ 9

试验所用的进水样取自湿地进水区,出水样取自湿地出水区,在 12 个月的测试分析期内定期取样,取样频率为每月 3 ~ 5 次. 检测的水质指标主要

包括 COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 和出水主要金属离子含量,其中 COD 采用重铬酸钾滴定法, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂分光光度法, TN 采用碱性过硫酸钾氧化-

紫外分光光度法, TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法, 金属离子采用电感耦合等离子体发射光谱法 (Optima 5300DV, 美国 PE 公司) [16]。

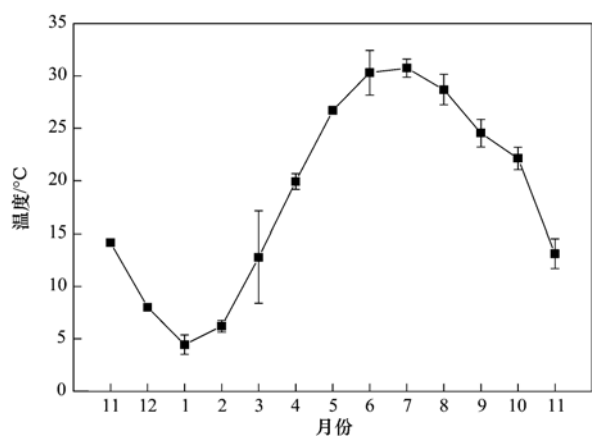


图2 人工湿地进水温度的变化情况

Fig. 2 Variations of water temperature with time

1.4 数据分析

本研究中数据归纳和图表分析采用 Excel 或 Origin 8.0 进行, 数据的统计分析采用 SPSS 18.0 进行。

2 结果与分析

2.1 不同水力停留时间下污染物净化效果

人工湿地对污染物的净化效果与水力停留时间 (HRT) 密切相关 [17], 本研究的 HRT 均是湿地系统填料区的有效容积 (孔隙率为 50%) 除进水流量所得值, 不同水力停留时间下污染物的净化效果如图 3 所示。从中可以看出, 水力停留时间对污染物的净化效果影响较大, 当 HRT = 1 d 时, 石灰石人工湿地对 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 10%、31% 和 60%, 黄铁矿-石灰石人工湿地对 COD、TN 和 TP 的去除率分别为 11%、32% 和 85%, 随着水力停留时间的延长, 污染物的去除率均有所提高, 当 HRT = 3 d 时, 2 种人工湿地对各污染物的净化效果均达到最佳值 (COD、TN 和 TP 的平均去除率分别为 51%、70% 和 95%), 此后水力停留时间的延长对污染物的去除效果影响不大。人工湿地对 COD 的去除主要是通过微生物对有机物进行降解, 当水力停留时间较短时, 填料区微生物与受污染河水中的有机物接触时间不够, 所以湿地对污染物的净化作用没有完全得到发挥。人工湿地对氮的去除主要是通过植物吸收和微生物的作用, 当水力停留时间较短时, 受污染水体与填料区的接触时间不够, 微生物和植物没有足够的时间来去除水体中的氮, 微生物的硝化

和反硝化作用不能进行完全, 所以氮的去除率偏低。人工湿地对磷的去除主要是通过基质的拦截过滤、基质的吸附沉淀和植物的吸收, 当水力停留时间较短时, 相应的通过界面的流速较大, 容易冲击之前吸附在基质表面的磷, 将湿地内部的磷带出系统, 使得 TP 去除率偏低。

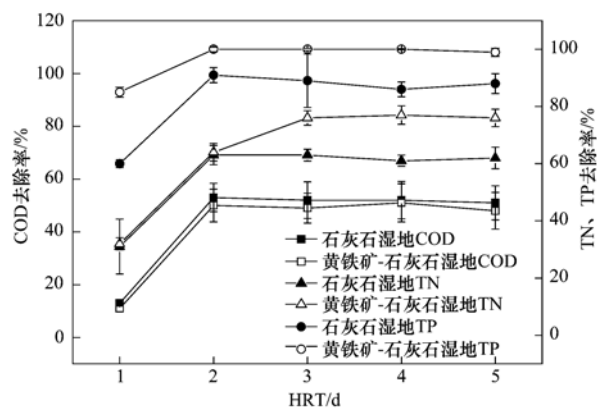


图3 污染物净化效果与 HRT 的关系

Fig. 3 Relationship between hydraulic retention time and purification effect

在相同水力停留时间条件下, 2 种人工湿地对 COD 的去除效果差异性不大 ($P > 0.05$), 黄铁矿-石灰石人工湿地对氮磷的去除效果优于石灰石人工湿地, 分析原因主要是因为反硝化菌可以以黄铁矿为硫源, 进行自养反硝化, 自养反硝化的同时产生铁离子, 从而实现同步脱氮除磷。

2.2 对 COD 的去除

人工湿地净化污水时, COD 的降解主要通过附着在基质上和湿地植物根区的微生物的活动来完成 [18]。对种植有芦苇的石灰石和黄铁矿-石灰石湿地进行 1 年多的试验研究, 2 种不同填料人工湿地对受污染河水 COD 的去除效果如图 4 所示。

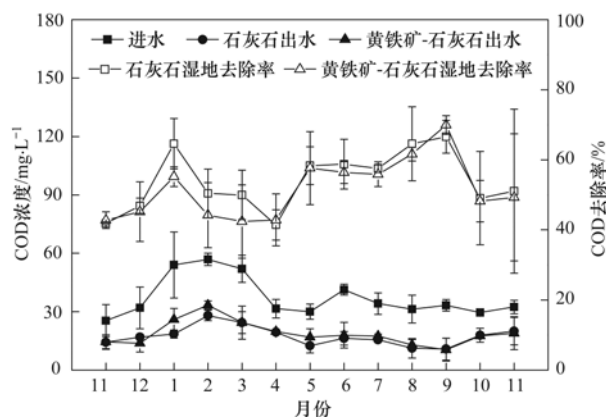


图4 两种湿地对 COD 的去除效果

Fig. 4 COD removal efficiency of the two constructed wetlands

由图4可以看出COD的去除受温度的影响,冬季(12月~次年2月)平均水温低于10℃,抑制了微生物的代谢和活性,而且不利于植物的生长,从而影响植物向系统内供氧,所以COD的去除率偏低.进入春季(3~5月),气温回升后微生物活性加强,植物也开始生长,对COD的去除效果逐渐回升.2种湿地在8、9月份植物达到茂盛期,微生物数量和活性也达到最大,COD的去除率达到60%以上,随后COD的去除率又随温度的下降而降低.人工湿地处理生活污水和其它废水时,COD的去除率一般在80%~90%左右^[19~22],而对于河水,由于有机物浓度比较低且难以降解^[5,6],水力停留时间较短,因此去除率相对于污水净化来说要低一些.全年运行过程中COD的去除率在50%~60%左右,但是出水COD均低于30 mg·L⁻¹,达到地表水Ⅳ类标准,出水能够满足改善水质的要求.

从1a的运行情况来看石灰石湿地和黄铁矿-石灰石湿地对COD的去除效果差异性不大($P > 0.05$),仅2012年1~3月石灰石湿地对COD的降解略优于黄铁矿-石灰石湿地,分析原因可能为黄铁矿容易好氧化,在运行初期黄铁矿表面的氧化物释放,出水pH低于石灰石湿地出水,水偏酸性,不利于微生物对有机物的降解,随着湿地的长期运行,黄铁矿表面的氧化物释放完全后趋于正常.

2.3 对氨氮的去除

湿地中NH₄⁺-N的去除主要依靠4个方面的作用:①微生物的同化作用;②植物的吸收利用;③NH₄⁺-N挥发作用;④基质的物理化学作用.NH₄⁺-N的挥发主要发生在碱性条件下,本试验湿地进水基本保持中性,所以NH₄⁺-N的去除主要通过微生物的好氧降解实现.

由图5可以看出NH₄⁺-N的去除受温度的影响,冬季(12月~次年2月)NH₄⁺-N的去除率逐渐下降,4月随着温度的回升,NH₄⁺-N的去除率逐渐升高,6月开始对NH₄⁺-N的去除率达到90%以上.在人工湿地启动期和运行初期,填料处于不饱和状态,对NH₄⁺-N有一定的吸附作用,达到吸附饱和之后,对NH₄⁺-N的去除转为生物作用,由于12月~次年3月温度较低,所以此期间NH₄⁺-N的去除率低于70%.除湿地运行初期出水NH₄⁺-N含量略高于2 mg·L⁻¹,4月开始出水NH₄⁺-N含量均低于1.5 mg·L⁻¹,满足地表水Ⅲ类标准,且进入秋季(9~11月)后,仍保持较高的去除率.

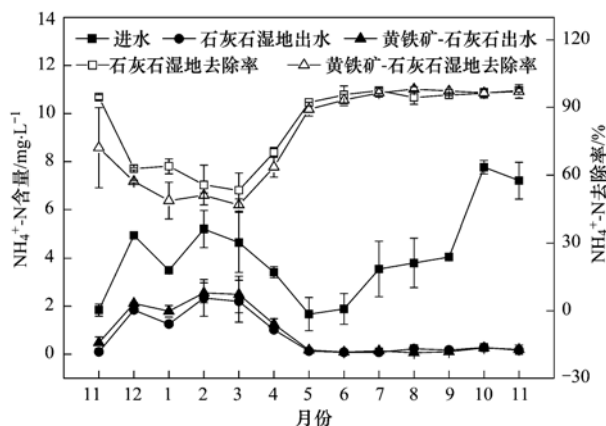


图5 两种湿地对NH₄⁺-N的去除效果

Fig. 5 NH₄⁺-N removal efficiency of the two constructed wetlands

从1a的运行情况来看2种人工湿地对NH₄⁺-N的去除效果差异性不大($P > 0.05$),石灰石湿地对NH₄⁺-N的去除效果略优于黄铁矿-石灰石湿地,分析原因可能为黄铁矿氧化消耗填料区的溶解氧,所以黄铁矿-石灰石湿地内部的溶解氧含量低于石灰石湿地,而NH₄⁺-N的去除主要依靠微生物的硝化作用,所以黄铁矿-石灰石湿地填料区的硝化作用强度不及石灰石湿地.

2.4 对总氮的去除

人工湿地系统对氮的去除主要依靠微生物的硝化与反硝化作用,2种人工湿地对TN的去除效果如图6所示,从中可以看出,湿地启动期,进水TN含量达到36 mg·L⁻¹的条件下,2种湿地对TN的去除率均能达到50%以上.进入冬季以后对TN的去除效果逐渐变差,4月开始,随着温度回升,TN去除效果逐渐提高,6月去除率基本达到95%以上,说明TN的去除受温度影响.温度高时,植物光合作用向植物根部输送氧气,在植物根区形成一系列的好氧及厌氧环境,

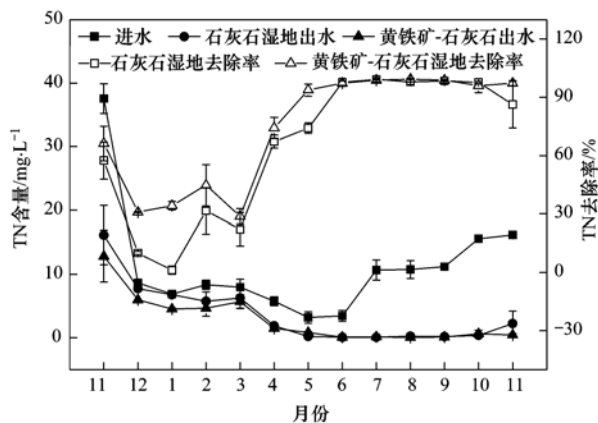
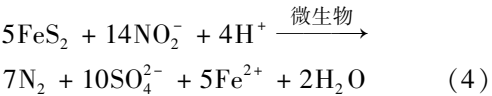


图6 两种湿地对TN的去除效果

Fig. 6 TN removal efficiency of the two constructed wetlands

有利于硝化和反硝化作用的进行. 而且 7 月芦苇已经进入茂盛期,植株高达 2 m 以上,对含氮营养物质的利用能力增强使得 TN 的去除率有所增加.

由图 6 可以发现,2012 年 6 月之前,黄铁矿-石灰石湿地对 TN 的去除效果优于石灰石湿地,6 月之后 2 种人工湿地对 TN 的去除率均达到 95% 以上,差异性不大($P>0.05$). 总体来看黄铁矿-石灰石湿地对氮的净化效果略优于石灰石湿地,与氨氮的去除趋势相反,说明黄铁矿-石灰石湿地的反硝化作用强于石灰石湿地,主要是因为反硝化菌可以以黄铁矿为硫源,进行自养反硝化,从而实现氮的去除,反应式如下:



除湿地启动期和运行初期(1~3 月),黄铁矿-石灰石湿地出水 TN 均小于 $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,满足地表水Ⅳ类标准. 一直到 2012 年 11 月,黄铁矿-石灰石湿地 TN 的去除率仍保持 95% 以上,而石灰石湿地则已出现去除率下降趋势.

2.5 对总磷的去除

基质的吸附是湿地除磷的主要途径^[23],所以基质对磷的吸附容量决定了湿地的除磷效果及稳定性. 2 种人工湿地对受污染河水 TP 的去除效果如图 7 所示,从中可以发现 2 种人工湿地除磷效果差异性较大($P<0.05$). 黄铁矿-石灰石湿地对磷的去除效果很稳定,一直保持在 95% 以上. 而石灰石湿地在运行初期有较大的波动,主要是因为湿地启动期添加外来磷素,湿地进水磷含量较高,达到 $5.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,12 月以后恢复正常进水,部分吸附的磷释出,造成 12 月和 1 月 TP 的去除率出现负值,2 月开始 TP 的去除率逐渐升高,6 月达到 80% 以上,进入秋季(9~11 月)后又开始逐渐下降,可见石灰石湿

地对 TP 的去除受温度的影响,温度越高去除效果越好.

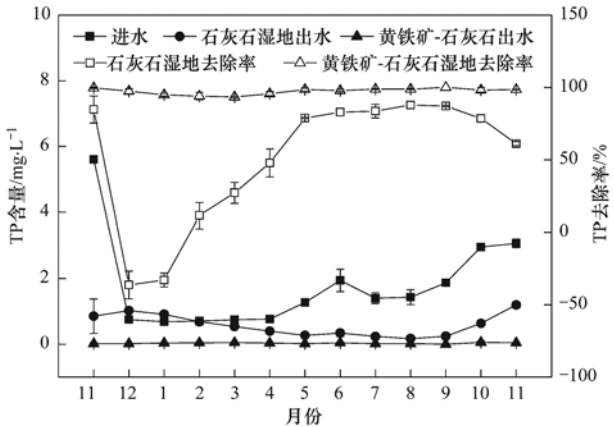


图 7 两种湿地对 TP 的去除效果
Fig. 7 TP removal efficiency of the two constructed wetlands

对 2 种湿地除磷效果进行比较可以发现,黄铁矿-石灰石人工湿地截留磷的能力优于石灰石人工湿地,且效果稳定,即使在冬季除磷效果也能达到 95% 以上. 分析原因主要是黄铁矿的好氧化化和厌氧氧化(自养反硝化)均产生铁离子,铁离子与磷反应,生成铁-磷沉淀从而去除水体中的磷.

2.6 出水重金属分析

基于石灰石和黄铁矿的化学组成,人工湿地运行过程中,重金属的释出可能会造成二次污染. 通过电感耦合等离子体发射光谱仪分析 2 种人工湿地运行期间的出水成分(取平均值),发现出水中 Cu、Zn、Cd、Cr、Pb、Ni、As、Fe、Mn 等重金属离子均低于城镇污染排放标准和地表水Ⅲ类环境质量标准,如表 2 所示. 表明 2 种人工湿地运行过程中基本不会引起因重金属释放而造成的二次污染问题,石灰石和黄铁矿可以作为人工湿地的基质,净化受污染的河水.

表 2 2 种人工湿地出水中的重金属含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Concentrations of heavy metals in effluent of the two constructed wetlands/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

污染物	石灰石人工湿地	黄铁矿-石灰石人工湿地	污水排放标准 ^[24]	地表水环境质量标准 ^[25]
Cu	<0.005	<0.005	0.5	1.0
Zn	0.01	0.01	1.0	1.0
Cd	<0.005	<0.005	0.01	0.005
Cr	<0.005	<0.005	—	0.05
Pb	<0.05	<0.05	0.1	0.05
Ni	0.011	0.013	0.05	—
As	<0.05	<0.05	0.1	0.05
Fe	0.03	0.04	—	—
Mn	0.12	0.59	2.0	—

3 结论

(1) 石灰石和黄铁矿-石灰石湿地对污染物的净化效果与水力停留时间相关, HRT 越短, 污染物的去除率越低, 但是不断提高 HRT 并不能持续提高污染物的去除效率, 本试验的最佳 HRT 为 3 d. 2 种湿地对受污染河水均有较好的去除效果, 对 COD 的平均去除率分别为 53.93% 和 51.66%, 对 NH_4^+-N 的平均去除率分别为 82.13% 和 77.43%, 对 TN 的平均去除率分别为 66% 和 72.06%, 对 TP 的平均去除率分别为 50.9% 和 97.35%.

(2) 总体来看, 黄铁矿-石灰石湿地对总氮和总磷的去除效果较好, 石灰石湿地对氨氮的去除效果较好. 两种湿地的脱氮效果均受温度的影响, 春夏季去除效果优于秋冬季. 黄铁矿-石灰石湿地一全年对磷的去除效果都很好, 不受温度的影响, 而石灰石湿地明显受到温度的影响, 温度越高除磷效果越好. 从出水稳定性来看, 黄铁矿-石灰石湿地出水各项指标都比较稳定, 即使进入秋冬季节, 氮磷的含量也较低.

(3) 黄铁矿可以为湿地内部的反硝化细菌提供硫源, 促进微生物的自养反硝化从而去除水体中的氮, 与此同时自养反硝化的产物可以同时去除水体中的磷, 所以选取黄铁矿作为人工湿地的填料对于受污染水体的同步脱氮除磷意义重大. 综合考虑去除效果和出水水质的稳定性, 对于氮磷含量偏高而有机物含量低的受污染河水优先选择黄铁矿-石灰石湿地.

参考文献:

- [1] 刘洋, 王世和, 黄娟, 等. 两种人工湿地长期运行效果研究[J]. 生态环境, 2006, **15**(6): 1156-1159.
- [2] 张丽, 韩乔, 司马卫平. 人工湿地污水处理技术综述[J]. 山西建筑, 2007, **33**(28): 204-205.
- [3] 任峰, 陆忆夏, 刘琴, 等. 复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 570-575.
- [4] 关艳艳, 余宗莲, 周艳丽, 等. 人工湿地处理污染河水的研究进展[J]. 水处理技术, 2010, **36**(10): 10-15.
- [5] 黄毓琳, 叶民强, 金式容. 公共河道水污染的博弈分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2001, **22**(3): 326-330.
- [6] 刘红, 代明利, 刘学燕, 等. 人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(4): 65-69.
- [7] 黄锦楼, 陈琴, 许连煌. 人工湿地在应用中存在的问题及解决措施[J]. 环境科学, 2013, **34**(1): 401-408.
- [8] 汤显强, 李金中, 黄岁樑, 等. 人工湿地不同填料去污性能比较[J]. 水处理技术, 2007, **33**(5): 45-48.
- [9] 王冬梅, 刘培斌, 丁跃元, 等. 人工湿地填料对磷的吸附特性及预期使用年限[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(4): 17-21.
- [10] 王振, 刘超翔, 李鹏宇, 等. 废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4373-4379.
- [11] 李海波, 杨瑞崧, 李晓东, 等. 水淬渣人工湿地强化除磷作用研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2302-2308.
- [12] Torrentó C, Cama J, Urmeneta J. Denitrification of groundwater with pyrite and *Thiobacillus denitrificans*[J]. Chemical Geology, 2010, **278**(1-2): 80-91.
- [13] Torrentó C, Urmeneta J, Otero N, et al. Enhanced denitrification in groundwater and sediments from a nitrate-contaminated aquifer after addition of pyrite [J]. Chemical Geology, 2011, **287**(1-2): 90-101.
- [14] Elsetinow A R, Schoonen M A A, Strongin D R. Aqueous geochemical and surface Science investigation of the effect of phosphate on pyrite oxidation [J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(11): 2252-2257.
- [15] Li R H, Zhu L, Tao T, et al. Phosphorus removal performance of acid mine drainage from wastewater[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **190**(1-3): 669-676.
- [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] 吴建强, 周训华, 王敏, 等. 水力停留时间变化对 2 种人工湿地净化效果的影响[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(10): 3537-3542.
- [18] 梁威, 胡洪营. 人工湿地净化污水过程中的生物作用[J]. 中国给水排水, 2003, **19**(10): 28-31.
- [19] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetlands for wastewater treatment: opportunities and limitations [J]. Ecological Engineering, 1999, **12**(1-2): 5-12.
- [20] Geller G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: summary of long-term scientific and practical experiences; recommendations [J]. Water Science and Technology, 1997, **35**(5): 157-166.
- [21] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience [J]. Ecological Engineering, 2002, **18**(5): 633-646.
- [22] Yang Y, Xu Z C, Hu K P, et al. Removal efficiency of the constructed wetland wastewater treatment system at Bainikeng, Shenzhen[J]. Water Science and Technology, 1995, **32**(3): 31-40.
- [23] 李剑波, 闻岳, 赵星洁, 等. 有机物对人工湿地基质除磷影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 1880-1883.
- [24] GB 18918-2002, 城镇污水处理厂污染物排放标准[S].
- [25] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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

国内外公开发刊