

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第6期

Vol.34 No.6

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2008 ~ 2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O ₃ 生成潜势	曹函玉, 潘月鹏, 王辉, 谭吉华, 王跃思 (2065)
利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态	牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 周敏, 王红丽, 周振, 乔利平, 黄成, 李梅, 李莉, 王倩, 黄海英, 邹兰军 (2071)
沈阳市降水化学成分及来源分析	张林静, 张秀英, 江洪, 张清新 (2081)
秦皇岛大气污染物浓度变化特征	刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 吉东生, 王跃思 (2089)
笼养鸡生长过程 NH ₃ 、N ₂ O、CH ₄ 和 CO ₂ 的排放	周忠凯, 朱志平, 董红敏, 陈永杏, 尚斌 (2098)
碳化硅协同分子筛负载型催化微波辅助催化氧化甲苯性能	王晓晖, 卜龙利, 刘海楠, 张浩, 孙剑宇, 杨力, 蔡力栋 (2107)
生物滴滤塔净化多组分废气的研究	张定丰, 房俊逸, 叶杰旭, 邱松凯, 钱东升, 戴启洲, 陈东之 (2116)
在氧化和还原氛围下脉冲电晕法降解二硫化碳废气	金圣, 黄立维, 李国平 (2121)
模拟大气 CO ₂ 水平升高对春季太湖浮游植物生理特性的影响	赵旭辉, 汤龙升, 史小丽, 杨州, 孔繁翔 (2126)
一种确定湖泊水质基准参照状态浓度的新方法	华祖林, 汪靛 (2134)
HSPF 径流模拟参数敏感性分析与模型适用性研究	李燕, 李兆富, 席庆 (2139)
基于非点源污染的水质监测方案研究	吴喜军, 李怀恩, 李家科, 李强坤, 董雯 (2146)
不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究	陈玲, 刘德富, 宋林旭, 崔玉洁, 张革 (2151)
春季东海赤潮发生前后营养盐及溶解氧的平面分布特征	李鸿妹, 石晓勇, 陈鹏, 张传松 (2159)
三峡库区大宁河枯水期藻细胞的时空分布	张永生, 郑丙辉, 王坤, 姜霞, 郑浩 (2166)
湖泊沉积物溶解性有机氮组分的藻类可利用性	冯伟莹, 张生, 焦立新, 王圣瑞, 李畅游, 崔凤丽, 付绪金, 甄志磊 (2176)
刚毛藻分解对上覆水磷含量及赋存形态的影响	侯金枝, 魏权, 高丽, 孙卫明 (2184)
反复扰动下磷在沉积物和悬浮物以及上覆水间的交换	李大鹏, 王晶, 黄勇 (2191)
三峡库区主要支流表层沉积物多溴联苯醚的分布特征	李昆, 赵高峰, 周怀东, 刘晓茹, 余丽琴, 文武, 张盼伟 (2198)
UV 和 H ₂ O ₂ 联合消毒灭活饮用水中大肠杆菌研究	张一清, 周玲玲, 张永吉 (2205)
臭氧降解水中邻苯二甲酸二甲酯的动力学及影响因素	于丽, 张培龙, 侯甲才, 庞立飞, 李越, 贾寿华 (2210)
硝酸根对水体中甲基汞光化学降解的影响	毛雯, 孙荣国, 王定勇, 马明, 张成 (2218)
快雌醇氯化反应的动力学和机制研究	王斌楠, 刘国强, 孔德洋, 陆隽鹤 (2225)
金属离子对 δ-MnO ₂ 去除对叔辛基酚抑制作用的研究	李非里, 牟华倩 (2232)
核-壳表面磁性印迹聚合物的制备及其对水中双酚 A 的特异性去除	刘建明, 李红, 熊振湖 (2240)
有机蒙脱石负载纳米铁去除溶液中四溴双酚 A 的研究	闫梦玥, 庞志华, 李小明, 迟建宇, 罗隽 (2249)
纳滤预处理测定景观水体中溶解性有机氮质量浓度及其分布特征	于红蕾, 霍守亮, 杨周生, 席北斗, 咎逢宇, 张靖天 (2256)
改性水凝胶的制备及其对 Pb ²⁺ 、Cd ²⁺ 吸附性能研究	吴宁梅, 李正魁 (2263)
直接大红 4BE 的磷钨酸均相光催化还原脱色	魏红, 李克斌, 李娟, 陈经涛, 张涛 (2271)
基于微气泡曝气的生物膜反应器处理废水研究	张磊, 刘平, 马锦, 张静, 张明, 吴根 (2277)
Fenton 法处理竹制品废水生化出水出水的研究	郭庆稳, 张敏, 王炜, 杨治中, 吴东雷 (2283)
二价铁离子对 UASB 反应器厌氧发酵产氢效能的影响	李永峰, 王艺璇, 程国玲, 刘春妍 (2290)
进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究	陈志强, 邓毅, 黄龙, 温沁雪, 郭子瑞 (2295)
接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究	刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 丁敏 (2302)
聚磷污泥去除高浓度铅的影响因素研究	杨敏, 卢龙, 冯涌, 方超, 李雄清 (2309)
体积溶氧传递系数在好氧颗粒污泥系统中的变化特性初步分析	李志华, 范长青, 王晓昌 (2314)
我国淡水水体中双酚 A (BPA) 的生态风险评价	汪浩, 冯承莲, 郭广慧, 张瑞卿, 刘跃丹, 吴丰昌 (2319)
麦穗鱼物种敏感性评价	王晓南, 刘征涛, 闫振广, 张聪, 何丽, 孟双双 (2329)
不同评估方法得出的五氯酚的 PNEC 值的比较研究	雷炳莉, 文育, 王艺陪, 康佳, 刘倩 (2335)
桂林市交警头发 Hg、Pb 含量及分布研究	钱建平, 张力, 李成超, 黄栋 (2344)
直流电场处理后降线藻趋光性对 Cu ²⁺ 和 Hg ²⁺ 的响应	王飞祥, 袁玲, 黄建国 (2350)
UV-B 辐射对青冈凋落叶化学组成和分解的影响	宋新章, 卜涛, 张水奎, 江洪, 王志坤, 赵明水, 刘永军 (2355)
7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘 (2361)
溶解氧对碳氮硫共脱除工艺中微生物群落影响解析	于皓, 陈川, 张莉, 王爱杰 (2368)
不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp TM 方法	陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 袁红朝, 李苗苗, 朱捍华, 葛体达, 童成立, 吴金水 (2375)
典型滨海湿地干湿交替过程氮素动态的模拟研究	韩建刚, 曹雪 (2383)
三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究	刘意章, 肖唐付, 宁增平, 贾彦龙, 黎华军, 杨菲, 姜涛, 孙旻 (2390)
北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征	陈志凡, 赵焯, 郭廷忠, 王永峰, 田青 (2399)
季节变化对贵阳市不同功能区地表灰土重金属的影响	李晓燕 (2407)
东营市孤岛地区土壤中类二噁英类 PCBs 的污染特征	王登阁, 崔兆杰, 傅晓文, 殷永泉, 许宏宇 (2416)
模拟氮沉降对森林土壤有机物淋溶的影响	段雷, 马萧萧, 余德祥, 谭炳全 (2422)
甲基 β 环糊精对污染场地土壤中多环芳烃的异位增效洗脱修复研究	孙明明, 滕应, 骆永明, 李振高, 贾仲君, 张满云 (2428)
胶质芽孢杆菌对印度芥菜根际土壤镉含量及土壤酶活性影响	杨榕, 李博文, 刘微 (2436)
长期施用粪肥蔬菜基地蔬菜中典型抗生素的污染特征	吴小莲, 向垒, 莫测辉, 姜元能, 严青云, 李彦文, 黄献培, 苏青云, 王纪阳 (2442)
有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究	张旭, 席北斗, 赵越, 魏自民, 李洋, 赵昕宇 (2448)
北京市生活垃圾转运站耗能和排污特征及其影响因素分析	王昭, 李振山, 冯亚斌, 焦安英, 薛安 (2456)
氨对垃圾焚烧飞灰浸出特性的影响及地球化学模拟	官贞珍, 陈德珍, Thomas Astrup (2464)
焚烧飞灰预处理工艺及其无机氯盐的行为研究	朱芬芬, 高冈昌辉, 大下和傲, 姜惠民, 北岛義典 (2473)
富含中孔与酸性基团的生物炭的制备与吸附性能	李坤彬, 李辉, 郑正, 张雨轩 (2479)
生物炭技术缓解我国温室效应潜力初步评估	姜志翔, 郑浩, 李锋民, 王震宇 (2486)
基于物质流分析的钾素流动与循环研究	白桦, 曾思育, 董欣, 陈吉宁 (2493)
《环境科学》征订启事 (2115) 《环境科学》征稿简则 (2224) 信息 (2217, 2289, 2349, 2398) 专辑征稿通知 (2478)	

进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究

陈志强¹, 邓毅^{1,2}, 黄龙¹, 温沁雪¹, 郭子瑞¹

(1. 哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 哈尔滨 150090; 2. 浙江大学建筑设计研究院, 杭州 310027)

摘要: 混合菌群合成生物可降解塑料(PHA)成为目前研究的热点,三段式 PHA 合成工艺(水解产酸、产 PHA 菌富集、PHA 合成)被广泛应用. 在产 PHA 菌的富集非常关键,只有稳定产生 PHA 菌才能保障 PHA 合成的产量. 针对产 PHA 菌富集系统容易出现污泥膨胀的问题,本研究考察了进水底物浓度对产 PHA 菌富集效率及运行稳定性的影响. 在 560 mg·L⁻¹、1 120 mg·L⁻¹、1 680 mg·L⁻¹ 这 3 组不同进水底物浓度的对比实验中,证实了 COD 1 120 mg·L⁻¹ 条件下富集反应器能够在较短污泥龄下稳定富集具有较高污泥浓度的高效产 PHA 菌,且不会发生污泥膨胀. 在 94 d 的富集期后其批次实验最大 PHA 含量、PHA 转化率(COD/COD)及 PHA 比合成速率能分别达到 50%、0.714 5 及 0.191 2 mg·(mg·h)⁻¹. 研究还同时证实细胞内糖原水平高低与其 PHA 合成能力密切相关,可采用其作为富集效果的重要检测指标之一.

关键词: PHA; 混合菌群; 污泥膨胀; 底物浓度; 糖原

中图分类号: X 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)06-2295-07

Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate

CHEN Zhi-qiang¹, DENG Yi^{1,2}, HUANG Long¹, WEN Qin-xue¹, GUO Zi-rui¹

(1. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology (SKLUWRE, HIT), Harbin 150090, China; 2. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: PHA was a kind of biodegradable polymer produced by mixed microorganisms. In recent years, 3-stage PHA synthesis process (including substrate hydrolysis, culture selection, and PHA synthesis) was commonly used for PHA production. In this kind of process, culture selection is the key stage, which directly affects the PHA production efficiency. In order to deal with sludge bulking occurred in the culture selection system, this paper analyzes the influence of substrate concentration on culture selection efficiency as well as operation stability. Under different influent substrate concentrations of 560 mg·L⁻¹, 1 120 mg·L⁻¹ and 1 680 mg·L⁻¹, we confirmed that influent substrate concentration(COD) of 1 120 mg·L⁻¹ is the most suitable parameter for the bacteria enriching process after a long period of time under short SRT. After 94 days of cultivation, we achieved 50% of PHA content, 0.714 5 COD/COD of PHA conversion rate and 0.191 2 mg·(mg·h)⁻¹ of specific PHA storage rate at the end of batch tests with nutrient starvation. The study also confirmed that glycogen level in cells has a close relationship with its PHA synthesis ability, which shows its potential to predict the enrichment efficiency.

Key words: PHA; mixed culture; sludge bulking; substrate concentration; glycogen

近年来,传统塑料制品随着经济的发展以及工农现代化水平的不断提高被大量地应用于人们的日常生活中.但是,传统塑料具有难生物降解的特点,其对环境所造成的一系列污染也愈发严重^[1],寻找一种廉价且优异的替代品成为当务之急.

聚羟基烷酸酯(PHAs)是一种微生物于恶劣生存条件下合成的胞内储能物质,其具有与传统塑料相似的物化性质,又具有生物相容性、生物可降解性、易从可再生碳源中制取等优点,广泛应用于保鲜、食品包装、医疗等行业^[2].

高昂的生产成本一直是 PHA 取代传统化工塑料的阻碍^[21].近些年来,使用混合菌群合成 PHA 成为业界研究的热点^[3~9].通过多年的研究,人们发现混合菌群利用三段式工艺合成 PHA 有较高的效率.

较之未对 PHA 产生菌进行富集时较低的 PHA 合成量(仅为细胞干重的 6%~29.5%)^[10]有较大提高. Albuquerque 等^[9]提出基于三段式 PHA 合成工艺的好氧瞬时供料生产 PHA 法,大大提升了 PHA 生产工艺的效率.所谓三段式 PHA 合成工艺,是指有机废物水解产酸、产 PHA 菌富集、PHA 合成,部分水解产酸液为产 PHA 菌富集系统提供底物以保障产 PHA 菌富集系统稳定运行,PHA 合成则是产 PHA 菌富集系统排放的产 PHA 菌以其余水解产酸液为

收稿日期: 2012-06-26; 修订日期: 2012-12-17

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07201003);城市水资源与水环境国家重点实验室开放课题项目(2012TS01)

作者简介: 陈志强(1974~),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为环境污染控制与资源化, E-mail: czqh@163.com

底物合成 PHA. 3 阶段定向富集高效产 PHA 菌并同时回收了废水中的有机污染物,降低了 PHA 生产成本,这为生产 PHA 提供了一条崭新的思路.

在三段式工艺中,产 PHA 菌的富集非常关键,只有稳定产生 PHA 菌才能保障 PHA 合成的产量.目前产 PHA 菌的富集系统常采用 SBR 反应器,影响该系统稳定运行的因素包括污泥龄、底物浓度、组成及投加方式、pH 等^[11-17].对产 PHA 菌的富集系统来说,底物浓度直接影响反应器运行负荷,是影响 PHA 合成菌富集效果的重要因素.在进水底物浓度的选择上,目前业界尚有分歧. Doinisi 等^[11]主张使用较高的进水底物浓度,其实验当中的有机负荷(以 COD 计)处在 $8.5 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 到 $31.25 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 之间时,其实验结果表明,在此负荷区间内,富集效果呈现一个先升后降的趋势,并且在 $20 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时富集效果最好.然而较高的进水有机负荷会导致系统稳定性变差等问题.与之相对, Albuquerque 等^[6]主张采用一个较低的进水底物浓度,进水有机负荷范围(以 COD 计)为 $2.2 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 到 $4.4 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,并确定 $2.2 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 为最佳进水条件.两位研究者的结论有较大差异,因此最佳底物进水浓度的确定需要进一步研究.本课题组在前期研究中发现:高进水浓度时,以富集产 PHA 菌为目的的小分子有机酸好氧瞬时供料法容易导致丝状菌膨胀,威胁产 PHA 菌富集阶段污泥稳定性,使之无法为 PHA 生产阶段提供稳定的 PHA 产生菌^[22-24].进水底物浓度作为影响污泥稳定性的一大因素,其作用规律尚待探索.

为进一步考察进水负荷对产 PHA 富集系统稳

定运行的影响,本研究运行 SBR 反应器为产 PHA 富集系统,以废水产酸发酵液作为底物,分析其稳定运行能力和产 PHA 菌富集能力,设定了 3 组实验以考察不同进水底物浓度对 SBR 富集反应器启动期间污泥性状的稳定性以及 PHA 合成效率的影响,以期为 PHA 合成工艺最佳进水底物浓度的确定提供了依据.

1 材料与方法

1.1 污泥来源

SBR 反应器(第 2 段:产 PHA 菌富集系统)接种污泥来源于哈尔滨市太平污水处理厂污泥井,该水厂的主体工艺为 A/O 工艺,实测接种污泥浓度为 $5600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 实验装置及工艺流程

PHA 生产三段式工艺流程如图 1 中所示.蔗糖废水的产酸发酵装置(第 1 段:水解产酸系统)为 1 个有效容积为 20 L 的连续流搅拌反应器(CSTR),CSTR 的出水经过一套中空纤维膜组件($M_r \leq 20000$)进行过滤.滤后产酸废液 COD 约为 $5250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其中小分子挥发酸约占总 COD 的 45%(主要为乙酸、丙酸、丁酸),剩余成分大部分为未彻底水解的糖类及蛋白质类物质.富集反应器采用 3 个 4 L 容积的 SBR, $\text{HRT} = 1 \text{ d}$, $\text{SRT} = 10 \text{ d}$,每个周期 12 h,除了设置 10 min 的进水与排水时间外,控制沉淀时间为 2 h,其余时间对反应器实施不间断曝气搅拌.3 个反应器的进水浓度(以 COD 计,下同)分别控制在 560、1120 以及 $1680 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,分别依次命名为 1 号 SBR ~ 3 号 SBR.

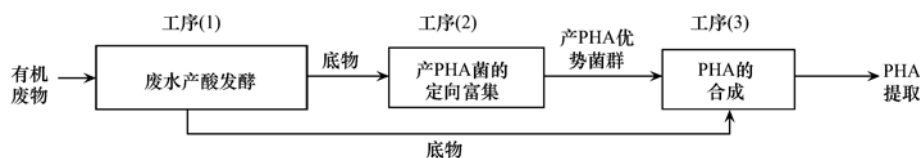


图 1 混菌三段式 PHA 合成工艺流程图

Fig. 1 Flow chart for the three-step PHA production process by mixed microbial cultures

1.3 实验方法

SBR 的取样周期为 5 ~ 7 d,取样时间贯穿整个曝气反应期.周期开始时测定反应器污泥浓度,之后每隔 30 min 取一次样,并在线监测溶解氧 DO,当 DO 发生明显突跃时,对反应器取样并测定该时刻的污泥浓度.

PHA 合成(第 3 阶段)是以 SBR 反应器排泥为种泥,以水解液为底物.实验前对种泥进行 1 h 的预

曝气从而使污泥中残留的氨氮等营养物质消耗完毕. PHA 合成采用多次补料方式,实验过程在线监测溶解氧 DO,当 DO 发生突跃时,停止搅拌进行沉降,在排除上清液之后重新补料.在补料完毕和 DO 突跃的时刻进行取样测定污泥中 PHA 成分.

1.4 测试分析方法

整个实验过程中,COD、MLSS、MLVSS、SV30、PH、ORP、DO、生物相以及糖原等指标的检测均采

用文献[25]中规定的标准检测方法. 污泥样品 PHA 含量的测定使用气相色谱法, 数据处理采用苯甲酸内标法. 样品中挥发酸(VFA)的测定采用气相色谱法, 数据分析采用内标法进行.

2 结果与讨论

2.1 富集反应器运行工况监测

自富集反应器投泥启动之后, 以 SV、SVI、MLSS 作为反应器稳定运行工况控制指标对反应器运行全过程的稳定性进行了评估, 实验结果如图 2 所示.

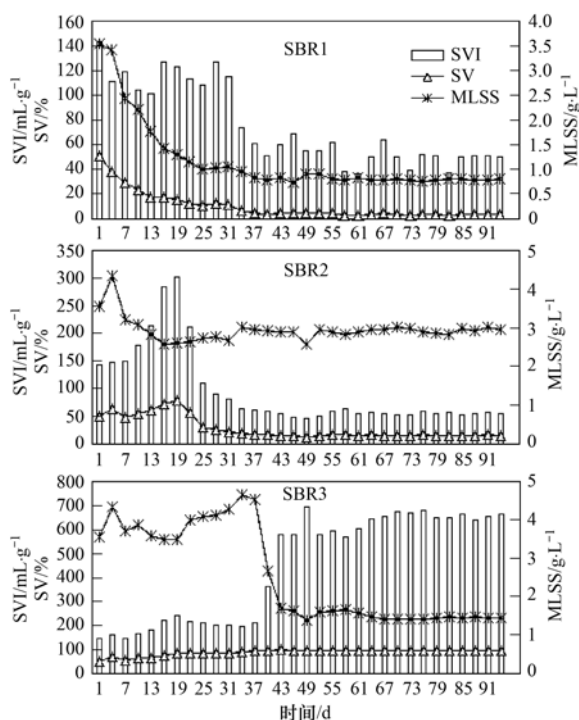


图2 SBR 富集反应器启动期污泥稳定性相关参数变化

Fig. 2 Change of parameters related to sludge stability in SBR reactor startup

从图 2 中可以发现, 在不同进水底物浓度条件下, 3 个反应器在启动期的污泥稳定性表现也各不相同. 1 号 SBR 中由于进水底物浓度较低, 导致周期末端微生物产生内源呼吸现象, 进而导致污泥浓度无法在较短污泥龄(10 d)条件下维持在一个较高的水平. 与之相反的是, 3 号 SBR 由于有了充足的底物供应, 污泥浓度自从反应器启动后便一路走高直至 $4\,600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但是, 由于后期丝状菌的爆发性增殖, 反应器污泥沉降性恶化, 随之而来的污泥流失导致了反应器污泥浓度的急剧下降, 最终在启动期第 43 d 稳定在 $1\,600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 这一水平附近, 无法再度提升. 而 2 号 SBR 由于采用了适中的进水底物浓

度, 既没有出现营养过低导致的生长限制, 也没有发生污泥膨胀导致的污泥流失, 这对于向 PHA 合成阶段稳定地提供高效、大量的种泥有十分重要的意义. 在同期进行的 SV、SVI 监控中 1 号 SBR 由于其进水底物浓度采用了与普通市政污水处理厂相似的水平, 在整个启动周期内其 SV 值从 51% 逐步下降至 5% 附近稳定, 相应地 SVI 值也控制在 $120\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下. 2 号 SBR 虽然在反应器启动初期有一个污泥沉降性变差的阶段, 在启动第 18 d 其 SV 值曾一度达到 80%, 相应的 SVI 值也达到 $311\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$, 但自此之后污泥沉降性有一个明显的改善过程, SV 迅速回落至 25% 以内, 相应的 SVI 值也在之后的很长时间内保持在 $70\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下, 呈现出了与普通市政污泥相类似的良好沉降特性. 而 3 号 SBR 由于高进水底物浓度所诱发的污泥膨胀, 导致启动 37 d 后 SV 值急剧上升至 95% 以上, 随之而来的污泥流失现象的出现又导致反应器中污泥浓度流失了约 65%, 使得自此之后的很长一段时间内 SVI 值高达 $600\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上, 反应器启动宣告失败.

从上述实验结果中可以发现, 短污泥龄条件下过低富集期进水底物浓度(约 $560\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)所造成的微生物内源呼吸及过高富集期进水底物浓度(约 $1\,680\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)条件下所导致的污泥丝状菌膨胀都会导致富集系统在长期运行过程中污泥浓度无法维系在一个较高水平. 对于实际 PHA 生产应用来看, 如若由于过高或是过低的进水底物浓度所导致的产 PHA 菌富集系统无法长期稳定高效运行, 将使得 PHA 合成阶段无法得到充足的高效 PHA 产生菌菌源, 并直接威胁到整个三段式 PHA 生产工艺的连续稳定运行. 这些因素最终都将造成后续 PHA 产品提取的成本和难度的提升. 因此笔者认为对于产 PHA 菌富集阶段, 适中的进水底物浓度对于获得高浓度且高效的 PHA 产生菌是较为有利的.

2.2 污泥性状显微检测

为了进一步确定反应器中污泥沉降性恶化的原因, 本研究对 3 个 SBR 反应器在整个启动阶段的污泥性状进行了光学显微镜下的观测. 图 3 中列出了 3 组反应器在启动不同阶段污泥形态的变化. 可以看出, 在反应器启动初期的第 17 d 时, 在 3 个反应器中泥水混合液内的主要成分均是菌胶团, 在 $\times 10$ 及 $\times 40$ 的放大倍数下均没有发现明显的丝状菌大量增殖现象. 并且由于 3 个反应器运行期进水底物浓度不同, 在相同放大倍数及同样的视野中, 2 号及 3 号 SBR 的菌胶团数量明显比 1 号 SBR 密集. 即在

单位体积生物量上,1号SBR较其他2组SBR的差距还是较为明显的.这证实了过低的进水底物浓度会造成反应器中微生物的内源呼吸,限制微生物的大量增殖,使得反应器中污泥浓度极低,无法提供充足高效的菌源.而到反应器运行至第37d时,3号SBR中的污泥沉降性急剧恶化,伴随着污泥流失导致的污泥浓度下降.对比此时反应器镜检照片及该反应器在第17d的镜检照片可以明显地发现,大量交错复杂的丝状菌已经基本取代了原本在活性污泥中占主导地位的菌胶团,并使得活性污泥沉降性迅速恶化、活性污泥大量流失.由此断定造成反应器污泥沉降性恶化的直接原因就是反应器中发生的丝状菌膨胀.

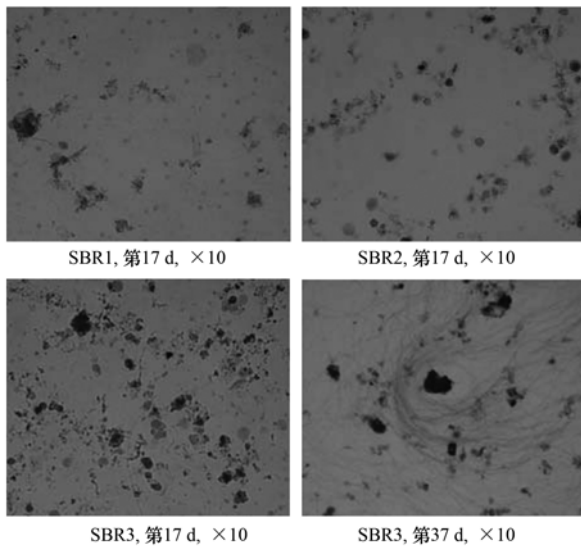


图3 反应器启动各阶段活性污泥镜检情况

Fig. 3 Microscopic examination of sludge from SBR reactors in different cultivation periods

对比3个反应器的进水底物浓度条件及主要进水底物组成可以发现,在进水底物单一、进水底物负荷较高的情况下,反应器丝状菌膨胀极易出现;且该种膨胀的发生往往十分剧烈,难以调控,一旦发生会对整个系统稳定运行造成致命的影响.因此检测并控制丝状菌的过度增殖对于富集反应器的稳定运行是至关重要的.

2.3 富集反应器富集效率评估

2.3.1 富集反应器周期内PHA合成效率研究

在富集反应器启动期间对反应器周期内的DO、PHA、COD、VFA等参数进行监测,并依据所测得的相关参数计算得PHA转化率以及PHA比合成速率,该2项参数代表着单位小分子有机酸底物向PHA产品转化的转化效率以及单位浓度活性污

泥在单位时间内合成PHA产品的合成速率.单位体积混合菌群中产PHA菌所占的比重越大,底物流向PHA以外的代谢终产物的可能性也就越小,同时,底物向PHA产物的转化速度也越迅速,其结果见图4及图5.

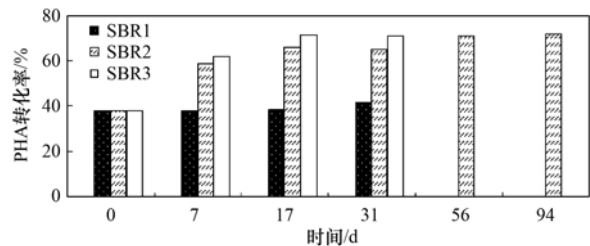


图4 富集期SBR富集反应器周期内PHA转化率变化趋势

Fig. 4 Variation trend of PHA conversion rate in SBR reaction cycle throughout the whole enrichment phase

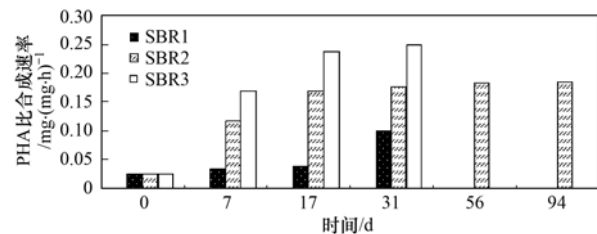


图5 富集期SBR富集反应器周期内PHA比合成速率变化趋势

Fig. 5 Variation trend of PHA synthesis rate in SBR reaction cycle throughout the whole enrichment phase

通过上述参数变化趋势可以看出,随着富集过程的不断推进,3个反应器中表征富集效率的两项指标均有一个明显的提升,而由于3个反应器在运行期间采用的自低到高的进水底物浓度,其各自的富集选择动力也依次增大,故计算得的相应PHA转化率以及PHA比合成速率也依次随着进水底物浓度的提升而呈一个上升的趋势.同时发现,虽然在进水底物浓度上3号SBR约为2号SBR的1.5倍,但是二者在富集效率参数上的差距却仅仅在10%之内.在经历了总计94d的富集运行后,2号SBR反应器达到了0.7206 (COD/COD)的PHA转化率以及0.1862 $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$ 的PHA比合成速率,富集效果良好.

2.3.2 富集反应器剩余污泥批次实验PHA合成效率研究

在对富集反应器进行周期内PHA合成效率研究的同时,对3组反应器周期内排出的剩余污泥在限制营养的条件下进行了PHA合成的批次实验,通过考察批次实验中的最大PHA积累量、PHA比合成速率、PHA转化率,考察第2阶段所富集的剩余污泥应用于PHA生产阶段时其实际PHA合成能力

高低,结果见图 6~8. 由图中各参数变化可以看出,在富集反应器剩余污泥实际应用于 PHA 生产过程,且底物浓度条件一致的情况下,表征富集效果相应参数仍然是随着富集期进水底物浓度的提升而提升. 这说明了高进水底物浓度对产 PHA 菌的富集还是有一定的促进作用的. 虽然说在同期实验中 3 号 SBR 的相关 PHA 合成能力优于其它两组反应器,但实践证明其无法在该条件下长期稳定运行. 2 号 SBR 虽然只能提供稍低的富集效果,但是其落后的幅度并不是很大,并且长期运行条件下能够稳定产出高浓度具有较高 PHA 合成能力的剩余污泥. 在富集期第 94 d 其分别达到了 50% 的最大 PHA 质量分数、0.714 5 (COD/COD) 的 PHA 转化率以及

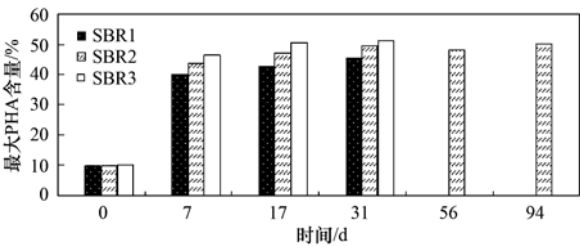


图 6 富集期 SBR 富集反应器批次实验中最大 PHA 含量变化趋势

Fig. 6 Variation trend of maximum PHA content in SBR batch experiments throughout the whole enrichment phase

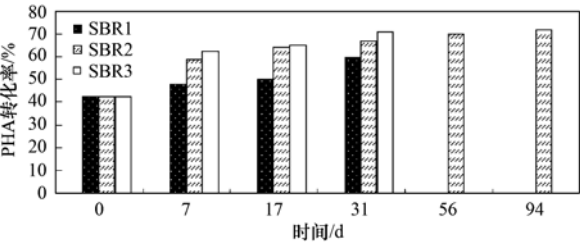


图 7 富集期 SBR 富集反应器批次实验中 PHA 转化率变化趋势

Fig. 7 Variation trend of PHA conversion rate in SBR batch experiments throughout the whole enrichment phase

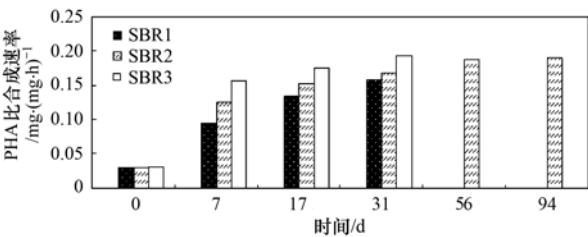


图 8 富集期 SBR 富集反应器批次实验中 PHA 比合成速率变化趋势

Fig. 8 Variation trend of PHA synthesis rate in SBR batch experiments throughout the whole enrichment phase

0.191 2 $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$ 的 PHA 比合成速率.

Albuquerque 等^[6]在其实验研究中同样采用水解酸化后的糖蜜废水作为底物,采用 $30 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的底物浓度(以 PHA 物质中 C 元素计,余同)作为富集反应器的运行条件,并最终在批次实验中得到了 30% 的 PHA 最大含量、0.57 (PHA/VFA) 的 PHA 转化率以及 $0.21 \text{ mmol} \cdot (\text{mmol} \cdot \text{h})^{-1}$ 的 PHA 比合成速率,这与本实验中所最终获得的富集效果参数大体一致.但是,在反应器的长期启动实验中,本研究证实了在该浓度下反应器无法长期稳定运行.虽然该研究者在其实验中强调 $45 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 对于提供最高的富集效率最为有利,但对于实际工程应用来看,产 PHA 菌富集阶段对于 PHA 生产阶段的持续、稳定、高效的菌源提供是整个三段式 PHA 生产工艺得以维系的不可或缺的前提.为了达到长期维持一个高效的富集系统稳定运行的目的,笔者认为,在 $\text{COD } 1120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的这一略低进水底物浓度条件下,能够兼顾反应器稳定运行及富集效果的提升,使之具有实际工程应用价值.

2.3.3 糖原水平与反应器富集效率相关性研究

为了研究细胞新陈代谢中另一个重要的内碳源物质——糖原与生物细胞 PHA 合成能力关系,对比了普通市政污泥与富集 96 d 的 2 号 SBR 中微生物细胞内糖原水平在一个运行周期内的变化,其结果如图 9 所示,其中第二个取样点为各自周期内底物耗尽且相应 PHA 浓度的峰值点.

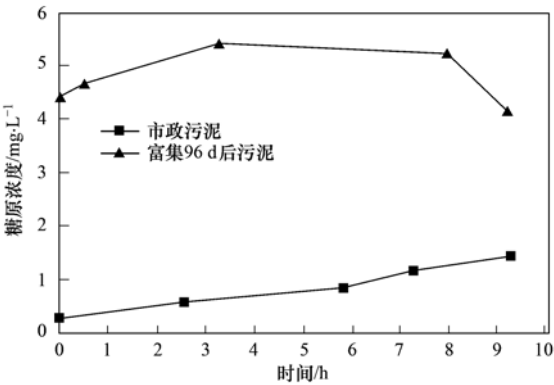


图 9 富集前后周期内糖原含量变化

Fig. 9 Variation trend of glycogen content before and after enrichment

实验结果表明,在底物充足的条件下,微生物细胞倾向于将碳源底物转化为糖原作为细胞度过底物匮乏期的内碳源储存起来.但是在底物耗竭后,微生物更倾向于优先分解 PHA 获得能量,并将一部分所获剩余能量再一次以糖原的形式储存起来.对于市政污泥,由于其未经过小分子有机酸底物的驯化富

集,对挥发酸底物吸收速度缓慢,周期内底物匮乏期相对较短,因此周期末端细胞并未完全耗竭 PHA 并开始分解糖原.而经过了长时间富集的污泥由于能够在较短的时间内耗尽底物,因此在漫长的底物匮乏期末端会开始分解先前储存在细胞内的糖原物质以维持细胞生存.同时由于长时间的富集选择作用,系统倾向于保留能迅速将底物转化为内碳源物质以度过底物匮乏期的微生物.因此,该运行模式下所富集得到的微生物往往细胞内糖原水平较高,并且同时具有优异的 PHA 合成能力.

3 结论

(1)不同的进水底物浓度会对富集反应器中污泥的稳定性产生显著的影响,底物浓度较高时($1680\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)会导致污泥沉降性严重恶化,而较低的进水底物浓度($560\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)无法在 SRT 为 10 d 的前提下保持较高的污泥浓度.

(2)较高进水浓度条件下所引发的丝状菌膨胀会导致污泥流失且该情况难以通过其他措施进行改善或控制.

(3)在 PHA 合成周期实验以及 PHA 合成批次试验中,均可以观察到 3 组 SBR 反应器的富集效果随时间增长而不断改善.在对 3 组反应器进行的横向比较中可以发现反应器的富集效果随进水浓度的增大而得到提升.

(4)作为细胞代谢重要产物,糖原的含量高低与细胞 PHA 合成能力具有密切的关系.糖原的含量可以作为一项指示富集反应器富集效果的重要指标,从而可以为工艺第 3 阶段合成 PHA 提供一个恰当的时机.

参考文献:

- [1] 郝晓地,朱景义,曹秀芹.利用混合菌群活性污泥法实现生物可降解塑料 PHA 的合成[J].生态环境,2005,14(6):967-971.
- [2] Salehizadeh H, Van Loosdrecht M C M. Production of polyhydroxyalkanoates by mixed culture: recent trends and biotechnological importance[J]. Biotechnology Advances, 2004, 22(3): 261-279.
- [3] Bengtsson S, Werker A, Christensson M, *et al.* Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge treating a paper mill wastewater[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(3): 509-516.
- [4] Rittmann B E. Microbial ecology to manage processes in environmental biotechnology[J]. Trends Biotechnology, 2006, 24(6): 261-266.
- [5] Dionisi D, Majone M, Papa V, *et al.* Biodegradable polymers from organic acids by using activated sludge enriched by aerobic periodic feeding[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 85(6): 569-579.
- [6] Albuquerque M G E, Torres C A V, Reis M A M. Polyhydroxyalkanoate (PHA) production by a mixed microbial culture using sugar molasses: Effect of the influent substrate concentration on culture selection[J]. Water Research, 2010, 44(11): 3419-3433.
- [7] Johnson K, Jiang Y, Kleerebezem R, *et al.* Enrichment of a mixed bacterial culture with a high polyhydroxyalkanoate storage capacity[J]. Biomacromolecules, 2009, 10(4): 670-676.
- [8] Serafim L S, Lemos P C, Oliveira R, *et al.* Optimization of polyhydroxybutyrate production by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding conditions [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 87(2): 145-160.
- [9] Albuquerque M G E, Eiroa M, Torres C, *et al.* Strategies for the development of a side stream process for polyhydroxyalkanoate (PHA) production from sugar cane molasses [J]. Journal of Biotechnology, 2007, 130(4): 411-421.
- [10] Takabatake H, Satoh H, Mino T, *et al.* PHA (polyhydroxyalkanoate) production potential of activated sludge treating wastewater[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(12): 119-126.
- [11] Bengtsson S, Werker A, Christensson M. Production of polyhydroxyalkanoates by activated sludge treating a paper mill wastewater[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(3): 509-516.
- [12] Chua A S M, Takabatake H, Satoh H, *et al.* Production of polyhydroxyalkanoates (PHA) by activated sludge treating municipal wastewater: effect of pH, sludge retention time (SRT), and acetate concentration in influent [J]. Water Research, 2003, 37(15): 3602-3611.
- [13] Kasemsap C, Wantawin C. Batch production of polyhydroxyalkanoate by low- polyphosphate- content activated sludge at varying pH [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(5): 1020-1027.
- [14] Dionisi D, Beccari M, Di Gregorio S, *et al.* Storage of biodegradable polymers by an enriched microbial community in a sequencing batch reactor operated at high organic load rate[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2005, 80(11): 1306-1318.
- [15] Dionisi D, Majone M, Vallini G, *et al.* Effect of the applied organic load rate on biodegradable polymer production by mixed microbial cultures in a sequencing batch reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, 93(1): 76-88.
- [16] Lemos P C, Serafim L S, Reis M A M. Polyhydroxyalkanoates production by activated sludge in a SBR using acetate and propionate as carbon sources [J]. Water Science and Technology, 2004, 50(10): 189-194.
- [17] Jiang Y M, Chen Y G, Zheng X. Efficient polyhydroxyalkanoates production from a waste-activated sludge alkaline fermentation liquid by activated sludge submitted to the aerobic feeding and

- discharge process [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(20): 7734-7741.
- [18] Rhu D H, Lee W H, Kim J Y, *et al.* Polyhydroxyalkanoate (PHA) production from waste [J]. Water Science and Technology, 2003, **48**(8): 221-228.
- [19] Kumar M S, Mudliar S N, Reddy K M K, *et al.* Production of biodegradable plastics from activated sludge generated from a food processing industrial wastewater treatment plant[J]. Bioresource Technology, 2004, **95**(3): 327-330.
- [20] Johnson K, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Influence of the C/N ratio on the performance of polyhydroxybutyrate (PHB) producing sequencing batch reactors at short SRTs[J]. Water Research, 2010, **44**(7): 2141-2152.
- [21] Choi J, Lee S Y. Process analysis and economic evaluation for Poly-(3-hydroxybutyrate) production by fermentation [J]. Bioprocess Engineering, 1997, **17**(6): 335-342.
- [22] 陈玮. 利用活性污泥混合菌群合成聚羟基脂肪酸脂的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 49-51.
- [23] 王昌勇. 两段式和三段式工艺制取聚羟基脂肪酸酯的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 41-58.
- [24] 田婷. 混合菌群合成聚羟基脂肪酸最佳工艺条件研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009. 46-47.
- [25] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.

CONTENTS

Concentrations and Ozone Formation Potentials of BTEX During 2008-2010 in Urban Beijing, China	CAO Han-yu, PAN Yue-peng, WANG Hui, <i>et al.</i> (2065)
Aging and Mixing State of Particulate Matter During Aerosol Pollution Episode in Autumn Shanghai Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	MU Ying-ying, LOU Sheng-rong, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (2071)
Chemical Characteristics and Source Assessment of Rainwater at Shenyang	ZHANG Lin-jing, ZHANG Xiu-ying, JIANG Hong, <i>et al.</i> (2081)
Variation of Atmospheric Pollutants in Qinhuangdao City	LIU Lu-ning, SHEN Yu-xuan, XIN Jin-yuan, <i>et al.</i> (2089)
NH ₃ , N ₂ O, CH ₄ and CO ₂ Emissions from Growing Process of Caged Broilers	ZHOU Zhong-kai, ZHU Zhi-ping, DONG Hong-min, <i>et al.</i> (2098)
Synergetic Effects of Silicon Carbide and Molecular Sieve Loaded Catalyst on Microwave Assisted Catalytic Oxidation of Toluene	WANG Xiao-hui, BO Long-li, LIU Hai-nan, <i>et al.</i> (2107)
Removal of Mixed Waste Gases by the Biotrickling Filter	ZHANG Ding-feng, FANG Jun-yi, YE Jie-xu, <i>et al.</i> (2116)
Decomposition of Carbon Disulfide by Pulse Corona Under Oxidizing and Reducing Atmosphere	JIN Sheng, HUANG Li-wei, LI Guo-ping (2121)
Effects of Simulated Elevation of Atmospheric CO ₂ Concentration on the Physiological Features of Spring Phytoplankton in Taihu Lake	ZHAO Xu-hui, TANG Long-sheng, SHI Xiao-li, <i>et al.</i> (2126)
A New Method for Estimation of the Lake Quality Reference Condition	HUA Zu-lin, WANG Liang (2134)
Parameter Sensitivity Analysis of Runoff Simulation and Model Adaptability Research Based on HSPF	LI Yan, LI Zhao-fu, XI Qing (2139)
Study on Water Quality Monitoring Scheme Based on Non-Point Source Pollution	WU Xi-jun, LI Huai-en, LI Jia-ke, <i>et al.</i> (2146)
Characteristics of Nutrient Loss by Runoff in Sloping Arable Land of Yellow-brown Under Different Rainfall Intensities	CHEN Ling, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (2151)
Distribution of Dissolved Inorganic Nutrients and Dissolved Oxygen in the High Frequency Area of Harmful Algal Blooms in the East China Sea in Spring	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, CHEN Peng, <i>et al.</i> (2159)
Temporal-Spatial Distribution of Algal Cells During Drought Period in Daning River of Three Gorges	ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, WANG Kun, <i>et al.</i> (2166)
Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen Components in the Lake Sediment to Algae	FENG Wei-ying, ZHANG Sheng, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2176)
Influence of Decomposition of <i>Cladophora</i> sp. on Phosphorus Concentrations and Forms in the Overlying Water	HOU Jin-zhi, WEI Quan, GAO Li, <i>et al.</i> (2184)
Phosphorus Exchange Between Suspended Solids Sediments Overlying Water Under Repeated Disturbance	LI Da-peng, WANG Jing, HUANG Yong (2191)
Distribution Characteristics of PBDEs in Surface Sediment from the Three Gorges Reservoir of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2198)
Study on UV and H ₂ O ₂ Combined Inactivation of <i>E. coli</i> in Drinking Water	ZHANG Yi-qing, ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji (2205)
Kinetics and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate Degradation in Aqueous Solution by Ozonation	YU Li, ZHANG Pei-long, HOU Jia-cai, <i>et al.</i> (2210)
Effects of Nitrate Ion on Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	MAO Wen, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2218)
Chlorination of Ethynyl Estradiol: A Kinetic and Mechanistic Study	WANG Bin-nan, LIU Guo-qiang, KONG De-yang, <i>et al.</i> (2225)
Metal Ions Restrained the Elimination of 4- <i>tert</i> -Octylphenol by δ -MnO ₂	LI Fei-li, MOU Hua-qian (2232)
Removal of Bisphenol A in Aqueous Solutions by Core-shell Magnetic Molecularly Imprinted Polymers	LIU Jian-ming, LI Hong-hong, XIONG Zhen-hu (2240)
Research on Removal of Tetrabromobisphenol A from Synthetic Wastewater by Nanoscale Zero Valent Iron Supported on Organobentonite	YAN Meng-yue, PANG Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (2249)
Measurement of Dissolved Organic Nitrogen with Nanofiltration Pretreatment and Its Distribution Characteristics in Landscape Water	YU Hong-lei, HUO Shou-liang, YANG Zhou-sheng, <i>et al.</i> (2256)
Preparation of a Novel Modified Hydrogel and Study of Its Adsorption Performance	WU Ning-mei, LI Zheng-kui (2263)
Photocatalytic Reductive Degradation of Direct Red 4BE by Phosphotungstic Acid	WEI Hong, LI Ke-bin, LI Juan, <i>et al.</i> (2271)
Wastewater Treatment Using a Microbubble Aerated Biofilm Reactor	ZHANG Lei, LIU Ping, MA Jin, <i>et al.</i> (2277)
Research on Fenton Treatment of the Biochemical Processes Effluent of Bamboo Industry Wastewater	GUO Qing-wen, ZHANG Min, WANG Wei, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Fe ²⁺ on Fermentation Hydrogen Production in an UASB	LI Yong-feng, WANG Yi-xuan, CHENG Guo-ling, <i>et al.</i> (2290)
Influence of Substrate Concentration on PHA Production Using Fermented Sugar Cane as Substrate	CHEN Zhi-qiang, DENG Yi, HUANG Long, <i>et al.</i> (2295)
Study on Rapid Start-up of a Nitrifying Process Using Aerobic Granular Sludge as Seed Sludge	LIU Wen-ru, SHEN Yao-liang, DING Ling-ling, <i>et al.</i> (2302)
Influencing Factors of High-Concentration Lead Removal Using the Phosphorus-Accumulating Sludge	YANG Min, LU Long, FENG Yong, <i>et al.</i> (2309)
Preliminary Study on Characteristics of Volumetric Oxygen Transfer Coefficient in Granular Sludge Systems	LI Zhi-hua, FAN Chang-qing, WANG Xiao-chang (2314)
Ecological Risk Assessment of Bisphenol A in Chinese Freshwaters	WANG Hao, FENG Cheng-lian, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (2319)
Species Sensitivity Evaluation of <i>Pseudorasbora parva</i>	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (2329)
Comparison of Aquatic Predicted No-Effect Concentrations (PNECs) for Pentachlorophenol Derived from Different Assessment Approaches	LEI Bing-li, WEN Yu, WANG Yi-pei, <i>et al.</i> (2335)
Study on Hair Hg and Pb Content Distribution of Traffic Polices, Guilin	QIAN Jian-ping, ZHANG Li, LI Cheng-chao, <i>et al.</i> (2344)
Changes in Phototaxical Index of <i>Daphnia carinata</i> Under Electric Field of Direct Current in Response to Cr ⁶⁺ and Hg ²⁺	WANG Fei-xiang, YUAN Ling, HUANG Jian-guo (2350)
Effect of UV-B Radiation on the Chemical Composition and Subsequent Decomposition of <i>Cyclobalanopsis glauca</i> Leaf Litter	SONG Xin-zhang, BU Tao, ZHANG Shui-kui, <i>et al.</i> (2355)
Leaf Micro-morphology and Features in Adsorbing Air Suspended Particulate Matter and Accumulating Heavy Metals in Seven Tress Species	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (2361)
Effect of Dissolved Oxygen on Microbial Community in Simultaneous Removal of Carbon, Nitrogen and Sulfur Process	YU Hao, CHEN Chuan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (2368)
Microbial Activity and Community Structure Analysis Under the Different Land Use Patterns in Farmland Soils: Based on the Methods PLFA and MicroResp TM	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (2375)
Effects of Drying-rewetting Alternation on Nitrogen Dynamics in a Typical Coastal Wetland: A Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (2383)
Cadmium and Selected Heavy Metals in Soils of Jianping Area in Wushan County, the Three Gorges Region: Distribution and Source Recognition	LIU Yi-zhang, XIAO Tang-fu, NING Zeng-ping, <i>et al.</i> (2390)
Total Contents of Heavy Metals and Their Chemical Fractionation in Agricultural Soils at Different Locations of Beijing City	CHEN Zhi-fan, ZHAO Ye, GUO Ting-zhong, <i>et al.</i> (2399)
Influence of Season Change on the Level of Heavy Metals in Outdoor Settled Dusts in Different Functional Areas of Guiyang City	LI Xiao-yan (2407)
Characteristics of Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls Contamination in Soils of Gudao Region in Dongying	WANG Deng-ge, CUI Zhao-jie, FU Xiao-wen, <i>et al.</i> (2416)
Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Organic Matter Leaching in Forest Soil	DUAN Lei, MA Xiao-xiao, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2422)
<i>Ex-situ</i> Remediation of PAHs Contaminated Site by Successive Methyl- β -Cyclodextrin Enhanced Soil Washing	SUN Ming-ming, TENG Ying, LUO Yong-ming, <i>et al.</i> (2428)
Effects of <i>Bacillus mucilaginosus</i> on the Cd Content of Rhizosphere Soil and Enzymes in Soil of <i>Brassica juncea</i>	YANG Rong, LI Bo-wen, LIU Wei (2436)
Concentrations of Antibiotics in Vegetables from Manure-mended Farm	WU Xiao-lian, XIANG Lei, MO Ce-hui, <i>et al.</i> (2442)
Characteristics of Organic Nitrogen Mineralization in Organic Waste Compost-Amended Soil	ZHANG Xu, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (2448)
Characteristics and Influence Factors of the Energy Consumption and Pollutant Discharge of Municipal Solid Waste Transfer Stations in Beijing	WANG Zhao, LI Zhen-shan, FENG Ya-bin, <i>et al.</i> (2456)
Influence of Ammonia on Leaching Behaviors of Incineration Fly Ash and Its Geochemical Modeling	GUAN Zhen-zhen, CHEN De-zhen, Thomas Astrup (2464)
Pretreatment Technology for Fly Ash from MSWI and the Corresponding Study of Chloride Behavior	ZHU Fen-fen, Takaoka Masaki, Oshita Kazuyuki, <i>et al.</i> (2473)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of Mesoporous Activated Carbon with Acidic Groups	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (2479)
Preliminary Assessment of the Potential of Biochar Technology in Mitigating the Greenhouse Effect in China	JIANG Zhi-xiang, ZHENG Hao, LI Feng-min, <i>et al.</i> (2486)
Research of Potassium Flow and Circulation Based on Substance Flow Analysis	BAI Hua, ZENG Si-yu, DONG Xin, <i>et al.</i> (2493)

《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)

2013年6月15日 34卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 6 Jun. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人