

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气 CH ₄ 和 CO 在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为 MUCT 工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米 TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中 PCNs 的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用 PCR-DGGE 分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与 AMF 群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)

不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响

刘奋武, 周立祥*, 周俊, 姜峰, 王电站

(南京农业大学资源与环境科学学院 环境工程系, 南京 210095)

摘要: 采用有效容积为 700 L 的推流式生物沥浸反应器对城市污泥进行连续 14 d 的生物沥浸处理, 利用折流方式将反应器从进泥端到排泥端沿程方向依次划分为 1~6 区. 对不同污泥停留时间 (SRT) 条件下反应器运行时各区的 pH、溶解氧 (DO) 值及污泥的脱水性能 (用污泥比阻 SRF 表征) 进行了系统的比较研究. 结果表明, 当反应器曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, 微生物营养剂加入量为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, SRT 为 2.5 d 时, 反应系统在 72 h 时运行达到稳定, 相应反应器各区的 pH 分别为 5.00、3.00、2.90、2.70、2.60 与 2.40. 污泥的比阻值由 1 区的 $0.64 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐降低至 6 区的 $0.33 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 当 SRT 为 2 d 时, 生物沥浸系统在 120 h 达到稳定, 各区相应的 pH 分别为 5.10、4.10、3.20、2.90、2.70 与 2.60. 相应的 DO 值分别为 0.43、1.47、3.29、4.76、5.75 与 5.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 污泥的比阻值由 1 区的 $0.56 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐降低至 6 区的 $0.20 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 当 SRT 为 1.25 d 时, 运行第 48 h, 反应器 6 区 pH 升高至 3.00. 污泥沿程流动过程中, 微生物菌群对营养剂利用率降低, 导致系统失衡. 生物沥浸反应器污泥停留时间越长, 推流式生物沥浸系统越易达到稳定. 停留时间 2 d 可以作为工程应用时的较优污泥停留时间. 生物沥浸后将污泥收集经过增强聚丙烯厢式压滤机脱水至含水率 60% 以下, 此研究将为城市污泥生物沥浸后期工程化运行提供必要的参数支持.

关键词: 城市污泥; 生物沥浸; 推流式反应器; 污泥停留时间; 脱水

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0191-06

Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System

LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, JIANG Feng, WANG Dian-zhan

(Department of Environmental Engineering, College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A plug-flow bio-reactor of 700 L working volume for sludge bioleaching was used in this study. The reactor was divided into six sections along the direction of the sludge movement. Fourteen days of continuous operation of sludge bioleaching with different sludge retention time (SRT) under the condition of $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ aeration amount and $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ of microbial nutritional substance was conducted. During sludge bioleaching, the dynamic changes of pH, DO, dewaterability (specific resistance to filtration, SRF) of sewage sludge in different sections were investigated in the present study. The results showed that sludge pH were maintained at 5.00, 3.00, 2.90, 2.70, 2.60 and 2.40 from section 1 to section 6 and the SRF of sludge was drastically decreased from initial $0.64 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ to the final $0.33 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ when bioleaching system reached stable at hour 72 with SRT 2.5d. In addition, the sludge pH were maintained at 5.10, 4.10, 3.20, 2.90, 2.70 and 2.60, the DO value were 0.43, 1.47, 3.29, 4.76, 5.75 and 5.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ from section 1 to section 6, and the SRF of sludge was drastically decreased from initial 0.56×10^{13} to the final $0.20 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ when bioleaching system reached stable at hour 120 with SRT 2 d. The pH value was increased to 3.00 at section 6 at hour 48 h with SRT 1.25 d. The bioleaching system imbalanced in this operation conditions because of the utilization efficiency of microbial nutritional substance by *Acidibacillus* spp. was decreased. The longer sludge retention time, the easier bioleaching system reached stable. 2 d could be used as the optimum sludge retention time in engineering application. The bioleached sludge was collected and dewatered by plate-and-frame filter press to the moisture content of dewatered sludge cake under 60%. This study would provide the necessary data to the engineering application on municipal sewage sludge bioleaching.

Key words: municipal sludge; bioleaching; plug-flow bioleaching reactor; sludge retention time (SRT); dewatering

截止 2010 年底,我国大陆建成运行的污水处理厂达到 2 832 座,污水处理厂的运行必然伴随着大量剩余污泥的产生,并且污泥的产量以每年 10% ~ 15% 的速度呈现递增趋势.目前常规污水处理厂产生的脱水污泥的含水率仍然高达 80% ~ 85%,高的

污泥含水率成为其进行卫生填埋、污泥堆肥、土地利

收稿日期: 2011-03-23; 修订日期: 2011-05-26

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2009AA06Z317); 国家自然科学基金项目 (20977048, 21177060)

作者简介: 刘奋武 (1984 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体废物处理处置与资源化, E-mail: lfwlw2008@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

用或者焚烧最终处置^[1~4]的“瓶颈”.采用机械方法对污泥深度脱水(使污泥饼含水率低于60%)由于较低的能耗使其成为目前国内外普遍推崇的方法.然而污泥要经过一定的调理^[5~16]才可能实现深度脱水.

本课题组系列报道了生物沥浸技术(bioleaching)在提高污泥脱水性方面的巨大作用^[17~20].同时在实验室摇瓶实验的基础上,笔者采用序批式运行模式、推流式运行模式对生物沥浸法改善污泥脱水性进行了中试试验,也获得了较理想的效果,生物沥浸后城市污泥直接经过增强聚丙烯厢式压滤机脱水,泥饼的含水率可以降低至60%以下.为该技术走向工程化应用提供了科学依据^[19,20].然而,值得指出的是,污泥停留时间在类似工程应用中显得至关重要,将严重影响生物沥浸过程对污泥的调理效果.同时,前期本课题组所运行的推流式运行模式,是以在反应器末端(6区)将已经处理好的污泥回流至初始端(1区)来增加系统的稳定性为前提^[20].这种运行模式势必会降低污泥的处理量.同时也会增加一部分能耗.如果在反应器的初始端(1区)只注入原始污泥,使得原始污泥从反应器1~6区流动的过程中,生物沥浸微生物菌群能够利用营养剂在各区生长,进而改善污泥的脱水性能,这必然会在实现真正意义上推流运行的同时,提高污泥的处理效率,节省能耗.然而,该种运行模式在城市污泥生物沥浸领域却鲜见报道.为此,本研究采用中试试验方法,在反应器完全推流(反应器1区不回流6区处理后的污泥)运行的前提下,探究不同水力停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响,以期为城市污泥生物沥浸工程化运行提供重要的参数支持.

1 材料与方法

1.1 供试污泥与接种物的制备

供试污泥:采自南京某污水处理厂的污泥浓缩池,该污水处理厂的污水处理工艺为活性污泥法,污泥未经厌氧或好氧消化处理.液态污泥基本性质为pH:7.26,有机质:52.9%,含固率:2.23%,污泥比阻(γ): $1.50 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.

反应器中酸化污泥的制备:按参考文献[21]在实验室利用氧化硫硫杆菌 *A. thiooxidans* TS6,氧化亚铁硫杆菌 *A. ferrooxidans* LX5 和其他耐酸性异养菌组成的复合菌群对城市污泥进行生物沥浸处理,培养生物酸化污泥5 L.然后在50 L连续搅拌釜式

反应器中将微生物密度扩大培养至 $10^7 \sim 10^8 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$,进一步将连续搅拌釜式反应器得到的接种物转移至700 L的生物沥浸反应器中,补充655 L原始污泥,调节温度至28℃培养,使得菌密度又一次达到 $10^7 \sim 10^8 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,体系中得到的700 L酸化污泥即为体系连续推流启动前反应器需要准备的酸化污泥.

1.2 生物沥浸反应器及系统污泥流向

所用的污泥生物沥浸反应系统的结构与组成详见文献[19,20].生物沥浸反应器主体部分采用8 mm PVC板焊接而成,为长2 000 mm×宽700 mm×深850 mm的长矩形结构,工作体积700 L.反应器沿纵向用PVC隔板隔成2个廊道,每个廊道设置3个PVC折流板,每个廊道设置3个区域,2个廊道共6个区域.反应器污泥流向见图1.简言之,供试原始城市污泥通过计量泵连续不断泵入反应器1区中,处理后剩余污泥通过反应器6区排泥口连续不断地排出至污泥浓缩池.在浓缩池进行重力浓缩,浓缩污泥采用增强聚丙烯厢式压滤机(型号为XMG10/800-UK,工作压力0.3 MPa)压滤脱水.压滤水和沉淀池上清液中重金属用石灰水沉淀回收.

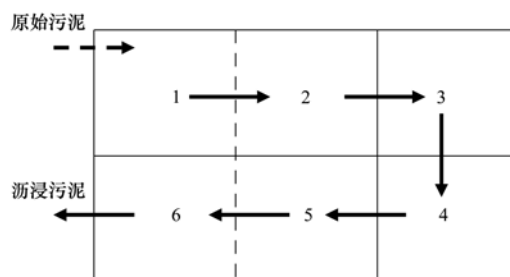


图1 700 L生物沥浸系统中污泥流向示意

Fig. 1 Configuration sketch map of the sludge flow in 700 L bioleaching system

1.3 城市污泥生物沥浸中试研究

在上述已经驯化好700 L酸化污泥的生物沥浸反应器中,将原始污泥(按 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 加入微生物复合营养剂)通过计量泵连续不断泵入反应器1区,污泥从1区依次经过2、3、4、5区,最终从6区排泥口流出反应器,通过控制计量泵的流量,将污泥平均停留时间(SRT)依次设置为2.5、2与1.25 d.反应器温度通过加热装置恒定在28℃、曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.污泥生物沥浸过程中,定时监测生物沥浸体系污泥的pH,及系统稳定运行时反应器各区的DO值及污泥的比阻值(SRF).将每天处理好的流出6区的污泥收集,通过增强聚丙烯厢式压滤机进行

污泥脱水.

1.4 测定方法

定期从反应器的不同区室取污泥 500 mL, 采用 pHS-2TC 精密 pH 计(浙江海天电子仪器厂)测定污泥的 pH 值; DO 值用便携式溶氧仪测定(JPB2607), 污泥的比阻 SRF 采用布氏滤斗-真空抽滤法测定^[18,22].

2 结果与讨论

2.1 SRT = 2.5 d 时反应器各区 pH 及稳定运行时污泥的比阻值(SRF)的变化

污泥停留时间为 2.5 d 时, 反应器各区 pH 动态变化如图 2 所示. 随着原始污泥不断地从 1 区流入反应器, 系统运行 4 h 后, 1 区污泥 pH 从原始的 2.60 提高至 5.00. 并且维持此水平至 120 h. 同理, 受 1 区污泥 pH 的影响, 反应器 2 区的 pH 也有较大的变化幅度, 然而, 2 区的 pH 呈现的是一个先升高后缓慢降低的变化趋势, 从运行初期的 2.66 快速升高至 14 h 的 3.87, 然后逐渐降低至稳定时(72 h)的 3.00, 分析原因, 是由于系统运行过程中, 污泥停留时间相对较长, 使得微生物菌群在反应器 2 区的活性逐渐增强, 对营养剂的利用率逐渐升高所致.

同时, 反应器 3~6 区的 pH 变化为上述推理提供了佐证, 具体而言, 反应器 3~6 区的 pH 分别从原来的 2.50、2.50、2.50、2.50 变化至稳定时(72 h)的 2.90、2.70、2.60、2.40. 可见, 在系统稳定运行时, 虽然从 3~6 区污泥的 pH 仍然有进一步减低的趋势, 但是降低的幅度很小, 经检测, 当反应器污泥 pH 降低至 2.70 时, 污泥中目标微生物在完全利用营养剂的基础上, 微生物数量达到 $10^7 \sim 10^8 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$, 城市污泥将会得到最佳的调理. 达到运行稳定时, 微生物营养剂在各区的利用率分别为 3%、11%、80%、88%、90% 与 94%. 换言之, 微生物菌群对污泥的调理作用主要集中在 1~4 区. 这与系统稳定运行时不同区污泥比阻测试结果相对应. 从图 3 可以看出, 当污泥停留时间为 2.5 d, 系统运行达到稳定时, 反应器 1~6 的比阻值依次为 0.64×10^{13} 、 0.43×10^{13} 、 0.30×10^{13} 、 0.33×10^{13} 、 0.33×10^{13} 与 $0.33 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.

可见, 污泥的比阻值流经反应器 1~4 区后, 污泥的比阻值确实呈现出明显下降的趋势, 而污泥流经反应器 5~6 区后, 污泥的比阻并没有继续降低的趋势. 这与上述用 pH 变化来表征微生物对污泥的调理作用所得的结果是一致的.

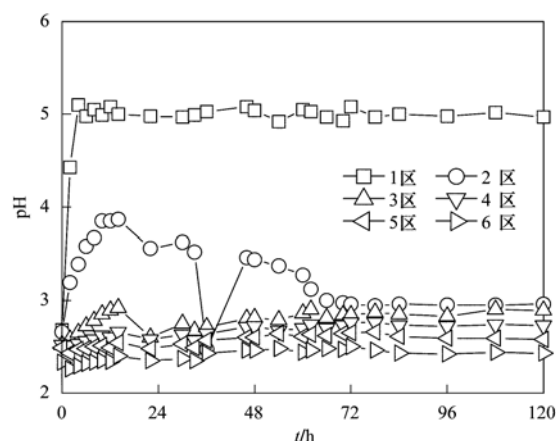


图2 生物沥浸反应器系统各区污泥 pH 随时间的变化 (SRT = 2.5 d)

Fig.2 Variation of sludge pH with time in bioleaching reactor system (SRT = 2.5 d)

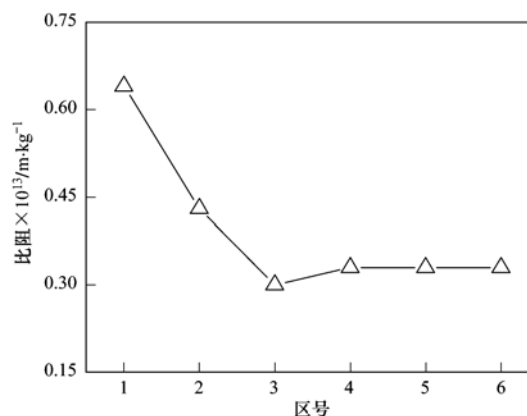


图3 系统稳定时生物沥浸反应器各区污泥比阻值 (SRT = 2.5 d)

Fig.3 SRF value in the different sections of bioleaching reactor at the stable point (SRT = 2.5 d)

2.2 SRT = 2 d 时反应器各区 pH 和系统稳定时各区 DO 值及污泥的比阻值(SRF)的变化

污泥停留时间为 2 d 时, 反应器各区 pH 动态变化如图 4 所示. 与污泥停留时间为 2.5 d 时反应器运行相类似, 系统运行 4 h 后, 1 区污泥 pH 从原始的 2.60 提高至 5.28. 后续生物沥浸过程中, 该区污泥 pH 有微弱降低的趋势, 反应器运行至 96 h, 1 区污泥 pH 缓慢降低至 5.10, 并且维持这一水平直至最终的 144 h. 反应器 2 区由于受反应器 1 区污泥 pH 变化的影响, 污泥 pH 也呈现出相类似的变化趋势. 2 区污泥 pH 由原来的 2.60 逐渐升高至 36 h 的 4.25, 后缓慢降低至 96 h 的 4.10. 直至反应器运行的后期保持同样的水平. 然而, 系统运行至 120 h

时,反应器的3区与4区才达到稳定状态.达到稳定状态时的pH分别为3.20与2.90.

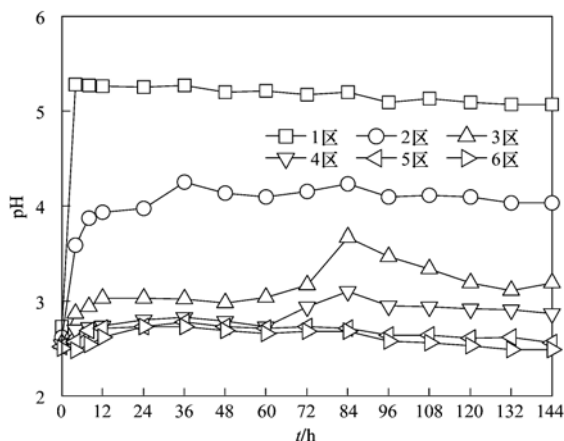


图4 生物沥浸反应器系统各区污泥pH 随时间的变化 (SRT = 2 d)

Fig.4 Variation of sludge pH with time in bioleaching reactor system (SRT = 2 d)

而反应器5区与6区pH相对于反应器运行初始时期没有大的变化,分别从初始的2.50与2.50变化至144 h的2.70与2.60.即到达120 h反应器稳定运行时,各区相应的pH分别为5.10、4.10、3.20、2.90、2.70与2.60.微生物营养剂的利用率在1~6区的5%、8%、21%、83%、94%与95%.可见,推流式反应器系统达到平衡时,是反应器各区从前至后以此达到稳定状态,并不是同一时间反应器各区达到稳定状态,这一结论与笔者前期研究得出的结论是相一致的^[20].

同样,从图5可以发现,在该运行体系中,污泥的比阻值在反应器前5区有较为明显的下降趋势.

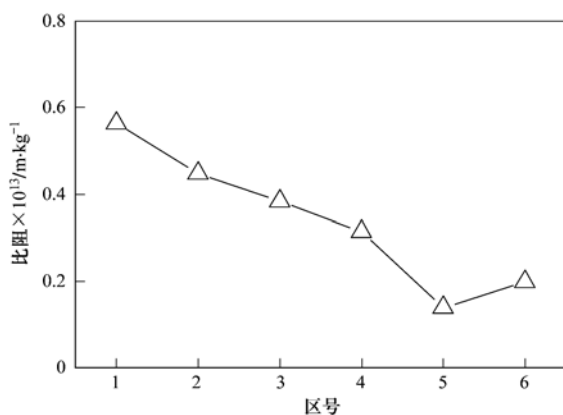


图5 系统稳定时生物沥浸反应器各区污泥比阻值 (SRT = 2 d)

Fig.5 SRF value in the different sections of bioleaching reactor at the stable point (SRT = 2 d)

从1区的 $0.56 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至5区的 $0.14 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.然而在6区污泥的比阻值有微弱上升的趋势,污泥的比阻微小上升至 $0.20 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.可见污泥脱水性能的调理主要体现在反应器的1~5区,其中系统稳定运行时,第5区污泥的pH稳定值为2.70.可见当营养物质被利用完全时,体系中目标微生物数量达到最佳,污泥的脱水性能得到显著地改善,这一结论与污泥停留时间为2.5 d的前述结果相吻合.

同时,由于生物沥浸过程中的微生物均为好氧微生物.在其生长过程中势必对体系不同区的溶解氧(DO)值产生的一定的影响.于是本研究反应器运行达到稳定时,对反应器不同区的DO值进行了检测,监测结果如图6所示.从图6可以看出,生物沥浸系统达到稳定时,反应器各区从1~6区,溶解氧逐渐增加,1~6区分别为0.43、1.47、3.29、4.76、5.75与5.88 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.可见,5区与6区溶解氧基本相同.所以,虽然反应器设计各区的曝气情况相同,但是在反应器前端由于污泥的pH相对较高,体系中同时存在着大量的好氧异养性微生物,其生长过程中需要消耗大量的氧气,所以导致反应器前端区的DO值较低,随着生物沥浸过程的进行,体系pH的降低,大部分中性异养微生物的活性受到抑制^[23],甚至死亡.导致系统耗氧量下降,进而使得后端各区DO值有逐渐上升的趋势.这一现象与课题组前期进行制革污泥中试研究时得出的结论一致^[17].

2.3 SRT = 1.25 d 时反应器各区 pH 变化

污泥停留时间为1.25 d时,反应器各区pH动态变化如图7所示.可以看出,反应器1区污泥pH

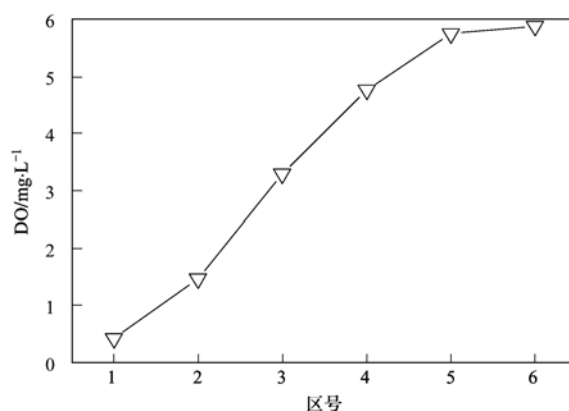


图6 系统稳定时生物沥浸反应器各区溶解氧(DO)值 (SRT = 2 d)

Fig.6 Dissolved oxygen(DO) value in the different sections of bioleaching reactor at the stable point (SRT = 2 d)

从 0 h 的 2.50 依次经过 2 h 的 4.87, 6 h 的 5.09, 最终逐渐升高至 18 h 的 5.44. 后维持这一水平至第 54 h. 反应器 2 区污泥 pH 从 0 h 的 2.50 依次经过 2 h 的 3.81, 6 h 的 4.12, 最终逐渐升高至 24 h 的 5.33. 后维持这一水平至最终的 54 h. 反应器 3 区污泥 pH 从 0 h 的 2.50 依次经过 2 h 的 2.85, 6 h 的 3.19, 最终逐渐升高至 30 h 的 4.88, 至反应器运行崩溃.

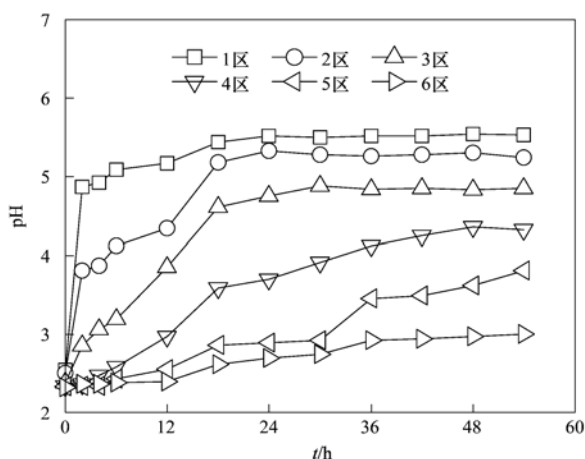


图7 生物沥浸反应器系统各区污泥

pH 随时间的变化 (SRT = 1.25 d)

Fig. 7 Variation of sludge pH with time in
biobleaching reactor system (SRT = 1.25 d)

而反应器 4、5 与 6 区在以该参数运行过程中, 并未观察到其稳定运行的时刻. 即直至系统崩溃的时刻, 该 3 区的污泥 pH 也未达到稳定. 从图 7 可以看出, 反应器 4、5 与 6 区从运行 0 h 始 pH 逐渐升高至 54 h 的 4.32、3.81 与 3.00. 在第 54 h 时, 反应器 1~6 区微生物对营养剂的利用率分别为 2%、4%、2%、3%、8% 与 43%. 可见, 与污泥停留时间 2.5 d、2 d 相比较, 在污泥停留时间为 1.25 d 运行的情况下, 反应器菌群不能良好地利用微生物营养剂进行生长.

通过分析上述结论, 可以得出, 在生物沥浸反应器污泥停留时间越长, 推流式生物沥浸系统越易达到稳定. 城市污泥的脱水性能也将得到较快的改善. 例如, 污泥停留时间为 2.5 d 时, 系统在 72 h 达到稳定, 污泥在反应器第 3 区得到较好的调理. 在实际的生产过程中, 通常希望污泥在反应器中停留时间较短, 进而得到较大的污泥处理量. 然而, 由于整个推流式生物沥浸反应器稳定运行是建立在体系微生物菌群良好的生长与繁殖基础之上, 进而来改善污泥的脱水性能. 由于微生物的大量繁殖需要一个过程.

这势必决定了该生物沥浸体系种污泥停留时间不可能无限制的缩短, 实验发现, 当污泥停留时间缩短至 2 d 时, 系统达到稳定则需要 120 h. 污泥的脱水性能在反应器的第 5 区才能得到理想的改善. 而当污泥停留时间进一步缩短至 1.25 d 时, 较大的污泥处理负荷对沥浸系统造成了不可恢复的冲击. 反应器中微生物菌群不能良好地利用微生物营养剂进行生长, 进而使得系统失衡. 另外, 污泥停留时间缩短至 2 d 时, 虽然污泥脱水性能的改善集中体现在反应器的 1~5 区, 反应器第 6 区没有被充分利用. 然而, 出于对将来工程化应用时, 不可预测因素对系统稳定运行影响的考虑. 停留时间 2 d 可以作为工程应用时的较优污泥停留时间.

不同污泥停留时间实验生物沥浸过程中得到的生物沥浸污泥集中收集, 不加任何絮凝剂直接经过增强聚丙烯厢式压滤机压滤至泥饼含水率 60% 以下. 得到的污泥饼由于含水率较低可以直接机械破碎. 由于该生物沥浸过程中, 泥饼 N、P、K 等营养成分损失较少^[18], 破碎后的污泥喷淋少量的石灰乳液中和 pH 后可以做土壤改良剂及园林绿化基质. 同时, 由于生物沥浸过程并不会降低污泥的有机质^[19,20,25], 所以深度脱水后的泥饼可以进行焚烧处置. 当然, 脱水以后的污泥经过适当的处理后也可以做建筑材料、吸附剂等环境友好型处置^[26~28].

3 结论

(1) 采用容量为 700 L 的推流式生物沥浸反应器连续处理污泥, 当反应器曝气量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, HRT 为 2.5 d, 反应系统在 72 h 时运行达到稳定, 污泥的比阻值由 1 区的 $0.64 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐降低至 6 区的 $0.33 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. SRT 为 2 d 时, 生物沥浸系统在 120 h 达到稳定, 污泥的比阻值由 1 区的 $0.56 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 逐渐降低至 6 区的 $0.20 \times 10^{13} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$. SRT 为 1.25 d 时, 沥浸系统微生物菌群对营养剂利用率降低, 系统在运行第 48 h 时失衡.

(2) 生物沥浸反应器污泥停留时间越长, 推流式生物沥浸系统越易达到稳定. 城市污泥的脱水性能也将得到较快的改善. 停留时间 2 d 可以作为工程应用时的较优污泥停留时间.

参考文献:

- [1] 刘峰, 万新南, 陈希伟. 浅谈中国城市污泥的处置 [J]. 环境科学与管理, 2009, 34(8): 116-119.
- [2] 唐小辉, 赵力. 污泥处置国内外进展 [J]. 环境科学与管理, 2005, 30(3): 68-71.

- [3] Cheng H F, Xu W P, Liu J L, *et al.* Application of composted sewage sludge (CSS) as a soil amendment for turfgrass growth [J]. *Ecological Engineering*, 2007, **29**(1): 96-104.
- [4] Lin C F, Wu C H, Ho H M. Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials [J]. *Waste Management*, 2006, **26**(9): 970-978.
- [5] 段宏伟, 王琳, 施永生. 各种调理剂在污泥脱水过程中的应用 [J]. *云南化工*, 2006, **33**(4): 67-69.
- [6] 李帅, 边炳鑫. 磁场对污泥脱水性能影响研究 [J]. *环境保护科学*, 2007, **33**(1): 12-14.
- [7] 陈世朋, 张景来. 污水处理中的污泥脱水技术研究进展 [J]. *污染防治技术*, 2006, **19**(1): 16-20.
- [8] Chen Y G, Chen Y S, Gu G W. Influence of pretreating activated sludge with acid and surfactant prior to conventional conditioning on filtration dewatering [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, **99**(2): 137-143.
- [9] Saveyn H, Pauwels G, Timmerman P, *et al.* Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase [J]. *Water Research*, 2005, **39**(13): 3012-3020.
- [10] Neyens E, Baeyens J. A review of thermal sludge pre-treatment processes to improve dewaterability [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **98**(1-3): 51-67.
- [11] 荀锐, 王伟, 乔玮, 等. 城市污泥处理现状与强化脱水的水热减量化技术 [J]. *环境卫生工程*, 2006, **16**(2): 28-32.
- [12] Turchiuli C, Fargues C. Influence of structural properties of alum and ferric flocs on sludge dewaterability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2004, **103**(1-3): 123-131.
- [13] Deneux-Mustin S, Lartiges B S, Villemin G, *et al.* Ferric chloride and lime conditioning of activated sludges: an electron microscopic study on resin-embedded samples [J]. *Water Research*, 2001, **35**(12): 3018-3024.
- [14] 袁园, 杨海真. 污泥化学调理和机械脱水方面的研究进展 [J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(7): 499-503.
- [15] Shao L M, Wang G H, Xu H C, *et al.* Effects of ultrasonic pretreatment on sludge dewaterability and extracellular polymeric substances distribution in mesophilic anaerobic digestion [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 474-480.
- [16] Yu Q, Lei H Y, Yu G W, *et al.* Influence of microwave irradiation on sludge dewaterability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, **155**(1-2): 88-93.
- [17] 王电站, 周立祥, 何峰. 生物淋滤法提高制革污泥脱水性能的研究 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(1): 67-71.
- [18] 宋兴伟, 周立祥. 生物沥浸处理对城市污泥脱水性能的影响研究 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2012-2017.
- [19] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究: 批式运行模式 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(7): 2023-2029.
- [20] 刘奋武, 周立祥, 周俊, 等. 生物沥浸处理提高城市污泥脱水性能的中试研究: 连续运行模式 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(10): 2993-2998.
- [21] 周立祥, 方迪, 周顺桂, 等. 利用嗜酸性硫杆菌去除制革污泥中铬的研究 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(1): 62-66.
- [22] 周立祥. 固体废弃物处理处置与资源化 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [23] 马文漪, 杨柳燕. 环境微生物工程 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1998.
- [24] 陈浩, 周立祥, 李超. 空气提升式反应器处理制革污泥的中试研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(9): 2046-2051.
- [25] 李超, 周立祥, 王世梅. 复合硫杆菌生物浸出污泥中重金属的效果及与 pH 和 ORP 的关系 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1155-1160.
- [26] 余兰兰, 钟秦, 冯兰兰. 剩余污泥制备活性炭吸附剂及其应用研究 [J]. *安全与环境学报*, 2005, **5**(4): 39-42.
- [27] 方平, 岑超平, 陈定盛, 等. 用污水处理厂脱水污泥制备含炭吸附剂 [J]. *化工环保*, 2011, **28**(3): 278-281.
- [28] 梁向东, 李飞飞. 污水处理厂污泥资源化利用的研究 [J]. *科技情报开发与经济*, 2010, **20**(33): 143-147.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, YIN Jun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《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1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 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