

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第7期

Vol.33 No.7

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

三峡库首秭归地区大气降水硫同位素组成及示踪研究	吴起鑫, 韩贵琳 (2145)
成都春季生物质燃烧和沙尘期间气溶胶散射特征及其重建	岳建华, 陶俊, 林泽健, 朱李华, 曹军骥, 罗磊 (2151)
太湖上空大气气溶胶光学厚度及其特征分析	饶加旺, 马荣华, 段洪涛, 姜广甲, 尚琳琳, 周琳 (2158)
环上海地区干霾气溶胶垂直分布的季节变化特征	徐婷婷, 秦艳, 耿福海, 陈勇航, 张华, 刘琼, 马晓骏 (2165)
南京冬季市区和郊区气溶胶中 PAHs 浓度的昼夜特征及粒径分布	张红亮, 樊曙先, 顾凯华, 朱彬, 范洋, 祖繁, 李红双, 孟庆紫, 何佳宝 (2172)
青岛大气气溶胶水溶性无机离子研究: 季节分布特征	刘臻, 祁建华, 王琳, 陈晓静, 石金辉, 高会旺 (2180)
城市污水处理厂生成的微生物气溶胶的污染特性	邱雄辉, 李彦鹏, 牛铁军, 李美玲, 马智慧, 苗莹, 王湘君 (2191)
基于 WEPS 模型的天津郊区土壤风蚀起尘及对中心城区迁移量估算	陈莉, 韩婷婷, 李涛, 姬亚芹, 白志鹏, 王斌 (2197)
浒苔绿潮与苏北近岸海域营养盐浓度的关系研究	高嵩, 石晓勇, 王婷 (2204)
福建沿海近 10 a 赤潮基本特征分析	李雪丁 (2210)
HSPF 水文水质模型应用研究综述	李兆富, 刘红玉, 李燕 (2217)
城市降雨径流模拟的参数不确定性分析	黄金良, 林杰, 杜鹏飞 (2224)
利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度	姜广甲, 马荣华, 段洪涛 (2235)
嘉善地区水环境敏感点水质影响权重分析及风险等级判定	谢蓉蓉, 逢勇, 张倩, 陈可, 孙明园 (2244)
重庆市盘溪河水质不同季节日变化规律及水质评价	张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强, 张烨 (2251)
南京市湿地水质对城市化影响强度的响应研究	郝敬锋, 刘红玉, 胡和兵, 安静, 张小红 (2259)
宁夏沙湖浮游植物与水环境因子关系的研究	邱小琼, 赵红雪, 孙晓雪 (2265)
影响太子河流域鱼类空间分布的不同尺度环境因子分析	丁森, 张远, 渠晓东, 孔维静, 刘思思, 孟伟 (2272)
大型底栖动物生物评价指数比较与应用	耿世伟, 渠晓东, 张远, 林坤德 (2281)
青藏高原纳木错流域水体总汞的时空分布特征	王康, 康世昌, 郭军明, 张强弓, 黄杰, 郑伟 (2288)
青藏高原纳木错湖水主要化学离子的时空变化特征	郭军明, 康世昌, 张强弓, 黄杰, 王康 (2295)
用物理-生态集成技术局部控制富营养化	李秋华, 夏品华, 吴红, 林陶, 张友春, 李存雄, 陈丽丽, 杨帆 (2303)
太湖氮素出入湖通量与自净能力研究	陈小锋, 揣小明, 曾巾, 刘涛, 杨柳燕 (2309)
富营养湖泊沉积物中磷组分对硫酸盐的响应	袁探, 华玉妹, 朱端卫, 赵建伟, 蔡建波 (2315)
巢湖表层沉积物磷的空间分布差异性研究	温胜芳, 单保庆, 张洪 (2322)
南京地区典型有机污染物长距离输送潜力研究	方利江, 吴有方, 丁中原, 马子龙, 柳敏, 高宏 (2330)
东海内陆架沉积物中黑碳分布及其与持久性有机污染物的相关性研究	林田, 方引, 陈颖军, 胡利民, 郭志刚, 张干 (2335)
嘉陵江重庆段表层水体多环芳烃的污染特征	蔡文良, 罗固源, 许晓毅, 杜炯 (2341)
电子废物拆解区河流沉积物中多氯联苯的污染水平、分布及来源	王学彤, 李元成, 缪绎, 张媛, 孙阳昭, 吴明红, 盛国英, 傅家谟 (2347)
基于梯形模糊数的沉积物重金属污染风险评价模型与实例研究	李飞, 黄瑾辉, 曾光明, 唐晓娇, 白兵, 蔡青, 祝慧娜, 梁婕 (2352)
渤海湾海岸带开发对近岸沉积物重金属的影响	秦延文, 郑丙辉, 李小宝, 张雷, 时瑶, 曹伟 (2359)
崇明东滩表层沉积物重金属空间分布特征及其污染评价	李雅娟, 杨世伦, 侯立军, 周菊珍, 刘英文 (2368)
白洋淀底泥重金属形态及竖向分布	李必才, 何连生, 杨敏, 孟睿, 袁冬海, 席北斗, 舒俭民 (2376)
西南涌酸挥发硫化物浓度水平及影响因素研究	刘晓冰, 温琰茂, 利锋, 吴昌华, 段志鹏 (2384)
氨氮在饮用水生物滤池内的去除机制	刘冰, 范辉, 余国忠, 于鑫, 赵承美, 李清飞, 张舒婷, 魏博 (2394)
Cu(II) 印迹壳聚糖交联膜的表征及其吸附热力学特性	张玉红, 张爱丽, 周集体, 孙筱雨 (2403)
声电氧化处理扑热息痛的研究	戴启洲, 马文姣, 沈宏, 陈浚, 陈建孟 (2410)
粉煤灰吸附-Fenton 及热再生处理亚甲基蓝废水的特性研究	白玉洁, 张爱丽, 周集体 (2419)
利用双室微生物燃料电池处理模拟废水的产电特性研究	张永娟, 李永峰, 刘春研, 王艺璇, 李龙, 王籽人, 董义兴 (2427)
Zn/Cr 型阴离子黏土的制备、表征及其对活性艳橙 X-GN 的去除性能研究	王小蓉, 吴平霄 (2432)
核电站低放射性废水在封闭水体中的输移规律研究	武国正, 徐宗学 (2438)
A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究	翟小敏, 高旭, 张曼曼, 贾丽, 郭劲松 (2444)
系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究	蒋涛, 孙培德, 徐少娟 (2451)
氧化还原介体催化强化 <i>Paracoccus versutus</i> 菌株 GW1 反硝化特性研究	李海波, 廉静, 郭延凯, 赵丽君, 杜海峰, 杨景亮, 郭建博 (2458)
1 株转座子插入突变菌株 TB34 的筛选及产氢分析	刘洪艳, 王广策, 侍浏洋, 朱大玲 (2464)
蜜环菌漆酶对氯酚类污染物催化降解条件优化	秦仁炳, 朱显峰, 吴珂, 张晶晶, 赵海康 (2470)
双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及品种筛选研究	傅志强, 朱华武, 陈灿, 黄瑛 (2475)
闽江河口短叶茳芰湿地 CH ₄ 和 N ₂ O 排放对氮输入的短期响应	牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高 (2482)
青海三江源地区退化草地土壤全氮的时空分异特征	彭景涛, 李国胜, 傅瓦利, 易湘生, 蓝家程, 袁波 (2490)
不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律	吴凤至, 史志华, 方怒放, 岳本江 (2497)
土壤性质对单一及复合污染下外源镉稳定化过程的影响	吴曼, 徐明岗, 张文菊, 武海雯 (2503)
多氯联苯污染农田土壤的原位生态调控修复效应	潘澄, 滕应, 骆永明, 涂晨, 李秀芬, 马婷婷, 张满云, 李振高, 宋静 (2510)
不同作物根系多环芳烃吸收特征差异的比较研究	梁宵, 占新华, 周立祥 (2516)
废气和废渣协同作用脱钠反应特性及机制研究	伊元荣, 韩敏芳 (2522)
中国第三产业能源碳排放影响要素指数分解及实证分析	卢愿清, 史军 (2528)
《环境科学》征稿简则 (2431) 《环境科学》征订启事 (2532) 信息 (2157, 2271, 2367, 2418)	

A + OSA 污泥减量工艺碳元素平衡与减量机制研究

翟小敏¹, 高旭^{1*}, 张曼曼², 贾丽¹, 郭劲松¹

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 安徽省建设工程勘察设计院, 合肥 230001)

摘要: 为深入研究 OSA 工艺减量途径, 揭示其污泥减量机制, 对缺氧-好氧-沉淀-厌氧 (A + OSA) 污泥减量系统和 AO 参照系统进行碳元素平衡分析, 以考察贮泥池插入对减量系统的影响; 辨识两系统各单元碳元素在固液气三相间的迁移转化途径, 推测减量驱动机制。碳平衡结果表明, 在贮泥池停留时间 7.14 h 时, 碳元素在减量系统剩余污泥中的比例比参照系统高约 50%, 与减量系统达到 49.98% 的污泥减量效果相对应。贮泥池的插入能有效减少污泥产量。各单元碳元素变化量表明, 减量系统缺氧池与好氧池 (主体反应区) 用于生物合成的碳元素量高于参照系统; 贮泥池中污泥出现负增长, 且释放 CH₄ 量较主体反应区有大幅增加。DGGE 图谱证实了贮泥池中存在与污泥衰减有关的水解发酵型细菌。A + OSA 工艺污泥减量是贮泥池污泥衰减和主体反应区补偿性增长共同作用的结果。

关键词: 污泥减量; 碳平衡; OSA 工艺; 污泥衰减; 水解发酵

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2444-07

Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process

ZHAI Xiao-min¹, GAO Xu¹, ZHANG Man-man², JIA Li¹, GUO Jin-song¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environemt, Ministry of Education, Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Anhui Geotechnical Investigation & Architectural Design Institute, Hefei 230001, China)

Abstract: In order to deeply explore the mechanism of sludge reduction in OSA system, carbon balance was performed in an anoxic-oxic-settling-anaerobic (A + OSA) system and a reference AO system to investigate effects of inserting a sludge holding tank in sludge cycle line on the sludge reduction process. Meanwhile, carbon mass change in each reaction unit was identified in terms of solid, liquid and gas phases. The causes of excess sludge reduction in A + OSA system were deduced. The carbon balance results show that when the hydraulic retention time in the sludge holding tank is 7.14 h, carbon percent in solid phase of the sludge reduction system is nearly 50% higher than that of the reference system, supporting the consequence that sludge reduction rate of 49.98% had been achieved. The insertion of a sludge holding tank in the sludge return circuit can be effective in sludge reduction. Carbon changes in each unit reveal that the amount of carbon consumed for biosynthesis in the anoxic and oxic tanks (main reaction zone) of the sludge reduction system is higher than in that of the reference system. Sludge decay is observed in the sludge holding tank. Furthermore, CH₄ released from the sludge holding tank is significantly higher than that from the main reaction zone. The DGGE profiles show that there are hydrolytic-fermentative bacteria in the sludge holding tank related to sludge decay. The excess sludge reduction in the A + OSA system could be a result of the combination of sludge decay in the sludge holding tank and sludge compensatory growth in the main reaction cell.

Key words: sludge reduction; carbon balance; oxic-settling-anaerobic (OSA); sludge decay; hydrolysis fermentation

活性污泥法是目前应用最广泛的污水处理方法, 在城市污水处理过程中, 污水中高达 50% 的有机物最终转化为生物污泥^[1]。由于剩余污泥中重金属、病原菌以及有机微污染物的存在, 需要对污泥进行适当的处理处置。但大多数处理技术能耗高, 增加了处理费用或者使用大量化学药品, 伴随有二次污染的问题。据报道, 污泥处理费用通常占污水处理厂总运行费用的 50% ~ 60%^[2~5]。因此, 污泥减量技术引起了各国研究人员极大的关注^[6~8]。在各种减量技术中, 好氧-沉淀-厌氧 (oxic-settling-anaerobic,

OSA) 工艺以其能耗低、无二次污染、减量效果好等特点被认为是较理想的减量途径之一^[9,10]。OSA 工艺是在传统活性污泥工艺的污泥回流系统中增加厌氧或缺氧的贮泥池构成, 污泥在贮泥池停留一段时间后再回流至好氧池。

为揭示 OSA 工艺的减量机制, 国内外学者先后

收稿日期: 2011-09-04; 修订日期: 2011-11-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51178484)

作者简介: 翟小敏 (1986 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: zxmgreen@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoyu@cqu.edu.cn

从不同途径开展研究. Chudoba 等^[11,12]在交替厌氧、好氧环境中得出 OSA 工艺通过能量解偶联实现污泥减量的结论. 文献[9,10]通过比对污泥产率分析能量解偶联、慢速生长的微生物、溶解性微生物产物(SMPs)以及污泥衰减对污泥减量的作用来阐明 OSA 工艺减量机制,随后通过贮泥池内 COD 平衡研究进一步补充验证污泥厌氧池内的污泥衰减是引发污泥减量的原因. 金文标等^[13]通过连续和间歇试验对蛋白质、多糖、内源以及污泥产率的分析,认为 OSA 工艺中的污泥减量是污泥衰减、能量解偶联和低污泥产率厌氧反应作用的结果. 但目前为止对 OSA 减量途径的认识尚未到元素层面,OSA 工艺的减量机制也并未定论. 另一方面,国内外研究中^[14~19],基于元素平衡思想的研究多以氮素为主,如研究植物对氮素的回收利用率,土壤对氮元素的吸附程度等;以碳元素平衡思想为基础的研究多数是针对生态系统展开的,如森林生态系统、陆地生态系统的碳平衡研究等,对反应器的碳平衡研究则相对较少. 本研究拟通过系统各个单元的碳元素在固相、液相和气相间的转化,对 OSA 工艺进行碳平衡分析,同时辅以聚合酶链式反应-变性梯度凝胶电泳(PCR-DGGE)技术,探讨贮泥池的插入对微生物种群的影响,以期揭示工艺减量机制和优化工艺提供证据及相关技术基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置和运行条件

建立 2 套流量为 34 mL·min⁻¹的传统缺氧-好氧(anoxic-oxic, AO)污水处理系统. 其中减量系统由 AO 活性污泥工艺回流段插入 25 L 的污泥停留池构造而成,主体 AO 工艺的缺氧池容积 4L,水力停留时间(hydraulic retention time, HRT) 1.92 h;好氧池容积 12 L, HRT 为 5.76 h. 参比系统的污泥通过污泥回流系统由沉淀池底部回流至缺氧区;减量系统的回流污泥先进入贮泥池,在贮泥池停留 7.14 h 后再由蠕动泵回流至缺氧区. 2 套装置均采用水浴加热使反应器温度处于(25±1)℃左右.

2 套系统平行运行,控制两系统所有可控参数一致. 硝化液回流比为 200%,污泥回流比为 100%. 缺氧区和好氧区(主体反应区) MLSS 为 2 000 mg·L⁻¹左右,缺氧区溶解氧控制在 0.1~0.4 mg·L⁻¹之间,好氧区溶解氧控制在 2.5~3.5 mg·L⁻¹之间. 减量系统污泥龄 30 d,对照系统污泥龄 10 d. 2 套系统采用同一进水箱进水. 为了保持进

水水质水量的稳定性,进水量由计量泵控制. 进水采用人工配水,水质指标如表 1 所示,配水组分为:葡萄糖(300 mg·L⁻¹),蔗糖(166.7 mg·L⁻¹),蛋白胨(100 mg·L⁻¹),NaHCO₃(675 mg·L⁻¹),NH₄Cl(225 mg·L⁻¹),MgSO₄·7H₂O(113.6 mg·L⁻¹),CaCl₂·2H₂O(75 mg·L⁻¹),KH₂PO₄(219.4 mg·L⁻¹),微量元素(1.25 mL·L⁻¹). 每升微量元素中包括 1.3 g ZnSO₄·7H₂O,0.28 g CuSO₄·5H₂O,0.6 g MnCl₂·4H₂O,0.1 g (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O,0.05 g FeCl₃和 0.003 g CoCl₂·6H₂O.

污泥减量效果试验累计进行 117 d,碳平衡分析试验累计进行 30 d. 试验期间 A + OSA 系统和 AO 系统均稳定运行.

表 1 进水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Characteristics of the influent/mg·L⁻¹

COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
430~620	49~58	48~62	5~8

1.2 气体收集试验

为进行碳平衡研究,采用批次试验分别对 2 套系统主体反应区和贮泥池释放含碳气体进行收集和测定. 序批式反应的控制条件和连续流试验的条件完全一致,理论上最大程度的模拟了连续流试验系统各个反应单元的气体产生量. 试验装置如图 1 所示. 其中 1 号、2 号、3 号和 4 号均采用止水阀控制,适当调节止水阀的开闭控制反应条件的进行. 关闭 2 号止水阀,试验前鼓入氩气赶走体系中原有含碳气体,试验后鼓入氩气完全收集装置内产生的含碳气体. 缺氧池和贮泥池气体收集模拟试验采用磁力搅拌控制使污泥处于均匀混合状态,好氧池模拟试验则需通入空气. 由于空气中 CO₂ 仅占空气含量的 0.03%,好氧曝气反应时引入空气中的二氧化碳的量可以忽略不计. 试验用污泥均取自稳定运行的连续反应器.

AO 系统缺氧池模拟试验污泥取自系统进水、回流污泥混合液及硝化液回流混合液,各组分按照 1:1:2 的比例均匀混合;A + OSA 系统缺氧池模拟试验污泥取自系统进水、贮泥池出流混合液及硝化液回流混合液,各组分按照 1:1:2 的比例均匀混合;两系统好氧池模拟试验污泥取自混合均匀的缺氧池出流混合液;A + OSA 系统贮泥池模拟试验污泥取自混合均匀的回流污泥混合液. 缺氧池模拟反应时间 1.92 h,好氧池模拟反应时间 5.56 h,贮泥池模拟反应时间 7.14 h. 为确保气体收集模拟试验与连续运

行反应器吻合,进行批次试验时,均需测试装置内反应前后污泥污水的相关参数,并与反应器中相应的污泥污水参数做对比,确保试验数据的准确性.各单元气体收集模拟试验平行运行3组,取平均值进行分析.

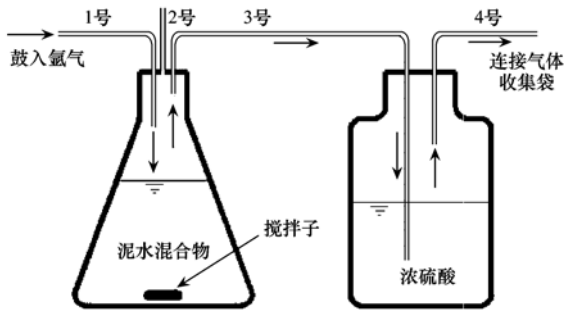


图1 批次试验气体收集装置示意

Fig. 1 Experimental setup for the biogas collection

1.3 污泥DNA提取,PCR-DGGE,测序和同源性比较

从A + OSA工艺贮泥池取活性污泥样品,于离心机中4℃离心15 min,取沉淀污泥约100 mg,参照文献[20]的方法提取DNA样品和PCR扩增.并在35%~55%变性梯度的基础上进行DGGE电泳,割胶与测序方法同文献[20].

1.4 取样及分析测试方法

取进出水、各反应单元泥水混合物及污泥回流、硝化液回流泥水混合物进行碳元素分析,对每个样品干燥基作3次平行测定.泥水混合物中碳元素测定预处理方法如下:所取泥水混合物样品先经过0.45 μm的滤膜进行抽滤,保留抽滤得到的水样做总碳(total carbon, TC)分析.取下滤膜上的污泥放入100 mL的坩埚,滤膜上残留的污泥用纯水洗涤,将洗涤废水也倒入坩埚中,然后将坩埚放入103~105℃的烘箱中进行烘干,直至恒重.用研钵将烘干的样品研磨成粉状,要求粒径≤200 μm.最后将粉末状的样品放入带标签的自封袋中备用.

水样TC分析采用德国ELEMENTAR分析系统公司生产的LiquiTOC/TNb仪进行测定.泥样碳元素含量采用德国Elementar公司生产的Vario EL全自动元素分析仪以及梅特勒-托利多MX/UMX天平.CO、CO₂和CH₄均采用北京北分瑞利集团色谱仪器中心生产的SP-2100气相色谱仪.

2 结果与分析

2.1 系统污泥减量效果

由图2可知,在累积117 d内,AO参照系统平

均产泥量约为2.46 g·d⁻¹,A + OSA系统在贮泥池停留时间7.14 h工况条件下,平均产泥量约为1.17 g·d⁻¹,A + OSA系统污泥减量率平均值为49.98%.该污泥减量率与课题组前期研究相比有显著提高.高旭等^[21]的研究结果显示在该工况下,A + OSA的污泥减量效果约为22%;范莹^[22]的试验结果表明,在贮泥池污泥停留时间7.14 h时,系统运行至34 d时污泥减量率为21%.Chen等^[9]认为贮泥池HRT为10.4 h,氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)控制在-250 mV时,OSA系统能达到接近50%的污泥减量率.钟贤波等^[23]的研究表明,贮泥池HRT为5.5、7.6、11.5 h时,OSA系统污泥减量效果分别为33.24%、22.99%和13.80%.俞小勇等^[24]的研究显示,贮泥池内污泥停留时间为5.6 h时,OSA可获得25.94%的污泥减量效果.张斌等^[25]研究表明,当解偶联池中温度为40℃、污泥浓度为11 g·L⁻¹、HRT为11 h时,OSA工艺的污泥产率比普通活性污泥法低58%.王建芳等^[26]研究在OSA系统中,当贮泥池内污泥停留时间2.64 h时,OSA系统相对于传统活性污泥工艺剩余污泥产率降低了44.34%.本试验污泥减量效果属较高水平.

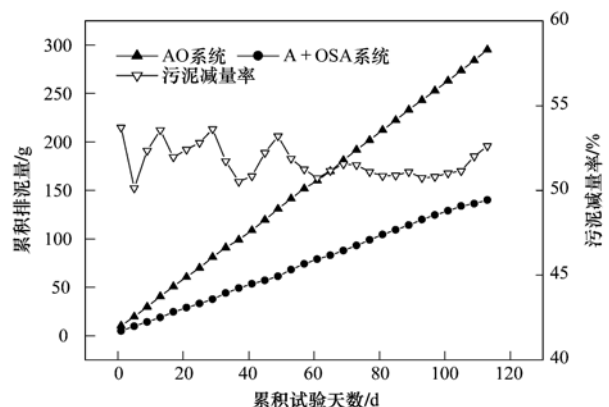


图2 A + OSA和AO系统累计排放剩余污泥量

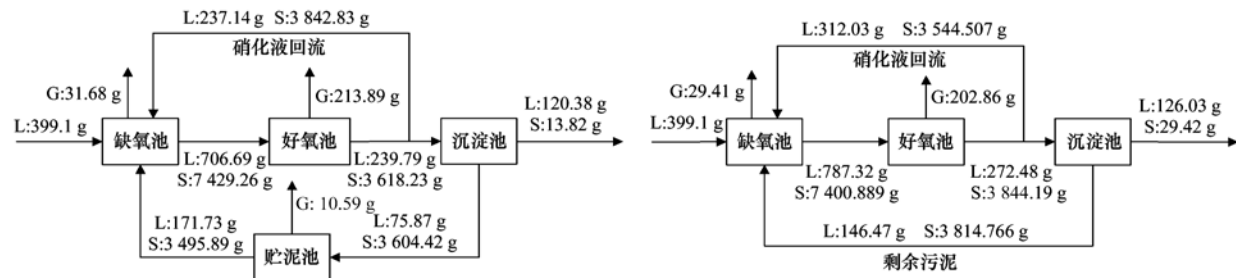
Fig. 2 Cumulative sludge productions in the A + OSA and the AO systems

2.2 A + OSA系统和AO系统碳元素平衡分析

A + OSA系统运行期间,系统碳元素源自系统进水,碳元素在系统内发生化合形态变化,由进水中含碳化合物形式向其他的含碳化合物转移.从微生物利用的角度来看,碳元素变化主要包含三大部分:一部分碳元素用于微生物维持正常的生命活动,所需碳元素通过生物燃烧转化为能量,最终以气体形式散发;另一部分碳元素用于合成生物体,成为微生物的组织结构,以剩余污泥中固相污泥形式排

出系统;还有一部分未被利用的碳元素随系统出水及剩余污泥中的水相排出.如图3所示,两系统稳定运行30 d,根据累计碳元素进出A + OSA系统和AO

系统各单元的量,可绘制碳元素转移流动图,从图3中可以看出碳元素在各单元中的流动分配形式和绝对量.



G 表示气相中碳元素的量; L 表示水相中碳元素的量; S 表示干污泥中碳元素的量

图3 累计30 d的A + OSA系统和AO系统各单元中碳元素转移流动图

Fig. 3 Carbon distribution in the units of the A + OSA and the AO systems during 30 days' stable operation

从形态来看,碳元素通过固、液、气这3种形态流失:一部分以剩余污泥中的固相污泥流失;一部分随系统出水及剩余污泥中的水相流失;一部分以气体形式散失.表2为参照系统和减量系统碳平衡试验结果.根据物料平衡原理,系统中碳元素的输出值应与输入值相等.由表2可知,A + OSA系统中,输出的碳元素总值为390.36 g,占输入碳元素总值的97.80%;AO参照系统中,输出的碳元素总值为387.72 g,占输入碳元素总值的97.15%.考虑试验误差的存在,可认为2套系统的碳元素输入输出值是平衡的.在2套系统碳输入保持相同的条件下,以气体形式逸散的碳元素占到系统总碳元素输出量的60%左右,其中减量系统高出参照系统6%左右.2套系统中,碳元素以污水形式排出系统的比例基本相同,为30%左右;而碳元素以剩余污泥形式排出系统的比例,参照系统要高于减量系统的50%左右,这与前面试验A + OSA系统平均污泥减量率49.98%相互对应.

表2 A + OSA系统和AO系统碳平衡结果

Table 2 Carbon balance in the A + OSA and the AO systems				
系统	介质	输入量/g	输出量/g	转移比例/%
A + OSA	污泥		13.82	3.46
	污水	399.1	120.38	30.16
	气体		256.15	64.18
	合计	399.1	390.36	97.80
AO	污泥		29.42	7.37
	污水	399.1	126.03	31.58
	气体		232.27	58.20
	合计	399.1	387.72	97.15

2.3 A + OSA系统和AO系统各处理单元碳元素变化分析

图4为碳元素在A + OSA系统和AO系统各单元中变化量.30 d内,A + OSA系统缺氧池水相中碳元素减少了98.60 g,占缺氧池水相中总碳输入量的12.2%;AO系统缺氧池水相中碳元素减少了70.28 g,占缺氧池水相总碳输入量的8.2%.显然A + OSA系统缺氧池水相中碳元素的减少比率大于AO参照系统.A + OSA系统好氧池水相中碳元素减少了229.75 g,占好氧池水相中总碳输入量的32.5%;AO系统好氧池水相中碳元素减少了206.02 g,占好氧池水相总碳输入量的26.2%.含碳气体在两系统缺氧池和好氧池逸出比例基本相同,A + OSA系统缺氧池和好氧池(主体反应区)水相中碳元素的减少比率大于AO参照系统,说明A + OSA系统主体反应区碳元素用于生物合成的碳元素量高于AO参照系统,可推测在这一区域内,前者的产泥量要高于后者.

为更直观地比较AO系统和A + OSA系统各反应单元固相污泥的变化,并和剩余污泥产生量作比较.将图4各单元污泥中碳元素变化列于表3中可知,2套系统污泥中碳元素变化量基本上与各自系统排出的剩余污泥中所含碳元素量保持一致.累积试验30 d内,A + OSA系统中贮泥池内污泥中碳元素出现负增长,说明贮泥池内发生了污泥衰减,使得污泥中碳元素含量降低.A + OSA系统主体反应区内,污泥中碳元素的增加量显著高于AO参照系统,由此证明,在本试验条件下,回流污泥混合液经过贮泥池,再返回主体反应区后,碳元素会补偿性从水相转移至泥相,产生过度增长.推测原因可能是由于AO工艺中贮泥池的插入,使得减量系统微生物群落结构或代谢途径发生变化,导致宏观上系统的运

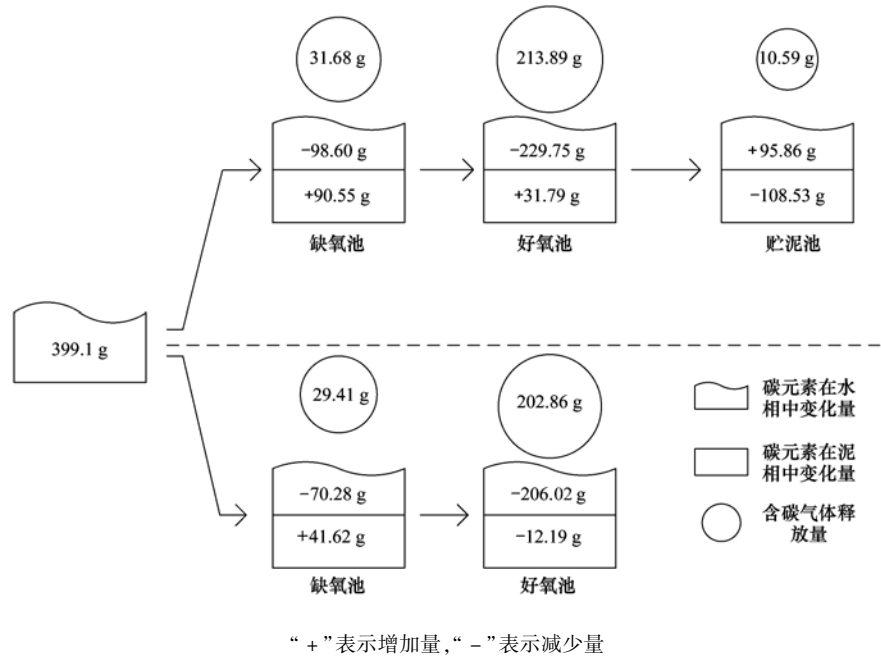


图4 A + OSA 系统和 AO 系统各单元碳元素变化量

Fig. 4 Carbon transformation in units of the A + OSA and the AO systems

行产生差异,关于这一点还需进一步研究证实.而贮泥池中可能存在一些利用碳源水解发酵的细菌,这些细菌能使污泥分解,从而致使贮泥池中污泥碳元素出现负增长.

表3 A + OSA 系统和 AO 系统各单元泥相中碳元素变化量/g

Table 3 Carbon change in solid phase of the A + OSA and the AO systems/g

系统	贮泥池	缺氧池	好氧池	总计	剩余污泥
A + OSA	-108.53	90.55	31.79	13.81	13.82
AO		41.62	-12.19	29.43	29.42

2.4 A + OSA 系统各反应区含碳气体释放分析

由试验数据列表4可知,减量系统各反应区中均可检测到CH₄和CO₂,未检测到CO.就CH₄和CO₂在各个反应区所占的比例而言,CO₂是主要释放气体.可以说是在整个系统稳定运行中,碳元素绝大多数以CO₂形式逸散,约为气体释放总量的99%;CH₄只占很小一部分,仅为1%左右.而在贮泥池中,虽然CO₂释放量仍然较多,但相对主体反应区而言,CH₄含量所占比例有显著上升.CH₄在缺

氧池和好氧池中以气体形式释放所占比例几乎可以忽略,而在贮泥池中可以占到20%左右.贮泥池厌氧条件可能促使其中微生物种类发生变化,其利用碳元素形式也发生改变.可能有一些产甲烷菌的出现使得反应器中CH₄的释放量增大.

2.5 A + OSA 系统贮泥池 DGGE 图谱分析

为进一步证实贮泥池中是否有发酵型水解细菌的存在,测定了A + OSA系统贮泥池污泥的DGGE图谱.经测序可得到条带A与Uncultured *Trichococcus flocculiformis* (AJ306611.1)相似度达100%.这种细菌是一类异养的慢速生长发酵型细菌.条带B与Uncultured bacterium clone (FJ534989.1)相似度达99%;而条带C与Uncultured bacterium clone (EU593791.1)相似度达100%.两者属于β-Proteobacteria,均发现于活性污泥厌氧发酵过程.这2类细菌均属于利用碳源的水解发酵型细菌^[27~30],β-Proteobacte在文献[29]pH为8发酵时间为8d的厌氧发酵系统中,为一种优势细菌,发酵系统碳元素平衡分析结果有甲烷产生.由此可以印证前面的推断,贮

表4 A + OSA 系统各单元气体收集结果/g

Table 4 Biogas collection in the A + OSA system/g

反应单元	气体类别		总计
	CH ₄	CO ₂	
缺氧池	0.02	31.66	31.68
好氧池	0.18	213.71	213.89
贮泥池	2.13	8.45	10.58

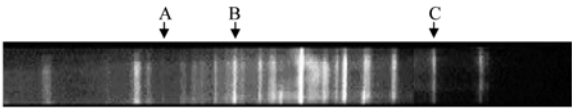


图5 A + OSA 贮泥池 DGGE 图谱

Fig. 5 DGGE profiles of DNA obtained from the sludge holding tank in the A + OSA system

泥池中确实存在水解发酵型细菌,能够分解污泥,使污泥在缺氧的贮泥池中发生衰减。

3 讨论

A + OSA 系统中污泥经过厌氧的缺乏基质的贮泥池时碳元素出现负增长,而回到基质底物充足的主体反应区时,碳元素在缺氧和好氧单元水相中的减少比率大于 AO 参照系统。试验证明 A + OSA 系统贮泥池中存在利用碳源的水解发酵型细菌,能够分解污泥,引起碳元素量负增长,使污泥在缺氧的贮泥池中发生衰减。以 Chen 为代表的研究者^[9,10]认为贮泥池内发生污泥衰减是 OSA 工艺污泥减量的最主要原因,并通过贮泥池内 COD 平衡进一步验证了污泥衰减对 OSA 工艺污泥减量的重要作用。OSA 工艺中贮泥池污泥浓度高,停留时间长,几乎没有外源基质,因污泥衰减增加的 COD 主要用于污泥厌氧释磷,硫酸盐还原,反硝化以及含碳气体的产生。金文标等^[13]认为 OSA 工艺中 66.7% 的污泥减量是由污泥水解、微生物维持代谢、内源代谢增加导致的污泥衰减引起的。但文献^[9,10,13]没有从微生物分子生物学角度对贮泥池内的微生物种类作出分析说明,并没有得出贮泥池中利用碳源的水解发酵型细菌的存在。此外,Chudoba 等^[11,12]认为,OSA 工艺中交替厌氧、好氧环境,使微生物在好氧段产生的 ATP,不用于新细胞的合成,而是在缺乏基质、低 ORP 的厌氧段作为维持细胞生命活动的能量被消耗;当微生物回到基质丰富的好氧池时,重新进行 ATP 的储备,用于维持厌氧段细胞的基本代谢。Chudoba 等得出 OSA 工艺通过能量解耦联理论实现污泥减量的结论,金文标等^[13]也认为 10% 左右污泥减量是由能量解耦联引起的。而 Chen 等^[9]认为 OSA 污泥减量不存在能量解耦联现象。因此,能量解耦联作用在 OSA 污泥减量中是否存在还需进一步研究。A + OSA 系统主体反应区用于生物合成的碳元素量高于 AO 参照系统,存在污泥补偿性增长的现象,这是在以前学者的研究中没有发现过的。本课题组前期研究^[21,22]也推测有这样的途径存在。从本试验研究来看,贮泥池污泥衰减作用大于主体反应区补偿性增长作用,从而实现了 A + OSA 系统的污泥减量。因此,A + OSA 系统的污泥减量效果是贮泥池的污泥衰减与主体反应区内微生物的补偿性增长的共同作用完成的,而非单一机制作用的结果。

4 结论

(1) 贮泥池停留时间 7.14 h 时,A + OSA 系统

达到接近 50% 的污泥减量效果,这一点可以通过整个系统的碳元素平衡得到印证。贮泥池的插入能有效降低污泥产量。

(2) A + OSA 主体反应区用于生物合成的碳元素量高于 AO 参照系统。A + OSA 系统贮泥池中污泥出现负增长,发生污泥衰减,且释放 CH₄ 量较主体反应区有大幅增加。通过 DGGE 图谱可知贮泥池中存在利用碳源的水解发酵型细菌,与污泥衰减有关。

(3) A + OSA 工艺污泥减量是贮泥池污泥衰减和主体反应区补偿性增长共同作用的结果。

参考文献:

- [1] Hendrickx T L G, Temmink H, Elissen H J H, *et al.* Aquatic worms eat sludge: mass balances and processing of worm faeces [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177** (1-3): 633-638.
- [2] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, *et al.* Comparison performances of membrane bioreactor and conventional activated sludge processes on sludge reduction induced by *Oligochaete* [J]. *Environmental Science Technology*, 2003, **37** (14): 3171-3180.
- [3] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, *et al.* Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2003, **37** (18): 4453-4467.
- [4] Elissen H J H, Hendrickx T L G, Temmink H, *et al.* A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms [J]. *Water Research*, 2006, **40** (20): 3713-3718.
- [5] 高大文, 安瑞, 付源, 等. UAFB-缺氧-好氧 MBR 组合工艺处理生活污水效能研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31** (8): 1851-1857.
- [6] Liang P, Huang X, Qian Y, *et al.* Determination and comparison of sludge reduction rates caused by microfaunas' predation [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97** (6): 854-861.
- [7] Liang P, Huang X, Qian Y. Excess sludge reduction in activated sludge process through predation of *Aeolosoma hemprichi* [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2006, **28** (2): 117-122.
- [8] 梁鹏, 黄霞, 钱易, 等. 3 种生物处理方式对污泥减量效果的比较及优化 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (11): 2339-2343.
- [9] Chen G H, An K J, Saby S, *et al.* Possible cause of excess sludge reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process (OSA process) [J]. *Water Research*, 2003, **37** (16): 3855-3866.
- [10] An K J, Chen G H. Chemical oxygen demand and the mechanism of excess sludge reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2008, **134** (6): 469-477.
- [11] Chudoba P, Chudoba J, Capdeville B. The aspect of energetic uncoupling of microbial growth in the activated sludge process: OSA system [J]. *Water Science Technology*, 1992, **26** (9-11):

- 2477-2480.
- [12] Chudoba P, Morel A, Capdeville B. The case of both energetic uncoupling and metabolic selection of microorganisms in the OSA activated sludge system[J]. *Environmental Technology*, 1992, **13**(8): 761-770.
- [13] 金文标, 王建芳, 赵庆良, 等. 好氧-沉淀-厌氧工艺剩余污泥减量性能和机理研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 726-732.
- [14] Ross S M, Izaurralde R C, Janzen H H, *et al.* The nitrogen balance of three long-term agroecosystems on a boreal soil in western Canada[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2008, **127**(3-4): 241-250.
- [15] Hama T, Nakamura K, Kawashima S, *et al.* Effects of cyclic irrigation on water and nitrogen mass balances in a paddy field[J]. *Ecological Engineering*, 2011, **37**(10): 1563-1566.
- [16] Constantin J, Mary B, Laurent F, *et al.* Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, **135**(4): 268-278.
- [17] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, *et al.* The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, **458**(7241): 1009-1013.
- [18] Galik C S, Jackson R B. Risks to forest carbon offset projects in a changing climate[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **257**(11): 2209-2216.
- [19] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1257-1263.
- [20] 秦宇. SBBR 单级自养脱氮工艺及其微生态特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009. 35-37.
- [21] 高旭, 卢艳华, 郭劲松. A + OSA 活性污泥工艺剩余污泥减量特性研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(5): 1475-1480.
- [22] 范莹. A + OSA 工艺污泥减量机理与热力学特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010. 13.
- [23] 钟贤波, 叶芬霞. 好氧-沉淀-缺氧 (OSA) 工艺的剩余污泥减量化研究[J]. *环境工程*, 2006, **24**(6): 26-28.
- [24] 俞小勇, 胡勤海, 叶芬霞. 化学解偶联剂和 OSA 联合工艺对剩余污泥的减量化作用[J]. *城市环境与城市生态*, 2006, **19**(6): 40-42.
- [25] 张斌, 吉芳英, 官超, 等. 污泥减量工艺 OSA 系统的影响因素研究[J]. *重庆建筑大学学报*, 2006, **28**(1): 92-95.
- [26] 王建芳, 赵庆良, 刘志刚, 等. 好氧-沉淀-厌氧工艺剩余污泥减量化的影响因素[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(5): 427-432.
- [27] Scheff G, Salcher O, Lingens F. *Trichococcus flocculiformis* gen. nov. sp. nov. A new gram-positive filamentous bacterium isolated from bulking sludge [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1984, **19**(2): 114-119.
- [28] Liu J R, Tanner R S, Schumann P, *et al.* Emended description of the genus *Trichococcus*, description of *Trichococcus collinsii* sp. nov., and reclassification of *Lactosphaera pasteurii* as *Trichococcus pasteurii* comb. nov. and of *Ruminococcus palustris* as *Trichococcus palustris* comb. nov. in the low-G + C Gram-positive bacteria [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2002, **52**(4): 1113-1126.
- [29] Feng L Y, Chen Y G, Zheng X. Enhancement of waste activated sludge protein conversion and volatile fatty acids accumulation during waste activated sludge anaerobic fermentation by carbohydrate substrate addition: the effect of pH [J]. *Environmental Science Technology*, 2009, **43**(12): 4373-4380.
- [30] Yasir M, Aslam Z, Kim S W, *et al.* Bacterial community composition and chitinase gene diversity of vermicompost with antifungal activity [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(19): 4396-4403.

CONTENTS

Isotopic Composition and Isotope Tracing of Sulfur in Atmospheric Precipitation at the Head Area of the Three Gorges Reservoir, China	WU Qi-xin, HAN Gui-lin (2145)
Characterization and Reconstruction of Aerosol Light Scattering Coefficient at Chengdu During Biomass Burning and Dust Storm Period in Spring	YUE Jian-hua, TAO Jun, LIN Ze-jian, <i>et al.</i> (2151)
Aerosol Optical Thickness of the Atmospheric Aerosol over Taihu Lake and Its Features; Results of In-site Measurements	RAO Jia-wang, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao, <i>et al.</i> (2158)
Seasonal Variations in the Vertical Distribution of Aerosols During Dry Haze Periods in Regions Around Shanghai	XU Ting-ting, QING Yan, GENG Fu-hai, <i>et al.</i> (2165)
Size Distributions and Diurnal Variations in the Concentrations of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Winter in Urban and Suburban Nanjing, China	ZHANG Hong-liang, FAN Shu-xian, GU Kai-hua, <i>et al.</i> (2172)
Seasonal Distribution of Water-Soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol in Qingdao	LIU Zhen, QI Jian-hua, WANG Lin, <i>et al.</i> (2180)
Pollution Characteristics of Microbial Aerosols Generated from a Municipal Sewage Treatment Plant	QIU Xiong-hui, LI Yan-peng, NIU Tie-jun, <i>et al.</i> (2191)
Estimation of the Effect Derived from Wind Erosion of Soil and Dust Emission in Tianjin Suburbs on the Central District Based on WEPS Model	CHEN Li, HAN Ting-ting, LI Tao, <i>et al.</i> (2197)
Variation of Nutrient Concentrations at the Inshore Coastal Area of Northern Jiangsu Province and the Occurrence of Green Tide Caused by <i>Enteromorpha prolifera</i>	GAO Song, SHI Xiao-yong, WANG Ting (2204)
Analysis on Characteristics of Red Tide in Fujian Coastal Waters During the Last 10 Years	LI Xue-ding (2210)
Review on HSPF Model for Simulation of Hydrology and Water Quality Processes	LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Yan (2217)
Parameter Uncertainty Analysis for Urban Rainfall Runoff Modelling	HUANG Jin-liang, LIN Jie, DU Peng-fei (2224)
Estimation of DOC Concentrations Using CDOM Absorption Coefficients; A Case Study in Taihu Lake	JIANG Guang-jia, MA Rong-hua, DUAN Hong-tao (2235)
Weight Parameters of Water Quality Impact and Risk Grade Determination of Water Environmental Sensitive Spots in Jianshan	XIE Rong-rong, PANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (2244)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality in Different Seasons of Panxi River in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (2251)
Responses of Wetland Water Quality to Influence the Strengthness of Urbanization in Nanjing, China	HAO Jing-feng, LIU Hong-yu, HU He-bing, <i>et al.</i> (2259)
Studies on Relationship of Phytoplankton and Water Environmental Factors in Shahu Lake	QIU Xiao-cong, ZHAO Hong-xue, SUN Xiao-xue (2265)
Influence on the Spatial Distribution of Fish in Taizi River Basin by Environmental Factors at Multiple Scales	DING Sen, ZHANG Yuan, QU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2272)
Comparison and Application of Biological Indices of Macroinvertebrates in River Health Assessment	GENG Shi-wei, QU Xiao-dong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2281)
Spatial and Temporal Distribution of Total Mercury (T-Hg) in Different Water Bodies of Nam Co, Tibetan Plateau	WANG Kang, KANG Shi-chang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (2288)
Temporal and Spatial Variations of Major Ions in Nam Co Lake Water, Tibetan Plateau	GUO Jun-ming, KANG Shi-chang, ZHANG Qiang-gong, <i>et al.</i> (2295)
Eutrophication Control in Local Area by Physic-ecological Engineering	LI Qiu-hua, XIA Pin-hua, WU Hong, <i>et al.</i> (2303)
Nitrogenous Fluxes and Its Self-Purification Capacity in Lake Taihu	CHEN Xiao-feng, CHUAI Xiao-ming, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2309)
Response of Phosphorus Components in Sediments from Eutrophic Lake to External Sulfate	YUAN Tan, HUA Yu-mei, ZHU Duan-wei, <i>et al.</i> (2315)
Spatial Distribution Character of Phosphorus Fractions in Surface Sediment from Chaohu Lake	WEN Sheng-fang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong (2322)
Long-range Transport Potential of Typical Organic Pollutants in Nanjing	FANG Li-jiang, WU You-fang, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (2330)
Distribution of Black Carbon in the Surface Sediments of the East China Sea and Their Correlations with Persistent Organic Pollutants	LIN Tian, FANG Yin, CHEN Ying-jun, <i>et al.</i> (2335)
Contamination Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Water from Jialing River in Chongqing	CAI Wen-liang, LUO Gu-yuan, XU Xiao-yi, <i>et al.</i> (2341)
Levels, Distribution and Possible Sources of Polychlorinated Biphenyls in River Sediments from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, LI Yuan-cheng, MIAO Yi, <i>et al.</i> (2347)
Assessment Model for Heavy Metal Pollution in Sediment Based on Trapezoidal Fuzzy Numbers and Case Study	LI Fei, HUANG Jin-hui, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (2352)
Impact of Coastal Exploitation on the Heavy Metal Contents in the Sediment of Bohai Bay	QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (2359)
Spatial Distribution and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Intertidal Surface Sediments of Eastern Chongming	LI Ya-juan, YANG Shi-lun, HOU Li-jun, <i>et al.</i> (2368)
Speciation and Vertical Distribution of Heavy Metals in Sediments of Baiyangdian Lake	LI Bi-cai, HE Lian-sheng, YANG Min, <i>et al.</i> (2376)
AVS Concentrations in Xinan Creek and the Influencing Factors	LIU Xiao-bing, WEN Yan-mao, LI Feng, <i>et al.</i> (2384)
Mechanism of NH_4^+ -N Removal in Drinking Water Biofilter	LIU Bing, FAN Hui, YU Guo-zhong, <i>et al.</i> (2394)
Characterization and Thermodynamic Properties of Cu(II) Imprinted Chitosan Crosslinked Membrane	ZHANG Yu-hong, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti, <i>et al.</i> (2403)
Studies on the Degradation of Paracetamol in Sono-electrochemical Oxidation	DAI Qi-zhou, MA Wen-jiao, SHEN Hong, <i>et al.</i> (2410)
Study on Treatment of Methylene Blue Wastewater by Fly Ash Adsorption-Fenton and Thermal Regeneration	BAI Yu-jie, ZHANG Ai-li, ZHOU Ji-ti (2419)
Electricity Generation Performance of Two-Chamber Microbial Full Cell in the Treatment of Simulated Wastewater	ZHANG Yong-juan, LI Yong-feng, LIU Chun-yan, <i>et al.</i> (2427)
Preparation and Characterization of Zn/Cr-LDHs and Their Removal Performances of Reactive Brilliant Orange X-GN	WANG Xiao-rong, WU Ping-xiao (2432)
Transport Processes of Low-level Radioactive Liquid Effluent of Nuclear Power Station in Closed Water Body	WU Guo-zheng, XU Zong-xue (2438)
Analysis of Carbon Balance and Study on Mechanism in Anoxic-Oxic-Settling-Anaerobic Sludge Reduction Process	ZHAI Xiao-min, GAO Xu, ZHANG Man-man, <i>et al.</i> (2444)
Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System	JIANG Tao, SUN Pei-de, XU Shao-juan (2451)
Biocatalyst of Redox Mediators on the Denitrification by <i>Paracoccus versutus</i> Strain GW1	LI Hai-bo, LIAN Jing, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (2458)
Isolation of a High Hydrogen-producing Mutant TB34 Generated by Transposon Insertion and Analysis of Hydrogen Production	LIU Hong-yan, WANG Guang-ce, SHI Liu-yang, <i>et al.</i> (2464)
Condition Optimization for Degradation of Chlorophenols Using Laccase from <i>Amillariella mellea</i>	QIN Ren-bing, ZHU Xian-feng, WU Ke, <i>et al.</i> (2470)
Characterization of CH_4 , N_2O Emission and Selection of Rice Cultivars in Double Cropping Rice Fields	FU Zhi-qiang, ZHU Hua-wu, CHEN Can, <i>et al.</i> (2475)
Short-term Effects of Exogenous Nitrogen on CH_4 and N_2O Effluxes from <i>Cyperus malaccensis</i> Marsh in the Min River Estuary	MOU Xiao-jie, LIU Xing-tu, TONG Chuan, <i>et al.</i> (2482)
Temporal-spatial Variations of Total Nitrogen in the Degraded Grassland of Three-River Headwaters Region in Qinghai Province	PENG Jing-tao, LI Guo-sheng, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2490)
Temporal Variations of Clay Content in Eroded Sediment Under Different Rainfall Condition	WU Feng-zhi, SHI Zhi-hua, FANG Nu-fang, <i>et al.</i> (2497)
Effects of Soil Properties on the Stabilization Process of Cadmium in Cd Alone and Cd-Pb Contaminated Soils	WU Man, XU Ming-gang, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (2503)
<i>In-situ</i> Remediation of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil by Ecological Controlling Measures; A Field Trial	PAN Cheng, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2510)
Characterization Comparison of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Uptake by Roots of Different Crops	LIANG Xiao, ZHAN Xin-hua, ZHOU Li-xiang (2516)
Characteristics and Mechanism of Sodium Removal by the Synergistic Action of Flue Gas and Waste Solid	YI Yuan-rong, HAN Min-fang (2522)
Decomposition Model of Energy-Related Carbon Emissions in Tertiary Industry for China	LU Yuan-qing, SHI Jun (2528)

《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7月15日 33卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 7 Jul. 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

国内外公开发行人