

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮐鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峰, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翔, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	
《环境科学》征订启事 (1890)	
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

合成氨废水短程反硝化特性研究

李妍¹, 李泽兵¹, 马家轩², 王晓毅², 赵白航¹, 李军^{1*}

(1. 北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 河南省化工研究所有限责任公司, 郑州 450052)

摘要: 取自强化 A/O 工艺处理合成氨废水中试装置的活性污泥, 在 pH、碳源和温度均不为限制性因素条件下, 短程反硝化和全程反硝化均为零级反应。结果表明, 相对于全程反硝化, 短程反硝化可以节约 14.1% 的碳源和 55.7% 的反硝化时间; 初始 NO_2^- -N 为 $36.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时反硝化最快, 比反硝化速率 (以 NO_2^- -N/VSS 计) 为 $0.509 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$; pH 为 7.5 时反硝化速率最快, 实际运行中应避免缺氧区 pH > 9; 选择性增殖的反硝化菌对甲醇和乙醇形成了良好的适应性, 却对葡萄糖和乙酸等其它低分子易降解有机物产生了不适应性。

关键词: 合成氨废水; 短程反硝化; 比反硝化速率; 碳源

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1902-05

Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process

LI Yan¹, LI Ze-bing¹, MA Jia-xuan², WANG Xiao-yi², ZHAO Bai-hang¹, LI Jun¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Henan Chemical Industry Research Institute Co. Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Active sludge was from a pilot-scale synthetic ammonia industrial wastewater treatment plant with a strengthen anoxic-oxic (A/O) technology. The zero order kinetic model was suit for describing shortcut and complete denitrification process. Experimental results showed that shortcut denitrification could reduce 14.1% carbon source consumption and 55.7% denitrification time, respectively, comparing with complete denitrification. The maximum specific denitrification rate was $0.509 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ with an initial NO_2^- -N concentration of $36.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and pH 7.5. In the industrial practice, it must be avoided pH higher than 9.0 in anoxic zone for industrial treatment. Replication-selective denitrifying bacteria showed a strong adaptability to methanol and ethanol, but showed maladaptation to other small molecular and easily biodegradable organics, such as glucose and acetic acid.

Key words: synthetic ammonia wastewater; shortcut denitrification; specific denitrification rates; carbon source

当前, 国内外研究人员为了实现脱氮过程耗氧量最小、碳源需求最少等目标, 对短程硝化反硝化技术开展了大量的研究^[1-4], 但关注焦点多集中于短程硝化与厌氧氨氧化相结合工艺的研究^[3,4]。由于厌氧氨氧化工艺难于控制, 因此也有研究者在实现短程硝化后采用投加外加碳源或前置反硝化等方法脱氮^[5], 但研究重点也主要是短程硝化的控制和稳定运行, 对短程反硝化及其影响因素的研究较少。

作为生物脱氮的重要步骤, 反硝化过程对短程硝化反硝化系统高效、稳定运行具有重要的意义。因此, 课题组基于在河南某合成氨企业开展的强化 A/O 工艺短程硝化反硝化生物脱氮中试试验, 研究了中试系统活性污泥的短程反硝化速率以及 pH 值和碳源对反硝化速率的影响, 以期短程硝化反硝化生物脱氮技术在合成氨废水处理中的运用和发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

活性污泥反硝化速率测定装置如图 1 所示。反应器容积为 12 L, 有效容积 10 L。

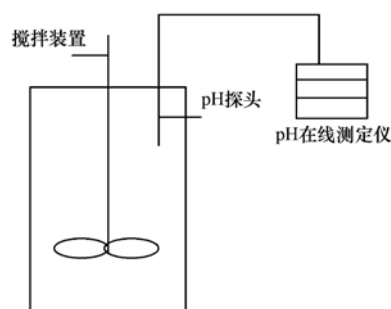


图 1 反硝化速率测定装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of measurement device for denitrification rate

收稿日期: 2011-08-24; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07210-002); 北京市自然科学基金项目 (8122005); 北京市教委重点项目 (KZ201110005008)

作者简介: 李妍 (1985 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为污水生物处理技术, E-mail: sohu_town@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jgljun@bjut.edu.cn

1.2 试验污泥

取中试装置缺氧池首端活性污泥 10 L, 先将混合液搅拌 1 h, 以去除其中的硝态氮。反硝化试验过程是在 2011 年 6~7 月开展的, 室温较高, 同步检测混合液温度为 30~32℃, 氨氮浓度 15~25 mg·L⁻¹, 碱度 300~500 mg·L⁻¹, 试验开始时定量投加亚硝酸盐、硝酸盐和碳源。在中试试验长期稳定运行中, 由于进水碱度及 pH 均较高, 中试装置缺氧池 pH 值的范围为 8.3~8.8, 平均值为 8.5, 因此在试验中混合液 pH 均控制为 8.50±0.05 (pH 影响试验除外)。为在试验过程中结合 WTW pH 测定仪的测定, 人工即时投加 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 和 NaOH 控制, 而在 pH 影响试验中只是选择 pH 的控制点不同, 控制方法相同。

1.3 分析方法

试验过程中水样取出后经定性滤纸过滤后分析, 水质指标包括 COD、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLVSS 等, 均采用国家标准方法分析^[6]。pH 测量采用德国 WTW IQ SENSOR NET 在线多参数监测系统 (MIQ/TC2020 XT-H3)。

2 结果与分析

2.1 短程反硝化与全程反硝化的比较

中试采用 A/O 工艺短程硝化反硝化处理合成氨废水。在 22~35℃ 条件下, 经过 90 d 的运行, A/O 工艺获得了稳定的有机物和氮去除。由于原水碱度

高, 进水 pH 高于 8.5, 经控制曝气量和逐渐降低 HRT 的协同调控, 系统实现了稳定的短程硝化反硝化, 出水亚硝态氮积累率维持为 80% 以上, 其中 COD、NH₄⁺-N 和 TN 的去除率分别达到了 90%、99% 和 80%。

全程反硝化是反硝化菌以有机物为碳源, 在硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶、一氧化二氮还原酶的作用下, 将 NO₃⁻-N 还原为 N₂ 的过程, 产生 1 mol N₂ 需要转移 10 mol 电子和 12 mol 质子。而短程反硝化过程由于无需经历硝酸盐的还原, 缩短了反应时间, 而且反硝化产生 1 mol N₂ 仅需要转移 6 mol 电子和 8 mol 质子, 显著减少了碳源需求量和反硝化时间。

图 2 所示为以甲醇为反硝化碳源, 反硝化过程中硝酸盐氮和亚硝酸盐氮的变化曲线, 初始 NO₃⁻-N 为 24.10 mg·L⁻¹, 100 min 后 NO₃⁻-N 为 0.56 mg·L⁻¹, 初始 NO₂⁻-N 为 21.34 mg·L⁻¹ 时, 40 min 后 NO₂⁻-N 为 0.10 mg·L⁻¹。由于短程反硝化速率远大于 NO₃⁻-N 还原为 NO₂⁻-N 的速率, 因此, 全程反硝化过程中没有出现 NO₂⁻-N 的积累, NO₂⁻-N 浓度始终 < 1 mg·L⁻¹。从图 2 还可以看出, 在碳源充足和 pH 稳定的条件下, NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 在低浓度 20~25 mg·L⁻¹ 时反硝化过程均属于零级反应^[7,8], 满足方程: $y = -Kt + S_0$, 相关系数均为 0.98, 反应速率和底物浓度无关, 仅与细菌活性、细菌数量有关。

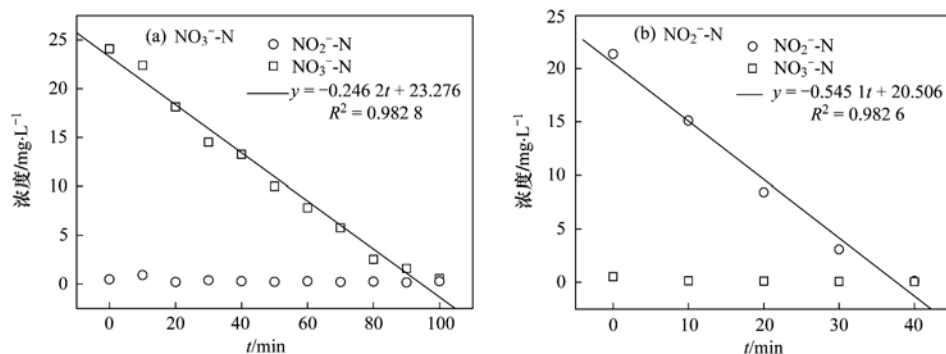


图 2 NO₃⁻-N 和 NO₂⁻-N 的反硝化曲线

Fig. 2 Denitrification curves of NO₃⁻-N and NO₂⁻-N

表 1 列出了短程和全程反硝化过程中各参数的比较, 可以发现相对于全程反硝化, 短程反硝化可以节约 14.1% 的碳源和 55.7% 的反硝化时间, 短程反硝化速率是全程反硝化的 2.2 倍。表 1 中全程反硝化和短程反硝化过程获得的 C/N 比值较理论计算值和其它相关的研究结论均较高, 原因包括①吸附作用: 由于活性污泥长期以甲醇为碳源, 污泥活性较

高, 在碳源充足条件下, 对甲醇具有较强的吸附作用; ②搅拌充氧: 由于试验装置未密封, 搅拌过程对混合液充氧导致有机物消耗。

2.2 不同初始 NO₂⁻-N 条件下短程反硝化速率的测定

如图 3 所示, 4 组试验的初始 NO₂⁻-N 浓度分别为 78.65、58.00、36.82 和 21.34 mg·L⁻¹, 其中初始碳源投加体积分别为 4 mL, 初始 COD 有效浓度为

表 1 短程反硝化和全程反硝化的比较

初始基质	NO _x ⁻ -N 浓度/mg·L ⁻¹		COD/mg·L ⁻¹		反应时间 /min	反硝化 (C/N)	比反硝化速率 /mg·(g·min) ⁻¹
	初始	结束	初始	结束			
NO ₂ ⁻ -N	21.34	0.10	168.5	81.90	40	4.08	0.31
NO ₃ ⁻ -N	24.10	0.56	215.8	103.9	100	4.75	0.14

400 mg·L⁻¹, C/N 比均远大于反硝化所需 4:1. 试验过程中各反应器分别反应 140、100、60 和 40 min 后,最终 NO₂⁻-N 分别降为 0.67、1.62、0.68 和 0.1 mg·L⁻¹. 从图 3 可以看出,在污泥浓度相同的条件下,不同初始 NO₂⁻-N 浓度的反硝化过程均为零级反应,相关系数分别为 0.99、0.99、0.99 和 0.98. 反硝化速率在初始 NO₂⁻-N 浓度为 36.82 mg·L⁻¹ 时最大,比反硝化速率(以 NO₂⁻-N/VSS 计)为 0.509

g·(g·d)⁻¹. 孙洪伟等^[9]在垃圾渗滤液短程生物脱氮研究中获得最大比反硝化速率为 0.435 g·(g·d)⁻¹, Ruiz 等^[10]在缺氧 UASB 反应器中处理人工配水研究中获得亚氮最大比反硝化速率为 0.49 g·(g·d)⁻¹,均与本试验结果较接近. 试验初始 NO₂⁻-N 浓度分别为 78.65、58.00 和 21.34 mg·L⁻¹ 时,比反硝化速率为最大速率的 91.6%、94.5% 和 90.1%.

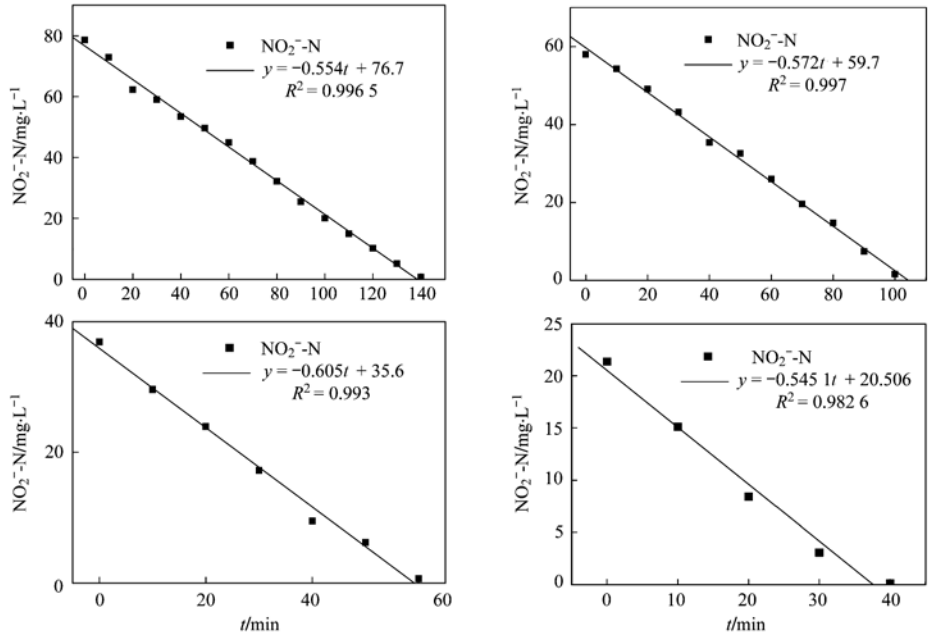


图 3 不同初始 NO₂⁻-N 浓度下 NO₂⁻-N 反硝化曲线

Fig. 3 Denitrification curves of NO₂⁻-N during different initial NO₂⁻-N concentration

2.3 pH 值对短程反硝化的影响

在亚硝酸盐还原过程中存在 3 种还原酶:亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶和一氧化二氮还原酶,亚硝酸盐还原酶和一氧化二氮还原酶存在于细胞膜外细胞周质中,似乎是周质酶,一氧化氮还原酶位于细胞膜上,是一种与膜结合的细胞色素 bc 复合物^[11~13]. 那么,亚硝酸盐的还原过程主要是在细胞膜上发生的反应,反应底物为 NO₂⁻,反应速率相对较快,底物形态(与 pH 密切相关)对反应速率的影响较小. 因此,在高碱度合成氨废水处理中,pH 对短程反硝化的影响主要体现在高 pH 对微生物细胞活性的抑制作用.

试验从 pH 6.0~9.2,共选取了 8 个 pH 点,各 pH 点试验时,碳源投量为 2 mL,反应器中初始 COD 有效浓度为 200 mg·L⁻¹. pH 试验结果如表 2 和图 4 所示:当 pH < 6 或 > 9 时,由于细胞酶活性降低,反硝化能力受到严重影响,pH 为 6.0 和 9.2 时比反硝化速率较低,分别为最大比反硝化速率的 12% 和 18%. 虽然中试装置实际运行中缺氧池 pH 通常为 8.3~8.8,但试验结果显示 pH 为 7.5 时比反硝化速率最大. 当 pH 为 8.0、8.5 和 8.8 时,比反硝化速率分别为最大反硝化速率的 80%、73% 和 66%,表明缺氧段 pH 越高比反硝化速率越小. 因此,对于包含联碱车间的合成氨企业就需要严格控制排水碱

表 2 不同 pH 时短程反硝化的数据

Table 2 Data of short-cut denitrification during different pH						
编号	pH	亚氮浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		运行时间 /min	VSS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	比反硝化速率 / $\text{g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$
		初始	结束			
1	6.0 ± 0.05	23.97	16.84	50	1.665	0.123
2	6.5 ± 0.05	21.64	4.6	40	1.684	0.364
3	7.0 ± 0.05	24.75	3.75	30	1.595	0.474
4	7.5 ± 0.05	23.56	0.05	30	1.604	0.704
5	8.0 ± 0.05	20.19	0.10	30	1.695	0.569
6	8.5 ± 0.05	21.34	0.10	40	1.712	0.512
7	8.8 ± 0.05	25.39	4.21	40	1.635	0.466
8	9.2 ± 0.05	21.64	17.92	40	1.615	0.083

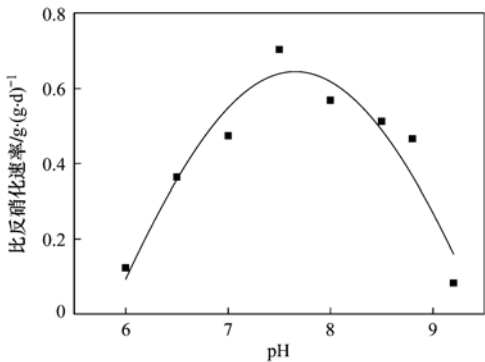


图 4 不同 pH 值下比反硝化速率曲线

Fig. 4 Specific denitrification rate curve during different pH

度,避免缺氧池 pH 过高而影响反硝化过程.在实际运行中,如果缺氧池 pH 高于 9,将导致反硝化不完全而进入好氧区的有机物增多,好氧池内有机物的氧化过程压缩了硝化过程的时间和空间,最终影响出水水质.

2.4 碳源类型对短程反硝化的影响

甲醇来源广,价格低,是国内外反硝化研究广泛采用的碳源类型^[14~17].由于中试研究所在的河南某合成氨企业联产甲醇,因此,其污水处理厂就近使用甲醇车间的甲醇残液作为外加碳源.异养反硝化菌短程反硝化过程中,有机物主要有 2 个功能:①提供电子和质子,电子用于将 N^{3+} 还原为 N_2 ,质子用于结合亚硝酸盐脱下的 O^{2-} 生成 H_2O ;②作为碳源,用于细胞合成.

为了考察碳源类型对通常以甲醇为碳源的反硝化菌的影响,试验共研究了葡萄糖、乙酸、甲醇和乙醇等 4 种有机物作碳源时活性污泥的短程反硝化特性.各反应器投加碳源后 COD 浓度均大于 $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,与投加的亚氮浓度相比较,C/N 比均远大于理论上完全反硝化所需的 C/N 比 3:1,因此,可以认为表征试验的比反硝化速率主要与碳源种类有关,与碳源浓度无关.从图 5 可以看出,初始亚氮浓

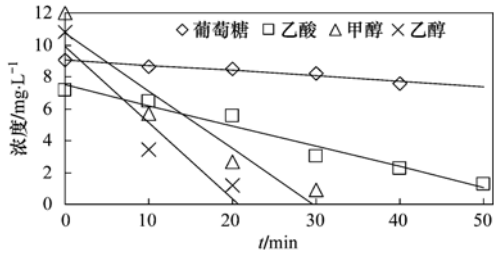


图 5 不同碳源种类的反硝化曲线

Fig. 5 Denitrification curves during variety carbon sources

度为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,以乙醇、甲醇和乙酸为碳源时,分别在 20、30 和 50 min 后反硝化完成,以葡萄糖为碳源时,50 min 后,亚氮浓度仅降低 $1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,各反应过程均属于零级反应.葡萄糖作碳源时,短程比反硝化速率最低,仅为 $0.034\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,乙醇为碳源时,比反硝化速率最大,为 $0.619\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,甲醇和乙酸为碳源时分别为最大比反硝化速率的 87% 和 18%.

在以混合有机物为碳源培养的活性污泥系统中,乙酸是最好的反硝化碳源,进入反硝化细菌细胞的乙酸在转化为乙酰辅酶 A 后可以直接利用,相对于其它挥发性有机酸为碳源时步骤短,反硝化速率快,并且小分子挥发性脂肪酸的反硝化速率比相应的醇类高^[18~21].还有研究表明^[22],应用甲醇作为外碳源将会选择性增殖反硝化菌的种类.从试验结果可以看出,在以甲醇为碳源长期运行的系统中,选择性增殖的反硝化菌在细胞内可将甲醇转化为乙酸进入 TCA 循环以获得反硝化所需的能量和电子供体^[23],而乙醇相对于甲醇转化为乙酸的过程更为简单,因此其反应速率比甲醇快.在脂溶性的甲醇、乙醇自由扩散进入反硝化菌细胞膜的情况下^[24],乙酸需要载体蛋白才能进入细胞膜,明显降低了细菌的反硝化速率.葡萄糖进入细胞膜则更困难,因为它不仅需要载体蛋白还需要 ATP^[25].同时在较短时间内,反硝化菌依靠葡萄糖胞外水解产物反硝化的效

果也十分有限。

3 结论

(1)以硝酸盐氮和亚硝酸盐氮为电子受体的反硝化过程均属于零级反应,相对于全程反硝化,短程反硝化可以节约 14.1% 的碳源和 55.7% 的反硝化时间,短程比反硝化速率是全程反硝化的 2.2 倍。

(2)反硝化速率在初始 NO_2^- -N 浓度为 $36.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最大,比反硝化速率为 $0.509 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。初始 NO_2^- -N 浓度分别为 78.65、58.00 和 $21.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,比反硝化速率为最大速率的 91.6%、94.5% 和 90.1%。

(3) $\text{pH} < 6$ 或 > 9 时,由于细胞酶活性降低,反硝化能力受到严重影响, pH 为 7.5 时比反硝化速率最大,当 pH 为 8.0、8.5 和 8.8 时,比反硝化速率分别为最大反硝化速率的 80%、73% 和 66%。

(4)在以甲醇为碳源长期运行的活性污泥系统中,选择性增殖的反硝化菌对甲醇以及作为甲醇的同源性有机物乙醇形成了良好的适应性,却对葡萄糖和乙酸等其它小分子易降解有机物产生了不适应性。

参考文献:

- [1] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. *Water Research*, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [2] Qiao S, Matsumoto N, Shinohara T, *et al.* High-rate partial nitrification performance of high ammonium containing wastewater under low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 111-117.
- [3] Helmer C, Tromm C, Hippen A, *et al.* Single stage biological nitrogen removal by nitrification and anaerobic ammonium oxidation in biofilm systems [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **43**(1): 311-320.
- [4] Chen H H, Liu S T, Yang F L, *et al.* The development of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in a single reactor for nitrogen removal [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(4): 1548-1554.
- [5] Claros J, Serralta J, Seco A, *et al.* Monitoring pH and ORP in a SHARON reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(11): 2505-2512.
- [6] 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.
- [7] Ghafari S, Hasan M, Aroua M K. A kinetic study of autohydrogenotrophic denitrification at the optimum pH and sodium bicarbonate dose [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(7): 2236-2242.
- [8] Gao D W, Peng Y Z, Wu W M. Kinetic model for biological nitrogen removal using shortcut nitrification-denitrification process in sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **44**(13): 5015-5021.
- [9] 孙洪伟, 王淑莹, 魏东洋, 等. pH 对高氨氮渗滤液短程生物脱氮反硝化过程动力学的影响 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 742-748.
- [10] Ruiz G, Jeison D, Rubilar O, *et al.* Nitrification-denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewaters [J]. *Bioresource Technology*, 2006, **97**(2): 330-335.
- [11] Ka J O, Urbance J, Ye R W, *et al.* Diversity of oxygen and N-oxide regulation of nitrite reductases in denitrifying bacteria [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1997, **156**(1): 55-60.
- [12] Zumft W G, Kroneck P M H. Respiratory transformation of nitrous oxide (N_2O) to dinitrogen by *Bacteria* and *Archaea* [J]. *Advances in Microbial Physiology*, 2006, **52**: 107-227.
- [13] Wunsch P, Körner H, Neese F, *et al.* NosX function connects to nitrous oxide (N_2O) reduction by affecting the Cu_2 center of NosZ and its activity in vivo [J]. *FEBS Letters*, 2005, **579**(21): 4605-4609.
- [14] Ginige M P, Bowyer J C, Foley L, *et al.* A comparative study of methanol as a supplementary carbon source for enhancing denitrification in primary and secondary anoxic zones [J]. *Biodegradation*, 2009, **20**(2): 221-234.
- [15] Kim I S, Oh S E, Bum M S, *et al.* Monitoring the denitrification of wastewater containing high concentrations of nitrate with methanol in a sulfur-packed reactor [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, **59**(1): 91-96.
- [16] Bosander J, Westlund Å D. Operation of full-scale fluidized bed for denitrification [J]. *Water Science and Technology*, 2000, **41**(9): 115-121.
- [17] Baytshtok V, Kim S, Yu R, *et al.* Molecular and biokinetic characterization of methylotrophic denitrification using nitrate and nitrite as terminal electron acceptors [J]. *Water Science and Technology*, 2008, **58**(2): 359-365.
- [18] 徐亚同. 不同碳源对生物反硝化的影响 [J]. *环境科学*, 1994, **15**(2): 29-32.
- [19] 殷芳芳, 王淑莹, 昂雪野, 等. 碳源类型对低温条件下生物反硝化的影响 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 108-113.
- [20] Mohseni-Bandpi A, Elliott D J. Groundwater denitrification with alternative carbon sources [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(6): 237-243.
- [21] Mohseni-Bandpi A, Elliott D J, Momeny-Mazdeh A. Denitrification of groundwater using acetic acid as a carbon source [J]. *Water Science and Technology*, 1999, **40**(2): 53-59.
- [22] Osaka T, Yoshie S, Tsuneda S, *et al.* Identification of acetate-or methanol-assimilating bacteria under nitrate-reducing conditions by stable-isotope probing [J]. *Microbial Ecology*, 2006, **52**(2): 253-266.
- [23] Weijma J, Stams A J M. Methanol conversion in high-rate anaerobic reactors [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(8): 7-14.
- [24] 蔡谨. 微生物学: 原理与探索 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 244.
- [25] 周群英, 高廷耀. 环境工程微生物学 [M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2000. 95-96.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人