

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

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

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H₂O₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe⁰/优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO₂/PS/Fe₃O₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H₂S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响

宋永伟, 刘奋武, 周立祥*

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要: 通过实验室摇瓶试验和实际工程应用试验研究了不同污泥浓度(2%~5%)下, 营养剂加入量对生物沥浸促进城市污泥脱水性能的影响, 同时分析了 pH 值和营养剂利用率的变化。结果表明, 生物沥浸过程中, 不同浓度污泥各处理下 pH 值均呈直线下降后趋于稳定的趋势; 生物沥浸 2 d 后, 各处理中营养剂几乎都被微生物完全利用; 2%、3%、4%、5% 浓度污泥比阻随着沥浸时间的延长先迅速减小后逐渐回升, 且浓度越高回升幅度越大, 各浓度污泥选择最佳营养剂浓度分别为 3.0、4.5、8.3 和 12.8 g·L⁻¹, 此时污泥最低比阻分别为 0.61 × 10¹²、1.22 × 10¹²、3.09 × 10¹² 和 4.83 × 10¹² m·kg⁻¹。通过工程应用试验表明, 将 5% 浓度城市污泥稀释成 3% 浓度再生物沥浸的方法不仅能够改善生物沥浸污泥脱水性能, 表现在比阻从 3.29 × 10¹² m·kg⁻¹ 下降到 1.10 × 10¹² m·kg⁻¹, 同时还可以缩短污泥停留时间(从 4 d 缩短为 2.35 d)及降低运行成本。这为生物沥浸工艺处理高浓度污泥运行参数的优化提供了科学依据。

关键词: 生物沥浸; 微生物营养剂浓度; 城市污泥浓度; 脱水性能; 厢式压滤机

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2786-07

Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching

SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang

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

Abstract: In this study, shaking flask batch experiments and practical engineering application tests were performed to investigate the effect of microbial nutrient concentration on the dewaterability of municipal sewage sludge with 2%, 3%, 4% and 5% solid contents via bioleaching. Meanwhile, the changes of pH value and the utilization efficiency of microbial nutrients during bioleaching were analyzed in this study. The results showed that the pH value decreased gradually at the beginning and then maintained a stable state in the treatments with different solid contents, and the nutrients were completely used up by the microorganisms after 2 days of bioleaching. It was found that the SRF of 2%, 3%, 4%, 5% sludges decreased quickly and then rose gradually with the extension of bioleaching time. In addition, the higher solid content the greater the increase. It was determined that the optimum microbial nutrient dosage for sludge with solid content of 2%, 3%, 4% and 5% were 3.0 g·L⁻¹, 4.5 g·L⁻¹, 8.3 g·L⁻¹ and 12.8 g·L⁻¹, respectively. At this point, the lowest SRF of sludge with each solid content were 0.61 × 10¹² m·kg⁻¹, 1.22 × 10¹² m·kg⁻¹, 3.09 × 10¹² m·kg⁻¹ and 4.83 × 10¹² m·kg⁻¹, respectively. Through the engineering application, it was showed that diluting the solid content of sewage sludge from 5% to 3% before bioleaching was feasible. It could not only improve the dewaterability of bioleached sewage sludge (the SRF declined from 3.29 × 10¹² m·kg⁻¹ to 1.10 × 10¹² m·kg⁻¹), but also shorten the sludge nutrient time (shortened from 4 days to 2.35 days) and reduce the operation costs. Therefore, the results of this study have important significance for the engineering application of bioleaching of municipal sewage sludge with high solid content.

Key words: bioleaching; microbial nutrient concentration; solid content of municipal sewage sludge; dewaterability; chamber filter press

生物沥浸法(Bioleaching, 生物淋滤或沥滤)是利用以硫杆菌为主的复合微生物对污泥中还原性硫和/或铁的生物氧化和生物酸化等作用, 将固相中重金属溶解浸提出来的一种无害化新技术^[1,2]。研究发现, 该方法在有效去除污泥中重金属的同时, 可以使得污泥的沉降性和脱水性得到明显改善^[3,4], 城市污泥经过生物沥浸后比阻值下降近 80%, 污泥可在不添加任何絮凝剂的条件下, 厢式压滤脱水至含水率 60% 以下^[5,6], 这对污泥大幅度减容和促进污

泥后续处置提供了非常好的途径。

生物沥浸主要与温度、底物、起始 pH 值、污泥的种类和浓度、某些重金属阳离子等抑制因子等有关, 其中底物浓度和污泥浓度是 2 个重要影响因

收稿日期: 2011-09-05; 修订日期: 2012-02-21

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(21177060)

作者简介: 宋永伟(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: syw1984888@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: lxzhou@njau.edu.cn

素^[7].底物浓度高,则微生物营养物质充足,有利于提高生物沥浸效果,同时缩短沥浸时间,但浓度过高则会造成浪费,提高运行成本.污泥浓度高,则缓冲力强,生物沥浸时间长且释放更多抑制因子,影响沥浸效果^[8].前人所做的工作大多是通过底物浓度或污泥浓度两方面来探讨生物沥浸对污泥中重金属去除效果^[9~14],对底物浓度与污泥浓度对生物沥浸污泥脱水效果的研究却鲜见报道.本课题组于2011年5~7月对江苏省150多家污水厂污泥进行了采样调查,结果显示,有近85%的城镇污水处理厂浓缩池污泥含水率>96%.而本课题组生物沥浸示范工程所在的无锡某污水处理厂一期浓缩池污泥浓度通常在4.0%~5.7%之间波动,最高时达到7.3%.由于季节性变化及外界因素的影响,浓缩池污泥的泥质呈长期不稳定,短期相对稳定的变化现象.因此,为了使得浓缩污泥生物沥浸后具有较好的脱水效果,研究不同污泥浓度下微生物营养剂的需要量具有重要意义.因此,本研究通过摇瓶试验,分析了生物沥浸过程中不同营养剂加入量对不同浓度污泥脱水性能(比阻 γ 表征)的影响,筛选不同浓度污泥的最佳营养剂浓度,同时根据生物沥浸运行成本分析高浓度污泥处理方法,并以示范工程实际运行进行论证,以期优化生物沥浸工艺运行参数提供科学依据.

1 材料与方 法

1.1 供试污泥与接种物的制备

供试污泥取自无锡某污水处理厂内的污泥浓缩池,浓度5.2%,pH值7.52,有机质含量48.3%,全氮4.78%,全磷3.00%,总铁2.78%,总硫3.11%,重金属均不超标.将该污泥稀释分别得到浓度为2%、3%、4%和5%的污泥,经测定比阻分别为 14.46×10^{12} 、 18.07×10^{12} 、 19.32×10^{12} 和 $20.12 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,备用.

接种物的制备:利用本课题组以前分离得到的2株硫杆菌和数株耐酸性异养菌,各自在专有培养基中培养扩繁(置于28℃往复摇床 $180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 中扩大培养,直至菌体细胞数量达约 10^8 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$).然后将培养液混合,吸取15 mL混合菌液到135 mL新鲜供试污泥中培养,直至菌体细胞数量达约 10^8 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$,再吸取15 mL此污泥到135 mL新鲜供试污泥中,如此重复2次,所得驯化污泥即为接种物.

1.2 不同浓度污泥生物沥浸试验

分别在一系列250 mL三角瓶中,加入135 mL

供试污泥,随后不同浓度污泥按如下设计添加复合营养剂(主要含N、P、Ca、Mg、S、Fe、Si、有机酸、维生素等):①浓度2%污泥4个处理:4.5、3.8、3.0、2.3 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;②浓度3%污泥4个处理:10.5、8.3、6.0、4.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;③浓度4%污泥4个处理:12.8、10.5、8.3、6.0 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$;④浓度5%污泥8个处理:24.8、21.0、16.5、12.8、10.5、8.3、6.0、4.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.接种物按污泥量10%加入.三角瓶置于28℃往复摇床($180 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$)中振荡培养,每天定时测定pH值、污泥比阻 γ 和营养剂利用率.

1.3 城市污泥生物沥浸处理生产性试验

根据生物沥浸试验结果选择不同浓度污泥最佳营养剂添加量,通过运行成本分析,将5%浓度污泥兑污水处理厂中水进行稀释至3%再生物沥浸有助于缩短生物沥浸时间和提高污泥脱水性能,并减少营养剂成本.为了使该室内研究结果在实际应用中得到验证,作者采用本课题组建于无锡太湖新城污水处理厂的生物沥浸示范工程(日处理浓缩污泥量规模 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)进行工程应用试验.该生物沥浸工程污泥流向见图1^[15],运行模式为推流式,每天定时将浓缩污泥通过计量泵泵入反应器1区中,生物沥浸后污泥通过反应器6区排出至沉淀池,具体工作原理见文献^[16].沥浸污泥在沉淀池经重力浓缩后用螺杆泵泵入隔膜厢式压滤机(型号XMZGFS150-1250-72.78-U,景津压滤机集团公司生产)进行压滤脱水.

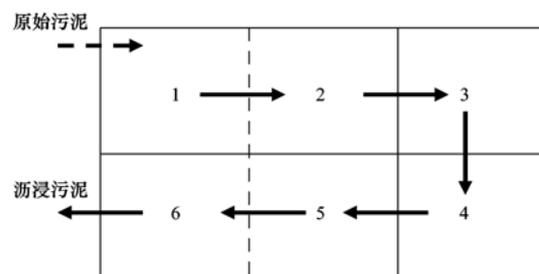


图1 生物沥浸系统中污泥流向示意^[13]

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

具体操作方法:试验期间,该工程生物沥浸处理的浓缩污泥浓度为5%并正常运行.2011年4月7日起改变运行模式,将 50 m^3 浓缩污泥兑中水稀释至浓度为3%(浓缩污泥 50 m^3 +中水 35 m^3 ,分别用计量泵泵入),同时按 $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 添加量加入微生物复合营养剂,在相同的操作条件下维持9 d至4月15日.在推流的作用下污泥从1区依次经过2、3、4、5区,最终从6区排泥口流出反应器.每天进原始

污泥前取样监测生物沥浸体系 6 区污泥比阻 γ , 沥浸污泥在沉淀池重力浓缩后用隔膜厢式压滤机脱水 (进泥 1.5 h, 压力 0.75 MPa; 压滤 1.5 h, 压力 1.5 MPa), 并测定压滤后泥饼含水率。

1.4 测定方法

采用 pHS-3C 精密 pH 计测定污泥的 pH 值; 污泥的比阻 γ 采用布氏滤斗-真空抽滤法测定^[17,18]; 污泥的含固率和有机质分别采用 105℃ 烘干法和 600℃ 灼烧法测定; 营养剂利用率以硫的氧化率为判断标准。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度污泥各处理下生物沥浸过程中 pH 值、比阻 γ 和营养剂利用率的变化情况

2.1.1 浓度污泥为 2% 时营养剂不同加入量对生物沥浸各指标的影响

图 2 反映了不同营养剂添加量下 2% 浓度污泥生物沥浸过程中 pH 值、比阻和营养剂利用率情况。从中可以很直观地看出, 当生物沥浸时间为 24 h 时, pH 值、比阻均迅速下降, 而营养剂利用率则直线上升, 除了添加量为 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理的利用率为 95.75% 外, 其他 3 个处理均被完全利用。随着沥浸时间的延长, 到 48 h 时, 各处理下 pH 值和比阻都有所回升 (除 $2.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外), 但上升幅度较小。此时个处理营养剂利用率均达到 100%。从不同处理下单一指标来看, 24 h 时各处理 pH 值分别从初始的 4.63、4.59、4.86 和 4.87 下降到 2.95、2.91、3.33 和 3.61 (营养剂浓度从高到低顺序, 下同), 可见营养剂浓度对 pH 值变化起着至关重要的作用, 营养剂浓度越高, pH 值下降越快。在 48 h 时各处理 pH 值基本趋于稳定, 分别为 3.00、2.99、3.27 和 3.42, 与 24 h 和 72 h 时相当。单从比阻来看, 虽然各处理在 24 h 时 pH 值大小不一, 但比阻值却非常接近, 从初始的 $14.46 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别下降到 0.62×10^{12} 、 0.77×10^{12} 、 0.61×10^{12} 和 $0.92 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。根据污泥脱水性能范围划分均属于较易脱水类别 ($< 1 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[17,19]。但生物沥浸 48 h 后比阻不再下降, 反而有所回升, 分别上升为 1.45×10^{12} 、 1.90×10^{12} 、 1.36×10^{12} 和 $2.82 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均变为原来的 2 倍以上。根据各处理不同沥浸时间下比阻的变化情况, 选择 2% 浓度污泥营养剂最佳添加量为 $3.0 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2.1.2 浓度污泥为 3% 时营养剂不同加入量对生物沥浸各指标的影响

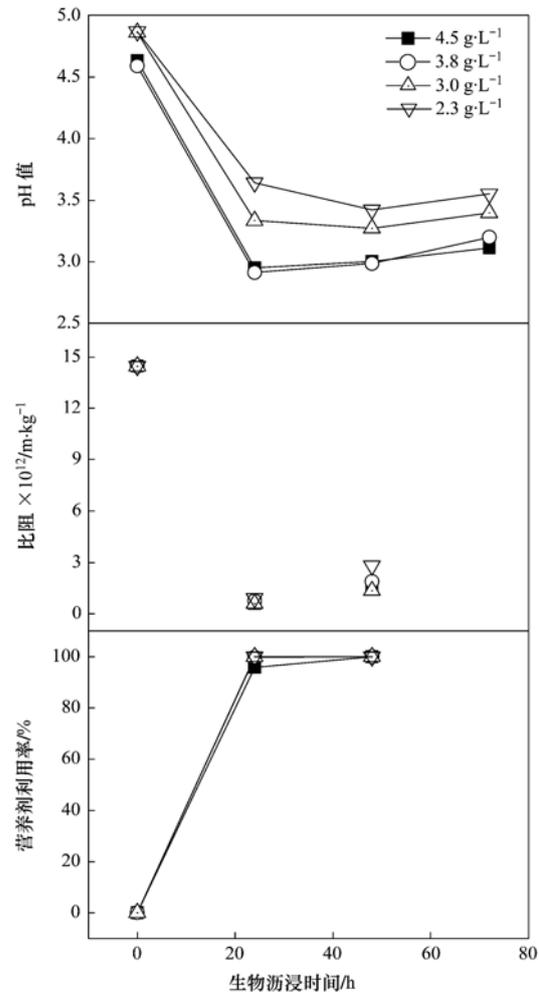


图 2 2% 浓度污泥不同处理下各指标变化情况

Fig. 2 Change of pH, SRF and nutrition utilization efficiency of 2% sludge in different treatments

图 3 为不同处理下各指标变化情况。从图 3 可以看出, 3% 浓度污泥生物沥浸过程中 pH 值、比阻和营养剂利用率的变化趋势与 2% 浓度污泥相类似。但笔者发现, 在 24 h 后体系中 pH 值仍直线下降。这主要是因为, 在试验设计中不同浓度污泥的各个处理的接种微生物都是按污泥量的 10% 加入, 而营养剂的添加量相对 2% 浓度污泥而言则增多。微生物对营养剂的利用是一个产酸过程, 营养剂越多, pH 值达到稳定所需的时间也越长, 并产生更多的 H^+ , 直至 48 h 时才趋于稳定。此时, 各处理 pH 值从初始的 5.20 左右分别下降到 2.47、2.45、2.63 和 2.86。于此相对应的, 除了 $10.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理为 91.98% 外, 其他各处理营养剂的利用率都达到 100%, 这也间接证明了微生物对营养剂的利用率与体系 pH 值变化的相关性。从比阻角度来看, 污泥的脱水性能得到了较好的改善, 在 48 h 时分别下降到

2.21×10^{12} 、 1.69×10^{12} 、 1.07×10^{12} 和 1.22×10^{12} $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与对照相比脱水性能分别提高了 87.77%、90.65%、94.08% 和 93.25%。而随着生物沥浸的延续，各处理均开始回升，在 48 h 时分别上升到 5.25×10^{12} 、 3.16×10^{12} 、 3.82×10^{12} 和 3.94×10^{12} $\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。除 $10.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理外，其他处理仍属于中等脱水类别 ($1 \times 10^{12} \sim 4 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$)，因此选择 3% 浓度污泥的最佳营养剂添加量为 $4.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

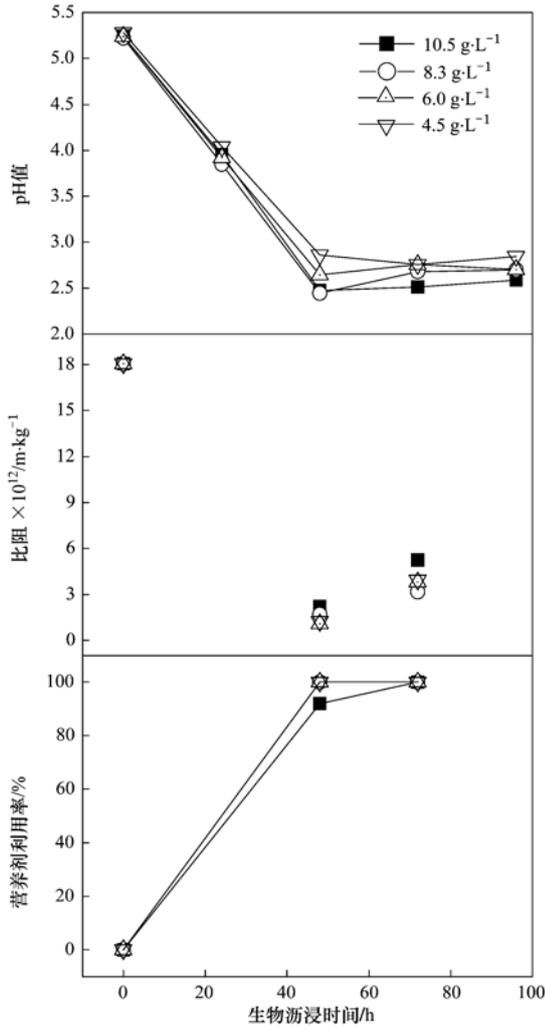


图3 3%浓度污泥不同处理下各指标变化情况

Fig. 3 Change of pH, SRF and nutrition utilization efficiency of 3% sludge in different treatments

2.1.3 浓度污泥为4%时营养剂不同加入量对生物沥浸各指标的影响

图4为4%浓度污泥不同处理下pH值、比阻和营养剂利用率的变化情况。从中可见，该浓度污泥生物沥浸过程中各指标变化于3%浓度污泥一致。pH值在48 h内呈直线下降，之后逐渐趋于稳定(略有回升)，不同之处在于，相同的生物沥浸时间下各

处理pH值之间的差异较小，分布比较集中，48 h后均从初始的5.40左右下降到2.50左右。此时各处理中营养剂的利用率分别为93.86%、93.61%、99.32%和97.28%，可见增加营养剂的添加量会延长微生物对其完全利用的时间。从图4中容易看出，生物沥浸48 h后，各处理比阻明显变小，从初始 $19.32 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 分别下降到 2.40×10^{12} 、 2.48×10^{12} 、 2.51×10^{12} 和 $2.61 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。但试验中发现，经生物沥浸72 h后，各处理比阻相对3%浓度污泥而言变化较大，分别上升到了 8.58×10^{12} 、 11.25×10^{12} 、 12.19×10^{12} 和 $13.61 \times 10^{12} \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，部分处理与2%浓度原始污泥相当。与24 h时相比分别增大了89.82%、187.72%、294.50%和270.84%，从中等脱水类别污泥转变成难脱水污泥。因此，对于4%浓度污泥而言，其生物沥浸时间最多只能2 d，综合考虑营养剂成本及比阻大小，选择 $8.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理较为适宜。

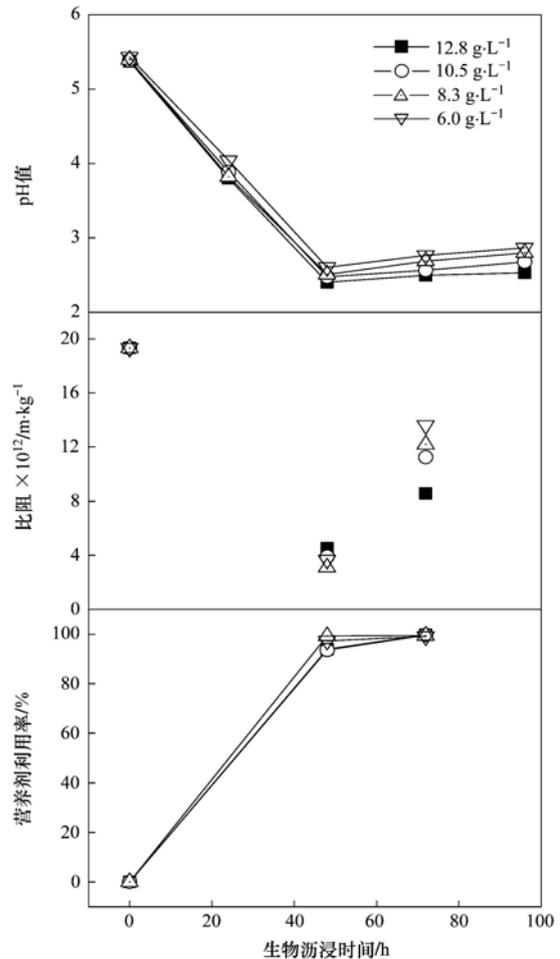


图4 4%浓度污泥不同处理下各指标变化情况

Fig. 4 Change of pH, SRF and nutrition utilization efficiency of 4% sludge in different treatments

2.1.4 浓度污泥为5%时营养剂不同加入量对生物沥浸各指标的影响

从图2~4可以看出,在营养剂完全利用之前,体系pH值均呈直线下降趋势,一旦营养剂被消耗殆尽,pH值则逐渐达到稳定状态.为了更直观地突出营养剂浓度与生物沥浸体系中pH值变化的关系,对5%浓度污泥的底物浓度从高到低设置了多个处理(图5).由图5可知,生物沥浸24h前各处理pH下降较快,从5.50左右分别降到3.12、2.84、2.61、2.82、2.75、2.99、3.03和3.24.此时10.5、8.3、6.0和4.5 g·L⁻¹处理营养剂利用率分别为72.28%、65.35%、78.03%和88.79%,由此可推断其他4个高底物浓度处理也未被完全利用.本研究发现,当沥浸时间为48h时,各处理下pH值分别为2.08、2.08、2.20、2.43、2.64、2.73、2.91、3.03,与24h相比下降的幅度分别为0.94、0.76、0.41、0.39、0.11、0.26、0.12和0.21.可见随着时间的延长,添加的底

物浓度越高,pH值下降越明显.当营养剂利用率都超过90%后(48h),各处理下pH值也趋于稳定,上升或下降的幅度都较小.从比阻方面来看,各处理均呈先迅速减小后逐渐增大的趋势.在24h时10.5、8.3、6.0和4.5 g·L⁻¹处理比阻从初始值 $20.12 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 分别下降为 3.22×10^{12} 、 3.78×10^{12} 、 2.91×10^{12} 和 $2.86 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,较好地改善了污泥脱水性能.从图5中48h时比阻可知,底物浓度越高或者越低均不利于污泥脱水,且沥浸时间越长,高浓度底物处理下比阻回升越快.在72h时24.8、21.0、16.5和12.8 g·L⁻¹处理比阻分别上升到 17.59×10^{12} 、 16.47×10^{12} 、 11.03×10^{12} 和 $8.52 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$.因此,5%浓度污泥最佳营养剂浓度可选择12.8 g·L⁻¹.

通过上述结论可知,在生物沥浸初期(48h),体系中pH值呈直线下降,随后逐渐稳定.这主要是因为接种微生物生长迟缓期短,在营养剂浓度充足的条件下,很快进入对数生长期,迅速繁殖,令pH值稳定下降.当营养剂消耗殆尽时,微生物便进入稳定期,对体系pH值的变化影响较小.

由图2~5可见,不同浓度不同营养剂加入量的处理下比阻均呈现先迅速减小后逐渐回升.分析认为可能有以下原因:从总体上看,在前48h,污泥比阻的变化与pH的变化有明显的相关性,pH越低则污泥比阻越小.这是因为污泥颗粒表面带负电荷而相互排斥,生物酸化引起H⁺浓度的升高部分中和了污泥颗粒表面负电荷,使其趋于近中性(pH为2.8左右时,Zeta电位为0 mV^[20]),从而使得污泥颗粒间相互排斥性明显降低而有利于脱水,表现出污泥比阻值明显下降.随着生物沥浸的继续,各处理的pH趋于稳定,而比阻值不再下降反而有所回升.分析认为这可能是胞外聚合物(EPS)的变化引起的,在沥浸初期,体系中微生物已经由异养菌组成的菌体胶团转变成嗜酸性自养菌为主并有少量耐酸性异养菌组成的群落结构.EPS亲水性一般都很强,而自养菌产生的EPS要比异养菌低得多,这可能是生物沥浸后污泥更容易脱水的原因之一.但是随着沥浸时间的延长,在外加能源物质消耗殆尽的情况下,以分解污泥中有机物作为能源物质的异养菌开始继续繁殖,从而取代自养菌成为菌群的主体,此时异养菌分泌的EPS也开始增多,过量的EPS反而会使污泥脱水性能变差.

同时,本研究发现在相同沥浸时间,不同浓度污泥在最佳底物浓度条件下比阻差异较大(浓度越高,比阻越大).理论上讲,比阻与污泥浓度无关,但

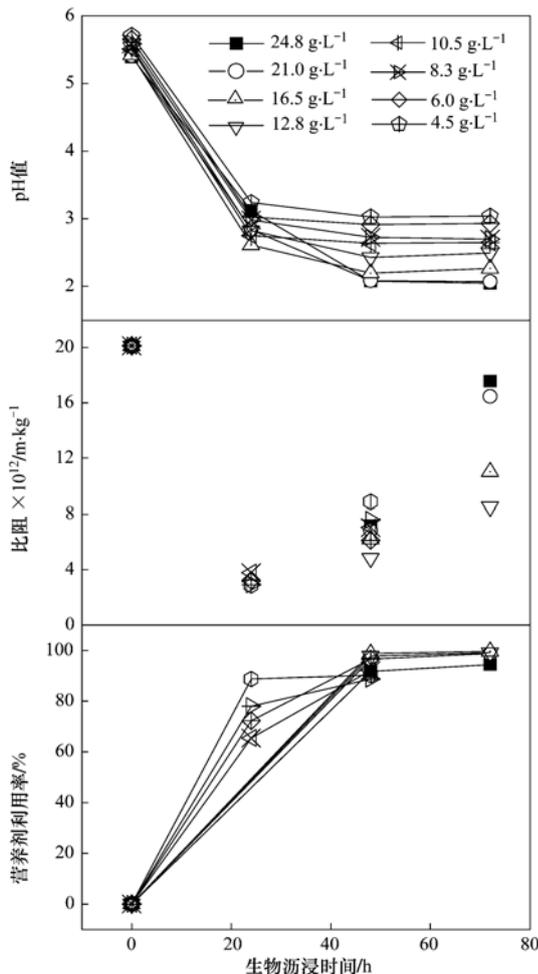


图5 5%浓度污泥不同处理下各指标变化情况

Fig. 5 Change of pH, SRF and nutrition utilization efficiency of 5% sludge in different treatments

实际中发现,比阻仍受污泥浓度影响^[21]. 笔者认为,当颗粒含量明显增大时,容易生成架桥,使过滤介质的实际孔径减小,过滤阻力增大;同时,较高的颗粒含量又会导致滤饼层增厚,使上部的液体透过介质的距离增加,过滤速度降低,导致比阻增大. 田禹等^[22]研究也表明,当污泥浓度 >3% 时,比阻随着浓度的增加显著增大.

与 2% 和 3% 浓度污泥相比,4% 和 5% 浓度污泥在生物沥浸过程中比阻值下降到最低点后回升幅度较大,脱水性能明显变差. 这可能与污泥颗粒存在的状态有关. 虽然污泥颗粒表面带负电荷而相互排斥,但浓度升高,污泥颗粒间隙减小而排列紧密成大颗粒. 因污泥颗粒相对比表面积减小,在生物沥浸酸化作用下,颗粒表面负电荷被中和. 虽然此时大颗粒间相互排斥力因体系的不断产酸而减小,但其内部大部分细颗粒仍呈负电荷. 随着沥浸时间的延长,营养剂被微生物逐渐消耗完全,体系 pH 值不再下降, H⁺ 浓度趋于稳定. 从而导致大颗粒污泥 Zeta 电位继续向负电性转变而不利于脱水,表现出比阻逐渐增大. 因此,对高浓度污泥而言,对其进行稀释将有助于充分分散污泥颗粒而增加表面接触面积,从而有利于生物沥浸后脱水.

2.2 城市污泥生物沥浸工程应用试验

从工程角度看,污泥浓度越高,生物沥浸单位池容处理效率就高. 然而上述结果表明,浓度污泥为 2%、3%、4%、5% 时,其营养剂最佳浓度分别为 3.0、4.5、8.3、12.8 g·L⁻¹. 按污泥干物质计算,则营养剂投入量依次为污泥干物质的 15%、15%、20.8%、和 25.6%. 显然,当污泥浓度超过 3% 时,污泥浓度越高,污泥单位干物质所需营养剂明显增加. 而从比阻来看,最佳处理下各浓度的最低比阻值分别为 0.61×10^{12} 、 1.22×10^{12} 、 3.09×10^{12} 和 $4.83 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,也就是说,污泥浓度越低,生物沥浸后污泥脱水性能越好. 将 5% 污泥稀释到 3% 以下再生物沥浸显然有利于改善污泥脱水性能. 这时需要考虑到稀释后与稀释前工程上运行成本问题.

为了验证稀释处理浓缩污泥再进行生物沥浸的方法是否具有可行性,作者于 2011 年 4 月 7~15 日在无锡生物沥浸示范工程平台上做了工程应用试验. 4 月 7 日前,日处理浓度约 5% 浓缩污泥 50 m³,营养剂加入量为 13 g·L⁻¹ 浓度添加,则每天需 650 kg 营养剂,生物沥浸时间为 4 d. 从 4 月 7 日起,改变原来进泥模式,每天定时进泥 50 m³,同时补加中水 35 m³,并按 4.5 g·L⁻¹ 量添加营养剂(因反应器

本身有复合微生物,这里不再添加),则每天需 382.5 kg 营养剂,该模式一直运行至 4 月 15 日. 每天进泥前取样测定反应器 6 区沥浸污泥比阻,同时测定沥浸污泥经厢式压滤机压滤脱水后泥饼含水率,结果如图 6 所示.

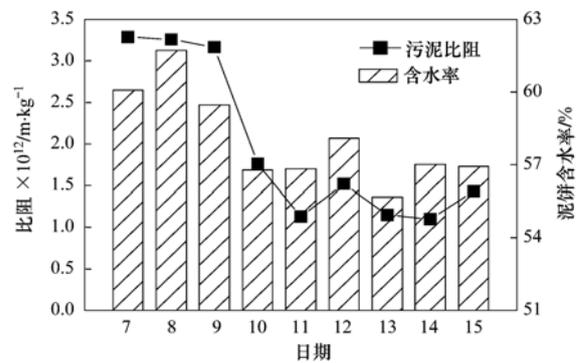


图 6 试验期间(2011 年 4 月)生物沥浸污泥比阻及压滤脱水后泥饼含水率

Fig. 6 Change in SRF of bioleached sewage sludge and the moisture content of sludge cakes after dehydration(2011-04)

从图 6 中可以看出,生物沥浸 3 d(4 月 10 日)后,6 区沥浸污泥比阻明显下降,从初始的 $3.29 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $1.76 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$,污泥生物沥浸时间(即污泥在反应器中的停留时间)为 2.35 d,此时 4 月 7 日所进原始污泥已通过 6 区出泥口几乎完全排出. 可见,稀释后污泥经生物沥浸后脱水性能明显得到了较好的改善. 随着工程的继续运行,不同时期沥浸污泥比阻仍有所下降,最低值为 $1.10 \times 10^{12} \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1}$ (4 月 14 日). 期间比阻有所回升(4 月 12 日、15 日),这可能与当天原始浓缩污泥的性质变化有关(如有机质含量变高等). 沥浸污泥压滤脱水后,泥饼含水率虽然变化起伏,但总的来说呈下降趋势,最低值为 55.68%. 4 月 10~15 日泥饼平均含水率(56.89%)相对 4 月 7~9 日泥饼(60.42%)下降了 3.53%,进一步去除了污泥中的水分. 从处理效率而言,虽然将浓度为 5% 的污泥稀释到 3% 的污泥,单位池容单位时间内污泥处理量看似降低了,但单位污泥干物质营养剂加入量大幅度下降,而且生物沥浸时间明显缩短,经核算单位污泥干物质所需营养剂量反而大幅下降,成本降低,而污泥处理量(以干物质计)却保持不变(见表 1).

由此可见,对高浓度浓缩污泥进行稀释再生物沥浸的方法在工程应用上是可行的,这样不仅减少了营养剂添加量,降低运行成本,还有助于沥浸后污泥的压滤脱水. 这对生物沥浸法处理高浓度浓缩污泥具有重要意义.

表 1 实际工程平台中浓度为 5% 的污泥稀释前后生物沥浸的效率及经济核算

Table 1 Effect of the dilution of concentrated sludge with 5% of solid content on its bioleaching efficiencies

污泥类型	浓度 /%	处理量 / $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	有效池容 / m^3	污泥停留时间 /d	每天营养剂量 / $\text{kg} \cdot \text{d}^{-1}$	污泥干物质所需营养剂/ $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$
稀释前	5	50	200	4	650	260
稀释后	3	85	200	2.35	382.5	153

3 结论

(1) 生物沥浸过程中, 不同浓度污泥对微生物营养剂需求不一样. 2%、3%、4% 和 5% 浓度污泥营养剂最佳添加量分别为 3.0、4.5、8.3、12.8 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 污泥浓度越高, 所需营养剂越多. 然而, 并不是呈比例增加趋势. 随着沥浸时间的延长, 各处理比阻均呈先迅速减小后逐渐回升的趋势. 最佳处理条件下各浓度污泥最低比阻分别为 0.61×10^{12} 、 1.22×10^{12} 、 3.09×10^{12} 和 $4.83 \times 10^{12} \text{m} \cdot \text{kg}^{-1}$. 生物沥浸时间最多不能超过 2 d.

(2) 工程应用试验表明, 高浓度浓缩污泥先稀释再生物沥浸方法有助于降低运行成本, 同时可以缩短污泥停留时间和提高污泥脱水性能. 如将 5% 浓度污泥稀释至 3% 再生物沥浸, 在处理相同量的浓缩污泥下不仅可以降低营养剂用量, 污泥停留时间也从 4 d 缩短为 2.35 d, 同时压滤脱水后泥饼含水率下降了 3.53%.

参考文献:

- [1] Zhou L X, Fang D, Wang S M, *et al.* Bioleaching of Cr from tannery sludge: the effects of initial acid addition and recycling of acidified bioleached sludge [J]. *Environmental Technology*, 2005, **26**(3): 277-284.
- [2] Tyagi R D, Sreekrishnan T R, Blais J F, *et al.* Effect of dissolved oxygen on sludge acidification during the SSDML process [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, **102**(1-2): 139-155.
- [3] 周立祥, 周顺桂, 王世梅, 等. 制革污泥中铬的生物脱除及其对污泥的调理作用 [J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1014-1020.
- [4] 王电站, 周立祥, 何锋. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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. 159-166.
- [8] 沈镭, 张太平, 贾晓珊. 利用氧化亚铁硫杆菌和氧化硫硫杆菌去除污泥中重金属的研究 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2005, **44**(2): 111-115.
- [9] Liu Y G, Zhou M, Zeng G M, *et al.* Effect of solids concentration on removal of heavy metals from mine tailings via bioleaching [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **141**(1): 202-208.
- [10] Zhang P Y, Zhu Y, Zhang G M, *et al.* Sewage sludge bioleaching by indigenous sulfur-oxidizing bacteria: Effects of ratio of substrate dosage to solid content [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(3): 1394-1398.
- [11] 黄明, 陆燕勤, 孙兴福, 等. 不同污泥浓度对生物沥滤过程的影响 [J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(1): 161-164.
- [12] 邹塞, 张盼月, 曾光明, 等. 硫粉投加量与污泥含固率之比对生物淋滤过程的影响 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(3): 510-515.
- [13] 温焯明, 王清萍, 林鸿雁, 等. 污泥浓度对城市污泥中重金属生物沥浸效果的影响 [J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, **5**(2): 62-68.
- [14] 方迪, 周立祥. 固体浓度对生物淋滤法去除制革污泥中铬的影响 [J]. *中国环境科学*, 2004, **24**(2): 163-165.
- [15] 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.
- [16] 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): 172-177.
- [17] 陈花果, 伍素兰. 提高石油化工污泥脱水性能试验研究 [J]. *西安地质学院学报*, 1996, **18**(3): 100-105.
- [18] 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. 120-130.
- [19] 高廷耀. 水污染控制工程 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [20] Citeau M, Larue O, Vorobiev E. Influence of salt, pH and polyelectrolyte on the pressure electro-dewatering of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(6): 2167-2180.
- [21] 谢敏, 施周, 李淑展. 污泥脱水性能参数-比阻检测的若干问题研讨 [J]. *环境科学与技术*, 2006, **29**(3): 15-16, 42.
- [22] 田禹, 王宁. 酱油污水污泥脱水的影响因素及其作用机理 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(5): 59-62.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yang, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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