

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第7期

Vol.34 No.7

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

唐山市大气颗粒物 OC/EC 浓度谱分布观测研究 郭育红, 辛金元, 王跃思, 温天雪, 李杏茹, 封孝信 (2497)

北京东灵山地区主要大气污染物浓度变化特征 于阳春, 胡波, 王跃思 (2505)

奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 王效科, 任玉芬, 宋文质 (2512)

华东森林及高山背景区域臭氧变化特征及影响因素 苏彬彬 (2519)

北京市居家空气微生物粒径及分布特征研究 方治国, 孙平, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2526)

民用燃煤源中多环芳烃排放因子实测及其影响因素研究 海婷婷, 陈颖军, 王艳, 田崇国, 林田 (2533)

醇类汽油车醇醛酮、芳香烃和烯烃类排放的试验研究 张凡, 王建华, 王小臣, 王建昕 (2539)

微波解吸-催化燃烧净化甲苯研究 曹晓强, 张浩, 黄学敏 (2546)

生物滴滤池对 BTEX 的去除及相应细菌群落分析 李建军, 廖东奇, 许玫英, 孙国萍 (2552)

炼油厂废水处理站挥发性羰基化合物成分谱研究 周博宇, 刘旺, 王伯光, 周咪, 黄青, 周磊 (2560)

春季东、黄海溶解甲烷的分布和海水交换通量 曹兴朋, 张桂玲, 马啸, 张国玲, 刘素美 (2565)

千岛湖湖泊区水体季节性分层特征研究 董春颖, 虞左明, 吴志旭, 吴春金 (2574)

新安江流域土地利用结构对水质的影响 曹芳芳, 李雪, 王东, 赵越, 王玉秋 (2582)

长江中下游草型湖泊浮游植物群落及其与环境因子的典范对应分析 孟睿, 何连生, 过龙根, 席北斗, 李中强, 舒俭民, 刁晓君, 李必才 (2588)

河口盐度梯度下溶解态核酸的微生物可利用性 杨青青, 李朋辉, 黄清辉 (2597)

水藻暴发的影响因素定量研究初步 张卓, 宋志尧, 黄昌春, 俞肇元 (2603)

深水型水库藻类功能组时空演替及生境变化的影响 卢金锁, 胡亚潘 (2611)

结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度 周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦 (2618)

Subwet 模型在人工湿地设计中的应用 李慧峰, 黄津辉, 林超 (2628)

白洋淀荷茎叶提取液对铜绿微囊藻及四尾栅藻化感效应 何连生, 孟繁丽, 刁晓君, 李一葳, 孟睿, 席北斗, 舒俭民 (2637)

苦草 (*Vallisneria spiralis*) 对城市缓流河道黑臭底泥理化性质的影响 许宽, 刘波, 王国祥, 马久远, 曹勋, 周锋 (2642)

铁屑-微生物协同还原去除水体中 Cr(VI) 研究 汤洁, 王卓行, 徐新华 (2650)

铁铜催化剂非均相 Fenton 降解苯酚及机制研究 杨岳主, 李玉平, 杨道武, 段锋, 曹宏斌 (2658)

不同形态无机氮对水中微量药物安替比林光降解效能影响 赵倩, 陈超, 封莉, 张立秋 (2665)

邻苯二甲酸二甲酯的紫外光-H₂O₂ 降解机制研究 刘青, 陈成, 陈泓哲, 杨绍贵, 何欢, 孙成 (2670)

二胺基改性有序多孔 SBA-15 对溶液中 Cd²⁺ 离子的吸附研究 张萌, 杨亚提, 秦睿, 王力, 张增强, 李忠宏, 李荣华, 孟昭福 (2677)

酸化蛭石的表面有机修饰及其对疏水性微污染物的吸附 蒋争明, 于旭彪, 胡芸, 任源, 李雪辉, 韦朝海 (2686)

基于废陶瓷的多孔陶瓷研制及其对 Ni²⁺ 的吸附性能 张永利, 王承智, 史册, 尚玲玲, 马瑞, 董婉莉 (2694)

树皮支持的厌氧生物法去除地下水中的高氯酸盐 王蕊, 刘菲, 陈楠, 陈鸿汉 (2704)

Cr(VI) 污染地下水修复的 PRB 填料实验研究 朱文会, 董良飞, 王兴润, 翟亚丽 (2711)

化学沉淀法去除稀土湿法冶炼废水中钙与高浓度氨氮研究 王浩, 成官文, 宋晓薇, 徐子涵, 蒙金结, 董传强 (2718)

镍铁尾矿硫酸浸出动力学研究 陈安安, 周少奇, 黄鹏飞 (2729)

HRT 对 A²O 工艺中典型多环麝香迁移转化的影响 刘鹏程, 黄满红, 陈东辉, 陈亮 (2735)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟 张超, 陈银广 (2741)

强化污泥利用水解反应器改善碳源与污泥减量作用研究 熊娅, 王强, 宋英豪, 朱民, 林秀军 (2748)

污泥胞外聚合物的提取方法及其对污泥脱水性能的影响 周俊, 周立祥, 黄焕忠 (2752)

不同粒径铁铝泥对砷(III)的吸附效果 林璐, 胥嘉瑞, 吴昊, 王昌辉, 裴元生 (2758)

我国畜禽粪便污染的区域差异与发展趋势分析 仇焕广, 廖绍攀, 井月, 栾江 (2766)

浙北平原富硒土壤资源区硒来源的定量分离 徐明星, 潘卫丰, 岑静, 马学文 (2775)

三江平原土地利用方式变化对土壤锰形态影响 张仲胜, 吕宪国, 宋晓林 (2782)

吉林前郭水田土壤有机碳垂向分布规律和储量研究 汤洁, 张雯辉, 李昭阳, 张楠, 胡猛 (2788)

关中地区农田土壤有机碳固存速率及影响因素: 以陕西武功县为例 张晓伟, 许明祥 (2793)

三峡库区不同林草措施土壤活性有机碳及抗蚀性研究 黄茹, 黄林, 何丙辉, 周立江, 于传, 王峰 (2800)

土壤自养微生物同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究: ¹⁴C 连续标记法 史然, 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 葛体达, 隋方功, 童成立, 吴金水 (2809)

西南丘陵区保护性耕作下小麦农田土壤呼吸及影响因素分析 张赛, 张晓雨, 王龙昌, 罗海秀, 周航飞, 马仲炼, 张翠微 (2815)

丹江口水库迁建区土壤有机氯农药的分布特征及风险评价 李子成, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 赵艳民, 时瑶 (2821)

农药企业场地苯系物污染风险及调控对策 虎博, 王铁宇, 杜立宇, 谭冰, 朱朝云, 吕永龙 (2829)

水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 王荣萍, 陈能场, 卢普相 (2837)

硝酸盐对沉积物中有机物氧化减量及微生物群落结构的影响 刘近, 邓代永, 孙国萍, 刘永定, 许玫英 (2847)

零价铁对脱色希瓦氏菌 S12 偶氮还原的促进作用 周庆, 陈杏娟, 郭俊, 孙国萍, 许玫英 (2855)

2 株好氧反硝化菌的筛选及其强化贫营养生物膜脱氮效果 全向春, 岑艳, 钱殷 (2862)

反硝化聚磷菌快速富集、培养及其荧光原位杂交技术鉴别 刘立, 汤兵, 黄绍松, 付丰连, 张启泰, 黎健彬, 罗建中 (2869)

1 株反硝化除磷菌的鉴定及其反硝化功能基因研究 张倩, 王弘宇, 桑稳姣, 李孟, 杨开, 马放 (2876)

1 株高效 BBP 降解菌的分离与特性研究 陈湖星, 杨雪, 张凯, 钟秋, 郭佳, 王攀, 熊丽, 刘德立 (2882)

微生物-化学水解联合作用下烟嘧磺隆的降解 张小林, 李咏梅, 袁志文 (2889)

扑草净降解菌的分离、筛选与鉴定及降解特性初步研究 周际海, 孙向婷, 胡锋, 李辉信 (2894)

固定化 *Lysinibacillus cresolovorans* 的 PVA-SA-PHB-AC 复合载体制备及间甲酚的降解 李婷, 任源, 韦朝海 (2899)

生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 表面活性物质提取与其破乳特性分析 黄翔峰, 张树聪, 彭开铭, 陆卫君, 刘佳 (2906)

A²O 工艺活性污泥中可培养丝状细菌的多样性 高莎, 金德才, 赵志瑞, 齐嵘, 彭霞微, 白志辉 (2912)

生活垃圾堆肥渗滤液污染物组成与演化规律研究 李丹, 何小松, 席北斗, 魏自民, 潘红卫, 赵国鹏, 崔东宇 (2918)

专辑征稿通知 (2551) 《环境科学》征稿简则 (2685) 《环境科学》征订启事 (2868) 信息 (2875)

发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模拟

张超¹, 陈银广²

(1. 石油化工科学研究院中国石化水处理中心, 北京 100083; 2. 同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 发酵液是一种优质的碳源, 能够提高生物除磷系统(EBPR)的除磷效果. 采用基于碳源代谢的修正 ASM2 模型, 能够较好地模拟发酵液作为 EBPR 碳源的动力学变化规律. 发酵液作为 EBPR 唯一碳源时, 系统中的异养菌不仅不对聚磷菌(PAO)的生长构成竞争关系, 反而促进 PAO 的生长. 发酵液作为实际污水的补充碳源时, 优化了污水中的碳源组成, 创造了有利于聚磷菌生长的环境, 使 EBPR 中聚磷菌达到微生物总量的 40% 以上, 比实际污水作为碳源的 EBPR 中的 PAO 含量提高了 3.3 倍.

关键词: 增强生物除磷; 聚磷菌; 发酵液; 动力学; 模拟

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)07-2741-07

Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source

ZHANG Chao¹, CHEN Yin-guang²

(1. Water Treatment Center of SINOPEC, Research Institute of Petroleum Processing, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: As a high-quality carbon source, fermentation broth could promote the phosphorus removal efficiency in enhanced biological phosphorus removal (EBPR). The transformation of substrates in EBPR fed with fermentation broth was well simulated using the modified activated sludge model No. 2 (ASM2) based on the carbon source metabolism. When fermentation broth was used as the sole carbon source, it was found that heterotrophic bacteria acted as a promoter rather than a competitor to the phosphorus accumulating organisms (PAO). When fermentation broth was used as a supplementary carbon source of real municipal wastewater, the wastewater composition was optimized for PAO growth; and the PAO concentration, which was increased by 3.3 times compared to that in EBPR fed with solely real municipal wastewater, accounting for about 40% of the total biomass in the reactor.

Key words: enhanced biological phosphorus removal (EBPR); phosphorus accumulating organisms (PAO); fermentation broth; kinetics; simulation

近年来, 污泥发酵产生的有机酸作为生物除磷的碳源引起越来越多的关注^[1~13]. 例如, Thomas 等^[1]向 Noosa 污水处理厂的进水中补充初沉污泥发酵液后, 发现出水磷浓度由 2.2 mg·L⁻¹ 下降至 0.4 mg·L⁻¹. Tong 等^[2]分别以乙酸和剩余污泥发酵液作为 EBPR 碳源, 发现在相同的操作下, 使用发酵液作为碳源的除磷效率约为 100%, 而使用乙酸的除磷效率仅有 70% 左右; Tong 等^[5]还将剩余污泥发酵液作为实际污水的补充碳源, 发现当发酵液与实际污水的体积比为 1/65 时, 出水溶解性磷(SOP)可以达到国家一级 A 排放标准, 表明发酵液是一种优质除磷碳源, 随后 Li 等^[9]在中试试验中证实了发酵液作为实际污水补充碳源的可行性. 研究发酵液作为 EBPR 唯一碳源和补充碳源的动力学过程对于深入认识发酵液促进增强生物除磷的机制、指导污水厂的稳定运行具有重要意义, 但是迄今鲜见报道. 因此, 本研究探讨了发酵液作为唯一碳源和补充碳

源的动力学模型, 确定了相关参数, 并对动力学过程和微生物变化进行了模拟.

1 材料与方法

在 pH = 10 的条件下将某污水厂剩余污泥发酵 8 d^[14], 按照课题组开发的碱性发酵污泥脱水方法^[15]获取发酵液, 稀释后作为 EBPR 的唯一碳源. 稀释后的发酵液中含有(平均值, 以 COD 或 P 计)溶解性 COD(SCOD)约 340 mg·L⁻¹, 其中短链脂肪酸(SCFAs)约 210 mg·L⁻¹ (包含 30.9% 乙酸、28.4% 丙酸、8.6% 正丁酸、11.5% 异丁酸、2.9% 正戊酸和 17.6% 异戊酸), 并补充适量的磷酸盐使

收稿日期: 2012-10-31; 修订日期: 2013-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(50408039); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA06Z326); 中国石化基础科研项目(311047)

作者简介: 张超(1981~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为废水生物处理与污泥资源化, E-mail: zhangchao_seu@163.com

SOP 为 $11.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. EBPR 采用 SBR 方式运行, 每周 8 h(包含 2 h 厌氧 + 3 h 好氧, 其余为静置、排水和闲置阶段) 每天 3 个周期. 反应器有效体积为 3.5 L, 每周进水 2.5 L, 控制污泥龄为 12 d, VSS 为 $2700 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. EBPR 运行稳定, 典型周期的物质代谢变化如表 1 所示.

发酵液作为补充碳源时 EBPR 运行方式同上, 实际污水取自上海某污水处理厂初沉池的出水, 含有(平均值, 以 COD 或 P 计) TCOD $176 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SCOD $141 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SCFAs $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (其中乙酸 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 丙酸 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), SOP 为 $4.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 向实际污水中补充污水体积 1/65 的发酵液作为 EBPR 的进水^[5], 补充后进水 SOP 约 $4.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (发酵液含有少量 SOP 所致).

测试方法: SCFAs、SCOD、TCOD 采用文献[15]的方法, SOP、PHA、糖原采用文献[16]的方法.

表 1 发酵液作为 EBPR 碳源时组分变化

Table 1 Changes in compositions of the EBPR fed with fermentation broth

项目	厌氧始	厌氧末	好氧末
细胞内 PHA(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	41.6	259.6	36.4
细胞内糖原(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	437.8	372.1	479.6
SOP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	11.5	78.8	0.15
SCOD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	347	98	71
BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	271	24	6
SCFAs(以 COD 计)/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	214	0	0

2 动力学模型的建立

当发酵液作为唯一碳源时, 由表 1 可以看出, 厌氧末含有较高的 SCOD, 然后在好氧阶段被消耗. 根据 ASM2 模型^[17, 18], 在这种运行环境下异养菌将出现增殖, 因此, 不能忽略 EBPR 中异养菌(X_H , 这里

表示除聚磷菌之外的所有异养菌) 的生长.

2.1 模型参数

发酵液物质成分比较复杂, 不仅含有除乙酸和丙酸之外的其它短链脂肪酸, 还含有多糖、蛋白质等大分子物质, 以及其它未知的物质, 因此, 按照 ASM2 模型的建议, 将发酵液组分作出如下划分:

$$S_{\text{SCOD}} = S_S + S_I \quad (1)$$

$$S_S = S_{\text{SCFAs}} + S_F \quad (2)$$

式中, S_{SCOD} 为进水中溶解性 COD; S_{SCFAs} 为短链脂肪酸; S_F 为易发酵/降解物质; S_{SCFAs} 与 S_F 之和 S_S 统称为易生物降解底物; S_I 为惰性不可降解有机物. 根据以上划分以及表 1 的数据, 可以近似认为 S_S 为 BOD₅ 的量, 这样 S_I 为 SCOD 与 BOD₅ 之差. 此外, 发酵液中还含有一些慢速可生物降解有机物 X_S , 这部分物质的 X_S 其厌氧水解速率仅有好氧水解速率的 1/10 左右^[17]; 由于污泥厌氧过程经历了约 8 d 的时间, 这部分物质仍然存在, 因此认为这部分物质在 EBPR 的厌氧过程难以水解, 故忽略 X_S 的厌氧水解, 仅考虑其好氧水解过程. 发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模型组分如表 2 所示.

2.2 模型矩阵与过程速率

根据 ASM2 模型, 厌氧/好氧过程中物质之间的转化关系可以用表 3 中的转化因子求得, 与之相应的过程速率列于表 4 中. 与乙酸/丙酸作为碳源相比^[19~21], 发酵液作为碳源时增加了 4 个反应过程, 即 S_F 转化为 S_{SCFAs} 、 X_H 基于 S_F 的生长、 X_S 的水解和 X_H 的水解. 由表 4 中反应 1 可知, 除了污水中原有的 SCFAs 之外, PAO 还将吸收 X_H 在厌氧阶段由 S_F 转化为 S_{SCFAs} 的那部分 SCFAs. 因此, X_H 将影响 PAO 的厌氧代谢, 进而影响 PAO 的好氧计量学.

表 2 发酵液作为 EBPR 碳源的动力学模型组分

Table 2 Definition of components in the kinetic model for EBPR fed with fermentation broth

类别	序号	模型组分	单位	含义
溶解性组分	1	S_{SCFAs}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	溶液中的短链脂肪酸(以 COD 计)
	2	S_F	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	易发酵/降解物质(不包括 S_{SCFAs} , 以 COD 计)
	4	S_I	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	惰性溶解性有机物(以 COD 计)
	5	S_{SOP}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	溶液中的磷酸盐(以 P 计)
	6	S_{O_2}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	溶解氧
	颗粒性组分	7	X_H	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
8		X_{PHA}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PAO 贮存的 PHA(以 COD 计)
9		X_{GLY}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PAO 贮存的糖原(以 COD 计)
10		X_{PP}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	PAO 贮存的聚磷酸盐(以 P 计)
11		X_{PAO}	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	聚磷菌浓度(以 COD 计)
其它组分	12	X_S	$\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	慢速可生物降解有机物(以 COD 计)
	12	pH	—	EBPR 系统好氧阶段 pH 值

表 3 发酵液作为碳源时 EBPR 的过程计量学系数矩阵

Table 3 Matrix of the stoichiometric coefficients for the EBPR metabolic model

序号	反应过程	S_F	S_{SCFAs}	S_I	S_{SOP}	X_S	X_{PHA}	X_{GLY}	X_{PP}	X_H	X_{PAO}
厌氧过程											
1	S_F 转化为 S_{SCFAs}	-1	1								
2	S_{SCFAs} 的厌氧吸收		-1		Y_{SOP}^{SCFAs}		Y_{PHA}^{SCFAs}	$-Y_{GLY}^{SCFAs}$	$-Y_{SOP}^{SCFAs}$		
3	X_{PP} 用于厌氧维持				1				-1		
好氧过程 X_H											
4	X_S 的好氧水解	$1-f_{SI}$		f_{SI}		-1					
5	X_H 基于 S_F 的生长	$-1/Y_H$			$-i_{PBM2}$					1	
6	X_H 的好氧水解				i_{PBM}					-1	
好氧过程 X_{PAO}											
7	X_{PP} 的好氧贮存				-1		$-Y_{PHA}$		1		
8	X_{GLY} 的好氧贮存						$-1/Y_{GLY}$	1			
9	X_{PAO} 的好氧生长				$-i_{PBM}$		$-1/Y_{PAO}$				1
10	X_{PAO} 的好氧水解				i_{PBM}						-1
11	X_{PP} 的好氧水解				1				-1		
12	X_{GLY} 的好氧水解	1						-1			
13	X_{PHA} 的好氧水解	1					-1				

需要指出的是,虽然厌氧和好氧条件下 S_F 均可以转化为 S_{SCFAs} (通过开关函数控制,表 4 反应 1),但是由于 K_{O_2} 为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[17],本研究的好氧溶解氧维持在 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,因此好氧条件下开关函数基本为 0,即好氧速率约等于 0,因此本

研究认为该反应仅发生在厌氧阶段.此外,尽管 ASM2 模型中认为 X_H 好氧条件下可以利用 S_{SCFAs} 进行生长,但是由于 S_{SCFAs} 在厌氧阶段已经被完全吸收,因此这里 X_H 基于 S_{SCFAs} 的生长可以忽略.

表 4 发酵液作为碳源时 EBPR 的过程速率

Table 4 Process reaction rate for EBPR fed with fermentation broth

反应序号	反应过程	过程速率表达式
厌氧过程 X_H		
1	S_F 转化为 S_{SCFAs}	$q_{fe} \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{K_{NO_3}}{K_{NO_3} + S_{NO_3}} \frac{S_F}{K_{fe} + S_F} X_H$
厌氧过程 X_{PAO}		
2	S_{SCFAs} 的厌氧吸收	$q_{SCFAs} \frac{S_{SCFAs}}{K_{SCFAs} + S_{SCFAs}} \frac{X_{PP}/X_{PAO}}{K_{PP} + X_{PP}/X_{PAO}} \frac{X_{GLY,p}/X_{PAO}}{X_{GLY} + X_{GLY,p}/X_{PAO}} X_{PAO}$
3	X_{PP} 用于厌氧维持	$m_{PAO}^{Anaerobic} X_{PAO}$
好氧过程 X_H		
4	X_S 的好氧水解	$K_h \frac{K_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{X_S/X_H}{K_X + X_S/X_H} X_H$
5	X_H 基于 S_F 的生长	$\mu_H \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{SOP}}{K_P + S_{SOP}} \frac{S_F}{K_F + S_F} X_H I_{pH}$
6	X_H 的好氧水解	$b_H X_H$
好氧过程 X_{PAO}		
7	X_{PP} 的好氧贮存	$q_{PP} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{SOP}}{K_{PS} + S_{SOP}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA-PP} + X_{PHA}/X_{PAO}} \frac{(f_{PP}^{Max} - X_{PP}/X_{PAO})}{K_{PP} + (f_{PP}^{Max} - X_{PP}/X_{PAO})} X_{PAO} I_{pH}$
8	X_{GLY} 的好氧贮存	$q_{GLY} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{f_{GLY}^{Max} - X_{GLY}/X_{PAO}}{K_{IG} + (f_{GLY}^{Max} - X_{GLY}/X_{PAO})} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA-GLY} + X_{PHA}/X_{PAO}} X_{PAO} I_{pH}$
9	X_{PAO} 的好氧生长	$\mu_{PAO} \frac{S_{O_2}}{K_{O_2} + S_{O_2}} \frac{S_{SOP}}{K_P + S_{SOP}} \frac{X_{PHA}/X_{PAO}}{K_{PHA} + X_{PHA}/X_{PAO}} X_{PAO} I_{pH}$
10	X_{PAO} 的好氧水解	$b_{PAO} X_{PAO}$
11	X_{PP} 的好氧水解	$b_{PP} X_{PP}$
12	X_{GLY} 的好氧水解	$b_{GLY} X_{GLY}$
13	X_{PHA} 的好氧水解	$b_{PHA} X_{PHA}$

3 发酵液作为 EBPR 唯一碳源的动力学模拟

发酵液作为 EBPR 碳源数学模型中的大部分计量学参数和动力学参数与之前的研究^[19~21]相同,其余有关 PAO 的参数采用文献^[19~21]的方法获取,有关异养菌的参数选用 ASM2 模型的推荐值^[17]. 从表 5 可以看出,以发酵液为唯一碳源时,在厌氧阶段每代谢单位 COD 的发酵液产生 0.86 COD 的 PHA,这低于代谢单位 COD 的混合酸所获得的计量学参数^[19~21],这可能是因为在发酵液中除了含有乙酸和丙

酸之外,还含有正/异丁酸、正/异戊酸等短链脂肪酸. Randall 等^[22]的研究表明,当正戊酸和异戊酸分别作为 EBPR 碳源时,分别合成的 PHA 仅为乙酸作为碳源时的 28% 和 22% 左右,为丙酸作为碳源时的 39% 和 32% 左右. 因此,发酵液作为碳源所得出的 Y_{PHA}^{SCFAs} 小于混合乙酸丙酸的取值. 然而,代谢单位 COD 的发酵液的释磷量、糖原水解量、以及好氧条件下合成的糖原及分解的 PHA 都与代谢混合酸的计量学^[19~21]接近,而且速率常数(q_{SCFAs} 、 q_{GLY} 、 q_{PP})也与代谢混合酸^[19~21]接近.

表 5 发酵液作为碳源时 EBPR 的部分模型参数

Table 5 Parameters in the model for EBPR fed with fermentation broth

计量学参数	量符号及单位	动力学参数	量符号及单位
$Y_{PHA}^{SCFAs} = 0.86$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$q_{SCFAs} = 5$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD}) \cdot t]/g \cdot (g \cdot d)^{-1}$
$Y_{GLY}^{SCFAs} = 0.23$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$q_{GLY} = 2.16$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD}) \cdot t]/g \cdot (g \cdot d)^{-1}$
$Y_{SOP}^{SCFAs} = 0.265$	$[m(\text{P})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$q_{PP} = 1.44$	$[m(\text{P})/m(\text{COD}) \cdot t]/g \cdot (g \cdot d)^{-1}$
$Y_{PHA} = 0.35$	$[m(\text{COD})/m(\text{P})]/g \cdot g^{-1}$	$q_{fe} = 0.125$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD}) \cdot t]/g \cdot (g \cdot d)^{-1}$
$Y_{GLY} = 0.9$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$\mu_H = 6$	d^{-1}
$Y_H = 0.63$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$b_H = 0.1$	d^{-1}
$i_{PBM2} = 0.004$	$[m(\text{P})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$K_{fe} = 30$	$[m(\text{COD})/V]/g \cdot m^{-3}$
$f_{SI} = 0$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$	$K_F = 4$	$[m(\text{COD})/V]/g \cdot m^{-3}$
		$K_h = 3$	d^{-1}
		$K_X = 0.1$	$[m(\text{COD})/m(\text{COD})]/g \cdot g^{-1}$

由于 EBPR 进水中加入了硝化抑制剂 ATU,根据 ASM2 的模型定义,可以认为反应器中仅含有异养菌和聚磷菌两类微生物. 为了确定反应器中异养菌和聚磷菌的数量和比例,假设起始某一周期将等量的异养菌和聚磷菌各 $1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 置于 EBPR 反应器中,根据表 1 所示的污水水质以及表 5 的参数,可以计算出一个月后反应器中异养菌和聚磷菌的数量和比例(图 1). 根据计算所得的微生物量($X_{PAO} = 1975 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $X_H = 309 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),模拟了 EBPR

一个周期的物质转化关系(图 2). 图 2 中还同时模拟了不考虑 pH 抑制作用时的好氧物质转化规律.

由图 1 可以看出,经过长期驯化达到稳定状态后,EBPR 中聚磷菌约为异养菌数量的 6.4 倍. 由表 4 反应 1 可知,当污水中含有较多的溶解性易生物降解有机物时,异养菌的存在不但不会对 PAO 构成竞争关系,相反,还会为 PAO 提供一定量的短链脂肪酸,促进 PAO 的生长.

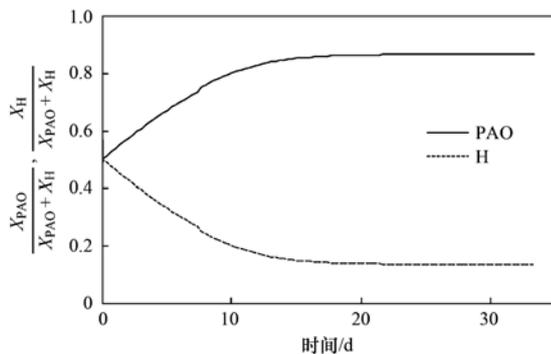
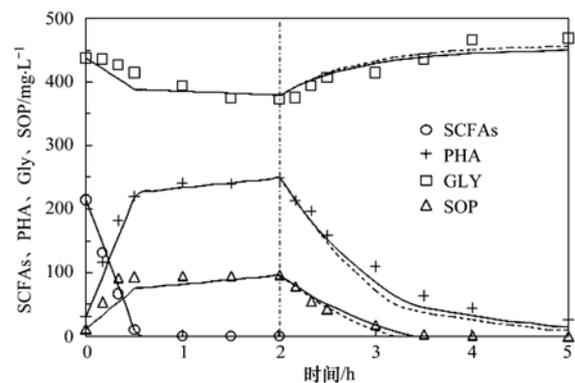


图 1 模拟发酵液作为碳源时反应器内异养菌(H)与聚磷菌(PAO)的比例关系

Fig. 1 Simulation of biomass ratio of PAO to heterotrophic bacteria (H) in EBPR fed with fermentation broth



点:测量值;线:模拟值,实线:pH 对代谢有抑制;虚线:pH 对好氧代谢无抑制

图 2 模型模拟发酵液作为碳源时模拟值与测量值比较
Fig. 2 Calibrated model describing the transformations in PAO fed with fermentation broth

前期研究表明,在好氧阶段除最佳 pH 之外,其它 pH 对聚磷菌会产生抑制作用^[19~21],因此图 3 采用 3 次样条函数拟合了 SBR 好氧 pH 变化规律、以及微生物代谢的抑制系数 I_{pH} 随 pH 的变化规律. 从图 3 可以看出,在好氧阶段,pH 由 7.2 升高到 8.2 左右,然后出现缓慢下降. 当 pH 在 7.4 附近时,pH 不对微生物代谢产生抑制,但是,当 pH 进一步升高,PAO 的 PHA 降解、糖原贮存和聚磷合成均受到

抑制. 这可以从图 2 中看出,当考虑 pH 抑制作用时,PHA 的降解速率明显降低;由于 PAO 好氧代谢的能量来源于 PHA 的降解,因此吸磷速率和糖原合成速率也都减慢. 由图 2 还可以看出,与没有考虑 pH 抑制相比,考虑 pH 抑制的模拟值与测量值比较吻合,这说明以乙酸/丙酸混合酸的计量学和动力学参数为基础、进行预测发酵液作为 EBPR 碳源、同时考虑 pH 抑制的动力学模型是合理的.

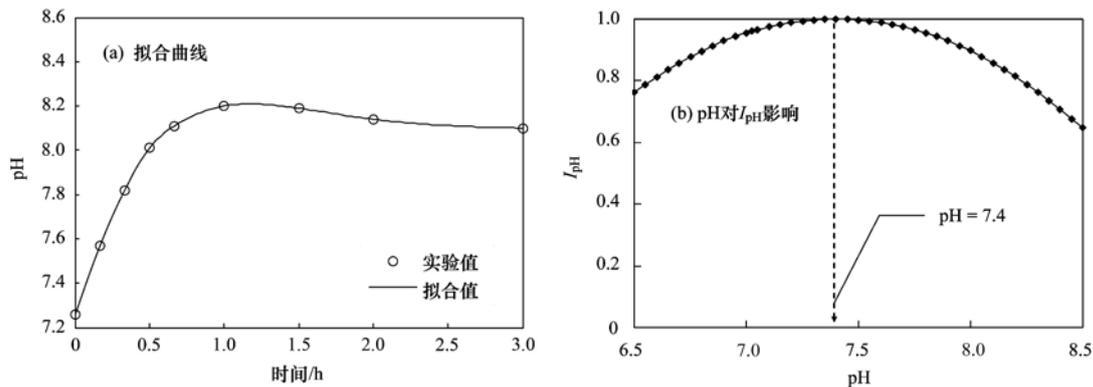


图 3 EBPR 好氧 pH 值的拟合曲线及 pH 对抑制系数的影响

Fig. 3 Simulation of the aerobic pH and effect of pH on I_{pH}

4 发酵液作为实际污水补充碳源的动力学模拟

在我国的大部分地区,污水中的有机物含量都不高,通常无法满足氮磷去除的要求^[23]. 如前所述,剩余污泥进行碱性发酵可以产生大量的 SCFAs,经过泥水分离后富含 SCFAs 的发酵液是一种高质量的(既含乙酸,又含丙酸)增强生物除磷碳源,其除磷效果优于乙酸^[2]. 因此,本节以发酵液作为实际污水的补充碳源,并进行动力学模拟.

实际污水中含有 S_I 为 $23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, S_F 为 $32 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, X_S 为 $52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, X_H 为 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, X_I 为 $29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,含有大量的慢速可生物降解有机物, $X_S/\text{TCOD} = 48\%$,为典型的城市污水^[24]. 在试验过程中,从污水厂取出实际污水到进入反应器中,平均时间约为 18 h,在这期间,污水中的异养菌有足够的时间将大部分 X_S 转化为 S_F ,或者将 S_F 转化为 S_{SCFAs} ,因此,以实际污水作为 EBPR 碳源时, X_S 的厌氧水解过程可以忽略.

以实际污水作为碳源时,EBPR 的除磷效果较差,好氧末 SOP 为 $1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率仅为 60% 左右;但是以发酵液作为补充碳源后,出水 SOP 下降到 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,去除率 95% 以上. 按第 3 节中的动力学取值,分别模拟了实际污水和实际污水 +

发酵液作为碳源的 EBPR 中 PAO 的浓度、占微生物总量的比例、以及出水中 SOP 的浓度(图 4). 由图 4 可以看出,当以实际污水作为碳源时,PAO 的浓度仅为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 COD 计),占反应器中微生物总量的 10% 左右,在这种情况下,模拟出水 SOP 为 $1.05 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,接近实际的出水 SOP 浓度,除磷效果较差.

由图 4 还可以看出,当以发酵液作为补充碳源时,稳定后的 EBPR 中 PAO 占微生物总量的 40% 以上,浓度接近 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以 COD 计),比实际污水中的 PAO 浓度增加了约 3.3 倍. 虽然回收氮磷,但是发酵液中仍然含有一定浓度的 SOP,因此,补充发酵液后污水中的 SOP 浓度有所增加. 尽管如此,实际出水和模拟出水中的 SOP 浓度依然下降到 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,模拟值与实际值相符.

在进水中增加丙酸的含量,有助于提高除磷效果,特别当丙酸:乙酸大于 1:2 时,EBPR 中的聚磷菌能够快速生长^[21, 25]. 从发酵液的组成来看,发酵液不仅是一种有机物含量较高的碳源,而且其中的丙酸:乙酸为 1:1 左右. 而实际污水中,乙酸占污水短链脂肪酸的 90% 以上,因此,在实际污水中补充富含有机酸、特别是丙酸的发酵液,不仅仅是为除磷提供了有机物,更重要的是优化了污水中的碳源构成,创造了有利于聚磷菌生长的环境.

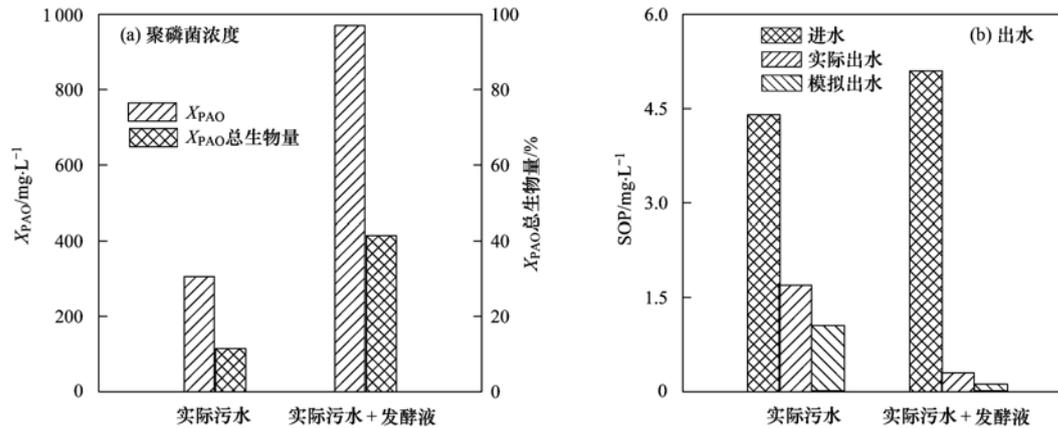


图4 两个反应器中聚磷菌浓度和出水的模拟结果比较

Fig. 4 Simulation of concentrations of PAO and effluent SOP in two EBPRs

5 结论

(1) 异养菌不对 PAO 的生长构成竞争关系, 反而促进 PAO 的生长. 发酵液中含有较多的易发酵/降解有机物 S_F 和惰性不可降解有机物 S_I , 这为异养菌 X_H 的生长创造了条件, 而异养菌又可以在厌氧阶段将 S_F 转化为 SCFAs, 从而促进 PAO 的厌氧代谢, 并进一步影响好氧代谢过程. 因此, 在建立发酵液作为碳源的动力学模型时, 需要考虑这些物质的代谢.

(2) 发酵液作为唯一碳源时, 该模型能够模拟 EBPR 一个周期的变化规律. 发酵液作为 EBPR 碳源的大多数计量学参数和动力学参数的取值与乙酸/丙酸作为碳源的参数取值相同. 少数参数可以利用 PAO 代谢乙酸/丙酸的参数进行估算, 这些参数的取值与乙酸/丙酸的参数比较接近.

(3) 发酵液作为补充碳源时, 该模型能够较好地模拟 EBPR 的去除效果. 以发酵液作为补充碳源的 EBPR 中聚磷菌浓度 (以 COD 计) 约为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 占微生物总量的 40% 以上, 比实际污水作为碳源的 EBPR 中的 PAO 浓度提高了 3.3 倍.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tong J, Chen Y G. Enhanced biological phosphorus removal driven by short-chain fatty acids produced from waste activated sludge alkaline fermentation [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41** (20): 7126-7130.
- [3] Jiang S, Chen Y G, Zhou Q, *et al.* Biological short-chain fatty acids (SCFAs) production from waste-activated sludge affected by surfactant [J]. *Water Research*, 2007, **41** (14): 3112-3120.
- [4] Ucisik A S, Henze M. Biological hydrolysis and acidification of sludge under anaerobic conditions: the effect of sludge type and origin on the production and composition of volatile fatty acids [J]. *Water Research*, 2008, **42** (14): 3729-3738.
- [5] Tong J, Chen Y G. Recovery of nitrogen and phosphorus from alkaline fermentation liquid of waste activated sludge and application of the fermentation liquid to promote biological municipal wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2009, **43** (12): 2969-2976.
- [6] Zheng X, Tong J, Li H J, *et al.* The investigation of effect of organic carbon sources addition in anaerobic-aerobic (low dissolved oxygen) sequencing batch reactor for nutrients removal from wastewaters [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (9): 2515-2520.
- [7] Yuan Q, Oleszkiewicz J A. Biomass fermentation to augment biological phosphorus removal [J]. *Chemosphere*, 2010, **78** (1): 29-34.
- [8] 佟娟. 剩余污泥碱性发酵产生的短链脂肪酸作为生物脱氮除磷碳源的研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008. 1.
- [9] Li X, Chen H, Hu L F, *et al.* Pilot-scale waste activated sludge alkaline fermentation, fermentation liquid separation, and application of fermentation liquid to improve biological nutrient removal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, **45** (5): 1834-1839.
- [10] Gao Y Q, Peng Y Z, Zhang J Y, *et al.* Biological sludge reduction and enhanced nutrient removal in a pilot-scale system with 2-step sludge alkaline fermentation and A^2O process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102** (5): 4091-4097.
- [11] Chen Y G, Li X, Zheng X, *et al.* Enhancement of propionic acid fraction in volatile fatty acids produced from sludge fermentation by the use of food waste and *Propionibacterium acidipropionici* [J]. *Water Research*, 2013, **47** (2): 615-622.
- [12] Ji Z Y, Chen Y G. Using sludge fermentation liquid to improve wastewater short-cut nitrification-denitrification and denitrifying phosphorus removal via nitrite [J]. *Environmental Science and*

- Technology, 2010, **44**(23): 8957-8963.
- [13] 冀周英. 剩余污泥发酵产生的有机酸用于城市污水短程消化反硝化同步脱氮除磷的研究[D]. 上海: 同济大学, 2011. 3.
- [14] 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 and Technology*, 2006, **40**(6): 2025-2029.
- [15] Zhang C, Chen Y G. Simultaneous nitrogen and phosphorus recovery from sludge-fermentation liquid mixture and application of the fermentation liquid to enhance municipal wastewater biological nutrient removal [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(16): 6164-6170.
- [16] Zhang C, Chen Y G, Randall A A, *et al.* Anaerobic metabolic models for phosphorus- and glycogen-accumulating organisms with mixed acetic and propionic acids as carbon sources[J]. *Water Research*, 2008, **42**(14): 3745-3756.
- [17] 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, 李咏梅译. 活性污泥数学模型[M]. 上海: 同济大学出版社, 2002.
- [18] Henze M, Gujer W, Mino T, *et al.* Activated sludge model No. 2, IAWQ Scientific and technical report[R]. IAWQ, London. 1995.
- [19] 张超, 陈银广. 乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(I)——模型的建立[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 993-997.
- [20] 张超, 陈银广. 乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(II)——动力学模拟[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 998-1003.
- [21] 张超, 陈银广. 乙酸/丙酸作为 EBPR 碳源的动力学模型研究(III)——模型的应用[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1004-1007.
- [22] Randall A A, Liu Y H. Polyhydroxyalkanoates form potentially a key aspect of aerobic phosphorus uptake in enhanced biological phosphorus removal [J]. *Water Research*, 2002, **36**(14): 3473-3478.
- [23] Chen Y H, Jiang S, Yuan H Y, *et al.* Hydrolysis and acidification of waste activated sludge at different pHs[J]. *Water Research*, 2007, **41**(3): 683-689.
- [24] 高志广. 城市污水脱氮除磷过程模拟及工艺优化运行研究[D]. 上海: 同济大学, 2007. 12.
- [25] 张超. 混合短链脂肪酸作为增强生物除磷碳源的计量学和动力学研究[D]. 上海: 同济大学, 2009. 6.

CONTENTS

Observation of Size Distribution of Atmospheric OC/EC in Tangshan, China	GUO Yu-hong, XIN Jin-yuan, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2497)
Changing Characteristics of the Main Air Pollutants of the Dongling Mountain in Beijing	YU Yang-chun, HU Bo, WANG Yue-si (2505)
Characteristic Comparative Study of Particulate Matters in Beijing Before and During the Olympics	ZHANG Ju, OUYANG Zhi-yun, MIAO Hong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Impact Factors of O ₃ Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin (2519)
Studies on the Size Distribution of Airborne Microbes at Home in Beijing	FANG Zhi-guo, SUN Ping, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (2526)
Emission Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Residential Coal Combustion and Its Influence Factors	HAI Ting-ting, CHEN Ying-jun, WANG Yan, <i>et al.</i> (2533)
Experimental Research on Alcohols, Aldehydes, Aromatic Hydrocarbons and Olefins Emissions from Alcohols Fuelled Vehicles	ZHANG Fan, WANG Jian-hai, WANG Xiao-cheng, <i>et al.</i> (2539)
Combination Process of Microwave Desorption-Catalytic Combustion for Toluene Treatment	CAO Xiao-qiang, ZHANG Hao, HUANG Xue-min (2546)
Removal of BTEX by a Biotrickling Filter and Analysis of Corresponding Bacterial Communities	LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (2552)
Source Profile of Volatile Carbonyl Compounds in Wastewater Treatment Plant of an Oil Refinery	ZHOU Bo-yu, LIU Wang, WANG Bo-guang, <i>et al.</i> (2560)
Distribution and Air-Sea Fluxes of Methane in the Yellow Sea and the East China Sea in the Spring	CAO Xing-peng, ZHANG Gui-ling, MA Xiao, <i>et al.</i> (2565)
Study on Seasonal Characteristics of Thermal Stratification in Lacustrine Zone of Lake Qiandao	DONG Chun-ying, YU Zuo-ming, WU Zhi-xu, <i>et al.</i> (2574)
Effects of Land Use Structure on Water Quality in Xin'anjiang River	CAO Fang-fang, LI Xue, WANG Dong, <i>et al.</i> (2582)
Canonical Correspondence Analysis Between Phytoplankton Community and Environmental Factors in Macrophytic Lakes of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	MENG Rui, HE Lian-sheng, GUO Long-gen, <i>et al.</i> (2588)
Microbial Bioavailability of Dissolved Nucleic Acids Across the Estuarine Salinity Gradient	YANG Qing-qing, LI Peng-hui, HUANG Qing-hui (2597)
Elementary Quantitative Study on Factors of Phytoplankton Bloom	ZHANG Zhuo, SONG Zhi-yao, HUANG Chang-chun, <i>et al.</i> (2603)
Spatiotemporal Succession of Algae Functional Groups and the Influence of Environment Change in a Deep-water Reservoir	LU Jin-suo, HU Ya-pan (2611)
Hyperspectral Remote Sensing of Total Suspended Matter Concentrations in Lake Taihu Based on Water Optical Classification	ZHOU Xiao-yu, SUN De-yong, LI Yun-mei, <i>et al.</i> (2618)
Application of Subwet Model in the Design of Constructed Wetland	LI Hui-feng, HUANG Jin-hui, LIN Chao (2628)
Allelopathic Effect of <i>Nelumbo nucifera</i> Stem and Leaf Tissue Extract on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>	HE Lian-sheng, MENG Fan-li, DIAO Xiao-jun, <i>et al.</i> (2637)
Influence of <i>Vallisneria spiralis</i> on the Physicochemical Properties of Black-odor Sediment in Urban Sluggish River	XU Kuan, LIU Bo, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (2642)
Removal of Cr(VI) by Iron Filings with Microorganisms to Recover Iron Reactivity	TANG Jie, WANG Zhuo-xing, XU Xin-hua (2650)
Degradation of Phenol with a Fe/Cu-Catalytic Heterogeneous-Fenton Process	YANG Yue-zhu, LI Yu-ping, YANG Dao-wu, <i>et al.</i> (2658)
Effect of Different Forms of Inorganic Nitrogen on the Photodegradation of Antipyrine in Water	ZHAO Qian, CHEN Chao, FENG Li, <i>et al.</i> (2665)
Degradation Mechanisms of Dimethyl Phthalate in the UV-H ₂ O ₂ System	LIU Qing, CHEN Cheng, CHEN Hong-zhe, <i>et al.</i> (2670)
Adsorption of Cd ²⁺ Ions in Aqueous by Diamine-Modified Ordered Mesoporous SBA-15 Particles	ZHANG Meng, YANG Ya-ti, QIN Rui, <i>et al.</i> (2677)
Surface Organic Modification of Acid Vermiculite and Its Adsorption of Hydrophobic Micro Pollutants in Aqueous Solutions	JIANG Zheng-ming, YU Xu-biao, HU Yun, <i>et al.</i> (2686)
Preparation of Porous Ceramics Based on Waste Ceramics and Its Ni ²⁺ Adsorption Characteristics	ZHANG Yong-li, WANG Cheng-zhi, SHI Ce, <i>et al.</i> (2694)
Perchlorate Removal from Underground Water by Anaerobic Biological Reduction with Bark	WANG Rui, LIU Fei, CHEN Nan, <i>et al.</i> (2704)
Experimental Study on the Remediation of Chromium Contaminated Groundwater with PRB Media	ZHU Wen-hui, DONG Liang-fei, WANG Xing-run, <i>et al.</i> (2711)
Removal of Calcium and High-strength Ammonia Nitrogen from the Wastewater of Rare-earth Elements Hydrometallurgical Process by Chemical Precipitation	WANG Hao, CHENG Guan-wen, SONG Xiao-wei, <i>et al.</i> (2718)
Leaching Kinetics of Josephinite Tailings with Sulfuric Acid	CHEN An-an, ZHOU Shao-qi, HUANG Peng-fei (2729)
Effects of HRT on Fate of Typical Polycyclic Musk by A ² O Process	LIU Peng-cheng, HUANG Man-hong, CHEN Dong-hui, <i>et al.</i> (2735)
Kinetic Simulation of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Fermentation Broth as Carbon Source	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (2741)
Effluent Carbon Source Improvement and Sludge Reduction by Hydrolysis Reactor with Enhanced Sludge Utilization	XIONG Ya, WANG Qiang, SONG Ying-hao, <i>et al.</i> (2748)
Optimization of Extracellular Polymeric Substance Extraction Method and Its Role in the Dewaterability of Sludge	ZHOU Jun, ZHOU Li-xiang, WONG Woo-chung (2752)
Effectiveness of Arsenite Adsorption by Ferric and Alum Water Treatment Residuals with Different Grain Sizes	LIN Lu, XU Jia-rui, WU Hao, <i>et al.</i> (2758)
Regional Differences and Development Tendency of Livestock Manure Pollution in China	QIU Huan-guang, LIAO Shao-pan, JING Yue, <i>et al.</i> (2766)
Quantitative Partitioning of Soil Selenium in the Selenium-Rich Area of Northern Zhejiang Plain	XU Ming-xing, PAN Wei-feng, CENG Jing, <i>et al.</i> (2775)
Effects of Land Use on Manganese Distribution and Fractions in Wetland Soil of Sanjiang Plain, Northeast China	ZHANG Zhong-sheng, LU Xian-guo, SONG Xiao-lin (2782)
Research on Vertical Distribution Pattern and Reserve of Organic Carbon in Paddy Field Soil of Qiangou, Jilin	TANG Jie, ZHANG Wen-hui, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (2788)
Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Its Influencing Factors in Farmland of Guanzhong Plain; A Case Study in Wugong County, Shanxi Province	ZHANG Xiao-wei, XU Ming-xiang (2793)
Effects of Biological Regulated Measures on Active Organic Carbon and Erosion-Resistance in the Three Gorges Reservoir Region Soil	HUANG Ru, HUANG Lin, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (2800)
Quantifying Soil Autotrophic Microbes-Assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	SHI Ran, CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> (2809)
Analysis of Soil Respiration and Influence Factors in Wheat Farmland Under Conservation Tillage in Southwest Hilly Region	ZHANG Sai, ZHANG Xiao-yu, WANG Long-chang, <i>et al.</i> (2815)
Distribution Characteristics and Risk Evaluation of Organochlorine Pesticides in Soil from Relocation Areas of the Danjiangkou Reservoir	LI Zi-cheng, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2821)
Risk Assessment and Countermeasure of BTEX in Pesticide Factory	PANG Bo, WANG Tie-yu, DU Li-yu, <i>et al.</i> (2829)
Accumulation of S, Fe and Cd in Rhizosphere of Rice and Their Uptake in Rice with Different Water Managements	ZHANG Xue-xia, ZHANG Xiao-xia, ZHENG Yu-ji, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Nitrate on Organic Removal and Microbial Community Structure in the Sediments	LIU Jin, DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (2847)
Zero-Valent Iron-Enhanced Azoreduction by the <i>Shewanella decolorationis</i> S12	ZHOU Qing, CHEN Xing-juan, GUO Jun, <i>et al.</i> (2855)
Isolation, Identification of Two Aerobic Denitrifiers and Bioaugmentation for Enhancing Denitrification of Biofilm Under Oligotrophic Conditions	QUAN Xiang-chun, CEN Yan, QIAN Yin (2862)
Rapid Enrichment and Cultivation of Denitrifying Phosphate-Removal Bacteria and Its Identification by Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization Technology	LIU Li, TANG Bing, HUANG Shao-song, <i>et al.</i> (2869)
Identification of a Denitrifying Polyphosphate-accumulating Organism (DPAO) and Study on Its Denitrifying Functional Genes	ZHANG Qian, WANG Hong-yu, SANG Wen-jiao, <i>et al.</i> (2876)
Isolation and Characterization of a Highly Efficient BBP-degrading Bacterium	CHEN Hu-xing, YANG Xue, ZHANG Kai, <i>et al.</i> (2882)
Degradation of Nicosulfuron by Combination Effects of Microorganisms and Chemical Hydrolysis	ZHANG Xiao-lin, LI Yong-mei, YUAN Zhi-wen (2889)
Isolation, Screening and Identification of Prometryne-Degrading Bacteria and Their Degrading Characteristics	ZHOU Ji-hai, SUN Xiang-wu, HU Feng, <i>et al.</i> (2894)
Preparation of PVA-SA-PHB-AC Composite Carrier and <i>m</i> -Cresol Biodegradation by Immobilized <i>Lysinibacillus cresolivorans</i>	LI Ting, REN Yuan, WEI Chao-hai (2899)
Extraction of Surface Active Substance and Analysis of Demulsifying Characteristics for the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, ZHANG Shu-cong, PENG Kai-ming, <i>et al.</i> (2906)
Diversity of Culturable Filamentous Bacteria in the Activated Sludge from A ² O Wastewater Treatment Process	GAO Sha, JIN De-cai, ZHAO Zhi-rui, <i>et al.</i> (2912)
Composition and Transformation of Leachates During Municipal Solid Waste Composting	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (2918)

《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7月15日 34卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 7 Jul. 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