

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究

曾国驱^{1,2}, 贾晓珊¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 广东省微生物研究所, 省部共建华南应用微生物国家重点实验室, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070)

摘要: 采用小试规模的厌氧折流板反应器 (ABR) 研究制革废水的厌氧氨氧化脱氮. 结果表明, ABR 可作为实现厌氧氨氧化的良好反应器, 厌氧氨氧化 ABR 反应器能有效和稳定地处理制革废水. 当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $25.0 \sim 76.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD 为 $131 \sim 237 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷为 $0.05 \sim 0.15 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $0.20 \sim 7.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、COD 为 $35.1 \sim 69.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达到 90.8% ~ 99.6% 和 66.9% ~ 74.7%. 此外, 厌氧氨氧化 ABR 反应器污泥在驯化和运行过程中形成了棕红色、棕黄色和红色的颗粒污泥. 电镜扫描观察证实厌氧氨氧化 ABR 反应器的 4 个隔室的颗粒污泥中均存在厌氧氨氧化菌. 荧光原位杂交 (FISH) 检测结果显示厌氧氨氧化菌在驯化和运行过程中出现不同程度的增殖, 厌氧氨氧化 ABR 反应器 4 个隔室的污泥中厌氧氨氧化菌所占比率分别由 4% 增加到 9%、8%、12% 和 30%, 呈现出前段隔室少、后段隔室多的分布规律.

关键词: 厌氧氨氧化; 厌氧折流板反应器; 制革废水; 颗粒污泥; 荧光原位杂交

中图分类号: X794 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4618-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.12.027

Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment

ZENG Guo-qu^{1,2}, JIA Xiao-shan¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. State Key Laboratory of Applied Microbiology Southern China, Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China)

Abstract: Anaerobic ammonium-N removal from tannery wastewater was investigated using a lab-scale anaerobic baffled reactor (ABR). The results indicated that ABR could be used as a good anaerobic ammonium oxidation reactor, the stable and effective performance of ammonium-N and COD removal from tannery wastewater was demonstrated in the ANAMMOX ABR. When the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration of the influents were in the range of $25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $76.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and COD ranged from $131 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $237 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, under the volumetric loading of $0.05 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ to $0.15 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD of the effluents were from $0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $7.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and from $35.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $69.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively, and the removal efficiency of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and COD were 90.8% to 99.6% and 66.9% to 74.7%, respectively. In addition, the brown-red, brown-yellow, red granular sludges were developed in ABR. SEM observation confirmed the presence of ANAMMOX bacteria in granular sludge of all four compartments of ANAMMOX ABR. According to FISH results, ANAMMOX bacteria had grown in all four compartments to various degrees during the acclimatization and running process, the percentage of ANAMMOX bacteria in sludge increased from 4% to 9%, 8%, 12% and 30% in compartment 1, compartment 2, compartment 3 and compartment 4, respectively, and a higher population percentage of ANAMMOX bacteria existed in the rear than in the front compartments.

Key words: ANAMMOX; anaerobic baffled reactor (ABR); tannery wastewater; granular sludge; fluorescence *in situ* hybridization (FISH)

自 ANAMMOX 被发现以来^[1], 各国研究者对其进行了多方面的深入研究, 目前取得了一系列的成果. 研究表明厌氧氨氧化菌具有生长缓慢^[2]、对环境要求苛刻^[3]、需要严格厌氧^[4]等特性. 厌氧氨氧化菌能否富集、厌氧氨氧化污泥的驯化和厌氧氨氧化反应能否快速启动并高效平稳运行, 与所采用的反应器类型和工艺操作方式直接相关^[5], 因此选择的反应器非常重要. 国内外学者采用了多种反应器进行厌氧氨氧化研究, 主要有序批式反应器

(SBR)^[6]、升流式厌氧污泥床反应器 (UASB)^[7]、推流式反应器^[8]、厌氧序批式反应器 (ASBR)^[9]、气提式反应器^[10]、(EGSB)^[11]、固定床反应器 (FBR)^[12]等, 均实现了厌氧氨氧化, 但厌氧折流板反应器 (ABR) 应用厌氧氨氧化甚少报道^[13].

收稿日期: 2014-05-14; 修订日期: 2014-08-08

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) 项目 (2006AA06Z322); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07206002)

作者简介: 曾国驱 (1966 ~), 男, 研究员, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: zengguoqu@163.com

尽管厌氧氨氧化为新型的脱氮新技术,具有良好的应用前景,但是以往主要对高氨氮、低碳氮比模拟无机废水的理论进行研究,导致应用范围窄. 厌氧氨氧化工艺的应用早期多集中在高浓度氨氮废水的处理上,主要包括消化污泥上清液^[14]、焦化废水^[15]、猪场废水^[16]和垃圾渗滤液^[17],对低浓度氨氮废水的处理和碳氮比较高的废水处理报道不多. 近年来,随着厌氧氨氧化研究的深入,厌氧氨氧化工艺逐渐应用于鱼肉罐头加工废水^[18]、制药废水^[19]、石化废水^[20]、光电工业废水^[21]、温室甲鱼养殖废水^[22]、低浓度生活污水^[7]等多种废水的处理,取得了较满意的效果. 但到目前为止,尚未有厌氧氨氧化工艺应用于制革废水的报道.

以往的研究发现,影响厌氧氨氧化的因素主要包括溶解氧^[2]、pH 值^[2, 23]、温度^[24]、有机物浓度^[25, 26]、高浓度氨和亚硝酸盐^[27]、有毒有害物质^[28]等. 但如何优化值得深入研究.

本研究利用新型高效厌氧反应器 ABR 进行厌氧氨氧化研究,首次应用于制革废水处理中,以期 ABR 厌氧氨氧化反应器处理制革废水工艺提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验装置

本试验采用 ABR 小试装置. ABR 反应器中每个隔室长 100 mm,宽 150 mm,高 300 mm,有效容积 3.6 L. 根据需要使用 4~6 个隔室,本试验中使用了 4 个隔室(见图 1). 避光并在室温(25~30℃)的条件下驯化和运行.

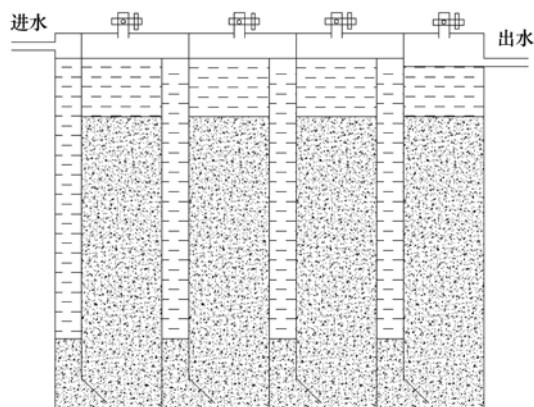


图 1 ABR 厌氧氨氧化试验工艺流程示意

Fig. 1 Schematic of ANAMMOX ABR reactor

1.1.2 接种污泥

厌氧氨氧化接种污泥由取自处理高浓度氨氮污水的厌氧污泥与河涌底泥混合而成,污泥床约占反应器容积的 60%.

1.1.3 试验用水

(1) 模拟废水

反应器污泥厌氧氨氧化在驯化阶段和启动期间试验用水为人工配制的模拟废水,模拟废水成分参考文献^[29],其组成($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)为: NaHCO_3 1 250, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 300, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 180, KH_2PO_4 27. 微量元素溶液 I $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, 微量元素溶液 II $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 分别以 NH_4Cl 和 NaNO_2 提供,按需配置. 其中微量元素溶液 I ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的组成为: EDTA 5 000, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 5 000; 微量元素溶液 II ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 的组成为: $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 430, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 240, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 990, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 250, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 190, H_3BO_3 314.

(2) 制革废水水质

厌氧氨氧化启动后,采用制革废水进行试验. 2 种废水用于本试验:取自经物理化学方法处理的制革厂废水和经小试生化处理装置(依次为 UASB 脱硫、小试 ABR 脱色降解和微曝气)处理的制革厂废水,水质情况如表 1 所示.

1.2 试验方法

1.2.1 水质分析方法

pH 采用 3210 手提式 pH 测定仪(德国 WTW 公司)测定, NH_4^+ -N 采用纳氏试剂分光光度法, NO_2^- -N 采用 N -(1-萘基)-乙二胺分光光度法, COD 采用重铬酸钾法^[30].

1.2.2 反应器污泥的驯化和厌氧氨氧化的启动

反应器污泥驯化阶段采用逐步提高负荷的运行方法进行:固定适宜的进水基质浓度,采用缩短水力停留时间(HRT)的方式提高反应器氮容积负荷. 每次缩短 HRT,监测 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 浓度以及 pH 值,根据 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 浓度的去除率、pH 值的变化、污泥情况等指标来决定下一个运行时间.

1.2.3 制革废水对厌氧氨氧化 ABR 反应器的冲击影响试验

取经小试 UASB 脱硫、小试 ABR 脱色降解、微曝气后的制革厂废水出水混合人工配制的模拟废水配成进水和制革厂废水(未经生化处理,按比例加入 NaNO_2),采用逐渐增加制革废水含量(提高废水浓度)的方式来驯化和试验制革废水对厌氧氨氧化 ABR 反应器的冲击影响.

表 1 制革废水水质

Table 1 Quality of tannery wastewater

项目	pH	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	BOD ₅ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^--\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
制革厂废水	6.2~7.8	$3.25\times 10^3\sim 5.62\times 10^3$	$312\sim 1.22\times 10^3$	36.7~302	未检出
厌氧氨氧化 ABR 进水	7.6~8.4	131~237	28.3~81.9	19.3~76.2	21.2~83.3

1.2.4 ABR 污泥的厌氧氨氧化活性恢复

用模拟配水按 1.2.2 节的方法对 ABR 的厌氧氨氧化功能进行活性恢复. 活性恢复后采用人工配制的模拟配水与经亚硝化过程处理后的制革废水混合水作为厌氧氨氧化 ABR 的进水,采取固定水力停留时间,逐步提高负荷的方法进行重新驯化.

1.2.5 厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水效果的影响因素研究

考察不同水力停留时间、基质浓度对厌氧氨氧化 ABR 处理效果的影响.

1.2.6 污泥样品扫描电镜观察

制样步骤:3% 戊二醛固定,经 30%、50%、70%、90%、100% 乙醇逐级脱水后,乙酸异戊酯置换 2 次,临界点干燥,贴台,喷金.

电镜观察和拍照:采用日立 S-3000N 扫描电镜观察样品并拍照.

1.2.7 荧光原位杂交分析

采用 Amx820 探针 (AAAACCCCTCTACTTAG TGCCC) 进行 FISH 试验^[31]. 样品固定和杂交按参考文献^[32]进行. 用 Leica DM RA2 荧光显微镜进行原始荧光图像的采集,Leica CW4000 FISH 软件进行荧光图像的合成后,使用 Leica QS00IW 图像分析系统进行分析. 通过其荧光杂交面积与通用荧光探针杂交面积的比较,计算目标微生物的相对丰度.

2 结果与分析

2.1 反应器污泥的驯化和厌氧氨氧化的启动

为富集厌氧氨氧化细菌,首先采用模拟废水对反应器污泥进行驯化. 反应器污泥的驯化和厌氧氨氧化的启动初期,反应器运行的 HRT 为 48 h,进水 NH_4^+-N 浓度约为 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均容积负荷为 $0.010\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 该阶段反应器 NH_4^+-N 去除率甚低, NO_2^--N 的去除率约为 50%; 系统运行不太稳定,发生跑泥现象,出水混浊. 经过 30 d 的运行,反应器 NH_4^+-N 去除率逐渐提高,出现厌氧氨氧化活性并逐步提高,污泥流失现象减少至消失. 随着驯化进程的延续,反应器 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 的去除率稳步上升. 将 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 容积负荷分别提高到 $0.040\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.037\text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 时,从图 2 可以

看出, NH_4^+-N 去除率为 54.7% ~ 83.6%, 平均为 70.1%, NO_2^--N 去除率为 83.2% ~ 99.2%, 平均为 90.1%, NH_4^+-N 与 NO_2^--N 的去除量之比为 1:1.15. 该阶段出水清澈. 从反应器内取出污泥进行观察,发现具有明显特征的颗粒污泥,污泥颜色也从黑色转变为棕红色或红色,这与文献^[8,29,33]观察到的厌氧氨氧化污泥颜色相似. 同时出水 pH 值高于进水(见图 3). 综合该阶段的 ABR 反应器的处理效果、 NH_4^+-N 与 NO_2^--N 的去除量之比、厌氧氨氧化污泥颜色特征和进出水 pH 值,表明厌氧氨氧化 ABR 已启动.

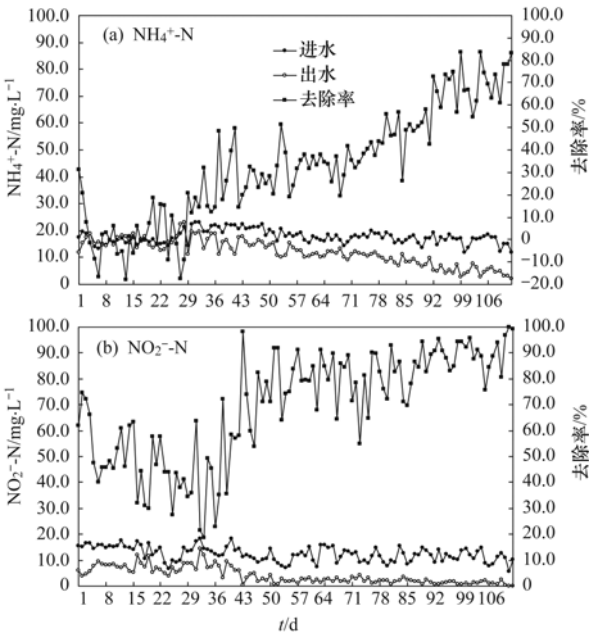


图 2 厌氧氨氧化启动过程中 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 去除效果曲线

Fig. 2 Performance of ABR in ammonia nitrogen and nitrite nitrogen removal during the start-up process

2.2 厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水的研究

2.2.1 制革废水对厌氧氨氧化 ABR 反应器的冲击影响试验

模拟废水厌氧氨氧化 ABR 启动成功后,采用逐步提高废水的浓度的方法对经过脱硫、脱色段和微曝气生化处理过的制革废水进行驯化和处理. 厌氧氨氧化 ABR 反应器处理低浓度的制革废水时,废水中的 COD 和 NH_4^+-N 的去除率维持较高的水平. 随着废水浓度的提高,反应器对 COD 和 NH_4^+-N 的处理

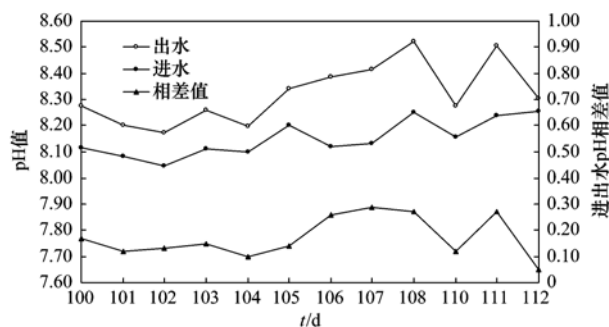


图3 厌氧氨氧化启动过程中 ABR 反应器
进出水 pH 值的情况

Fig. 3 The pH of influent and effluent in ANAMMOX ABR during the start-up process

效果逐渐下降,到第 7 d 时,当采用 100% 的制革废水(未经脱硫、脱色段生化处理过的制革废水)为进水时,其出水变得混浊,反应器失去厌氧氨氧化作用. 尽管如此,在提高废水的浓度的过程中,反应器对 NO_2^- -N 的去除率维持在 80% 以上的较高水平(图 4).

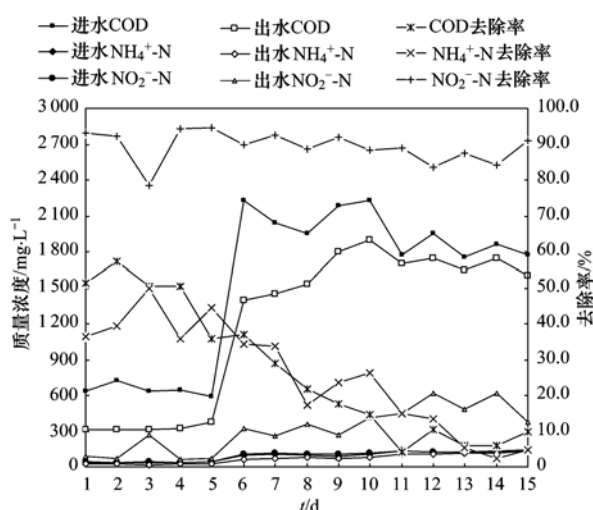
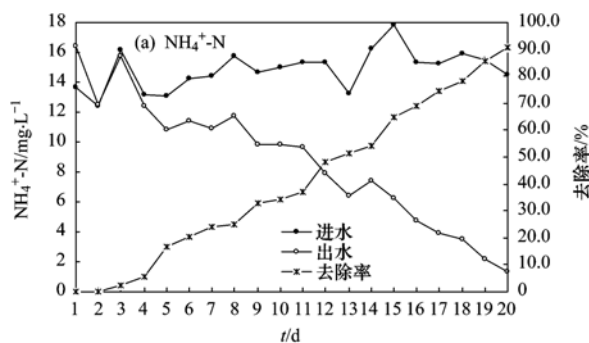


图4 制革废水对厌氧氨氧化 ABR 反应器冲击影响试验

Fig. 4 Performance of ANAMMOX ABR under impact of an increased concentration of tannery wastewater



2.2.2 厌氧氨氧化 ABR 的活性恢复

输入不含有机物的模拟废水,对厌氧氨氧化 ABR 进行活性恢复,经过 20 d 的持续运行,ABR 的厌氧氨氧化活性恢复正常, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除率均达到 90% 以上. 该过程呈现出与厌氧氨氧化驯化时类似的规律,但厌氧氨氧化活性恢复所需时间大大缩短(见图 5).

根据上述的试验结果,采用人工配制的模拟废水与经亚硝化过程处理后的制革废水混合水作为厌氧氨氧化 ABR 的进水,采取固定水力停留时间,逐步提高负荷的方法重新进行驯化. 经过 14 d 的驯化,成功启动实际制革废水厌氧氨氧化的脱氮处理. 从图 6 可以看出,厌氧氨氧化 ABR 的处理效果稳定, NH_4^+ -N 的去除率达到 74.4% ~ 93.1%.

2.2.3 厌氧氨氧化 ABR 处理效果的影响因素研究

从厌氧氨氧化 ABR 实际应用于制革废水处理出发,本试验的目的是使启动的厌氧氨氧化 ABR 稳定和有效地运行. 其中 HRT 和基质浓度是影响厌氧氨氧化的重要因素,考察不同水力停留时间、基质浓度对厌氧氨氧化 ABR 处理效果的影响,以确定合适的 HRT 和基质浓度.

采用在保持 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度不变的情况下,逐步缩短 HRT、提高水力负荷的方法,研究 NH_4^+ -N 去除情况,结果如图 7(a) 所示. 由图 7(a) 可以看出, HRT 由 24 h 缩短为 12 h 时, NH_4^+ -N 的去除率达 80% 以上; HRT 缩短至 6 h 时, NH_4^+ -N 的去除率显著下降为 50%,故合适的 HRT 为 12 h.

采用固定 HRT,保持反应器的容积负荷,提高 NH_4^+ -N 浓度的条件下研究其对反应器的处理效果,结果见图 7(b). 在 HRT 为 12 h 的条件下,当进水 NH_4^+ -N 为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 去除率为 85.5%,当进水 NH_4^+ -N 提高到 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 去除率下降到 76.8%,仍然处于较好的状态.

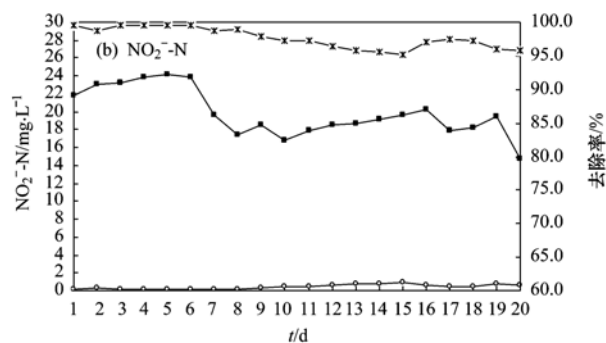


图5 去除 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的 ABR 厌氧氨氧化活性恢复过程

Fig. 5 Recovery process of ANAMMOX ABR for ammonia nitrogen and nitrite nitrogen removal and nitrogen removal

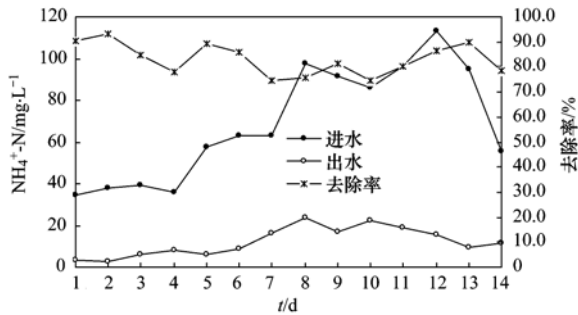


图6 以制革废水驯化反应器污泥的过程中 NH_4^+ -N的去除效果

Fig. 6 Ammonia nitrogen removal performance of ANAMMOX ABR during the domestication process of tannery wastewater

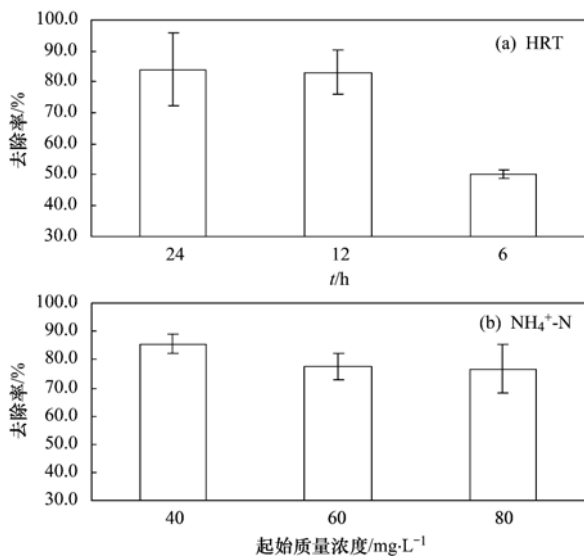


图7 HRT和 NH_4^+ -N浓度对ABR厌氧氨氧化的影响

Fig. 7 Effect of HRT and ammonia concentration on the performance of ANAMMOX ABR

2.2.4 厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水效果

根据2.2.3节的结果优化了试验条件,应用厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水,结果表明:厌氧氨氧化 ABR 进水 NH_4^+ -N为 $25.0 \sim 76.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NH_4^+ -N容积负荷为 $0.05 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,出水 NH_4^+ -N为 $0.20 \sim 7.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达 $90.8\% \sim 99.6\%$ [见图8(a)]. 在去除 NH_4^+ -N的同时,COD去除效果也同样稳定. 当进水 COD 为 $131 \sim 237 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水 COD 为 $35.1 \sim 69.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达 $66.9\% \sim 74.7\%$ [见图8(b)].

2.3 颗粒污泥的特征

从处理制革废水效果稳定期(第66 d)的反应器中取出污泥,发现出现大量外表呈棕红色或棕黄色至红色、颗粒粒径以 $2 \sim 3 \text{ mm}$ 为主的颗粒污泥(见图9). 从图9可以看见,第1隔室、第2隔室的

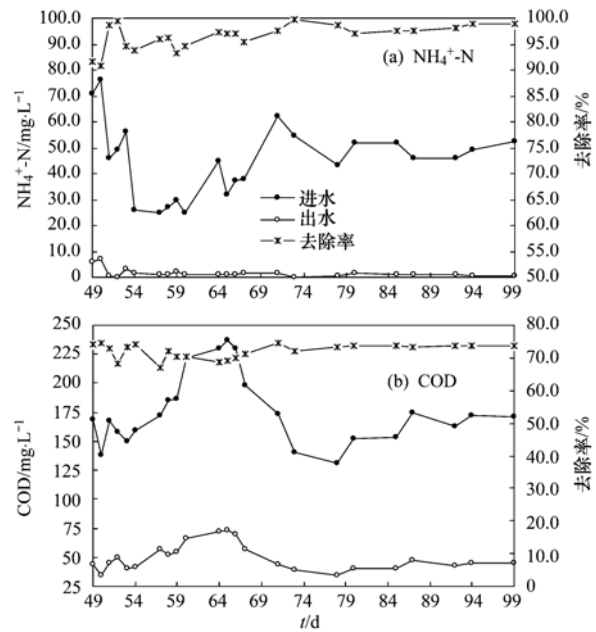


图8 ABR 厌氧氨氧化反应器对 NH_4^+ -N和 COD 的处理效果

Fig. 8 Ammonium nitrogen and COD removal performance of the ANAMMOX ABR

颗粒污泥呈棕红色或棕黄色,而第3隔室、第4隔室的颗粒污泥明显比第1、第2隔室的颜色要深,呈棕红色或棕黄色,部分颗粒污泥呈红色. 各隔室的颗粒污泥其粒径大小没有明显的区别.

为了解颗粒污泥中厌氧氨氧化微生物的形态特征,采用电镜扫描观察厌氧氨氧化颗粒污泥. 从图10可以看出,培养出的厌氧氨氧化颗粒污泥中以丝状菌和球状菌为主,也存在部分杆状菌. 其中球状菌菌体呈不规则椭圆形,簇生,其大小 $< 1 \mu\text{m}$,并且出现颗粒化. 这些都与典型的厌氧氨氧化菌形态相似. 有些菌体表面覆盖着黏性物质,推测是厌氧氨氧化细菌在代谢过程中分泌的胞外多聚物. 此外可观察到颗粒污泥表面有大量菌丝存在.

2.4 荧光原位杂交分析污泥中的厌氧氨氧化细菌

在采用电镜扫描观察厌氧氨氧化颗粒污泥的同时,对厌氧氨氧化污泥样进行荧光原位杂交分析,结果见图11,厌氧氨氧化的效率逐渐提高,厌氧氨氧化菌的丰度在此过程中出现不同程度的增加,探针Amx820检测到4个隔室的厌氧氨氧化菌丰度分别为9%、8%、12%和30%,其中第1隔室、第2隔室厌氧氨氧化菌有所增加,第3隔室、特别是第4隔室厌氧氨氧化菌的数量明显增多,所占比例增大. 这一分布规律与颗粒污泥的颜色、电镜观察和分析的结果一致.

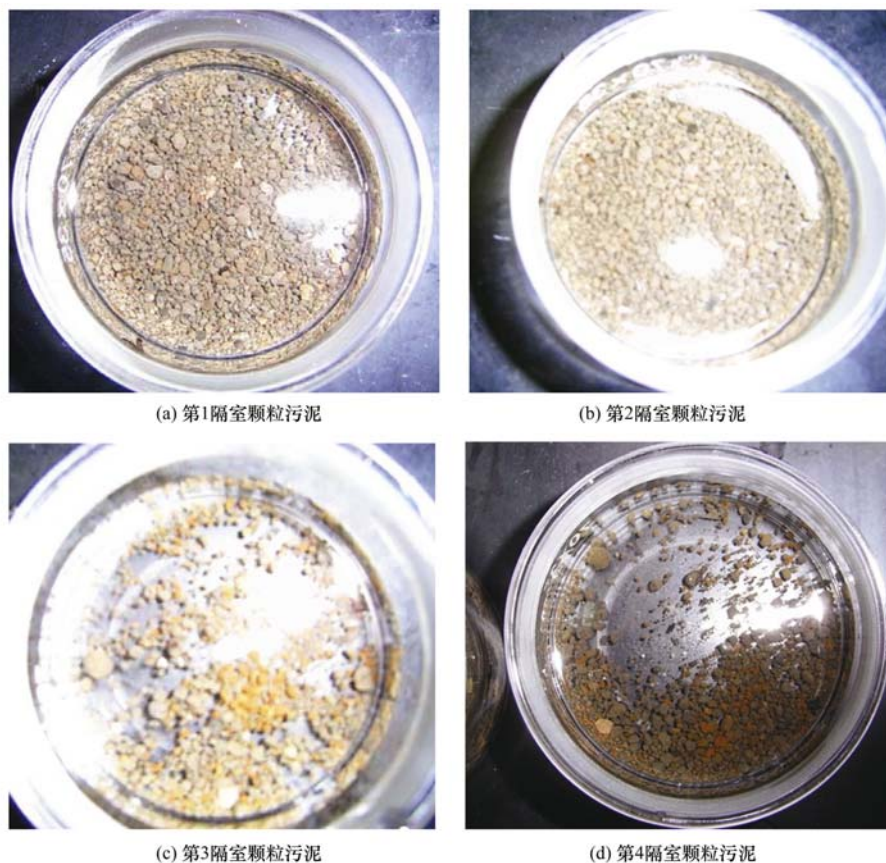


图9 厌氧氨氧化颗粒污泥的实物

Fig. 9 Photos of the granular sludges

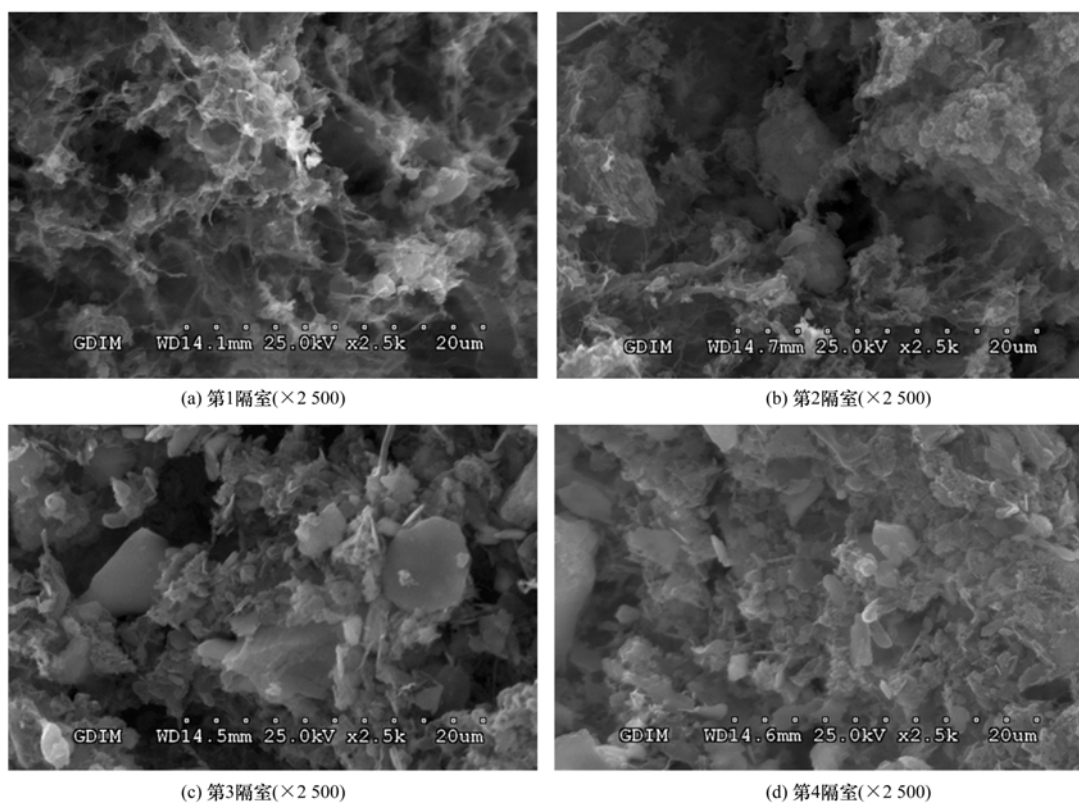


图10 厌氧氨氧化颗粒污泥的电镜照片

Fig. 10 SEM micrographs of cultivated granular sludge

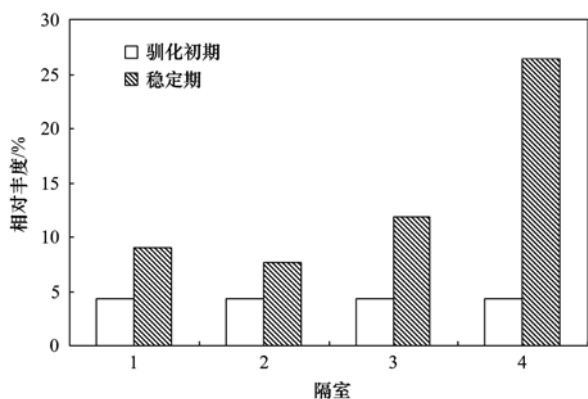


图 11 FISH 检测驯化污泥中厌氧氨氧化菌丰度变化

Fig. 11 Abundance variation of ANAMMOX bacteria in sludge detected by FISH

3 讨论

3.1 反应器污泥的驯化和厌氧氨氧化的启动

反应器污泥厌氧氨氧化启动的初期,反应器出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度高于进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率约为 50%. 这与唐崇俭等^[34]和 Chamchoi 等^[35]研究启动厌氧氨氧化反应时,在驯化初期发现出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度高于进水的情况一致.

随着驯化时间的推进,厌氧氨氧化得以启动.具体表现为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率逐步提高,驯化后期反应中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的消耗量比值约为 1:1.15,接近 Strous 等^[2]和 van de Graaf 等^[29]得出 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除量的理论比值(1:1.32)的水平,也与相关报道^[36]相似.另外,反应器的出水 pH 大于进水 pH,通过 pH 的变化可推断反应器进行 ANAMMOX 反应^[8, 37, 38];此外,接种污泥由黑色转为棕红色或深红的颗粒污泥,这些特征可认为已成功启动厌氧氨氧化反应^[38].

3.2 厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水的研究

根据 ABR 厌氧氨氧化反应器处理制革废水的试验结果,有机物(COD)的高低对厌氧氨氧化反应存在影响.一方面反应器中的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 可以被异养菌还原为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,从而为厌氧氨氧化菌所利用,增强反应器的处理效果.但由于制革废水中含有大量有机物,COD 浓度较高.有机物的加入,有利于异养菌大量生长,异养菌可以和厌氧氨氧化菌竞争 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 作为电子受体,从而限制厌氧氨氧化反应^[39].在本试验中当 COD 高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,厌氧氨氧化反应明显受到抑制,而当 COD 高于 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,厌氧氨氧化反应完全受到抑制. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的厌氧氨氧化率不断降低,而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的还原率上升或处于平稳状态

(达 80%), $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的消耗量之比远小于理论值 1:1.32. 因此,进水 COD 增大到一定程度使反应器内的主导反应类型由厌氧氨氧化向反硝化转变,这与 Du 等^[6]和 Chamchoi 等^[40]的结果类似.但在去除高浓度有机物(表现为高浓度 COD)后,ABR 中的污泥厌氧氨氧化活性迅速恢复,一方面是 ABR 中的颗粒污泥有一定的有机物冲击负荷,另一方面 ANAMMOX 菌仅受到抑制而并未真正死亡,因此,这种抑制是可逆的,只要条件合适,ANAMMOX 菌即可快速恢复厌氧氨氧化功能,这与文献[6, 41, 42]的研究结果类似.

通过优化条件,厌氧氨氧化 ABR 处理制革废水取得良好的效果.由于实际废水的缘故,水质的波动大,但厌氧氨氧化 ABR 处理效果稳定,在去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的同时也有效去除废水中的 COD.厌氧氨氧化 ABR 成功应用于实际废水处理,可为制革废水和其他废水的处理提供技术参考.

3.3 污泥特征和微生物分析

与模拟废水驯化的颗粒污泥相比,制革废水处理反应器的颗粒污泥颜色没有以模拟废水驯化的颗粒污泥的颜色鲜红,但更为密实.这与制革废水的水质相关,与 Park 等^[43]的研究结果相类似.

扫描电镜图片显示颗粒污泥以丝状菌和球状菌为主,也存在部分杆状菌,这种情况与其他研究者对厌氧氨氧化细菌的描述一致^[19, 44].菌体表面覆盖着黏性物质,推测是厌氧氨氧化细菌在代谢过程中分泌的胞外多聚物^[50].国内外研究者也观察到同样的现象^[19, 30, 35].胞外多聚物对厌氧氨氧化细菌形成颗粒污泥起稳定的作用^[45].

ABR 形成整体上为推流式(PF),局部区域为完全混合式(CSTR)的多个反应器串联的工艺.一方面颗粒污泥的形成为厌氧氨氧化细菌的增殖提供了良好的环境,使得厌氧氨氧化细菌成为形成优势,从而使污泥转为棕红色或棕黄色直至红色.另一方面,由于 ABR 的推流式工艺,不同的隔室其厌氧程度不同,ABR 中前段的隔室由于进水带来的氧气造成厌氧程度较低,后段的隔室因为前段的隔室中的兼性微生物已将带进的少量氧气消耗掉,还原电位变得更低,比前段的隔室更有利于厌氧氨氧化细菌的生长,导致后段隔室的厌氧氨氧化菌的数量更多.本试验中从颗粒污泥外观观察、电镜扫描和 FISH 的结果均证实了这一现象.

4 结论

(1)采用 ABR 以模拟废水成功启动厌氧氨氧

化反应并在反应器中形成棕红色和红色颗粒污泥, 将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 容积负荷分别提高到 $140 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $130 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率为 54.7% ~ 83.6%, 平均为 70.1%; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率为 83.2% ~ 99.2%, 平均为 90.1%。因此 ABR 可作为实现厌氧氨氧化的良好反应器。

(2) 厌氧氨氧化 ABR 反应器可有效处理制革废水, 当进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $25.0 \sim 76.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积负荷为 $0.05 \sim 0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $0.20 \sim 7.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率达 90.8% ~ 99.6%; 在去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的过程中, 厌氧氨氧化 ABR 同时也有效去除废水中的 COD。当进水 COD 为 $131 \sim 237 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水 COD 为 $35.1 \sim 69.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 去除率达 66.9% ~ 74.7%。

(3) 利用常规的水质分析方法结合分子生物学 FISH 方法以及电镜扫描的方法研究了反应器中污泥的厌氧氨氧化运行过程及其厌氧氨氧化菌的分布状况。经过启动和运行, 污泥中厌氧氨氧化菌所占比率大为提高, ABR 反应器 4 个隔室的污泥中厌氧氨氧化菌所占比率分别为 9%、8%、12% 和 30%, 并呈现出前段隔室少、后段隔室多的分布规律。常规方法结合现代分子生物学新技术可为厌氧氨氧化反应器的启动和运行提供指导。

参考文献:

- [1] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1995, **16**(3): 177-184.
- [2] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [3] Jin R C, Yang G F, Yu J J, *et al.* The inhibition of the Anammox process; a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **197**: 67-79.
- [4] Strous M, van Gerven E, Kuenen J G, *et al.* Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) sludge [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(6): 2446-2448.
- [5] 齐京燕, 李旭东, 曾抗美, 等. 厌氧氨氧化反应器研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2007, **13**(5): 748-752.
- [6] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [7] Ma B, Peng Y Z, Zhang S J, *et al.* Performance of anammox UASB reactor treating low strength wastewater under moderate and low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 606-611.
- [8] 刘寅, 杜兵, 司亚安, 等. 厌氧氨氧化菌的培养与推流式反应器氨氮工艺[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 137-141.
- [9] Slijkers A O, Derwort N, Campos Gomez J L, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [10] Hendrickx T L G, Wang Y, Kampman C, *et al.* Autotrophic nitrogen removal from low strength waste water at low temperature [J]. *Water Research*, 2012, **46**(7): 2187-2193.
- [11] Chen T T, Zheng P, Tang C J, *et al.* Performance of ANAMMOX-EGSB reactor[J]. *Desalination*, 2011, **278**(1-3): 281-287.
- [12] Wang T, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Start-up and long-term operation of the Anammox process in a fixed bed reactor (FBR) filled with novel non-woven ring carriers [J]. *Chemosphere*, 2013, **91**(5): 669-675.
- [13] Jin R C, Yu J J, Ma C, *et al.* Performance and robustness of an ANAMMOX anaerobic baffled reactor subjected to transient shock loads [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **114**: 126-136.
- [14] van Dongen U, Jetten M S M, van Loosdrecht M C M. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [15] Toh S K, Webb R I, Ashbolt N J. Enrichment of autotrophic anaerobic ammonium-oxidizing consortia from various wastewaters [J]. *Microbial Ecology*, 2002, **43**(1): 154-167.
- [16] Ahn Y H, Kim H C. Nutrient removal and microbial granulation in an anaerobic process treating inorganic and organic nitrogenous wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(6): 207-215.
- [17] Siegrist H, Reithaar S, Koch G, *et al.* Nitrogen loss in a nitrifying rotating contactor treating ammonium-rich wastewater without organic carbon [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(8-9): 241-248.
- [18] Dapena-mora A, Campos J L, Mosquera-Corral A, *et al.* Anammox process for nitrogen removal from anaerobically digested fish canning effluents [J]. *Water Science and Technology*, 2006, **53**(12): 265-274.
- [19] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [20] An P, Xu X C, Yang F L, *et al.* A pilot-scale study on nitrogen removal from dry-spun acrylic fiber wastewater using anammox process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **222**: 32-40.
- [21] Daverey A, Su S H, Huang Y T, *et al.* Partial nitrification and anammox process; A method for high strength optoelectronic industrial wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2013, **47**(9): 2929-2937.
- [22] Chen C J, Huang X X, Lei C X, *et al.* Effect of organic matter strength on anammox for modified greenhouse turtle breeding wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **148**:

- 172-179.
- [23] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 335-342.
- [24] Vazquez-Padin J R, Fernandez I, Morales N, *et al.* Autotrophic nitrogen removal at low temperature [J]. *Water Science and Technology*, 2011, **63**(6): 1282-1288.
- [25] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [26] 操沈彬, 王淑莹, 吴程程, 等. 有机物对厌氧氨氧化系统的冲击影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2164-2169.
- [27] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short-and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **95**(Suppl): S170-S174.
- [28] 阳广凤, 金仁村, 余好, 等. 厌氧氨氧化工艺的抑制现象 [J]. *应用与环境生物学报*, 2012, **18**(3): 502-510.
- [29] van de Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor [J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [30] 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.
- [31] Tal Y, Watts J E M, Schreier H J. Anaerobic ammonia-oxidizing bacteria and related activity in Baltimore inner harbor sediment [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(4): 1816-1821.
- [32] Amann R I. In situ identification of micro-organisms by whole cell hybridization with rRNA-targeted nucleic acid probes [A]. In: Akkermans A D L, van Elsas J D, de Bruijn F J (Eds.). *Molecular microbial ecology manual* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. 1-15.
- [33] Strous M, van Gerven E, Zheng P, *et al.* Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations [J]. *Water Research*, 1997, **31**(8): 1955-1962.
- [34] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟, 等. 不同接种物启动 Anammox 反应器的性能研究 [J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(8): 683-688.
- [35] Chamchoi N, Nitisoravut S. Anammox enrichment from different conventional sludges [J]. *Chemosphere*, 2007, **66**(11): 2225-2232.
- [36] Yang Z, Zhou S, Sun Y. Start-up of simultaneous removal of ammonium and sulfate from an anaerobic ammonium oxidation (anammox) process in an anaerobic up-flow bioreactor [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **169**(1-3): 113-118.
- [37] Zhang L, Yang J C, Ma Y G, *et al.* Treatment capability of an up-flow anammox column reactor using polyethylene sponge strips as biomass carrier [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2010, **110**(1): 72-78.
- [38] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor: Operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance [J]. *Desalination*, 2012, **286**: 436-441.
- [39] Ni S Q, Ni J Y, Hu D L, *et al.* Effect of organic matter on the performance of granular anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 701-705.
- [40] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [41] Kimura Y, Isaka K, Kazama F, *et al.* Effects of nitrite inhibition on anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(1): 359-365.
- [42] Monballiu A, Desmidt E, Ghyselsbrecht K, *et al.* Enrichment of anaerobic ammonium oxidizing (Anammox) bacteria from OLAND and conventional sludge: Features and limitations [J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, **104**: 130-137.
- [43] Park H, Rosenthal A, Jezek R, *et al.* Impact of inocula and growth mode on the molecular microbial ecology of anaerobic ammonia oxidation (anammox) bioreactor communities [J]. *Water Research*, 2010, **44**(17): 5005-5013.
- [44] Cho S, Takahashi Y, Fujii N, *et al.* Nitrogen removal performance and microbial community analysis of an anaerobic up-flow granular bed anammox reactor [J]. *Chemosphere*, 2010, **78**(9): 1129-1135.
- [45] Liu X W, Sheng G P, Yu H Q. Physicochemical characteristics of microbial granules [J]. *Biotechnology Advances*, 2009, **27**(6): 1061-1070.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人