

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

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

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强, 贺千山, 陈勇航, 亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 何清, 王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉, 金军, 王英, 李明圆, 何松洁, 徐萌, 孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷, 李天昕, 赵秀阁, 曹素珍, 王贝贝, 马瑾, 段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎, 赵彤, 李志鹏, 丁文军, 崔晓勇, 许群, 宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲, 谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴, 何觉聪, 陈洲洋, 黎宝仁, 黄倩茹, 张再利, 魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊, 张依章, 张远, 朱鲁生, 王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕, 朱春刚, 许笛, 丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲, 赵凯, 王国祥, 欧媛, 范嫻, 毛丽娜, 张佳, 韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣, 程品, 张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒, 卢丙清, 贺秋芳, 陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程, 杨平恒, 任坤, 陈雪彬, 徐昕, 胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria spiralis</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国, 王国祥, 张佳, 马久远, 魏宏农, 俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰, 宋永会, 袁鹏, 张雪妍, 胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超, 王凤贺, 纪莹雪, 张帆, 赵斌, 王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶, 汤芳, 席劲璇, 庞宇辰, 胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰, 龚昕, 胡晓莲, 任伯帆 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华, 沈冰冰, 荆洁, 陆继来, 王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许, 纵瑞强, 高欣玉, 谢慧君, 殷永泉, 梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪, 刘辉, 姜林, 唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣, 谭科艳, 胡希佳, 顾远, 杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和, 刘佩炬, 王磊, 田中凯, 刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕, 黄芳, 谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅, 周顺桂, 袁勇, 刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹, 朱能武, 吴平霄, 邹定辉, 邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松, 余红, 席北斗, 崔东宇, 潘红卫, 李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹, 宋永伟, 徐峙辉, 崔春红, 周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜, 陈秀荣, 林逢凯, 黄华, 章斐, 赵骏, 丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭, 季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平, 姜理英, 陈建孟, 何智敏, 肖少丹, 蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇, 杨开, 张倩, 季斌, 陈丹, 孙宇翀, 田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁, 高品, 薛昱, 何梦琦, 吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露, 党志, 伍凤姬, 梁旭军, 郭楚玲, 卢桂宁, 杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳, 陈秀荣, 闫龙, 赵建国, 章斐, 江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊, 赵树欣, 魏长龙, 于水燕, 史吉平, 张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏, 邓琦, 邹华, 梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍, 王光华, 王美玉, 刘晚冰, 冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽, 张高科, 陈晓国, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红, 刘征涛, 方征, 王晓南, 王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军, 陆泗进, 许人骥, 李伯苓, 吴国平, 魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤, 王建力, 李潮流, 康世昌, 陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘, 王飞, 郭强, 聂小倩, 黄应平, 陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧, 翁珊, 方婧, 黄佳蕾, 陆芳华, 卢宇浩, 张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍, 唐宇力, 陆骏, 周虹, 徐芸茜, 陈川, 赵赞, 王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷, 张承中, 徐峰, 李海凤, 田振宇, 唐琛, 刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真, 毕春娟, 陈振楼, 张焕焕, 倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖, 李航, 朱华玲, 田锐, 高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华, 陈志良, 张太平, 潘伟斌, 彭晓春, 车融, 欧英娟, 雷国建, 周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波, 刘文清, 张玉钧, 赵南京, 殷高方, 肖雪, 余晓娅, 方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰, 施汉昌, 王洪臣, 盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼, 李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇, 陶欢, 阎秀兰, 赵丹, 林龙勇, 李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟, 李凤英, 刁一伟, 吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 杨毅, 安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗, 赵由才, 宋立岩, 尹雅洁, 王洋清, 徐中慧 (1602)
农副食品加工工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送, 郁达伟, 曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究

吴宣¹, 谭科艳², 胡希佳¹, 顾运¹, 杨宏^{1*}

(1. 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037)

摘要: 在 18.0 ~ 22.3℃ 条件下, 以含镉(Cd^{2+})废水为研究对象, 首先对分离纯化出的硫酸盐还原菌(SRB)采用细胞包埋固定化技术同沸石填料制成具有生物活性的载体, 建立硫酸盐还原生物滤池, 培养驯化完成后进行了生物滤池对废水中 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 的去除效果试验研究. 结果表明, 利用 SRB 采用生物滤池的运行方式可以对废水中的重金属镉(Cd^{2+})进行良好地去除. 当滤速(V) = 0.4 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 生物滤池对进水 Cd^{2+} 浓度 $\leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的废水处理效果最好. 在稳定运行期间, 生物滤池对 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 的去除率分别在 99%、75% 和 50% 以上, 经过生物滤池处理后出水中 Cd^{2+} 含量低于 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到国家《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010)中对 Cd^{2+} 的排放要求. 生物滤池对 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 的去除效果主要集中在 60 cm 以上的空间. 当 $V < 0.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, 滤池对 Cd^{2+} 有高效稳定的去除效果.

关键词: 硫酸盐还原菌; 含镉废水; 生物滤池; 滤速; 包埋固定化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1366-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.04.023

Research on Removal Efficiency of Cd (II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter

WU Xuan¹, TAN Ke-yan², HU Xi-jia¹, GU Yun¹, YANG Hong¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. National Research Center for Geoanalysis, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: At the temperature of 18.0-22.3℃, biological carriers were produce from pure SRB and zeolite by the embedding immobilized method, and a sulfate-reducing biological filter filled with filter carriers was built to treat cadmium-containing wastewater. Experimental research on removal efficiency of Cd^{2+} , COD and SO_4^{2-} in wastewater by the biological filter was carried out after SRB domestication. Results show that cadmium can be removed satisfactorily from wastewater using SRB by the biological filter filled with sulfate-reducing bacteria. When the filtration rate was 0.4 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ and the cadmium concentration in wastewater was not more than 15 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the processing efficiency was the best. In the formal running period, the removal rates of Cd^{2+} , COD and SO_4^{2-} by the biological filter were more than 99%, 75% and 50%. The effluent Cd^{2+} concentration was less than 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which could meet the cadmium emission requirements in the wastewater quality standards for discharge to municipal sewers (CJ 343-2010). The removal of Cd^{2+} , COD and SO_4^{2-} by biological filter mainly occurs in the top 60 cm of the filter bed during stable operation. When the filtration rate was less than 0.6 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$, Cd^{2+} can be removed by the biological filter with high efficiency and stability.

Key words: sulfate-reducing bacteria (SRB); Cd (II)-bearing wastewater; biological filter; filtration rate; embedded immobilization

近几年来我国重金属污染严重, 尤其镉污染事件频繁发生, 广西龙江镉污染事件, 广东镉大米事件等严重危害人们的身体健康. 镉(Cd)污染的主要来源是矿山、冶炼、电镀、油漆等企业大量排放的重金属废水^[1]. 国家《污水排入城镇下水道水质标准》中规定: 水中 Cd 的最高允许排放浓度为 0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但含 Cd 废水在处理前 Cd 的浓度都远高于国家标准. 研究者一直寻求经济且有效的 Cd 去除方法, 含 Cd 废水处理的常见方法主要有沉淀法、离子树脂交换法、电解法、活性炭吸附法及反渗透法等^[2-4], 这些方法虽对 Cd 有一定的去除效果, 但均存在处理成本高、二次污染及处理效果不好等缺

点. 生物法处理含重金属废水是目前研究的重点和热点^[5,6], 其中硫酸盐还原菌(SRB)是研究和应用处理重金属的主要微生物之一.

SRB^[7-9]通常指的是能通过异化作用进行硫酸盐(SO_4^{2-})还原的一类细菌. SRB 能够把水中的 SO_4^{2-} 还原成负二价硫离子(S^{2-}), S^{2-} 与重金属离子反应, 产生溶解度非常低的金属硫化物, 从而将其去除. 国内外对利用 SRB 处理重金属早有报道^[10-14]. Jong 等^[15]在上流厌氧填充床反应器中研究了 SRB

收稿日期: 2013-08-28; 修订日期: 2013-11-12

作者简介: 吴宣(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: wuxuan2007@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yhong@bjut.edu.cn

混合菌种对废水中重金属的去除,试验中 Cu、Zn、Ni 的去除率为 97%,As 和 Fe 的去除率分别为 77.5% 和 82%。马晓航等^[16]利用 SRB 处理含 Zn^{2+} 废水,结果表明进水 COD 和锌分别为 $320\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,有机物和 Zn^{2+} 的去除率分别达到 73.8% 和 99.63%。现有利用 SRB 去除废水中重金属的研究均有一定的处理效果,但均存在反应器组成复杂、处理时间长等缺点。本研究对 SRB 进行了包埋固定化^[17,18],采用生物滤池的形式对含 Cd 废水进行处理,将硫酸盐还原、硫化物形成沉淀及沉淀过滤等过程在同一个反应器中发生,从而对处理流程进行了简化,以期对硫酸盐还原生物滤池处理含 Cd 废水的应用提供理论及技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置及流程

本试验采用下向流厌氧生物滤池对含 Cd^{2+} 废水进行去除。试验装置由 3 部分组成:原水配水部分、厌氧生物滤池、反冲洗部分,整个试验流程如图 1 所示。

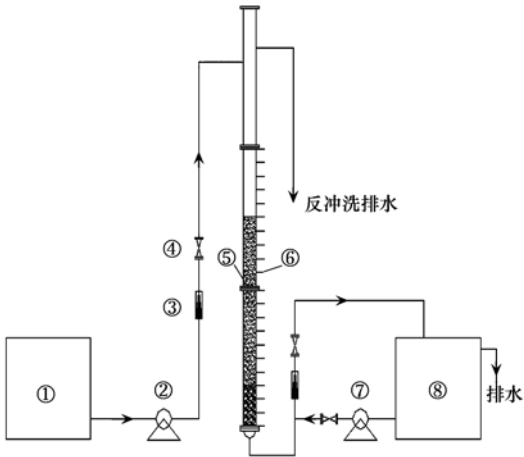
原水配水部分由 1 个水箱组成,在水箱内人工配制含镉废水。

厌氧生物滤池:滤池由有机玻璃制成,直径 110 mm,高 3 000 mm,沸石滤料粒径为 0.8~1.2 mm,滤层厚 1 200 mm,卵石承托层粒径为 5~30 mm,厚为 300 mm,在滤池侧壁每隔 100 mm 距离设置取样口,共 15 个,采用浸没式进水方式进水,滤池运行为正向过滤。

反冲洗部分:反冲洗水为滤后水,由反冲洗水箱和反冲洗水泵组成。

1.2 试验方法

试验菌株来自 Cd 污染土壤,取不同地点多份



①原水水箱;②进水泵;③流量计;④阀门;⑤硫酸盐还原生物滤池;⑥取样口;⑦反冲洗水泵;⑧反冲洗水箱

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment

含 Cd 污染的土壤,在实验室中进行菌株的分离、纯化及培养,最终筛选出高效的 SRB 纯菌株。

试验中对富集培养好的 SRB 纯菌株进行离心浓缩,制成菌株的浓缩液。利用细胞包埋固定化技术将浓缩液同沸石结合制成具有生物活性的载体填料加入厌氧生物滤池进行 SRB 的驯化培养。待驯化稳定后,研究生物滤池初期和稳定期对 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 的去除效果,稳定期生物滤池中 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 的沿层变化及进水 Cd^{2+} 浓度、滤速(V)对 Cd^{2+} 去除的影响。

1.3 试验原水水质及运行参数

试验进水是根据采集到的湖南省株洲市工业园区附近含 Cd 废水的水质情况,在本次试验中采取人工配水的方式来模拟,废水水质各种主要指标如表 1 所示。

表 1 原水水质

Table 1 Characteristics of raw water

项目	$\text{Cd}^{2+}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{COD}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{SO}_4^{2-}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
范围	5.0~30.1	55.0~154.0	200.0~300.0	0.2~0.8	7.2~7.8

本试验采用人工配水,就生物滤池对含 Cd 废水的处理效果进行初步研究,稳定后在株洲市工业园区进行中试试验,进一步考察生物滤池对实际废水的处理效果。在人工配制废水中碳源采用乳酸钠,硫酸盐采用无水硫酸钠,重金属镉采用硝酸镉。

运行参数:滤速 $0.4\sim1.0\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$; 温度 $18.0\sim22.3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 反冲洗强度 $10\text{ L}\cdot(\text{s}\cdot\text{m}^2)^{-1}$; 反冲洗历时 3 min; 反冲洗周期 20 d。

1.4 分析项目及方法

所有检测项目均采用国家规定的标准方法^[19]。 Cd^{2+} 浓度的检测采用原子吸收法,检测仪器为 AAS vario 6 型原子吸收仪; SO_4^{2-} 浓度的检测采用离子色谱法,检测仪器为 IC 型离子色谱仪; COD 值采用联华科技的 5B-3F 型 COD 快速测定仪; pH 值采用 pHS-2C 型 pH 计测定,测定前用标准 pH 缓冲溶液进行校正;溶解氧(DO):手提式 DO 测试仪;水温:

手提式 DO 测试仪。

2 结果与讨论

2.1 运行初期生物滤池对 Cd^{2+} 、COD 及 SO_4^{2-} 的去除效果

首先对 SRB 进行包埋固定化,并对建立好的生物滤池进行培养驯化,完成后保证生物滤池正常进出水,进水 $\text{DO} \leq 0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,生物滤池 $V = 0.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,水力停留时间(HRT) = 3 h. 生物滤池稳定运行 46 d,图 2~4 分别为 46 d 内生物滤池中 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 浓度的变化情况。

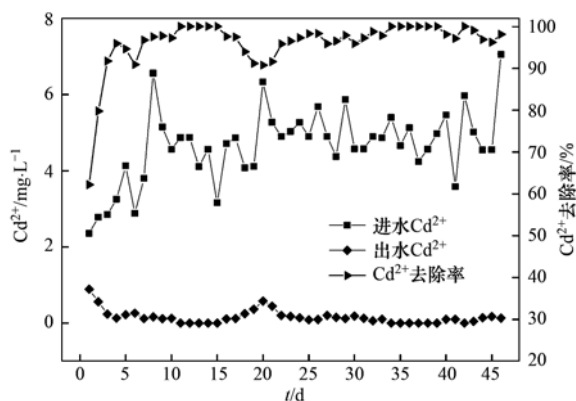


图2 运行初期生物滤池对 Cd^{2+} 的去除效果

Fig. 2 Cadmium removal by biological filter during first operating period

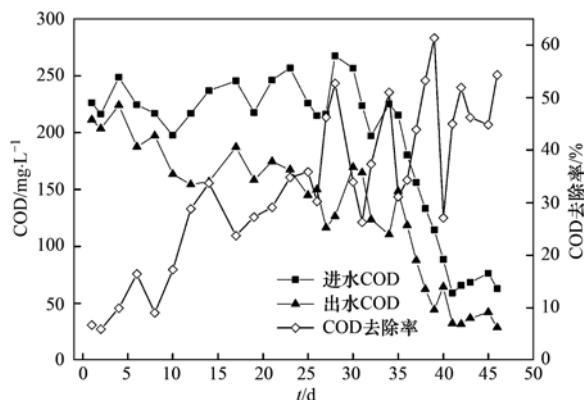


图3 运行初期生物滤池对 COD 的去除效果

Fig. 3 COD removal by biological filter during first operating period

由图 2 可知,最初生物滤池对 Cd^{2+} 的去除率为 60%,随后逐渐提高,运行 7 d 后达到 95% 以上,运行 20 d 后,去除率稍有下降.这是由于生物滤池运行初期反冲洗过程中有一定的菌量流失,造成对 Cd^{2+} 的去除率有所降低.但随着生物滤池运行的稳定,反冲洗过程对其影响逐渐变小,从第 25 d 至第 46 d 的运行中,进水 Cd^{2+} 浓度在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,出

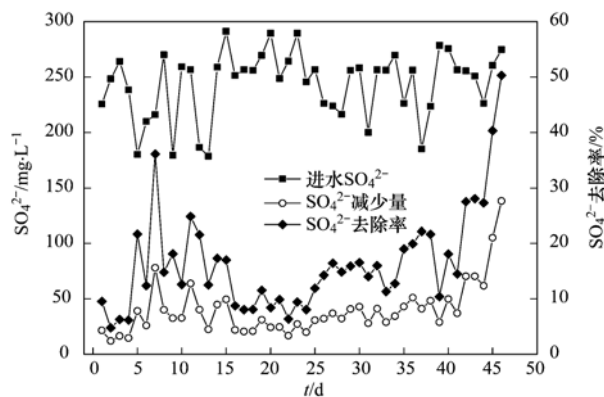


图4 运行初期生物滤池对 SO_4^{2-} 的去除效果

Fig. 4 SO_4^{2-} removal by biological filter during first operating period

水可以达到 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到国家《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010)中对 Cd 的排放要求。

由图 3 可知,在初始阶段为加快滤池内细菌的增殖,控制生物滤池进水 COD 在 $220 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,出水 COD 为 $170 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,大部分的 COD 未被消耗掉,培养 10 d 后 COD 的去除量增加,到达 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,说明生物滤池内 SRB 的菌量在增多且细菌的生物活性在增强,但大部分有机物仍未被消耗掉.从第 10 d 到第 29 d,保持进水 COD 浓度不变,出水中 COD 维持在 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.运行 30 d 后,降低进水中 COD 的浓度,出水浓度也随之降低,且由图 2 可知此时生物滤池对 Cd^{2+} 的去除未降低,说明进水 COD 为 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时,可以完全维持生物滤池内 SRB 的菌量及活性,保证生物滤池对 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Cd^{2+} 的去除。

由图 4 可知,在生物滤池运行初期,生物滤池对 SO_4^{2-} 的去除率较低, SO_4^{2-} 的去除量维持在 $40 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.当进水 SO_4^{2-} 为 $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右时,去除率只有 10%~25%.从第 41 d 起,SRB 还原 SO_4^{2-} 逐步增强,去除率也相应提高,生物滤池开始进入稳定期。

结合图 2~4 的分析可知,在连续 46 d 的运行中,生物滤池对 Cd^{2+} 、COD 及 SO_4^{2-} 均具有一定的去除效果,且对 Cd^{2+} 去除率稳定在 95% 左右,对 SO_4^{2-} 和 COD 也有一定的去除效果,说明在运行初期该生物滤池在具备良好的去除 Cd^{2+} 能力的同时也有一定的去除 SO_4^{2-} 及 COD 的能力。

2.2 进水 Cd^{2+} 浓度对 Cd^{2+} 去除的影响

Cd^{2+} 浓度的变化会引起 Cd^{2+} 容积负荷的变化,当 Cd^{2+} 容积负荷增大到某一值,超过生物滤池对 Cd^{2+} 的处理能力时,可能出现生物滤池漏 Cd^{2+} 的现

象. 由图 5 可知, 在其他条件不变的前提下, 进水 Cd^{2+} 浓度的增加对于生物滤池对镉的去除效率有一定的影响. 当进水 $\text{Cd}^{2+} \leq 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水 $\text{Cd}^{2+} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率 $\geq 99\%$, 出水浓度达到国家《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010) 中对 Cd 的排放要求. 在进水 $\text{Cd}^{2+} > 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以后, 生物滤池出现了严重的漏 Cd^{2+} 现象, 出水中 Cd^{2+} 浓度从原来的 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下逐步升高, 随着进水 Cd^{2+} 浓度的再次增加, 出水中 Cd^{2+} 浓度也逐步升高, 若以进、出水中 Cd^{2+} 的浓度变化表示生物滤池的除 Cd^{2+} 能力, 则对应的 Cd^{2+} 的去除量为 $18.2 \sim 20.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率也由 99% 以上下降到 60% . 虽然随着进水 Cd^{2+} 浓度的升高, 尽管出水中出现漏 Cd^{2+} 现象及 Cd^{2+} 的去除率不断降低, 但 Cd^{2+} 的绝对去除量可以维持 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 说明该生物滤池对高浓度含 Cd^{2+} 废水仍有一定的去除效果.

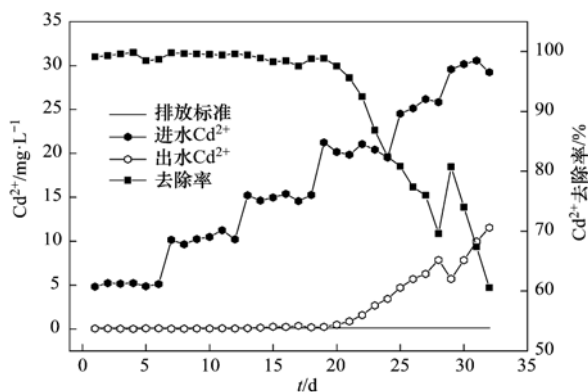


图 5 进水 Cd^{2+} 浓度对 Cd^{2+} 去除的影响

Fig. 5 Effect of initial Cd^{2+} concentration on removal of Cd^{2+}

2.3 稳定运行期

在生物滤池运行初期后, 进行了 32 d 的稳定运行. 在稳定运行期间, 生物滤池进水 Cd^{2+} 为 $12.0 \sim 14.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 为 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 为 $250 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $V = 0.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, $\text{HRT} = 3 \text{ h}$. 生物滤池中 Cd^{2+} 、COD 和 SO_4^{2-} 浓度的变化情况如图 6~8 所示.

2.3.1 生物滤池对 Cd^{2+} 的去除效果

由图 6 可知, 在连续 32 d 的稳定运行过程中生物滤池对 Cd^{2+} 具有良好的去除效果, 在进水 Cd^{2+} 为 $12.0 \sim 14.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 连续 32 d 对 Cd^{2+} 的去除率 $\geq 99\%$, 出水中 $\text{Cd}^{2+} \leq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 达到国家《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010) 中对 Cd 的排放要求. 废水流经生物滤池时, 通过滤池中 SRB 的作用, 将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} , 同 Cd^{2+} 结合生成难溶的硫化镉微絮体, 被生物滤料层截留, 从而将废

水中的 Cd^{2+} 去除.

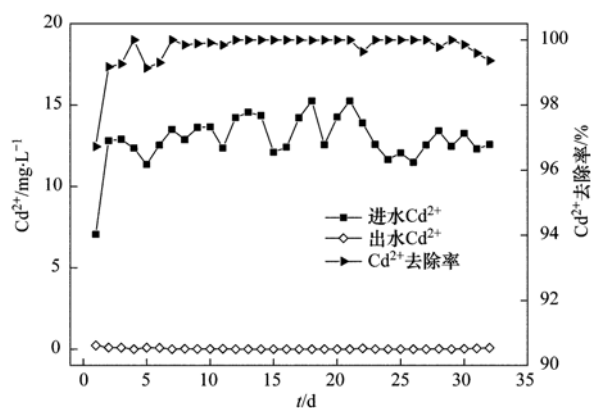


图 6 稳定运行期生物滤池对 Cd^{2+} 的去除效果

Fig. 6 Cadmium removal by biological filter during mature period

2.3.2 生物滤池对 COD 的去除效果

废水中的有机物是 SRB 能量的主要来源^[20~23], 因而废水中的有机物含量是影响生物滤池性能的重要因素. 由图 7 所示, 生物滤池连续运行 32 d, 在进水 COD 为 $60 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 出水中 COD 维持在 $30 \sim 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 在保证滤池对 Cd^{2+} 高效去除的前提下, 生物滤池中 SRB 对废水中 COD 的去除率在 50% 以上, 说明在此 COD 的浓度范围内, 可以保证生物滤池内 SRB 的能量供应及废水中 Cd^{2+} 的良好去除.

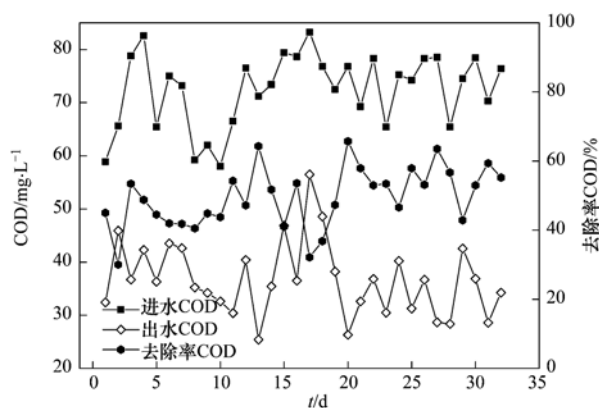


图 7 稳定运行期生物滤池对 COD 的去除效果

Fig. 7 COD removal by biological filter during mature period

2.3.3 生物滤池对 SO_4^{2-} 的去除效果

生物滤池对 SO_4^{2-} 的去除效果如图 8 所示. 从中可知, 在稳定运行期生物滤池对 SO_4^{2-} 有良好的还原作用, 进水 SO_4^{2-} 为 $250 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水中 SO_4^{2-} 维持在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 运行 25 d 后达到 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, SO_4^{2-} 的去除率由 60% 增至 80% 左右且均在 75% 以上. 废水中大量的 SO_4^{2-} 在生物滤池内通过 SRB 的生物作用被还原为 S^{2-} 从而与 Cd^{2+} 结合

形成相应的难溶金属硫化物. 在去除 Cd^{2+} 的同时, SO_4^{2-} 也能相应地被去除掉.

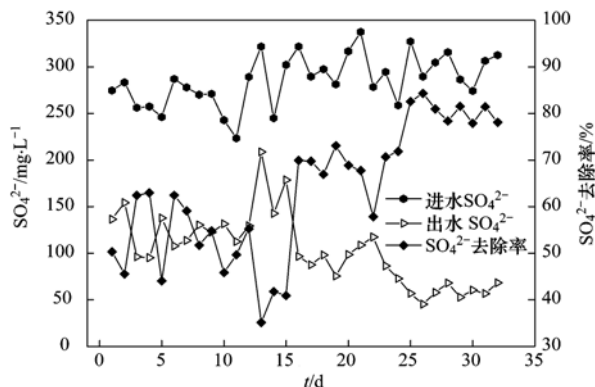


图 8 稳定运行期生物滤池对 SO_4^{2-} 的去除效果

Fig. 8 SO_4^{2-} removal by biological filter during mature period

2.3.4 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的沿层去除效果

为了更清楚地了解生物滤池 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的浓度变化情况,对生物滤池沿进水方向每隔 10 cm 取样,检测 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的浓度,结果如图 9 所示. 从中可见,生物滤池对 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的去除均是沿层变化的,且大部分均在生物滤池的上半层被去除掉. 在进水端 60 cm 的范围内生物滤池对 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的去除率分别为 96.41%、54.18%、68.38%,分别占总去除率的 96.41%、91.25% 和 88.55%. SRB 在去除 Cd^{2+} 的同时消耗 COD 和 SO_4^{2-} ,由图 9 可知,在每层中 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的减少趋势基本一致,且去除量均在前 60 cm 滤层中,说明在本试验中 SRB 主要集中在生物滤池的进水端,尤其在前 60 cm 的滤层中. 滤池下半段可能由于 COD 含量过少,造成 SRB 的菌量不足,从而未发挥 SO_4^{2-} 还原作用. 所以该生物滤池在此滤速

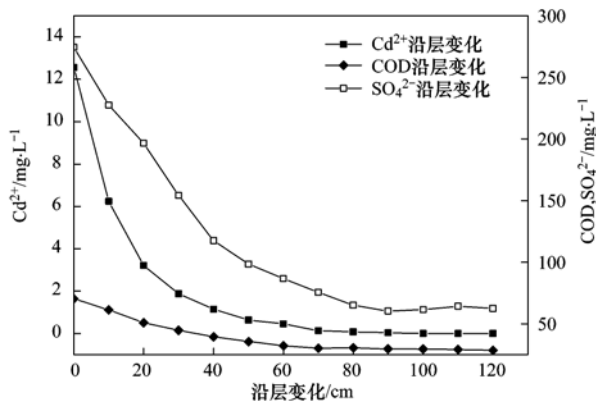


图 9 不同厚度滤层对 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的去除效果

Fig. 9 Removal efficiencies of Cd^{2+} , COD and SO_4^{2-} with different filter bed depths

下运行可以降低生物滤池的高度,以达到更加经济的运行效果.

2.4 滤池 V 对 Cd^{2+} 去除效果的影响

在生物滤池运行初期及稳定期滤速 $V = 0.4 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$,生物滤池对 Cd^{2+} 有稳定的去除效果. 由图 9 可知生物滤池的下半部分滤层未全部发挥作用,生物滤池是一个动态平衡的系统,可以采用提高 V 的方式增加对生物滤池滤层的利用. 在此阶段研究 V 对生物滤池除 Cd^{2+} 的影响,较低的 V 有利于 Cd^{2+} 与 S^{2-} 的结合及滤池对难溶的金属硫化物的截留,但生物滤池的处理效率较低,因此合理的 V 不仅可以保证对 Cd^{2+} 的良好去除还能提高生物滤池的处理效率^[24,25]. 由图 10 可知,保证进水 Cd^{2+} 在 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, $V < 0.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,生物滤池对 Cd^{2+} 有良好的去除效果,但 $V \geq 0.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,生物滤池出现严重漏 Cd^{2+} 现象,但仍有一定的去除效果. 其原因可能是因为较高的 V 导致 Cd^{2+} 短时间内不能与生成的 S^{2-} 有效地结合生成难溶的金属硫化物,且随着 V 的提高,单位容积内 S^{2-} 的生成量减少,从而造成生物滤柱漏 Cd^{2+} . 所以在本试验条件下, $V < 0.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 时生物滤池对 Cd^{2+} 有良好的去除且滤池本身也得到充分利用.

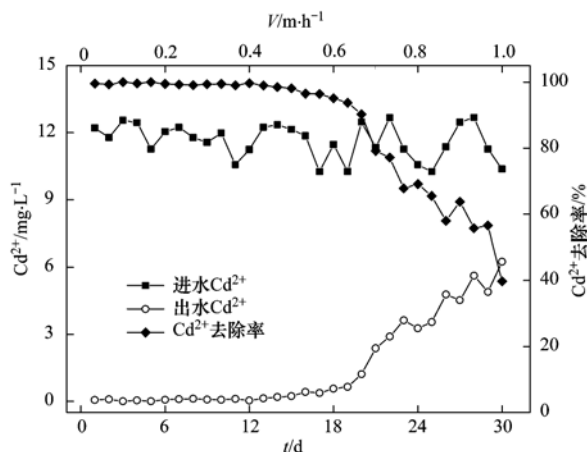


图 10 滤速对滤池出水中 Cd^{2+} 浓度的影响

Fig. 10 Effect of filtering speed on effluent Cd^{2+} concentration

3 试验工艺分析

本试验所采用的是模拟一级生物滤池去除含 Cd^{2+} 废水的工艺,采用包埋固定化技术实现了硫酸盐还原生物滤池的快速生物驯化. 此工艺的关键是将 SO_4^{2-} 还原、金属硫化物生成及去除在同一个反应器中实现,避免了生成的金属硫化物难沉降的问题. 该单级过滤工艺处理流程短,占地面积小,成本低,对含 Cd^{2+} 废水处理效果好,应用前景良好.

4 结论

(1) 在 18.0 ~ 22.3℃ 条件下, 采用细胞固定化技术将 SRB 与沸石制成生物载体, 利用生物滤池的工艺形式稳定实现了对废水中 Cd^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 COD 的良好去除. 说明该生物滤池有较好的应用价值.

(2) 进水 Cd^{2+} 浓度对生物滤池去除 Cd^{2+} 有一定的影响. $V=0.4 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 生物滤池对进水 $\text{Cd}^{2+} \leq 15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的废水处理效果最佳, Cd^{2+} 的去除率 $\geq 99\%$.

(3) 在稳定期生物滤池对 Cd^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 COD 的去除率分别达到 99%、75% 和 50% 以上, 且出水 Cd^{2+} 浓度 $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 达到国家《污水排入城镇下水道水质标准》(CJ 343-2010) 中对 Cd 的排放要求, 实现了对含 Cd 废水的稳定去除.

(4) 在稳定运行期间, 滤池沿层对 Cd^{2+} 、 SO_4^{2-} 及 COD 的去除集中在 60 cm 以上的滤料范围内, 其中对 Cd^{2+} 、COD、 SO_4^{2-} 的去除率分别为 96.41%、54.18%、68.38%. 说明该生物滤池并未完全发挥作用, 有更大的处理潜力.

(5) V 是影响生物滤池去除 Cd^{2+} 的重要因子. $V < 0.6 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 生物滤池对 Cd^{2+} 有高效的去除效果, $V \geq 0.8 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 生物滤池出现严重的漏 Cd^{2+} 现象.

参考文献:

- [1] 顾继光, 周启星. 镉污染土壤的治理及植物修复[J]. 生态科学, 2002, **21**(4): 352-356.
- [2] 王璞, 闵小波, 柴立元. 含镉废水处理现状及其生物处理技术的进展[J]. 工业安全与环保, 2006, **32**(8): 14-17.
- [3] 沈萍, 朱国伟. 含镉废水处理方法的比较[J]. 污染防治技术, 2010, **23**(6): 56-59.
- [4] 张玉梅. 含镉废水处理的试验研究[J]. 环境工程, 1995, **13**(1): 15-21.
- [5] 王建龙, 韩英健, 钱易. 微生物吸附金属离子的研究进展[J]. 微生物学通报, 2000, **27**(6): 449-452.
- [6] Goncalves M M M, De Mello L A O, Da Costa A C A. The use of seaweed and sugarcane bagasse for the biological treatment of metal-contaminated waters under sulfate-reducing conditions[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2008, **147**(1-3): 97-105.
- [7] Klonowska A, Clark M E, Thieman S B, et al. Hexavalent chromium reduction in *Desulfovibrio vulgaris* Hildenborough causes transitory inhibition of sulfate reduction and cell growth[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **78**(6): 1007-1016.
- [8] 李建军, 叶广运, 陈进林, 等. 一株硫酸盐还原菌的分离鉴定和系统发育分析[J]. 微生物学通报, 2009, **36**(10): 1476-1482.
- [9] Neculita C M, Zagury G J, Bussière B. Passive treatment of acid mine drainage in bioreactors using sulfate-reducing bacteria; critical review and research needs[J]. Journal of Environmental Quality, 2007, **36**(1): 1-16.
- [10] Dvorak D H, Hedin R S, Edenborn H M, et al. Treatment of metal-contaminated water using bacterial sulfate reduction: Results from pilot-scale reactors [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1992, **40**(5): 609-616.
- [11] Kaksonen A H, Franzmann P D, Puhakka J A. Performance and ethanol oxidation kinetics of a sulfate-reducing fluidized-bed reactor treating acidic metal-containing wastewater [J]. Biodegradation, 2003, **14**(3): 207-217.
- [12] Wang Q L, Ding D X, Hu E M, et al. Removal of SO_4^{2-} , uranium and other heavy metal ions from simulated solution by sulfate reducing bacteria[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008, **18**(6): 1529-1532.
- [13] Bechtel A, Pervaz M, Puttmann W. Role of organic matter and sulphate-reducing bacteria for metal sulphide precipitation in the Bahloul Formation at the Bou Grine Zn/Pb deposit (Tunisia) [J]. Chemical Geology, 1998, **144**(1-2): 1-21.
- [14] 方迪, 王方, 单红仙, 等. 硫酸盐还原菌对酸性废水中重金属的生物沉淀作用研究[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(3): 562-565.
- [15] Jong T, Parry D L. Removal of sulfate and heavy metals by sulfate reducing bacteria in short-term bench scale upflow anaerobic packed bed reactor runs [J]. Water Research, 2003, **37**(14): 3379-3389.
- [16] 马晓航, 华尧熙, 叶雪明. 硫酸盐生物还原法处理含锌废水[J]. 环境科学, 1995, **16**(4): 19-21.
- [17] 柴立元, 唐宁, 闵小波, 等. 硫酸盐还原菌包埋固定化技术处理含铬废水[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, **36**(6): 965-970.
- [18] 李二平, 闵小波, 舒余德, 等. 内聚营养源 SRB 污泥固定化处理含锌及硫酸根废水[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, **42**(6): 1522-1527.
- [19] 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. 323-334.
- [20] Chang I S, Shin P K, Kim B H. Biological treatment of acid mine drainage under sulfate reducing conditions with solid waste materials as substrate [J]. Water Research, 2000, **34**(4): 1269-1277.
- [21] Boshoff G, Duncan J, Rose P D. Tannery effluent as a carbon source for biological sulphate reduction [J]. Water Research, 2004, **38**(11): 2651-2658.
- [22] Zagury G J, Kulnieks V I, Neculita C M. Characterization and reactivity assessment of organic substrates for sulphate-reducing bacteria in acid mine drainage treatment [J]. Chemosphere, 2006, **64**(6): 944-954.
- [23] 苏宇, 王进, 彭书传, 等. 以稻草和污泥为碳源硫酸盐还原菌处理酸性矿山排水[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1858-1863.
- [24] 杨宏, 尹瑞, 张杰. 生物除锰滤池对砷(Ⅲ)的去除效果研究[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(7): 85-88.
- [25] 李冬, 张杰, 张艳萍, 等. 除铁除锰生物滤层最优化厚度的研究[J]. 中国给水排水, 2007, **23**(13): 94-97.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《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4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 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