

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

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

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩峰, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响

郭秀丽¹, 高大文^{1,2*}, 卢健聪¹

(1. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 2. 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)

摘要: 利用 SBR 反应器培养的成熟好氧硝化颗粒污泥, 进行了硝化颗粒污泥临界活性以及不同氨氮浓度及曝气时间对储存的好氧硝化颗粒污泥活性恢复的影响研究。结果表明, 储存不同时间的硝化菌活性 (SOUR, O_2/VSS) 差别较大, 储存前硝化颗粒污泥硝化菌 SOUR 为 $13.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 储存 20 d 的硝化菌 SOUR 下降了 $1.26 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 恢复运行了 5 个周期, 氨氮去除率已经达到 95% 以上, 恢复后活性为 $13.87 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 。但储存 30 d 的硝化菌 SOUR 降了 $11.63 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 恢复运行 51 个周期后, 氨氮去除率才达到 92.64%, 恢复后活性为 $14.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 同时这种储存方法恢复时间较长, 因此提出硝化颗粒污泥的临界活性为当硝化菌 SOUR 开始下降时, 进行活性恢复。在临界活性的基础上, 采用当硝化菌 SOUR 下降到临界活性时实施恢复, 之后进入下一个储存周期, 这种储存方式即为动态储存。当进水氨氮浓度分别为 20、30、40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 进行颗粒污泥活性恢复, 进水氨氮浓度为 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 恢复后硝化菌活性最高, 经过 3 次动态储存后, 其活性保持良好。当曝气时间分别为 1、2、3 h 时, 进行颗粒污泥活性恢复, 曝气时间为 1 h 时恢复后硝化菌活性最高, 在动态储存过程中其活性一直保持较高水平。

关键词: 好氧硝化颗粒污泥; 动态储存; 活性恢复; 比耗氧速率; 曝气时间

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3981-05

Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge

GUO Xiu-li¹, GAO Da-wen^{1,2}, LU Jian-cong¹

(1. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Water Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Aerobic nitrifying granule sludge cultivated in sequential batch reactor (SBR) was used to investigate the critical activity point of granules and the effect of different ammonia concentration and aeration time on reactivation after storage. The results showed that there was big difference in the activity (SOUR, O_2/VSS) of nitrifying bacteria after different storage time. The specific oxygen utilization rate (SOUR) of granules before storage was $13.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. After a storage period of 20 days, the SOUR decreased by $1.26 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, after 5 cycles of reactivation, the ammonia removal efficiency was already increased to 95% while the SOUR was recovered to $13.87 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. But after a storage period of 30 days, the SOUR decreased by $11.63 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, after 51 cycles of reactivation, the ammonia removal efficiency only reached 92.64% while the SOUR was recovered to $14.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. Meanwhile, this storage method required a longer recovery time. Therefore, we put forward that the critical activity of denitrifying granular sludge should be the activity when activity recovery starts and the nitrifying bacteria SOUR begins to decline. On the basis of the critical activity, we began to restore the activity when the activity of the denitrifying bacteria was reduced to critical activity, and then started a new storage cycle. This storage method was named dynamic storage. Different influent ammonia concentrations of 20, 30 and 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ were applied to reactivate the aerobic granules. Highest SOUR could be achieved when fed with an ammonia concentration of 40 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ after reactivation. After three times of dynamic storage, the SOUR remained stable. Different aeration time of 1, 2 and 3 h was applied to reactivate the aerobic granules. Highest SOUR could be obtained when aeration time of 1 h was applied after reactivation and remained stable along with dynamic storage.

Key words: aerobic nitrifying granules; dynamic storage; activity recovery; specific oxygen utilization rates (SOUR); aeration time

好氧颗粒污泥是微生物固定化技术的一种特殊形式,是近年来兴起的新型废水生物处理技术。好氧颗粒污泥具有沉降性能好、生物密度大、微生物种群多样化、污泥活性高、抗冲击负荷强等优点^[1,2]。而好氧硝化颗粒污泥又同时具有结构稳定能够同时去除水中的 COD、氮和磷以及同步硝化反硝化^[3,4]的功能,因此利用好氧硝化颗粒污泥技术处理生活污水是近些年研究热点之一^[5]。

然而好氧颗粒污泥存在启动时间长、储存后稳定性下降等问题,在实际废水处理过程中很大程度上限制了其应用。许多学者做了大量的试验研究,结果表明颗粒污泥闲置后具有较好的稳定性和活性

收稿日期: 2013-01-19; 修订日期: 2013-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21177033)

作者简介: 郭秀丽 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制及环境微生物技术, E-mail: guoxiuli626@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dawengao@gmail.com

恢复能力. 有研究发现室温下储存 2 个月后的好氧颗粒污泥活性明显下降,但经过 2 周的恢复,活性恢复至储存前水平^[6]. 本课题组的前期研究结果表明,好氧颗粒污泥储存 8 个月,经过 10 d 的活化运行后,其生物活性可完全恢复^[7,8]. 而在废水的生物脱氮过程中,硝化反应是生物脱氮的关键步骤,硝化菌对好氧颗粒污泥的脱氮性能和稳定性起着决定性的作用. 由硝化菌占优势的好氧颗粒污泥会比传统异养菌占优势的好氧颗粒污泥有更好的稳定性和同时去除碳、氮的能力^[9,10]. 但是,研究发现长期储存的硝化颗粒污泥其硝化菌活性恢复周期长. 有研究将硝化颗粒污泥冷藏(4℃)下储存 7 个月,活化运行 10 d 后硝化菌活性完全恢复^[11]. 又有研究将好氧硝化颗粒污泥搁置 2 个月,重新投入运行,恢复运行第 65 d 时,循环时间由 4 h 延长至 6 h 硝酸菌的活性得到了完全恢复^[12]. 因此在好氧硝化颗粒污泥闲置后,探究好氧硝化颗粒污泥硝化菌活性的快速恢复成为硝化颗粒污泥在污水处理领域实际应用的关键与热点^[13,14].

基于此,本研究对储存的好氧硝化颗粒污泥进行不同时间点恢复,拟在寻找硝化颗粒污泥的临界活性(快速恢复活性). 并考察了不同氨氮浓度与不同曝气时间恢复方式对储存后的好氧硝化颗粒污泥活性影响,以期为好氧颗粒污泥技术在实际工程中的应用提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验用水与污泥

反应器进水采用人工模拟的合成废水,人工模拟合成废水组成见表 1. 试验用泥为絮状污泥经过 2 个多月驯化培养成熟的好氧硝化颗粒污泥,如图 1 所示.

表 1 试验配水组成¹⁾

Table 1 Composition of synthetic wastewater

基质名称	质量浓度 /mg·L ⁻¹	微量元素成分	质量浓度 /g·L ⁻¹
COD	150 ~ 180	FeCl ₃	1.5
NH ₄ ⁺ -N	40	H ₃ BO ₃	0.15
PO ₄ ³⁻ -P	5 ~ 6	CuSO ₄	0.03
碱度	290 ~ 320	KI	0.18
CaCl ₂	10	MnCl ₂	0.12
		NaMoO ₄	0.06
		ZnSO ₄	0.12
		CoCl ₂	0.15
		EDTA	10

1) 微量元素投加量 1 mL·L⁻¹

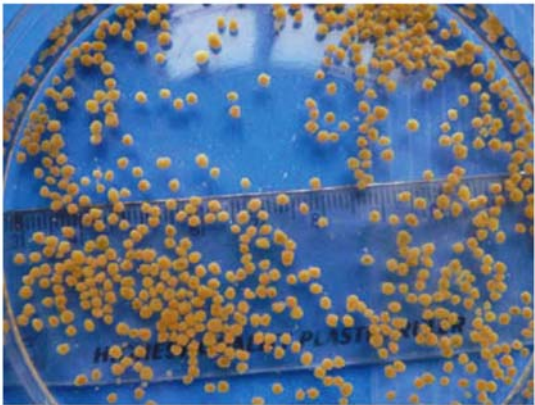


图 1 培养的硝化颗粒污泥

Fig. 1 Cultivation of denitrifying granular sludge

1.2 试验装置与运行

试验分别采用有效体积为 12 L 和 1 L 两种规格 SBR 反应器,其中 12 L 反应器为有机玻璃圆柱体,高 60 cm,直径 22 cm; 1 L 反应器为玻璃圆柱体,高 44 cm,直径为 7 cm. 曝气方式采用微孔曝气,用温度加热棒控制反应器内温度. 利用 12 L 反应器培养驯化好氧硝化颗粒污泥,为后期储存试验用泥. 培养期间采用瞬时进水,曝气 3 h,沉淀 1 min,排水 5 min. 利用 1 L 反应器进行储存后的好氧硝化颗粒污泥的活性恢复试验研究,该反应器采用瞬时进水,曝气时间见表 2,沉淀时间 1 ~ 5 min,排水时间 5 min.

表 2 方案设计

Table 2 Experimental design

序号	进水氨氮浓度/mg·L ⁻¹	曝气时间/h
1	20	3
2	30	3
3	40	3
4	40	1
5	40	2
6	40	4
7	40	5

1.3 分析检测方法

COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、MLSS、污泥沉降比(SV)等采用国家环境保护总局编制的标准方法进行测量^[15].

EPS 提取采用加热法^[16],其中多糖测定采用苯酚-硫酸法^[17],蛋白质含量采用 Lowry 法测定^[18].

DO、pH、硝化菌比耗氧速率的测定采用 WTW 台式测定仪. 硝化菌比耗氧速率(SOUR)是评价污泥中微生物群体代谢活性的一个重要指标^[19].

1.4 试验设计

利用 SBR 反应器,经过约两个月驯化,培养出成熟好氧硝化颗粒污泥,储存前硝化颗粒污泥 MLSS 为 $4\,500 \sim 5\,000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 分别储存 5 个泥样于 250 mL 玻璃瓶内,将储存不同时间(15、20、25、30、35 d)的硝化颗粒污泥分别进行活性检测及恢复,恢复方式同储存前运行方式,针对以上试验设计得出最佳恢复活性. 在此基础上同样储存 7 个泥样,试验方案如表 2 所示. 考察不同氨氮浓度和不同曝气时间对储存的硝化颗粒污泥的 SOUR 活性恢复的影响.

2 结果与讨论

2.1 储存前好氧硝化颗粒污泥状况

经过 2 个月左右好氧硝化颗粒污泥的稳定培养,好氧结束时系统对氨氮的转化如图 2 所示. 入水氨氮浓度在 $40 \sim 48 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,出水氨氮浓度在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,氨氮去除率大于 95%. 此外,培养成熟硝化颗粒污泥结构致密、沉降性能好、颗粒分布均匀.

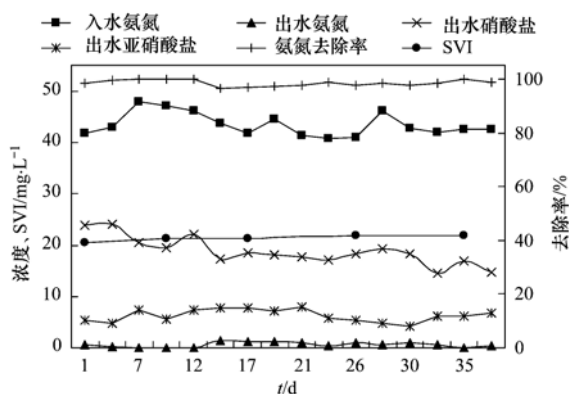


图 2 储存前颗粒污泥脱氮效能

Fig. 2 Denitrification efficiency of the granular sludge before storage

2.2 好氧硝化颗粒污泥的临界活性

选择不同储存时间(15、20、25、30、35 d)的好氧硝化颗粒污泥进行活性测定(图 3). 储存前硝化菌 SOUR 为 $13.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 储存 15 d 后硝化菌 SOUR 为 $13.07 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 储存 20 d 时硝化菌 SOUR 下降到 $11.89 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 储存 25 d 时硝化菌 SOUR 已经降到 $4.27 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 30 d 时活性下降至 $1.52 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 储存 35 d 的硝化颗粒污泥活性为 $1.41 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

储存 15 d 的污泥经过 2 个周期的活化后氨氮去除效果与储存前几乎相同;而储存 20 d 的硝化污泥经过 5 个周期的活化氨氮去除效果恢复至储存前

水平,活化后硝化菌 SOUR 为 $13.87 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 储存 25 d 的污泥经过 37 个周期的活化氨氮去除效果才得到恢复,活化后硝化菌 SOUR 为 $13.52 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 储存 30 d 的污泥经过 51 个周期活化氨氮去除效果得到恢复,活性恢复至 $14.92 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 储存 35 d 的污泥经过 39 个周期的活化运行其氨氮去除率仍小于 40%,而且硝化颗粒污泥的沉降性能明显下降,并且观察到此时颗粒污泥的表面有丝状菌,因此终止了 35 d 的储存污泥的试验. 由于颗粒污泥储存或者闲置期间容易发生内源呼吸与胞内水解,会导致颗粒污泥丧失其生物活性、部分物理特性及结构稳定性^[20~22],而温度越高其水解与内源呼吸越快,会导致硝化菌活性丧失快. 因此,在硝化颗粒污泥的活性开始下降时对其进行活性恢复,能使硝化菌活性快速恢复.

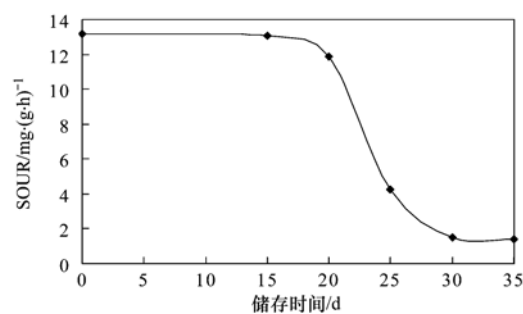


图 3 不同储存时间硝化菌 SOUR 变化

Fig. 3 Changes in activity of the nitrifying bacteria with different storage time

2.3 不同氨氮浓度条件下的动态储存对硝化颗粒污泥活性的影响

长期储存的方式会使硝化菌活性丧失,而且活化过程中存在时间长、污泥解体等缺点^[23,24]. 基于此,本研究提出动态储存的方式,即在一个储存周期中,当硝化颗粒污泥的活性开始下降时即对其进行短时快速活化,而后再进入另一个储存周期. 采取动态储存方式能使硝化颗粒污泥在储存过程中始终保持较高的生物活性和氮去除性能.

储存前(第 0 d)硝化菌 SOUR 为 $13.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 27 d 时检测硝化菌 SOUR 下降至 $11.31 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ (图 4),当进水氨氮浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氨氮去除率在 3 次活化过程中都是经过 2 个周期活化运行之后均能达到 97% 以上. 同样当进水氨氮浓度分别为 30、 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,氨氮去除率在 3 次活化过程中都运行 2 个周期之后均能达到 100%. 因此,不同进水氨氮浓度(20、30、 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)虽然对活性影响较大但对硝化菌氮去除性

能影响不明显。

不同进水氨氮浓度(20、30、40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下第1次活化后硝化菌 SOUR 分别为 11.85、12.79、13.72 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。活化后进入第2阶段的短期储存,第55 d,不同进水氨氮浓度下硝化菌 SOUR 分别下降至 10.29、10.34、10.98 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。进行第二次活化后(第56 d),当进水氨氮浓度为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其恢复后硝化菌的 SOUR 最高,达到 12.69 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。之后进入第3阶段的短期储存,第83 d,硝化菌的活性又出现不同程度的下降,对其进行活化后(第84 d),当进水氨氮浓度为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其恢复后硝化菌的 SOUR 最高,达到 13.08 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。以上结果表明,较高氨氮浓度(40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)更有利于硝化菌活性的恢复,且再次储存后其活性仍然保持相对较高水平。进水基质浓度直接影响着颗粒污泥活化过程中的生物活性恢复状况,充足的底物浓度促进了微生物的能量代谢过程和生物活性恢复。

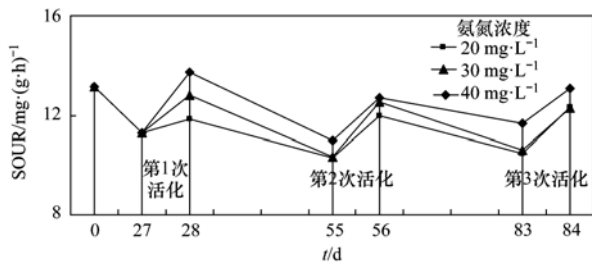


图4 活化过程中不同进水氨氮浓度对硝化菌 SOUR 的影响

Fig. 4 Different water nitrogen concentration on the influence of nitrifying bacteria SOUR in activation process

2.4 不同曝气时间条件下的动态储存对硝化颗粒污泥活性的影响

曝气时间是 SBR 反应器中好氧颗粒污泥形成的关键因素,本研究考察不同曝气时间(1、2、3 h)对硝化菌活性恢复的影响,控制总的活化时间为 6 h,当曝气时间为 1 h 时,活化了 6 次,2 h 活化了 3 次,3 h 活化了 2 次。当曝气时间为 1 h 时,3 次活化过程中,氨氮去除率在活化后均能达到 60% 以上;当曝气时间为 2 h 时,3 次活化过程中,氨氮去除率在活化后均能达到 82% 以上;当曝气时间为 3 h 时,3 次活化过程中,氨氮去除率在活化后均能达到 99% 以上。

对硝化颗粒污泥进行活性检测发现,经第一次活化后,当曝气时间为 1 h 时,恢复后硝化菌的 SOUR 最高(如图5),达到 15.86 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,当曝气时间为 2 h 和 3 h 时, SOUR 分别为 13.22 和

13.72 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。经过第二次/第三次储存后,硝化菌的活性又出现不同程度的下降,对其进行活性恢复,同样,1 h 的曝气时间获得更好的活性恢复效果。以上结果表明,当总活化时间相同的条件下,较短的曝气时间(1 h)相应较长的活化次数更有利于硝化菌活性的恢复,且再次储存后其活性仍然保持相对较高水平,这与前人研究结果相类似^[25]。

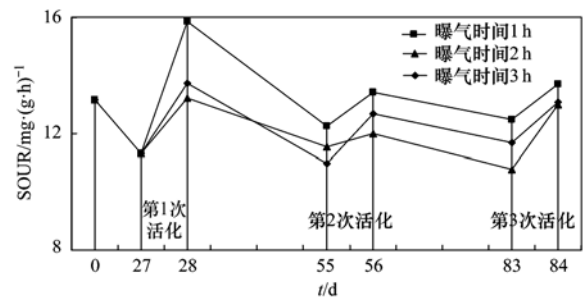


图5 活化过程中不同曝气时间对硝化菌 SOUR 的影响

Fig. 5 Effect of different aeration time on the SOUR of nitrifying bacteria during the activation process

3 结论

(1)硝化菌临界活性试验可得出,在硝化颗粒污泥的活性开始下降时对其进行活性恢复,能使硝化菌活性快速恢复。

(2)较高氨氮浓度更有利于硝化菌活性的恢复,当氨氮浓度为 40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,储存前硝化菌 SOUR 为 13.15 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,经过 3 次动态储存后,其活性保持良好,为 13.08 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

(3)较短的曝气时间更有利于硝化菌活性的恢复,当曝气时间为 1 h,储存前硝化菌 SOUR 为 13.15 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$,在动态储存过程中其活性一直保持较高水平,达到 13.71 $\text{mg}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 。

参考文献:

- [1] 王建龙, 张子健, 吴伟伟. 好氧颗粒污泥的研究进展[J]. 环境科学学报, 2009, 29(5): 449-473.
- [2] Bartrali A, Carrera J, Pérez J. Bioaugmentation as a tool for improving the start-up and stability of a pilot-scale partial nitrification biofilm airlift reactor[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(5): 4370-4375.
- [3] 阮文权, 陈坚. 同步脱氮好氧颗粒污泥的特性及其反应过程[J]. 中国环境科学, 2003, 23(4): 380-384.
- [4] Su K Z, Yu H Q. Formation and characterization of aerobic granules in a sequencing batch reactor treating soybean-processing wastewater[J]. Environmental Science and Technology, 2005, 39(8): 2818-2828.
- [5] 季民, 魏燕杰, 李超, 等. 好氧颗粒污泥处理实际污(废)水的研究与工程化应用进展[J]. 中国给水排水, 2010, 26

- (4): 10-14.
- [6] Zhang L L, Zhang B, Huang Y F, *et al.* Re-activation characteristics of preserved aerobic granular sludge [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, **17**(4): 655-658.
- [7] Gao D W, Yuan X J, Liang H. Reactivation performance of aerobic granules under different storage strategies [J]. *Water Research*, 2012, **46**(10): 3315-3323.
- [8] Yuan X J, Da W G, Hong L. Reactivation characteristics of stored aerobic granular sludge using different operational strategies [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, **94**(5): 1365-1374.
- [9] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Improved stability of aerobic granules by selecting slow-growing nitrifying bacteria [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **108**(2): 161-169.
- [10] Wang X H, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Improved stability and performance of aerobic granules under stepwise increased selection pressure [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2007, **41**(3): 205-211.
- [11] Wang X H, Zhang H M, Yang F M, *et al.* Long-term storage and subsequent reactivation of aerobic granules [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(17): 8304-8309.
- [12] 王新华, 张捍民, 夏丽萍, 等. 好氧硝化颗粒污泥搁置后活性恢复研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 127-131.
- [13] 夏丽萍. 硝化颗粒污泥稳定性及活性恢复研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- [14] Tirá J A, Lafuente J, Baeza J A, *et al.* Long-term starvation and subsequent reactivation of a high-rate partial nitrification activated sludge pilot plant [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(21): 9870-9875.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [17] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. *Analytical Chemistry*, 1956, **28**(3): 350-356.
- [18] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A, *et al.* Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. *Biological Chemistry*, 1977, **193**(1): 265-275.
- [19] Joanna S G, Krest G, Cael D, *et al.* Nitrification monitoring in activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) measurements [J]. *Water Research*, 1996, **30**(5): 1228-1236.
- [20] 王新华. 好氧硝化颗粒污泥的性能及储存与解体后的自修复行为研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [21] Zeng P, Zhuang W Q, Tay S T L, *et al.* The influence of storage on the morphology and physiology of phthalic acid-degrading aerobic granules [J]. *Chemosphere*, 2007, **69**(11): 1751-1757.
- [22] Liu Y, Liu Q S, Qin L, *et al.* Comments on “effect of extended idle conditions on structure and activity of granular activated sludge” by Zhu and Wilderer [J]. *Water Research*, 2004, **38**(14-15): 3465-3466.
- [23] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Proteolytic activity in stored aerobic granular sludge and structural integrity [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(1): 68-73.
- [24] 刘宏波, 杨昌柱, 濮文虹, 等. 好氧颗粒污泥活性恢复的试验研究 [J]. *中国给水排水*, 2008, **24**(19): 16-19.
- [25] 徐颖, 邵文华, 王惠卿. 曝气量和曝气时长对好氧颗粒污泥活性恢复的影响 [J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(6): 1975-1979.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 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