

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第5期

Vol.36 No.5

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究	孙建林, 常文静, 陈正侠, 曾辉 (1513)
北京市典型餐饮企业 VOCs 排放特征研究	崔彤, 程婧晨, 何万清, 任培芳, 聂磊, 徐东耀, 潘涛 (1523)
2006~2010 年珠三角地区 SO ₂ 特征分析	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邓涛, 徐婉筠, 冉靛, 赵春生 (1530)
环境空气 PM _{2.5} 连续监测系统手工采样比对测试	王强, 钟琪, 迟颖, 张杨, 杨凯 (1538)
燃煤电厂可凝结颗粒物的测试与排放	裴冰 (1544)
南海水域不同深度非光合微生物的固碳潜能及其对不同电子供体的响应	方峰, 王磊, 席雪飞, 胡佳俊, 付小花, 陆兵, 徐殿胜 (1550)
基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算	冯驰, 金琦, 王艳楠, 赵丽娜, 吕恒, 李云梅 (1557)
贵州清水江流域丰水期水化学特征及离子来源分析	吕婕梅, 安艳玲, 吴起鑫, 罗进, 蒋浩 (1565)
东莞石马河流域水化学特征时空差异及来源辨析	高磊, 陈建耀, 王江, 柯志庭, 朱爱萍, 许凯 (1573)
河南鸡冠洞洞穴水对极端气候的响应及其控制因素研究	刘肖, 杨琰, 彭涛, 赵景耀, 任小凤, 张银环, 聂旭东, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (1582)
石漠化治理对岩溶地下水水化学和溶解无机碳稳定同位素的影响	肖时珍, 熊康宁, 蓝家程, 张晖, 杨龙 (1590)
旱季不同土地利用类型下岩溶碳汇效应差异	赵瑞一, 梁作兵, 王尊波, 于正良, 江泽利 (1598)
有机氯农药在岩溶区上覆土壤中的垂直迁移特征及对地下水的影响	孙玉川, 王永启, 梁作兵, 袁道先 (1605)
山东南四湖沉积物中汞的污染现状及迁移研究	曹霏霏, 杨丽原, 庞绪贵, 王炳华, 王云倩 (1615)
摇蚊幼虫扰动下沉积物微环境和微界面对物理扰动强度的响应	史晓丹, 李勇, 李大鹏, 王忍, 邓猛, 黄勇 (1622)
南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响	郝卓, 高扬, 张进忠, 徐亚娟, 于贵瑞 (1630)
不同紫色母岩对景观水体氮磷及有机物去除的影响	黄雪娇, 刘晓晨, 李振轮, 石纹豪, 杨珊 (1639)
荔枝落叶对铜绿微囊藻生长和光合作用的影响	汪小雄, 姜成春, 李锦卫, 汪晓军 (1648)
黄连根茎浸提物对绿藻的毒理作用	陈亚楠, 袁玲 (1655)
饮用水中消毒副产物 1,1-二氯丙酮的形成机制	丁春生, 孟壮, 徐洋洋, 缪佳 (1662)
水中利谷隆氯化降解动力学和消毒副产物生成特性	凌晓, 胡晨燕, 程明, 谷建 (1668)
化学消毒的中和剂对水中内毒素活性检测的影响	张灿, 刘文君, 史云, 安代志, 白森, 徐稳 (1674)
牛粪生物炭对水中氨氮的吸附特性	马锋锋, 赵保卫, 刁静茹, 钟金魁, 李安邦 (1678)
丁二酸改性茶油树木屑吸附铅的研究	张晓峰, 陈迪云, 彭燕, 刘永胜, 熊雪莹 (1686)
SPG 膜表面润湿性对膜污染和化学耐受性的影响	张静, 肖太民, 张晶, 曹丽亚, 杜亚威, 刘春, 张磊 (1694)
TiO ₂ 诱导下左旋氧氟沙星的可见光降解及其机制	郭宏生, 刘亚楠, 乔琪, 魏红, 董呈幸, 薛洁, 李克斌 (1700)
新型高分子絮凝剂对废水中 Cr(VI) 的捕集性能	王刚, 杜凤龄, 常青, 徐敏 (1707)
基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量	曾善文, 王泽宇, 高敬, 刘东, 张代钧, 卢培利 (1713)
分离高浓度污泥产酸发酵液的自生动态膜形成机制	黄帅, 刘宏波, 殷波, 马惠君, 符波, 刘和, 白洁 (1720)
通风强度对市政污泥生物干化中试效果的影响	张喻, 韩融, 陆文静, 王洪涛, 明中远, 王强, 夏伟 (1727)
生物可降解螯合剂谷氨酸 N,N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究	吴青, 崔延瑞, 汤晓晓, 杨慧娟, 孙剑辉 (1733)
百乐克 (BIOLAK) 活性污泥宏基因组的生物多样性及功能分析	田美, 刘汉湖, 申欣, 赵方庆, 陈帅, 姚永佳 (1739)
异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性	梁贤, 任勇翔, 杨垒, 赵思琪, 夏志红 (1749)
菌株 <i>Arthrobacter</i> sp. CN2 降解对硝基苯酚的特性与动力学	任磊, 史延华, 贾阳, 姚雪松, Ruth Nahurira, 弥春霞, 闫艳春 (1757)
短短芽孢杆菌及其芽孢对苣的降解	刘芷辰, 叶锦韶, 彭辉, 刘则华, 邓庭进, 尹华, 廖丽萍 (1763)
垃圾填埋场抗生素抗性基因初探	李蕾, 徐晶, 赵由才, 宋立岩 (1769)
不同构型人工湿地基质中土著菌的耐药性及整合子丰度调查	麦晓蓓, 陶然, 杨扬, 张敏, 林剑华, 满滢 (1776)
硝酸盐和甲烷对覆土中苯系物厌氧氧化的影响	柳蓉, 龙焰, 王立立, 何婷, 叶锦韶 (1785)
山西高原落叶松人工林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 李洪建, 李君剑, 武江星 (1793)
施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响	姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 刘庆芳, 王志齐, 张彦军, 李娜娜, 李如剑, 吴得峰, 孙棋棋 (1802)
宣威街道尘中重金属的分布特征及其健康风险评估	张文超, 吕森林, 刘丁戎, 刘品威, 米持真一, 王效举, 王青耀 (1810)
宝鸡市街道尘埃磁学特征空间分布及环境意义	张俊辉, 王瑾, 张健, 房妮, 夏敦胜 (1818)
长期施肥下浙江稻田不同颗粒组分有机碳的稳定特征	毛霞丽, 陆扣萍, 孙涛, 张小凯, 何丽芝, 王海龙 (1827)
矿区植被恢复方式对土壤微生物和酶活性的影响	李君剑, 刘峰, 周小梅 (1836)
三江平原典型湿地类型土壤微生物特征与土壤养分的研究	肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国 (1842)
钠盐类型对表面活性剂清洗煤油污染土壤的强化效应	黄昭露, 陈泉源, 周娟, 谢墨函 (1849)
石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应	杨茜, 吴蔓莉, 聂麦茜, 王婷婷, 张明辉 (1856)
可生物降解螯合剂 GLDA 诱导东南景天修复重金属污染土壤的研究	卫泽斌, 陈晓红, 吴启堂, 谭蒙 (1864)
绿洲土 Pb-Zn 复合胁迫下重金属形态特征和生物有效性	金诚, 赵转军, 南忠仁, 王胜利, 武文飞, 王厚成 (1870)
硫素对水稻根系铁锰胶膜形成及吸收的影响	王丹, 李鑫, 王代长, 饶伟, 杜光辉, 杨军, 化党领 (1877)
臭氧对几种楠木气体交换参数的影响	李苗苗 (1888)
某货车侧翻水污染事件的环境损害评估方法探索	蔡锋, 赵士波, 陈刚才, 鲜思淑, 杨清玲, 周贤杰, 余海 (1902)
《环境科学》征订启事 (1543) 《环境科学》征稿简则 (1756) 信息 (1667, 1726, 1809, 1848)	

基于 OUR-HPR 测量在线估计活性污泥合成 PHA 量

曾善文¹, 王泽宇^{2,3}, 高敬¹, 刘东¹, 张代钧^{1,2*}, 卢培利^{1,2}

(1. 重庆大学环境科学系, 重庆 400044; 2. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 3. 重庆市第一中学, 重庆 400044)

摘要: 活性污泥工艺是一种具有重要应用前景的工业化生产聚羟基烷酸酯(PHA)的方法. 当前 PHA 测量主要采用离线分析方法, 时间滞后、分析操作复杂, 不适于 PHA 生产过程控制. 本研究基于活性污泥同时储存生长-溶解性微生物产物模型(SSAG-SMP), 认为在饱食(外部有机碳基质充足)期间, 聚羟基烷酸酯(PHA)的合成速率与氧利用速率(OUR)及氢离子产生速率(HPR)呈线性关系, 建立了一种基于 OUR-HPR 在线测量数据估计活性污泥合成 PHA 量的方法. 本研究对乙酸作基质的不同浓度情况进行模拟, 结果表明 OUR 及 HPR 的 PHA 合成的氧气消耗分数($k_{\text{PHA,OUR}}$)和质子消耗分数($k_{\text{PHA,HPR}}$)为常数, 分别是 0.67 和 0.57. 利用建立的线性关系来预测饱食期 PHA 含量, 结果显示预测值与实测值较为吻合, 说明提出的基于 OUR-HPR 测量在线估计 PHA 合成量的方法可行.

关键词: 聚羟基烷酸酯(PHA); 活性污泥; 同时储存生长-溶解性微生物产物模型; 氧利用速率-氢离子产生速率; 预测

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)05-1713-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.05.028

On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements

ZENG Shan-wen¹, WANG Ze-yu^{2,3}, GAO Jing¹, LIU Dong¹, ZHANG Dai-jun^{1,2*}, LU Pei-li^{1,2}

(1. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. The First Middle School of Chongqing City, Chongqing 400044, China)

Abstract: Activated sludge process is an important approach for industrial Polyhydroxyalkanoate (PHA) production. Off-line measurement with a time lag and complex analysis, is a common method for PHA, but is not suitable for the process control of PHA production. Based on a model for simultaneous storage and growth-soluble microbial products (SSAG-SMP), it is assumed that there is the linear relationship between the PHA synthesized and OUR or HPR, respectively. Further, a novel method to estimate PHA content based on in-situ monitoring data of oxygen uptake rate (OUR) and hydrogen-ion production rate (HPR) is established in this paper. The results of modeling OUR and HPR under different substrate concentrations showed that oxygen consumption proportion ($k_{\text{PHA,OUR}}$) and proton consumption proportion ($k_{\text{PHA,HPR}}$) of PHA synthesis were 0.67 and 0.57, respectively. The predicted results based on the linear relationship were essentially consistent with measured ones, and indicated that the method is feasible.

Key words: PHA; activated sludge; SSAG-SMP; OUR-HPR; estimation

聚羟基烷酸酯(PHA)是一种胞内聚合物,可作为微生物的碳源、能量或还原当量^[1]. 其物理性能与聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等材料相似,但其优越的可生物降解性、热塑性、疏水性及低透气性使其成为一种极有前景的石油化工塑料的替代材料^[2]. 目前工业 PHA 的生产采用纯菌种发酵的方法,其较高的生产成本是 PHA 成为商品聚合物最主要的障碍. 因此,当前的研究主要集中于 PHA 的生产成本控制^[2]及产量提高^[3]两个方面. 生产成本控制研究多聚焦在混合培养代替纯培养及回收废弃有机物(包括废水)作为碳源 2 个方面,提高 PHA 产量的研究多关注生产条件的优化. 不同的有机碳基质对象的研究,如:造纸厂出水^[4]、橄榄油厂出水^[5]、城市污水厂污水及剩余污泥^[6,7]等有利于从产生

PHA 的原料上来节约成本;不同基质类型研究发现以乙酸作为碳源时 VFA(挥发性脂肪酸)吸收量和 PHA 产量更高^[8~10];不同浓度基质^[11]研究发现基质浓度在低污泥龄、COD 为 1 120 mg·L⁻¹时可获得最可观的 PHA;不同投加方式,如脉冲、连续投加方式研究发现脉冲投加更利于 PHA 的富集^[12]. 当前对于产 PHA 菌群富集多采用饱食-饥饿培养模式,而后在限营养条件下限制生长使 PHA 产量最大化^[13]. 此外,细菌合成 PHA 的数学模型也受到较多关注. 单一基质(乙酸)富集 PHA 数学模型由 Beun

收稿日期: 2014-10-14; 修订日期: 2014-12-21

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(CSTC2013JJB20002)

作者简介: 曾善文(1989~),男,博士研究生,主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: zengshanwen@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dzhang@cqu.edu.cn

等^[14]提出,一些研究^[15,16]也提出了 PHA 的数学模型,然而这些模型还只是基于单一基质. 直到 2008 年,Dias 等^[17]提出了混合基质(乙酸+丙酸)数学模型.

诸多对于 PHA 产量优化的研究取得了重要进展,但是 PHA 测试仍面临挑战. 当前 PHA 的测试通常采用的气相色谱法(GC)是基于文献^[18]的修正,修正的气相色谱法仍需要较长的预处理时间. 另外,通量平衡分析(FBA)^[17,19,20]是基于代谢平衡分析(MBA)的一种数学方法,可以较好地优化 PHA 产量并发挥指导作用. 图像分析法^[21]也能较好地估测 PHA 含量. 然而,这些分析方法都是离线分析,时间滞后、分析操作复杂,不能对微生物细胞合成 PHA 的过程进行在线估计. Dias 等^[22]尝试采用在线方法来估测 PHA,似乎 CO₂ 测试对 PHA 含量估计有较大影响,预测值与测量值存在较大偏差.

为了克服离线分析方法的缺点,提高 PHA 生产过程的 controllability,本研究结合活性污泥同时储存生长-溶解性微生物产物模型和氧利用速率-氢离子产生速率(OUR-HPR)在线测量数据,提出了一种简单的、可在线估计活性污泥合成 PHA 量的方法.

1 材料与方法

1.1 反应器的启动与运行

实验采用的 SBR 装置是由有效容积 4 L 的反应器、机械搅拌系统、曝气系统、进出水蠕动泵系统、恒温水浴系统以及时间控制系统组成. 运行周期为 6 h,启动期运行模式设置为 15 min 进水,300 min 曝气,45 min 沉淀,15 min 排水,泥龄通过排泥来控制,在 15 d.

活性污泥取自重庆市大渡口污水厂,实验用水采用人工合成废水,以乙酸钠作为碳源,以氯化铵为氮源,人工合成废水中的 COD、NH₄⁺-N、PO₄³⁻-P 分别为 400、15、4 mg·L⁻¹.

1.2 实验方法

待 SBR 反应器运行稳定后,取活性污泥加入实验室自主开发的混合呼吸滴定测量仪^[23]获取 OUR-HPR 在线数据,投加不同浓度乙酸(分别为 100、200、300 mg·L⁻¹)考察对 PHA 合成的影响. 保持反应器内 MLSS = 1 000 mg·L⁻¹,并加入 20 mg·L⁻¹ ATU 以抑制硝化作用^[24]. 每 10 min 取一次样,测量不同时刻的 COD、OUR-HPR 及 PHA 值. 其中,COD 采用快速消解法,PHA 测试采用气相色谱法^[18].

1.3 基于 OUR 和 HPR 估计 PHA

国际水协(IWA)推出的活性污泥 3 号模型(ASM3)认为基质在微生物胞内的应用是先储存后生长^[25]. 但是,在实际使用过程中,ASM3 不能模拟微生物生长率在基质充足期和匮乏期时的不连续性并且 ASM3 预测的胞内贮存物的浓度比实验测定的浓度更高^[26]. 造成模拟失败的原因主要在于 ASM3 中的基本假设,即基质先贮存后被用于生长的机制与实际不符,实验现象表明基质贮存与生长是同时发生的. 本研究参考文献^[27],对 ASM3 模型进行修正建立同时贮存生长-溶解性微生物产物(SSAG-SMP)模型,见表 1.

同时贮存生长过程的 O₂ 消耗量 S_{O₂}:

$$S_{O_2} = \int_{t_0}^{t_i} \rho_{O_2}(t) dt = \int_{t_0}^{t_i} OUR_{ex}(t) dt \quad (1)$$

根据同时贮存生长-溶解性微生物产物(SSAG-SMP)模型,有机碳基质好氧储存过程的 O₂ 消耗速率 $\rho_{O_2,STO}$ 与 PHA 合成速率 $\rho_{X_{STO},STO}$ 的关系:

$$\frac{\rho_{O_2,STO}}{1 - Y_{STO}} = \frac{\rho_{X_{STO},STO}}{Y_{STO}} \quad (2)$$

定义 PHA 合成的氧气消耗分数:

$$\rho_{O_2,STO} = k_{PHA,OUR} \cdot \rho_{O_2} \quad (3)$$

假设 PHA 合成的氧气消耗分数 $k_{PHA,OUR}$ 在饱食期为常数,由方程(1)~(3)得到 OUR 与 PHA 关系式(4),同理,可以得到 HPR 与 PHA 的关系式(5).

$$\begin{aligned} \Delta PHA(t_i) &= \int_{t_0}^{t_i} \rho_{X_{STO},STO} dt \\ &= k_{PHA,OUR} \frac{Y_{STO}}{1 - Y_{STO}} \int_{t_0}^{t_i} \rho_{O_2,STO}(t) dt \\ &= K_{PHA,OUR} \int_{t_0}^{t_i} \rho_{O_2}(t) dt \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta PHA(t_i) &= k_{PHA,HPR} \frac{Y_{STO}C}{m} \int_{t_0}^{t_i} HPR_{ex}(t) dt \\ &= K_{PHA,HPR} \int_{t_0}^{t_i} HPR_{ex}(t) dt \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中,系数 $k_{PHA,HPR}$ 是 PHA 合成的质子消耗分数,这里也假设其在饱食期为常数.

在同时贮存生长-溶解性微生物产物(SSAG-SMP)模型校核中, Y_{STO} 为易生物降解基质(S_s)贮存为异养菌储存有机质(X_{STO})的好氧产率系数取 0.8; m 为吸收 1 mol 乙酸消耗质子,且 $m = 1/(1 + 10^{pK_a - pH})$,在 pH=7.8 时, m 取 1; C 为乙酸基质的相对分子质量(g·mol⁻¹),取值为 64.

2 结果与讨论

2.1 *k* 值的验证

本研究采用 AQUASIM 2.0 软件^[28]对矩阵部分参数进行校核. 对乙酸基质 COD 浓度分别为 100、200 及 300 mg·L⁻¹ 情况下的 OUR 及 HPR 进行模拟, 预测结果部分数据见表 1.

基于 *S_s* 储存耗氧速率与总的耗氧速率比值, 记为 PHA 储存氧气消耗分数 *k_{PHA,OUR}*; 基于 *S_s* 储存消耗质子速率与总的质子消耗速率比值, 记为 PHA 储存质子消耗分数 *k_{PHA,HPR}*. 由表 1 知, 在基质充足时, *k_{PHA,OUR}* 与 *k_{PHA,HPR}* 的值分别在 0.67 及 0.57 附近波动, 数据分析得到的离散系数均小于 5%. 通过对模型数据的分析发现在饱食期, *k_{PHA,OUR}* 与 *k_{PHA,HPR}* 均为常数, 即在基质充足时, 储存 PHA 过程消耗的溶

解氧(质子)所占比例为定值.

采用线性回归方法分析 PHA 与氧消耗量和质子消耗量的关系, 结果如图 1~3 所示, 相关系数均大于 0.9. 根据线性回归分析结果, 利用方程(4)和(5)可计算得到贮存过程的氧气消耗及质子消耗的比例 *k_{PHA,OUR}* 和 *k_{PHA,HPR}*, 结果见表 2. 线性回归方法估算的 *k_{PHA,OUR}* 值分别为 0.73、0.66、0.59, 平均值为 0.66, 与模型模拟计算值 0.67 的相对误差为 -1.5%; 线性回归方法估算的 *k_{PHA,HPR}* 值分别为 0.61、0.59、0.62, 平均值为 0.61, 与模型模拟计算值 0.57 相比较, 相对误差为 7.0%. 根据实测结果线性回归得到的值与模型模拟计算值比较, 相对误差均在 10% 以内, 同样证明了在饱食期 *k_{PHA,OUR}* 和 *k_{PHA,HPR}* 保持为常数的假设成立.

表 1 3 种不同乙酸基质浓度下同时储存生长过程 OUR-HPR 模拟结果

Table 1 Model calibration for OUR-HPR under three different acetate concentrations

基质浓度 /mg·L ⁻¹	时间/min	<i>S_s</i> 储存耗氧速率 (OUR _{STO}) /mg·(L·min) ⁻¹	总耗氧速率(OUR _{TOT}) /mg·(L·min) ⁻¹	OUR _{STO} OUR _{TOT}	<i>S_s</i> 储存质子消耗速率 (HPR _{STO}) /mg·(L·min) ⁻¹	总质子消耗速率 (HPR _{TOT}) /mg·(L·min) ⁻¹	HPR _{STO} HPR _{TOT}
100	0	0.818 8	1.144	0.72	0.067 26	0.117 1	0.57
	3	0.819	1.146	0.71	0.067 39	0.116 9	0.58
	6	0.818 7	1.148	0.71	0.067 48	0.116 6	0.58
	9	0.818	1.149	0.71	0.067 53	0.116 2	0.58
	12	0.816 4	1.149	0.71	0.067 51	0.115 7	0.58
	15	0.813 6	1.148	0.71	0.067 38	0.115 1	0.59
	18	0.808 8	1.146	0.71	0.067 06	0.114 2	0.59
	21	0.800 5	1.140	0.70	0.066 36	0.112 8	0.59
	24	0.784 9	1.128	0.70	0.064 72	0.110 1	0.59
200	27	0.750 9	1.100	0.68	0.059 62	0.102 4	0.58
	0	0.791 3	1.153	0.69	0.058 94	0.111	0.53
	6	0.794 8	1.160	0.69	0.059 28	0.110 5	0.54
	12	0.798 1	1.166	0.68	0.059 61	0.110 1	0.54
	18	0.801 1	1.173	0.68	0.059 92	0.109 6	0.55
	24	0.803 9	1.179	0.68	0.060 2	0.109 1	0.55
	30	0.806 1	1.184	0.68	0.060 44	0.108 5	0.56
	36	0.807 5	1.189	0.68	0.060 58	0.107 7	0.56
	42	0.807 1	1.192	0.68	0.060 53	0.106 7	0.57
300	48	0.802 6	1.191	0.67	0.059 95	0.104 9	0.57
	54	0.785	1.177	0.67	0.056 85	0.099 24	0.57
	0	0.742 9	1.153	0.64	0.063 12	0.116 1	0.54
	9	0.749 3	1.166	0.64	0.063 85	0.116	0.55
	18	0.755 7	1.178	0.64	0.064 57	0.115 8	0.56
	27	0.762 1	1.190	0.64	0.065 29	0.115 6	0.56
	36	0.768 3	1.202	0.64	0.065 99	0.115 4	0.57
	45	0.774 1	1.214	0.64	0.066 68	0.115 1	0.58
	54	0.779 5	1.225	0.64	0.067 31	0.114 8	0.59
平均值	63	0.783 7	1.236	0.63	0.067 83	0.114 2	0.59
	72	0.784 9	1.243	0.63	0.068 06	0.113 2	0.60
	81	0.775 3	1.24	0.63	0.067 07	0.110 4	0.61
	标准差			0.030			0.019
离散系数/%				4.5	3.3		

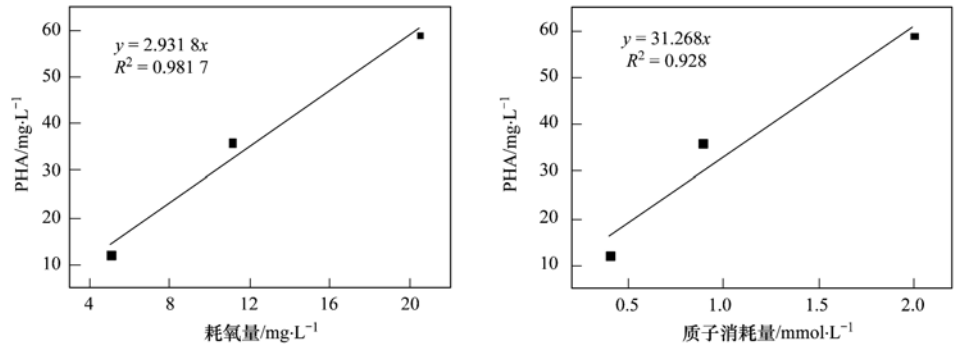


图 1 100 mg·L⁻¹ 乙酸浓度下, PHA 与耗氧量、质子消耗量之间的线性关系

Fig. 1 Linear relationship between consumption of OUR, HPR and PHA under 100 mg·L⁻¹ of acetate

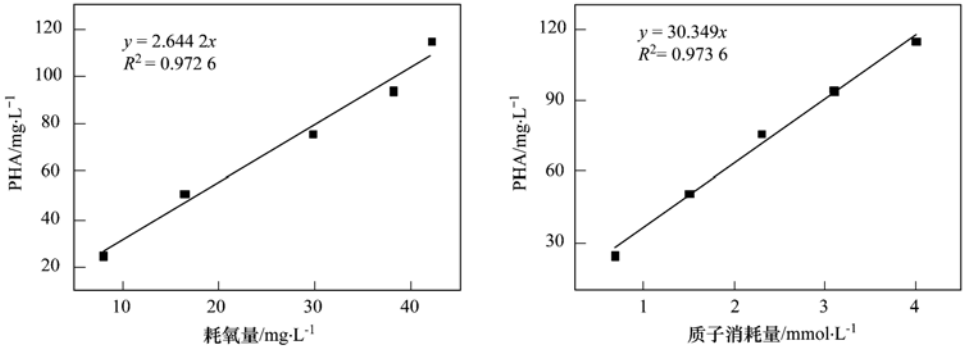


图 2 200 mg·L⁻¹ 乙酸浓度下, PHA 与耗氧量、质子消耗量之间的线性关系

Fig. 2 Linear relationship between consumption of OUR, HPR and PHA under 200 mg·L⁻¹ of acetate

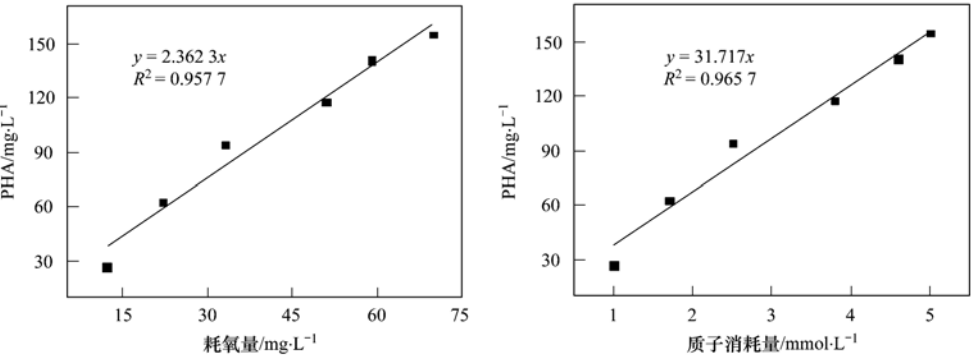


图 3 300 mg·L⁻¹ 乙酸浓度下, PHA 与耗氧量、质子消耗量之间的线性关系

Fig. 3 Linear relationship between consumption of OUR, HPR and PHA under 300 mg·L⁻¹ of acetate

表 2 利用线性回归计算参数 $k_{\text{PHA,OUR}}$ 和 $k_{\text{PHA,HPR}}$

Table 2 Calculation of parameter based on linear regression

基质浓度 /mg·L ⁻¹	基于 OUR 线性 回归系数 K	$k_{\text{PHA,OUR}}$	基于 HPR 线性 回归系数 K	$k_{\text{PHA,HPR}}$
100	2.93	0.73	31.26	0.61
200	2.644	0.66	30.34	0.59
300	2.362	0.59	31.71	0.62

2.2 PHA 的预测

图 4 给出了 OUR、HPR 的预测曲线及实测 PHA 值. 基质饱食期建立的 PHA 与 OUR、HPR 的

2 个方程对于 PHA 的预测整体趋势较好, 实验测得的 PHA 值均落在 OUR-HPR 预测曲线附近. 100 mg·L⁻¹ 及 200 mg·L⁻¹ 基质浓度下, HPR 预测曲线更

趋近于实测值; 而 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 基质浓度时, OUR 的预测效果似乎更好. 在实际工程运用中, 可根据不同基质浓度选择更加准确的估测方法. 从图 4 来看, 在初始段, OUR 预测曲线与 HPR 预测曲线有较长时间重合, 曲线分开后可以观察到, OUR 预测曲线与 HPR 预测曲线均有趋于平缓的趋势, 且 OUR 模拟值比 HPR 模拟值大, 在接近饱食期结束时这一差值越发明显 (拐点附近, HPR 预测曲线斜率变化更大). 可能是因为在拐点附近, 系统不能保证严格饱食状态, 而这一变化对于 HPR 的影响更大.

当基质浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 基于 OUR 与 HPR 的相对误差范围分别为 $(-17.96\% \sim 23.28\%)$ 和 $(-19.33\% \sim 20.85\%)$, 平均误差为 18.52% 和 14.35% ; 当基质浓度 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 基于 OUR 与 HPR 的相对误差范围分别为 $(-17.96\% \sim 13.54\%)$ 和 $(-19.33\% \sim 20.85\%)$, 平均误差为 12.91% 和 10.85% ; 当基质浓度 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 基于 OUR 与 HPR 的相对误差范围分别为 $(-22.83\% \sim 28.58\%)$ 和 $(-26.5\% \sim 30.33\%)$, 平均误差为 13.23% 和 17.67% . 导致误差的原因包括: ①活性污泥中的初始 PHA 量, 只有在活性污泥的初始 PHA 量趋于零时, PHA 合成量 (预测值) 才与饱食期活性

污泥中的 PHA 量相等, 实际情况可能并非如此; ②PHA 的测量误差; ③ CO_2 吹脱导致的非线性 HPR 响应^[30], 本研究假设质子消耗的背景值为定值, 这种假设虽然将计算进行了简化, 但对预测结果会产生影响.

Villano 等^[13]在饱食-饥饿过程驯化 PHA 菌群, 用 DO 曲线最低点来预测饱食期的结束, 取饱食期稳定驯化污泥生产 PHA, 产量可达 90% 以上. 本研究提出的预测方程不仅能预测饱食期各时刻 PHA 合成量, 而且 OUR 及 HPR 预测曲线的拐点能够用于指示饱食期的结束^[29], 对实际工况生产 PHA 有重要指示作用.

在理论上, SSAG-SMP 模型在减去内源呼吸的耗氧 (质子消耗) 响应后, 余下的耗氧 (质子消耗) 响应主要包括 3 个过程: 外部基质的好氧储存 (即是 PHA 合成)、基于外部基质的好氧生长及基于内部储存物 PHA 的好氧生长. Sin 等^[31]认为严格饱食情况下, 好氧生长基于内部贮存物这一过程受到抑制, 即是在除去内源呼吸后, 总的耗氧 (质子消耗) 仅来自外部基质的好氧储存 (即 PHA 的合成) 及基于外部基质的好氧生长. 根据 SSAG-SMP 模型, 在忽略基于内部储存物 PHA 的好氧生长的条件下可以导出:

$$K_{\text{PHA}, \text{OUR}} = \frac{Y_{\text{STO}} k_{\text{STO}} f_{\text{STO}}}{(1 - Y_{\text{STO}}) k_{\text{STO}} f_{\text{STO}} + \left(\frac{1}{Y_{\text{u}, \text{s}}} - 1 - k_{\text{UAP}} \right) \mu_{\text{H}, \text{s}} (1 - f_{\text{STO}})} \quad (6)$$

$$K_{\text{PHA}, \text{HPR}} = \frac{Y_{\text{STO}} k_{\text{STO}} f_{\text{STO}}}{\frac{m}{C} k_{\text{STO}} f_{\text{STO}} + \left(\frac{m}{Y_{\text{H}, \text{s}} C} + \frac{i_{\text{NBM P}}}{14} \right) \mu_{\text{H}, \text{s}} (1 - f_{\text{STO}})} \quad (7)$$

方程 (6) 和 (7) 右边的符号均是 SSAG-SMP 模型的相关参数 (常数). 因此, 在利用 OUR 和 HPR 监测数据在线估计 PHA 合成量前, 需要进行模型校核^[32,33], 再根据方程 (6) 和 (7) 计算常数 $K_{\text{PHA}, \text{OUR}}$ 和 $K_{\text{PHA}, \text{HPR}}$. 但是, 前述线性回归分析的结果表明,

线性回归方法完全可以替代复杂的模型校核方法, 直接确定 PHA 与氧消耗量、质子消耗量间的线性系数 $K_{\text{PHA}, \text{OUR}}$ 和 $K_{\text{PHA}, \text{HPR}}$, 这将极大地减少基于 OUR 和 HPR 监测数据在线估计 PHA 合成量的复杂性和工作量.

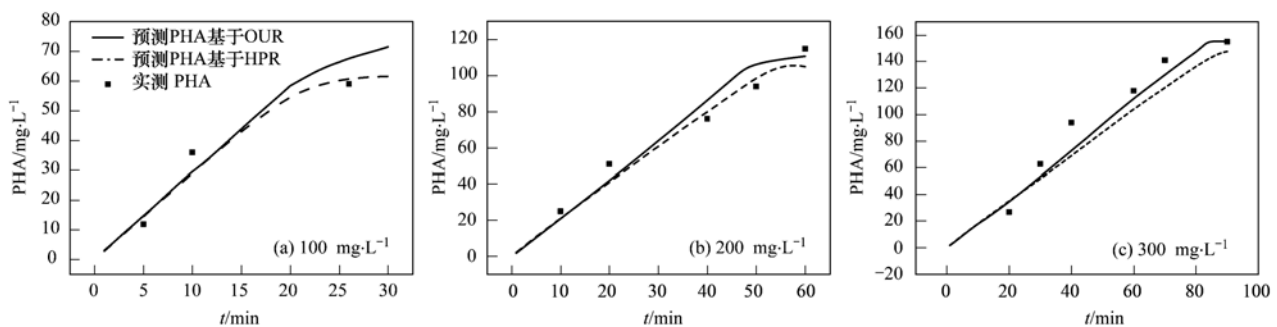


图 4 基于 OUR-HPR 预测基质浓度在 100 、 200 及 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 PHA 浓度

Fig. 4 Predicted value of PHA based on OUR- HPR under $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

相比而言, OUR 测量方法更为成熟, 应用于各种好氧反应系统中. 其优点在于响应信号明显, 由内源呼吸等产生的氧气消耗速率背景值在整个反应过程中一致. 但实际 PHA 生产常采用厌氧-好氧活性污泥工艺, 这在一定程度上限制了 OUR 测量方法的应用范围. 相比于 OUR 测量, HPR 适用于任何涉及质子产生及消耗的反应系统, 应用前景更为广泛. 但 HPR 测量方法得到的响应信号较小, 且反应系统中背景质子产生速率在实验过程中并非恒定, 这在一定程度上会增大误差, 因而还需要更多的研究来提高 HPR 测量的准确性.

3 结论

在饱食期(外部基质充足时), PHA 储存氧气消耗分数 $k_{\text{PHA,OUR}}$ 和质子消耗分数 $k_{\text{PHA,HPR}}$ 为常数, 说明 PHA 合成速率与 OUR、HPR 存在线性关系. 利用 OUR、HPR 与 PHA 之间的线性关系估计饱食期 PHA 的合成量具有可行性.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Chang H F, Chang W C, Tsai C Y. Synthesis of poly(3-hydroxybutyrate/3-hydroxyvalerate) from propionate-fed activated sludge under various carbon sources [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **113**: 51-57.
- [3] Mozumder M S I, Wever H D, Volcke E I P, *et al.* A robust fed-batch feeding strategy independent of the carbon source for optimal polyhydroxybutyrate production [J]. *Process Biochemistry*, 2014, **49**(3): 365-373.
- [4] 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.
- [5] Beccari M, Bertin L, Dionisi D, *et al.* Exploiting olive oil mill effluents as a renewable resource for production of biodegradable polymers through a combined anaerobic-aerobic process [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2009, **84**(6): 901-908.
- [6] Yuan H Y, Chen Y G, Zhang H X, *et al.* Improved bioproduction of short-chain fatty acids (SCFAs) from excess sludge under alkaline conditions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(6): 2025-2029.
- [7] 盛欣英, 熊惠磊, 孙润, 等. 利用剩余污泥水解酸化液合成聚羟基脂肪酸酯的研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(11): 2047-2052.
- [8] Carta F, Beun J J, Van Loosdrecht M C M, *et al.* Simultaneous storage and degradation of PHB and glycogen in activated sludge cultures [J]. *Water Research*, 2001, **35**(11): 2693-2701.
- [9] Dircks K, Beun J J, Van Loosdrecht M, *et al.* Glycogen metabolism in aerobic mixed cultures [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2001, **73**(2): 85-94.
- [10] Lemos P C, Serafim L S, Reis M A M. Synthesis of polyhydroxyalkanoates from different short-chain fatty acids by mixed cultures submitted to aerobic dynamic feeding [J]. *Journal of Biotechnology*, 2006, **122**(2): 226-238.
- [11] 陈志强, 邓毅, 黄龙, 等. 进水底物浓度对蔗糖废水产酸合成 PHA 影响研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2295-2301.
- [12] Reis M A M, Serafim L S, Lemos P C, *et al.* Production of polyhydroxyalkanoates by mixed microbial cultures [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2003, **24**(6): 377-385.
- [13] Villano M, Valentino F, Barbetta A, *et al.* Polyhydroxyalkanoates production with mixed microbial cultures: from culture selection to polymer recovery in a high-rate continuous process [J]. *New Biotechnology*, 2013, **31**(4): 289-296.
- [14] Beun J J, Paletta F, Van Loosdrecht M C, *et al.* Stoichiometry and kinetics of poly-β-hydroxybutyrate metabolism in aerobic, slow growing, activated sludge cultures [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2000, **67**(4): 379-389.
- [15] Dias J M L, Serafim L S, Lemos P C, *et al.* Mathematical modelling of a mixed culture cultivation process for the production of polyhydroxybutyrate [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, **92**(2): 209-222.
- [16] Johnson K, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C. Model-based data evaluation of polyhydroxybutyrate producing mixed microbial cultures in aerobic sequencing batch and fed-batch reactors [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **104**(1): 50-67.
- [17] Dias J M L, Oehmen A, Serafim L S, *et al.* Metabolic modelling of polyhydroxyalkanoate copolymers production by mixed microbial cultures [J]. *BMC Systems Biology*, 2008, **2**: 59.
- [18] Oehmen A, Keller-Lehmann B, Zeng R J, *et al.* Optimisation of poly-β-hydroxyalkanoate analysis using gas chromatography for enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1070**(1-2): 131-136.
- [19] Pardelha F, Albuquerque M G E, Reis M A M, *et al.* Flux balance analysis of mixed microbial cultures: application to the production of polyhydroxyalkanoates from complex mixtures of volatile fatty acids [J]. *Journal of Biotechnology*, 2012, **163**(2-3): 336-345.
- [20] Pardelha F, Albuquerque M G E, Carvalho G, *et al.* Segregated flux balance analysis constrained by population structure/function data: The case of PHA production by mixed microbial cultures [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2013, **110**(8): 2267-2276.
- [21] Mesquita D P, Leal C, Cunha J R, *et al.* Prediction of intracellular storage polymers using quantitative image analysis in enhanced biological phosphorus removal systems [J]. *Analytica*

- Chimica Acta, 2013, **770**: 36-44.
- [22] Dias J M L, Pardelha F, Eusébio M, *et al.* On-line monitoring of PHB production by mixed microbial cultures using respirometry, titrimetry and chemometric modelling [J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(4): 419-427.
- [23] 张欣, 张代钧, 卢培利, 等. 应用呼吸-滴定测量监测硝化动态过程 [J]. 中国环境科学, 2010, **30**(10): 1316-1322.
- [24] Xiao P Y, Cai Q, Zhang D J, *et al.* Characteristics of nitrogen removal and nitrous oxide production in CANON process [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2014, **89**(4): 552-558.
- [25] 国际水协废水生物处理设计与运行数学模型课题组著. 张亚雷, 李泳梅译. 活性污泥数学模型 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [26] Gujer W, Henze M, Mino T, *et al.* Activated sludge model no. 3 [J]. Water Science and Technology, 1999, **39**(1): 183-193.
- [27] Fan J, Lu S G, Qiu Z F, *et al.* An activated sludge model based on activated sludge model number 3 for full-scale wastewater treatment plant simulation [J]. Environmental Technology, 2009, **30**(7): 641-649.
- [28] Reichert P. Aquasim 2.0-User Manual, computer program for the identification and simulation of aquatic systems [M]. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), 1998: 219.
- [29] 高敬. 活性污泥储存与消耗乙酸基质的实验与模拟 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014. 21-34.
- [30] Sin G, Vanrolleghem P A. Extensions to modeling aerobic carbon degradation using combined respirometric-titrimetric measurements in view of activated sludge model calibration [J]. Water Research, 2007, **41**(15): 3345-3358.
- [31] Sin G, Guisasola A, De Pauw D J W, *et al.* A new approach for modelling simultaneous storage and growth processes for activated sludge systems under aerobic conditions [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **92**(5): 600-613.
- [32] Fan J, Vanrolleghem P A, Lu S G, *et al.* Modification of the kinetics for modeling substrate storage and biomass growth mechanism in activated sludge system under aerobic condition [J]. Chemical Engineering Science, 2012, **78**: 75-81.
- [33] Hoque M A, Aravinthan V, Pradhan N M. Calibration of biokinetic model for acetate biodegradation using combined respirometric and titrimetric measurements [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(5): 1426-1434.

CONTENTS

Pollution of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Particulate Matters of Shenzhen	SUN Jian-lin, CHANG Wen-jing, CHEN Zheng-xia, <i>et al.</i> (1513)
Emission Characteristics of VOCs from Typical Restaurants in Beijing	CUI Tong, CHENG Jing-chen, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (1523)
Characteristics Analysis of Sulfur Dioxide in Pearl River Delta from 2006 to 2010	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (1530)
Comparison Test Between PM _{2.5} Continuous Monitoring System and Manual Sampling Analysis for PM _{2.5} in Ambient Air	WANG Qiang, ZHONG Qi, CHI Ying, <i>et al.</i> (1538)
Determination and Emission of Condensable Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	PEI Bing (1544)
Potential Carbon Fixation Capability of Non-photosynthetic Microbial Community at Different Depth of the South China Sea and Its Response to Different Electron Donors	FANG Feng, WANG Lei, XI Xue-fei, <i>et al.</i> (1550)
Remote Sensing Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Inland Lakes Based on GOCI Image and Optical Classification of Water Body	FENG Chi, JIN Qi, WANG Yan-nan, <i>et al.</i> (1557)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Qingshuijiang River Basin at Wet Season in Guizhou Province	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (1565)
Temporal-spatial Variation and Source Identification of Hydro-chemical Characteristics in Shima River Catchment, Dongguan City	GAO Lei, CHEN Jian-yao, WANG Jiang, <i>et al.</i> (1573)
Response and Control Factors of Groundwater to Extreme Weather, Jiguan Cave, Henan Province, China	LIU Xiao, YANG Yan, PENG Tao, <i>et al.</i> (1582)
Impact of Rocky Desertification Treatment on Underground Water Chemistry and Dissolved Inorganic Carbon Isotope in Karst Areas	XIAO Shi-zhen, XIONG Kang-ning, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (1590)
Difference of Karst Carbon Sink Under Different Land Use and Land Cover Areas in Dry Season	ZHAO Rui-yi, LIANG Zuo-bing, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (1598)
Vertical Migration Characteristics of Organochlorine Pesticides in Overlying Soil in Karst Terranes and Its Impact on Groundwater	SUN Yu-chuan, WANG Yong-qi, LIANG Zuo-bing, <i>et al.</i> (1605)
Pollution Status and Migration of Mercury in the Sediments of Nansi Lake in Shandong Province	CAO Fei-fei, YANG Li-yuan, PANG Xu-gui, <i>et al.</i> (1615)
Response of Sediment Micro Environment and Micro Interface to Physical Disturbance Intensity Under the Disturbance of <i>Chironomus plumosus</i>	SHI Xiao-dan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1622)
Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition and Associated Impact on N Transport in the Watershed of Red Soil Area in Southern China	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1630)
Effect of Different Purple Parent Rock on Removal Rates of Nitrogen, Phosphorus and Organics in Landscape Water	HUANG Xue-jiao, LIU Xiao-chen, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1639)
Effects of <i>Litchi chinensis</i> Defoliation on Growth and Photosynthesis of <i>Microcystis aeruginosa</i>	WANG Xiao-xiong, JIANG Chen-chun, LI Jin-wei, <i>et al.</i> (1648)
Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to Green Algae	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (1655)
Formation Mechanism of the Disinfection By-product 1,1-Dichloroacetone in Drinking Water	DING Chun-sheng, MENG Zhuang, XU Yang-yang, <i>et al.</i> (1662)
Degradation Kinetics and Formation of Disinfection By-products During Linuron Chlorination in Drinking Water	LING Xiao, HU Chen-yan, CHENG Ming, <i>et al.</i> (1668)
Interference for Various Quench Agents of Chemical Disinfectants on Detection of Endotoxin Activities in Water	ZHANG Can, LIU Wen-jun, SHI Yun, <i>et al.</i> (1674)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Dairy Manure Biochar	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei, DIAO Jing-ru, <i>et al.</i> (1678)
Absorption of Uranium with Tea Oil Tree Sawdust Modified by Succinic Acid	ZHANG Xiao-feng, CHEN Di-yun, PENG Yan, <i>et al.</i> (1686)
Effect of Membrane Wettability on Membrane Fouling and Chemical Durability of SPG Membranes	ZHANG Jing, XIAO Tai-min, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1694)
TiO ₂ -Induced Photodegradation of Levofloxacin by Visible Light and Its Mechanism	GUO Hong-sheng, LIU Ya-nan, QIAO Qi, <i>et al.</i> (1700)
Performance of Novel Macromolecule Flocculant in the Treatment of Wastewater Containing Cr(VI) Ions	WANG Gang, DU Feng-ling, CHANG Qing, <i>et al.</i> (1707)
On-line Estimation for the Amount of Stored PHA in Activated Sludge Based on OUR-HPR Measurements	ZENG Shan-wen, WANG Ze-yu, GAO Jing, <i>et al.</i> (1713)
Formation Mechanism of Self-forming Dynamic Membrane During Separation of High-concentration Sewage Sludge Fermented for Acid Production	HUANG Shuai, LIU Hong-bo, YIN Bo, <i>et al.</i> (1720)
Influence of Air Flux on Municipal Sludge Biodrying in a Pilot Scale Test	ZHANG Yu, HAN Rong, LU Wen-jing, <i>et al.</i> (1727)
Extraction of Heavy Metals from Sludge Using Biodegradable Chelating Agent <i>N,N</i> -bis(carboxymethyl) Glutamic Acid Tetrasodium	WU Qing, CUI Yan-rui, TANG Xiao-xiao, <i>et al.</i> (1733)
Biodiversity and Function Analyses of BIOLAK Activated Sludge Metagenome	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin, <i>et al.</i> (1739)
Characteristics of Nitrogen Removal by a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium YL	LIANG Xian, REN Yong-xiang, YANG Lei, <i>et al.</i> (1749)
Biodegradation Characteristics and Kinetics of <i>p</i> -nitrophenol by Strain <i>Arthrobacter</i> sp. CN2	REN Lei, SHI Yan-hua, JIA Yang, <i>et al.</i> (1757)
Biodegradation of Pyrene by Intact Cells and Spores of <i>Brevibacillus brevis</i>	LIU Zhi-chen, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (1763)
Investigation of Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in Landfill	LI Lei, XU Jing, ZHAO You-cai, <i>et al.</i> (1769)
Investigation of Antibiotic Resistance of Indigenous Bacteria and Abundance of Class I Integron in Matrix of Constructed Wetlands of Different Configurations	MAI Xiao-bei, TAO Ran, YANG Yang, <i>et al.</i> (1776)
Effects of Nitrate and CH ₄ on Anaerobic Oxidation of BETX in Landfill Cover Soils	LIU Rong, LONG Yan, WANG Li-li, <i>et al.</i> (1785)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Planted Larch Forest in Shanxi Plateau	YAN Jun-xia, LI Hong-jian, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (1793)
Effects of Nitrogen Fertilization on Soil Respiration and Temperature Sensitivity in Spring Maize Field in Semi-Arid Regions on Loess Plateau	JIANG Ji-shao, GUO Sheng-li, WANG Rui, <i>et al.</i> (1802)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Street Dusts in Xuanwei and Their Health Risk Assessment	ZHANG Wen-chao, LÜ Sen-lin, LIU Ding-yu, <i>et al.</i> (1810)
Spatial Distribution of Magnetic Properties of Street Dust in Baoji City and Its Implications of Environment	ZHANG Jun-hui, WANG Jin, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (1818)
Effect of Long-term Fertilizer Application on the Stability of Organic Carbon in Particle Size Fractions of a Paddy Soil in Zhejiang Province, China	MAO Xia-li, LU Kou-ping, SUN Tao, <i>et al.</i> (1827)
Effects of Different Reclaimed Scenarios on Soil Microbe and Enzyme Activities in Mining Areas	LI Jun-jian, LIU Feng, ZHOU Xiao-mei (1836)
Soil Microorganism Characteristics and Soil Nutrients of Different Wetlands in Sanjinag Plain, Northeast China	XIAO Ye, HUANG Zhi-gang, WU Hai-tao, <i>et al.</i> (1842)
Strengthening Effects of Sodium Salts on Washing Kerosene Contaminated Soil with Surfactants	HUANG Zhao-lu, CHEN Quan-yuan, ZHOU Juan, <i>et al.</i> (1849)
Effects and Biological Response on Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil	YANG Qian, WU Man-li, NIE Mai-qian, <i>et al.</i> (1856)
Enhanced Phytoremediation of Heavy Metals from Contaminated Soils Using <i>Sedum alfredii</i> Hance with Biodegradable Chelate GLDA	WEI Ze-bin, CHEN Xiao-hong, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (1864)
Speciation Characteristics and Bioavailability of Heavy Metals in Oasis Soil Under Pb, Zn Combined Stress	JIN Cheng, ZHAO Zhuan-jun, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (1870)
Influence of Sulfur on the Formation of Fe-Mn Plaque on Root and Uptake of Cd by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	WANG Dan, LI Xin, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (1877)
Effects of Ozone on Photosynthesis of Several Plants	LI Miao-miao (1888)
A Method Research on Environmental Damage Assessment of a Truck Rollover Pollution Incident	CAI Feng, ZHAO Shi-bo, CHEN Gang-cai, <i>et al.</i> (1902)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年5月15日 第36卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 5 May 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行