

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	邱小琮, 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)
闽江河口短叶茳苳湿地 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)	

系列混合碳源在 EBPR 系统颗粒化进程中的影响研究

蒋涛^{1,2}, 孙培德^{1*}, 徐少娟¹

(1. 浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012; 2. 浙江省环境保护科学设计研究院, 杭州 310007)

摘要: 在 SBR 反应器中接种富含聚磷菌的活性污泥, 以一系列不同比例的丙酸与乙酸混合为碳源条件, 进行了 EBPR 系统颗粒化培养, 考察了混合碳源中丙酸所占质量分数(以 COD 质量浓度计)的提高对 EBPR 系统颗粒化进程中颗粒粒径生长、污泥沉降性能、系统除磷效率等宏观特性的影响规律。结果表明, EBPR 系统污泥颗粒生长速率随碳源中丙酸所占质量分数的增加而提高; 碳源中丙酸所占质量分数较高的反应器污泥 SVI 值相对较高。经 90 d 培养, 碳源中丙酸所占质量分数分别为 0%、25%、50%、75% 及 100% 的系统中成熟颗粒体积平均粒径分别为 550.64、599.41、642.38、680.99 和 745.08 μm , 污泥 SVI 值分别稳定在 30、40、50、60 及 75 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右。在相同的磷处理负荷下, 各试验系统除磷性能产生了显著性差异。0%、25%、50%、75% 及 100% 丙酸碳源系统平均净除磷能力(以 MLSS 计)分别为 0.78、2.29、2.96、3.23 及 3.77 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均除磷效率分别为 31.5%、56.5%、77.4%、85.9% 及 97.0%。

关键词: 强化生物除磷(EBPR); 颗粒污泥; 混合碳源; 丙酸; 乙酸

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)07-2451-07

Effect of Mixed Carbon Sources in the Granulation Process of EBPR System

JIANG Tao^{1,2}, SUN Pei-de¹, XU Shao-juan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China; 2. Environmental Science Research and Design Institute of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Activated sludge highly enriched of phosphorus accumulating organisms (PAOs) were seeded, and cultivated with mixed carbon sources of different propionate to acetate ratios, to obtain granule-based enhanced biological phosphorus removal (EBPR) system. The results showed that the granule growth rate was obviously increased as the proportion of propionate in the mixed carbon sources increased. After operating for 90 d, the volume average particle diameters of the mature granules were 550.64 μm , 599.41 μm , 642.38 μm , 680.99 μm and 745.08 μm , and the sludge volume indexes (SVI) of the mature granules were 30 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 40 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 50 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 60 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ and 75 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$, in the treatment of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% propionate in mixed carbon sources, respectively. The phosphorus (P) removal performances of granule-based EBPR system cultivated with different carbon sources showed significant differences under the same P-loading. It was about 0.78 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 2.29 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 2.96 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 3.23 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ and 3.77 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ of net P removed in the treatment of 0%, 25%, 50%, 75% and 100% propionate in mixed carbon sources, respectively, which resulted in the phosphorus removal efficiencies were 31.5%, 56.5%, 77.4%, 85.9% and 97.0%, respectively.

Key words: enhanced biological phosphorus removal (EBPR); granular sludge; mixed carbon sources; propionate; acetate

污泥颗粒化是微生物细胞间自身固定化的一种特殊形式,是在特定的工艺条件下反应器中的微生物与载体或微生物间相互作用形成大而密实的颗粒状污泥聚集体。与传统的絮状污泥相比,颗粒污泥在废水处理中的应用往往显示出很多优势,如稳定牢固的物理结构,优良的沉降性能,高生物量水平,耐高负荷有机废水的能力以及耐毒性等等^[1~4]。

近年来,为提高废水生物除磷工艺的运行效率及稳定性,污泥颗粒化技术在强化生物除磷(enhanced biological phosphorus removal, EBPR)系统中的应用逐渐成为研究热点^[5,6]。Dulekgurgen 等^[7]较早 SBR 中实现了 EBPR 系统的颗粒化培养,连续运行中除磷效率高达 99.6%。由阳等^[8]在 SBR 中接种普通活性污泥培养富含聚磷菌的好氧颗粒污泥,其对 COD 去除率可达 95% 以上,磷去除率

可达 100%。Wu 等^[9]以模拟废水成功培养了聚磷生物颗粒,稳定运行 300 多天,平均除磷效率达到 94.3%。上述研究结果使人们不断认识到了强化生物除磷颗粒污泥的优势。然而,目前人们对于 EBPR 系统污泥颗粒化的形成机制尚未明确。

至今,国内外学者分别在葡萄糖、乙酸钠、乙醇、丙酸以及实际生活废水等各种不同的碳源条件下都进行了除磷颗粒污泥的研究^[7~10]。从这些研究中可以发现,除磷颗粒污泥的大小尺寸、沉降性能等特性与其培养所用的底物碳源条件有一定的相关性。为更好地理解 EBPR 系统污泥颗粒化培养机制,探明

收稿日期: 2011-09-19; 修订日期: 2011-12-12

基金项目: 浙江省重大科技专项(2010C03003)

作者简介: 蒋涛(1986~),男,硕士,主要研究方向为废水处理与优化控制技术, E-mail: taosjunior@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: pdsun@126.com

底物碳源条件变化对除磷颗粒污泥性能的影响规律是十分必要的. 在大多数实际运行的废水生物除磷系统中,复杂的底物碳源往往会经过水解作用而转化为乙酸或丙酸,从而形成以乙酸与丙酸为主的混合碳源条件^[11]. 因此,本试验针对一系列不同比例的乙酸、丙酸混合碳源进行系统性研究,考察系列混合碳源条件下各 EBPR 系统的污泥颗粒化过程,以探明混合碳源中丙酸所占质量分数(以 COD 质量浓度计)的变化对 EBPR 系统颗粒化进程中颗粒粒径生长、污泥沉降性能以及系统除磷效率等宏观特性的影响规律.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行参数

试验装置采用 5 套相同的有机玻璃制 SBR 反应器,有效容积为 10 L. 每套反应器各配有一个进水箱,通过电动泵在每个周期开始的 6 min 内进水 2.5 L. 每周期运行时间为 6 h,包括厌氧段 2.5 h,好氧段 3 h,沉淀 15 min,滗水 15 min. 反应结束后,通过滗水器以及电磁阀出水 2.5 L,以控制水力停留时间为 24 h. 各反应器内分别设有搅拌器和微孔曝气头,以提供良好的厌氧和好氧环境,同时提供一定的水力剪切力以助于颗粒污泥的形成^[12]. 每套反应器各对应一套污水处理智能控制系统,负责控制电动泵、搅拌器、曝气泵、电磁阀的开启与关闭,保证进水、厌氧搅拌、好氧曝气、沉淀和排水的连续运行. 试验过程中控制各系统污泥浓度 (mixed liquor suspended solids, MLSS) 约为 2500 mg·L⁻¹,各反应器内温度为 (20 ± 1) °C, pH 为 7.5 ~ 8.0,好氧阶段溶解氧浓度为 6 ~ 7 mg·L⁻¹.

1.2 接种污泥与模拟废水

试验接种污泥采用经乙酸/丙酸交替碳源长期驯化的富含聚磷菌 (phosphorus accumulating organisms, PAOs) 的活性污泥^[13],具有良好的除磷性能,长期除磷效率稳定在 90% 以上. 接种污泥经荧光原位杂交技术^[14]检测,其中 PAOs 占全菌比例达 (75 ± 5) %.

试验模拟废水采用人工合成,分为合成废水 I 与 II 两种. 其中,合成废水 I 含 (每 L): 0.52 mL 丙酸 (COD = 800 mg·L⁻¹), 0.229 g NH₄Cl, 0.088 g KH₂PO₄, 0.147 g K₂HPO₄ · 3H₂O, 0.185 g MgSO₄ · 7H₂O, 0.022 g CaCl₂, 1.5 mg 蛋白胨, 1.5 mg 酵母粉, 1.2 mg ATU, 0.6 mL 微量元素液^[15]. 合成废水 II 含 (每 L) 1.043 g 无水乙酸钠 (COD = 800

mg·L⁻¹), 不含丙酸,其它成分与合成废水 I 相同. 各反应器进水由不同体积比例的合成废水 I 与合成废水 II 混合而成. 混合后,5 套 SBR 进水中碳源组成及丙酸所占质量分数(以 COD 质量浓度计)如表 1 所示. 进水后各反应器初始状态 COD 质量浓度均为 200 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 质量浓度为 15 mg·L⁻¹, PO₄³⁻-P 质量浓度为 10 mg·L⁻¹, 即各反应器 COD/N/P 均为 20/1.5/1.

表 1 各 SBR 碳源组成及丙酸所占质量分数(以 COD 质量浓度计)
Table 1 Composition of the main carbon sources and their concentrations in different SBR systems

SBR	丙酸 /mg·L ⁻¹	乙酸 /mg·L ⁻¹	碳源中丙酸所占 质量分数/%
1 号	0	800	0
2 号	200	600	25
3 号	400	400	50
4 号	600	200	75
5 号	800	0	100

1.3 分析测定方法

试验运行过程中,定期(每隔 5 ~ 7 d)采集各反应器内活性污泥样品,检测分析系统污泥的颗粒化程度. 为使样品更具有代表性,样品采集统一选择循环运行周期中好氧段曝气结束前的时刻. 此时各试验处理系统内单个循环周期的反应完成,且反应器内处于泥水完全混匀状态. 污泥颗粒粒径大小及分布状况采用英国马尔文仪器有限公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定. 所有样品测定结果取 3 次平行测定结果的平均值. MLSS、PO₄³⁻-P、COD 等指标的测定方法参考文献[16]. DO 和 pH 分别采用上海雷磁 JPBj-608 便携式 DO 测定仪和 PHBJ-260 便携式 pH 测定仪监测.

2 结果与讨论

2.1 混合碳源条件对颗粒粒径生长的影响

图 1 为各试验处理系统中颗粒污泥体积平均粒径随时间变化的情况. 从中可见,试验开始后,各处理系统的污泥都在反应器中较好地适应生长,并顺利进入颗粒化的转化过程. 随着试验的进行,各系统中污泥颗粒化现象日益明显. 试验运行 90 d,各反应器内活性污泥都实现了颗粒化转化,并维持稳定. 试验运行前期,反应器内污泥颗粒粒径增长速率相对较快,颗粒生长快而明显; 试验运行 2 个月后,颗粒粒径增长开始缓慢; 至试验运行末期,各反应器内皆形成了成熟的颗粒污泥,颗粒粒径停止增长进入平衡稳定状态.

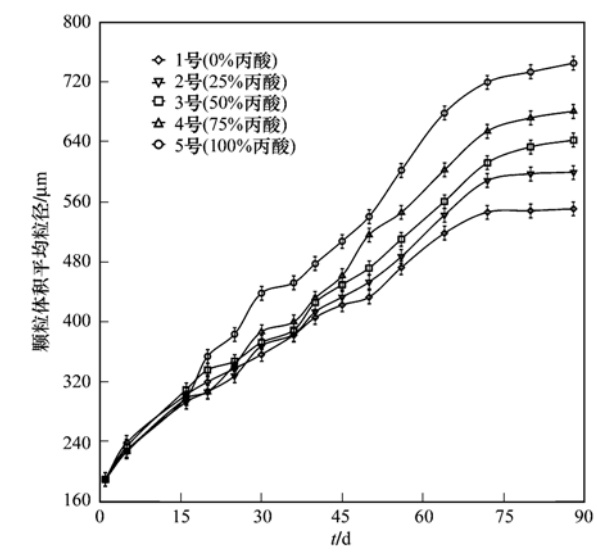


图1 不同 SBR 反应器内的颗粒粒径生长规律

Fig. 1 Size evolution of granules from different SBR systems

从图 1 中不难发现,不同混合碳源条件培养的 EBPR 系统颗粒粒径生长有明显的差异. 系统颗粒污泥的粒径增长速率与混合碳源中丙酸所占质量分数(以 COD 质量浓度计)之间具有一定的相关性. 随着丙酸在混合碳源中所占质量分数的增加(从 0% ~ 100%),系统颗粒粒径生长速率明显提高,颗粒体积平均粒径明显增大. 这种影响一直持续在整个污泥颗粒化进程中,至试验运行末期各系统反应器内形成的成熟颗粒体积平均粒径大小呈现出了一定的梯度关系,见图 2.

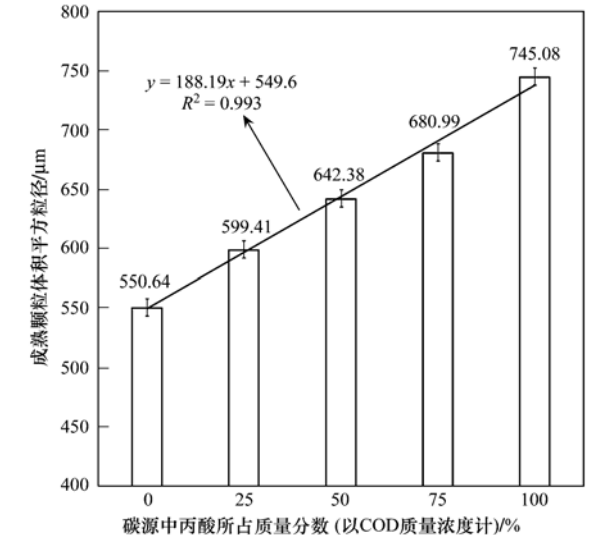


图2 不同混合碳源系统成熟颗粒体积平均粒径

Fig. 2 Volume average particle diameter of mature granular of different mixed carbon sources systems

如图 2 所示,碳源中丙酸所占质量分数为 0%、25%、50%、75% 和 100% 的反应器内形成的成熟

颗粒体积平均粒径分别为 550.64、599.41、642.38、680.99 和 745.08 μm . 系统碳源中丙酸所占质量分数与成熟颗粒粒径之间呈线性相关,且相关系数较高($R^2 = 0.993$).

表 2 中显示了不同碳源条件下培养的系统成熟颗粒粒径大小的分布范围. 从整体上看,本试验研究所培养的除磷颗粒污泥粒径分布范围为 0.1 ~ 1.5 mm,明显小于传统好氧颗粒污泥^[17~19]. 所有系统颗粒粒径分布基本符合正态分布(见图 3),与以往的研究相符^[17,20].

表 2 各 SBR 反应器内成熟颗粒粒径分布范围¹⁾

Table 2 Size arrange of mature granular from different SBR systems			
SBR	$D(0.1)/\mu\text{m}$	$D(0.5)/\mu\text{m}$	$D(0.9)/\mu\text{m}$
1 号	101.911	516.376	1 026.500
2 号	124.414	555.229	1 118.015
3 号	133.564	596.906	1 182.222
4 号	142.462	634.918	1 250.667
5 号	182.976	700.513	1 331.248

1) $D(0.1)$ 、 $D(0.5)$ 及 $D(0.9)$ 分别代表该粒径大小占颗粒总体的 10%、50% 及 90%

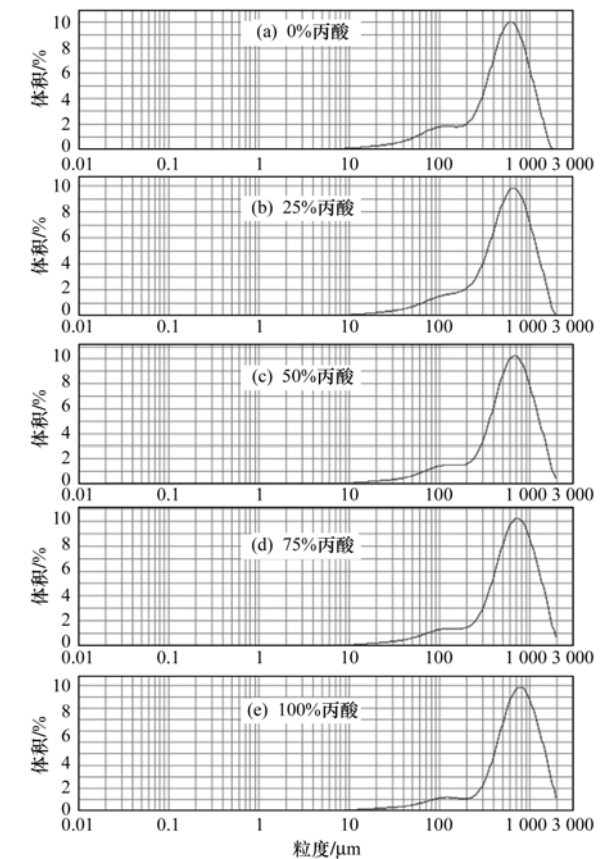


图3 不同混合碳源系统成熟颗粒粒径正态分布

Fig. 3 Normal distribution of mature granular size of different mixed carbon sources systems

2.2 混合碳源条件对污泥沉降性能的影响

图 4 为试验运行过程中各反应器内污泥容积指

数 (sludge volume index, SVI) 随时间变化的情况. 从中可以看出, 试验运行初期, 各反应器内污泥 SVI 指数都为 $50 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. 说明本试验接种的除磷污泥具有较好的沉降性能, 为本试验各 EBPR 系统的污泥颗粒化培养提供了良好的基础.

试验运行初始的 2 周内, 各反应器污泥 SVI 指数都呈现出了一定的波动性下降趋势, 结合图 1 中的颗粒粒径生长情况, 可见系统污泥进入颗粒化转化过程, 已使污泥沉降性能进一步提高. 但总体上各处理系统之间 SVI 差异性不甚明显, 而此时各反应器内的颗粒粒径大小也基本一致. 经过 2 周的适应生长后, 各反应器中生长的颗粒粒径大小开始出现明显差别 (图 1). 相应地, 各反应器中污泥 SVI 也开始产生差异. 试验运行 20 d 后, 1 号 SBR 反应器污泥 SVI 出现下降趋势, 同时 5 号 SBR 反应器污泥 SVI 开始逐渐上升. 1 号 SBR 反应器的碳源条件为 0% 丙酸, 而 5 号 SBR 为 100% 丙酸, 可见碳源条件中的丙酸所占比例大小对系统污泥的生长产生了明显影响.

随着试验的进一步运行 (至 54 d 后), 2 号、3 号与 4 号 SBR 反应器的污泥 SVI 值也开始逐渐区分, 并表现为混合碳源中丙酸所占质量分数较高的反应器污泥 SVI 值相对较高. 至试验运行第 3 个月, 各系统颗粒污泥生长进入稳定成熟阶段, 而各系统污泥 SVI 值也分别维持相应稳定. 试验末期, 混合碳源中丙酸所占质量分数为 0%、25%、50%、75% 及 100% 的系统污泥 SVI 指数分别稳定在 30、40、50、60 及 $75 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右.

本试验接种污泥是在等量的丙酸碳源与乙酸碳

源交替供给的条件下长期驯化而得^[13], 即从长效性角度考虑, 试验接种污泥驯化期所供给的碳源条件为等量丙酸与乙酸. 比较 EBPR 系统颗粒化培养试验前后的污泥沉降性能不难发现, 当混合碳源条件同样为等量丙酸与乙酸时 (即 50% 丙酸碳源系统), 系统污泥沉降效果与接种污泥的沉降效果一致. 而当混合碳源中丙酸比例大于乙酸 (即超过 50%) 时, 系统污泥 SVI 值相对较大; 当混合碳源中丙酸比例小于乙酸 (即低于 50%) 时, 系统污泥 SVI 值相对较小.

显然, EBPR 系统颗粒化培养中, 污泥沉降性能与系统提供的碳源条件密切相关, 污泥 SVI 值与混合碳源中丙酸所占比例 (质量分数) 呈正相关性. 结合各系统成熟颗粒的粒径大小差异 (图 2), 推测由于碳源中丙酸所占比例较高的系统颗粒污泥粒径较大, 使得在污泥沉降过程中大颗粒之间构成的间隙空间较大, 从而表现上单位质量污泥沉降后所占的体积也相应较大.

2.3 混合碳源条件对系统除磷特性的影响

试验运行过程中各处理系统的除磷 (P) 情况如图 5 所示. 可以看出, 在相同的 P 处理负荷 ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右) 下, 不同碳源条件培养的颗粒化 EBPR 系统除磷效率之间产生了显著性的差异. 纵观整个试验运行过程发现, 碳源中丙酸所占质量分数较低 ($\leq 50\%$) 的系统除磷特性都表现出了不同程度的恶化; 而碳源中丙酸所占质量分数较高 ($> 50\%$) 的系统则维持了相对较高的除磷效率. 特别是碳源条件为 100% 丙酸的反应器在整个试验运行过程中都表现出了十分优异的除磷效果, 出水 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度一直保持在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

在传统 EBPR 系统研究中, 虽然许多以乙酸为碳源的系统通常具有良好的除磷效率, 不过也有不少乙酸碳源系统除磷效率恶化的报道^[21~23]. 而目前大量研究表明, 以丙酸为碳源条件可维持更好的除磷效率, 相比乙酸更有利于 EBPR 工艺的成功运行^[24~26]. 而在本试验 EBPR 系统颗粒化培养过程中也发现了上述现象, 即碳源中丙酸所占质量分数越高的系统出水越稳定. 这可能是因为以丙酸为碳源的条件不利于一类典型聚糖菌 *Candidatus Competibacter phosphatis* 的生长^[27,28]. 于是在相同的总碳源负荷下, 丙酸组成较高的碳源条件可在一定程度上抑制 *Candidatus Competibacter phosphatis* 生长, 从而相应地降低了聚糖菌对系统除磷过程的干扰. 不仅如此, 从本试验的数据结果来看, 更是发现

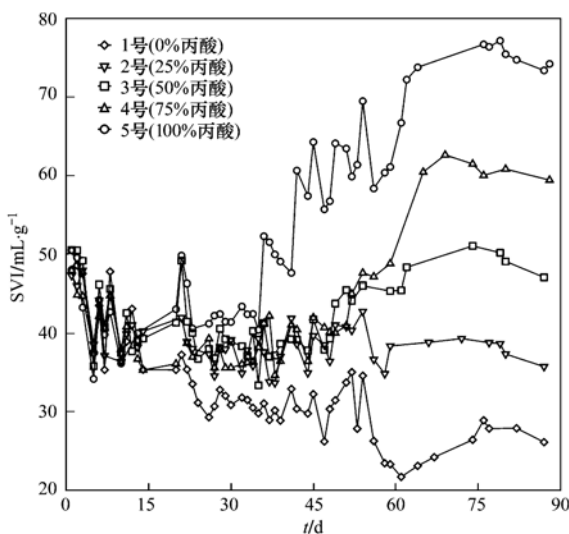


图 4 不同 SBR 反应器污泥 SVI 变化

Fig. 4 SVI profiles of sludge from different SBR systems

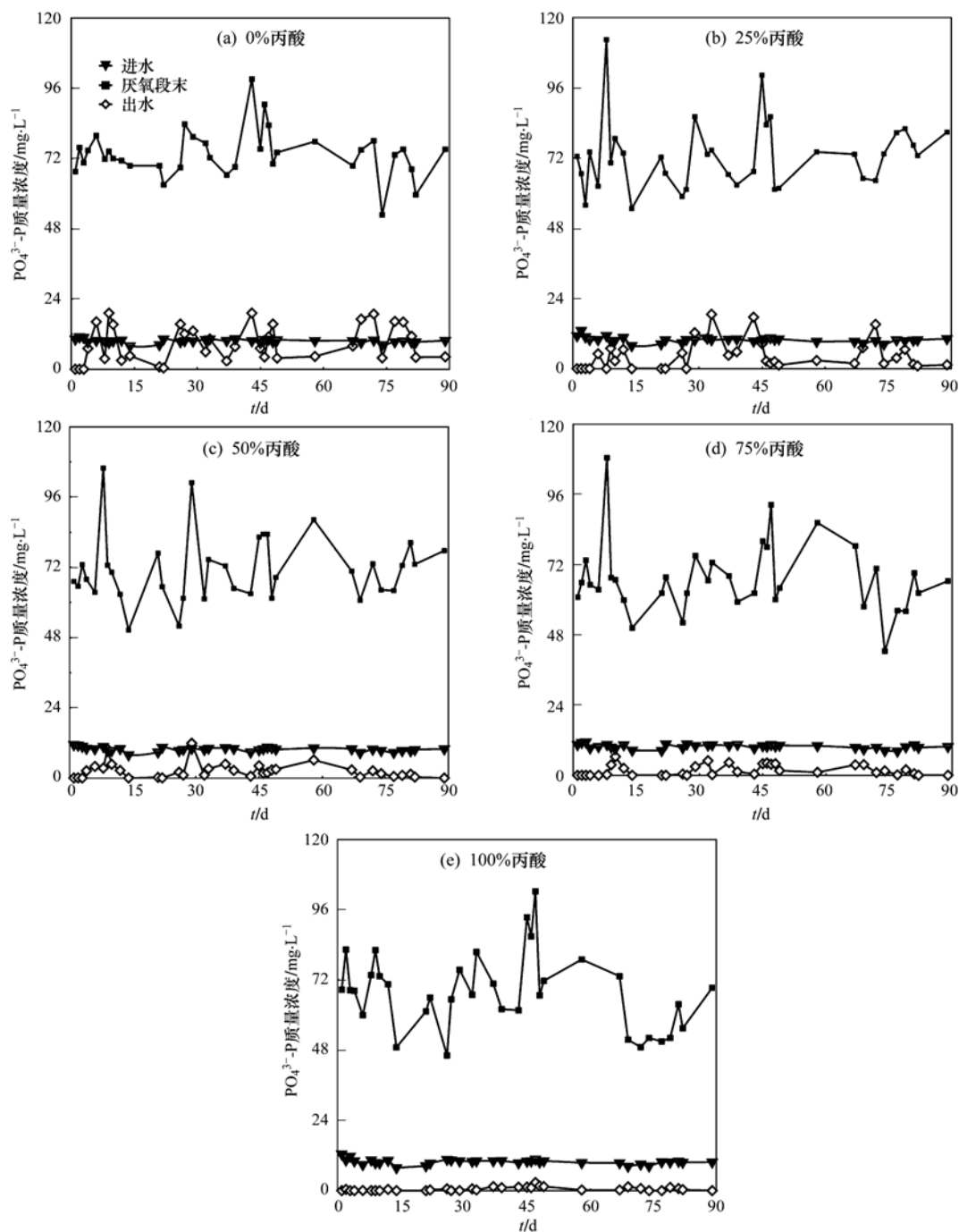
图5 不同混合碳源系统 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度变化

Fig. 5 Profiles of phosphorus concentrations at different mixed carbon sources conditions

碳源中丙酸所占质量分数的变化对系统除磷性能的影响具有非常明显的规律性. 图6显示了系统碳源中丙酸所占质量分数与系统平均净除磷能力及平均除磷效率之间的关系. 从中可以看出, 随着碳源中丙酸所占质量分数的不断提高, 单位质量污泥的平均净除磷能力不断提高, 从而使系统平均除磷效率不断提高. 当碳源中丙酸所占质量分数分别为0%、25%、50%、75%及100%时, 系统平均净除磷能力

(以 MLSS 计) 分别为 0.78、2.29、2.96、3.23 及 3.77 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 系统平均除磷效率分别为 31.5%、56.5%、77.4%、85.9% 及 97.0%.

上述试验结果表明, 在 EBPR 系统的颗粒化培养过程中, 碳源组成比例 (如丙酸所占质量分数) 的变化对于系统污泥的颗粒化进程、污泥沉降性能、宏观除磷表现等方面都起着非常明显的影响作用. 并且, 这些影响作用都具有非常明显的规律可循. 据

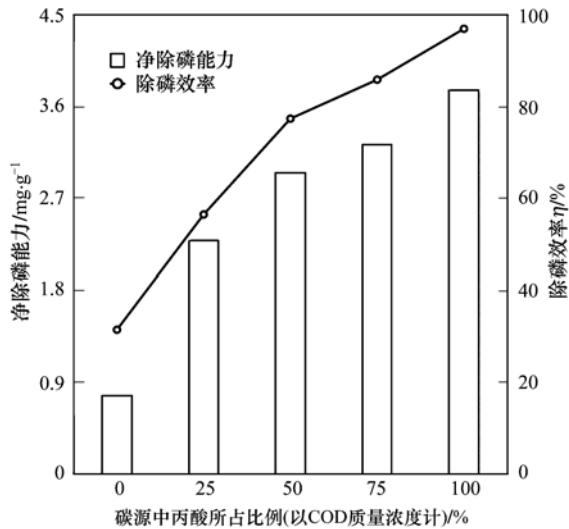


图6 碳源中丙酸比例与系统除磷特性关系

Fig. 6 Relationship between the mixed carbon sources conditions and phosphorus removal performances

此,通过调整培养系统中的碳源组成比例(如适当提高丙酸所占质量分数),可在一定程度上控制EBPR系统颗粒化程度及系统除磷性能.因此,在颗粒化EBPR系统的相关工艺设计中,碳源组成比例(如丙酸所占质量分数)应该作为一个重要参数得到更多关注与考虑.

3 结论

(1)混合碳源中丙酸所占质量分数(以COD质量浓度计)变化对EBPR系统污泥颗粒化生长速率具有非常明显的影响.颗粒体积平均粒径随着碳源中丙酸所占质量分数的增加(从0%~100%)而明显增大,两者之间具有较高的正相关性($R^2 = 0.993$).经过90 d培养,0%、25%、50%、75%及100%丙酸碳源的系统中成熟颗粒体积平均粒径分别为550.64、599.41、642.38、680.99和745.08 μm .

(2)不同混合碳源条件下EBPR系统污泥颗粒化程度不同,污泥沉降性能相应产生了明显差异,即碳源中丙酸所占质量分数较高的反应器污泥SVI值相对较高.颗粒生长成熟稳定后,0%、25%、50%、75%及100%丙酸碳源的系统污泥SVI值分别稳定在30、40、50、60及75 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右.

(3)在相同的P处理负荷下,混合碳源中丙酸所占质量分数变化对颗粒化EBPR系统除磷性能同样产生了明显的规律性影响.碳源中丙酸所占质量分数较低($\leq 50\%$)的系统除磷特性表现出了不同

程度的恶化;而碳源中丙酸所占质量分数较高($>50\%$)的系统则维持了相对较高的除磷效率.0%、25%、50%、75%及100%丙酸碳源的系统,平均净除磷能力(以MLSS计)分别为0.78、2.29、2.96、3.23及3.77 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;平均除磷效率分别为31.5%、56.5%、77.4%、85.9%及97.0%.

(4)碳源组成比例(如丙酸所占质量分数)变化对EBPR系统颗粒化进程、除磷效率等方面都具有非常明显的规律性影响作用.因此,在颗粒化EBPR系统的相关工艺设计中,碳源组成比例(如丙酸所占质量分数)应该作为一个重要参数得到更多关注与考虑.

参考文献:

- [1] Wang S G, Liu X W, Gong W X, *et al.* Aerobic granulation with brewery wastewater in a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(11): 2142-2147.
- [2] Jiang H L, Tay J H, Maszenan A M, *et al.* Enhanced phenol biodegradation and aerobic granulation by two coaggregating bacterial strains [J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, **40**(19): 6137-6142.
- [3] Moy B Y P, Tay J H, Toh S K, *et al.* High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules [J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2002, **34**(6): 407-412.
- [4] Liu Q S, Tay J H, Liu Y. Substrate concentration-independent aerobic granulation in sequential aerobic sludge blanket reactor [J]. *Environmental Technology*, 2003, **24**(10): 1235-1242.
- [5] Zhang B, Ji M, Qiu Z G, *et al.* Microbial population dynamics during sludge granulation in an anaerobic-aerobic biological phosphorus removal system [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(3): 2474-2480.
- [6] Ahn J, McIlroy S, Schroeder S, *et al.* Biomass granulation in an aerobic; anaerobic-enhanced biological phosphorus removal process in a sequencing batch reactor with varying pH [J]. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 2009, **36**(7): 885-893.
- [7] Dulekgurgen E, Ovez S, Artan N, *et al.* Enhanced biological phosphate removal by granular sludge in a sequencing batch reactor [J]. *Biotechnology Letters*, 2003, **25**(9): 687-693.
- [8] 由阳,彭轶,袁志国,等.富含聚磷菌的好氧颗粒污泥的培养与特性[J]. *环境科学*, 2008, **29**(8): 2242-2248.
- [9] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal by granular sludge: from macro to micro scale [J]. *Water Research*, 2010, **44**(3): 807-814.
- [10] Lin Y M, Liu Y, Tay J H. Development and characteristics of phosphorus-accumulating microbial granules in sequencing batch reactors [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, **62**(4): 430-435.
- [11] Oehmen A, Lemos P C, Carvalho G, *et al.* Advances in enhanced biological phosphorus removal: From micro to macro scale [J]. *Water Research*, 2007, **41**(11): 2271-2300.

- [12] Liu Y, Tay J H. State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22** (7): 533-563.
- [13] 徐少娟, 蒋涛, 殷峻, 等. 进水氨氮浓度对强化生物除磷 (EBPR) 系统除磷特性及微生物群落结构的影响 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 745-751.
- [14] 亢涵, 王秀衡, 李楠, 等. 生物除磷系统启动期聚磷菌的 FISH 原位分析与聚磷特性 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 80-84.
- [15] Smolders G J F, Van der Meij J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Model of the anaerobic metabolism of the biological phosphorus removal process: stoichiometry and pH influence [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 1994, **43**(6): 461-470.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 201-284.
- [17] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater [J]. *Environmental Science Technology*, 2005, **39** (8): 2818-2827.
- [18] Wang Q, Du G C, Chen J. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force [J]. *Process Biochemistry*, 2004, **39**(5): 557-563.
- [19] Wang Z W, Liu Y, Tay J H. The role of SBR mixed liquor volume exchange ratio in aerobic granulation [J]. *Chemosphere*, 2006, **62**(5): 767-771.
- [20] Wilén B M, Balmér P. The effect of dissolved oxygen concentration on the structure, size and size distribution of activated sludge flocs [J]. *Water Research*, 1999, **33**(2): 391-400.
- [21] Crocetti G R, Banfield J F, Keller J, *et al.* Glycogen-accumulating organisms in laboratory-scale and full-scale wastewater treatment processes [J]. *Microbiology*, 2002, **148** (11): 3353-3364.
- [22] Nielsen A T, Liu W T, Filipe C, *et al.* Identification of a novel group of bacteria in sludge from a deteriorated biological phosphorus removal reactor [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(3): 1251-1258.
- [23] Wong M T, Tan F M, Ng W J, *et al.* Identification and occurrence of tetrad-forming Alphaproteobacteria in anaerobic - aerobic activated sludge processes [J]. *Microbiology*, 2004, **150** (11): 3741-3748.
- [24] Thomas M, Wright P, Blackall L, *et al.* Optimisation of Noosa BNR plant to improve performance and reduce operating costs [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(12): 141-148.
- [25] Pijuan M, Saunders A M, Guisasola A, *et al.* Enhanced biological phosphorus removal in a sequencing batch reactor using propionate as the sole carbon source [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **85**(1): 56-67.
- [26] Chen Y G, Randall A A, McCue T. The efficiency of enhanced biological phosphorus removal from real wastewater affected by different ratios of acetic to propionic acid [J]. *Water Research*, 2004, **38**(1): 27-36.
- [27] Chen Y G, Liu Y, Zhou Q, *et al.* Enhanced phosphorus biological removal from wastewater-effect of microorganism acclimatization with different ratios of short-chain fatty acids mixture [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2005, **27**(1): 24-32.
- [28] Oehmen A, Saunders A M, Vives M T, *et al.* Competition between polyphosphate and glycogen accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems with acetate and propionate as carbon sources [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **123**(1): 22-32.

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