

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第7期

Vol.35 No.7

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

区域污染对本底地区气溶胶光学特性及辐射强迫影响的地基和卫星遥感观测研究	张小玲, 夏祥鳌, 车慧正, 汤洁, 唐宜西, 孟伟, 董瑶 (2439)
北京上甸子区域大气本底站甲基氯仿在线观测研究	姚波, 周凌晔, 刘钊, 张根, 夏玲君 (2449)
浙江临安大气本底站 CO 浓度及变化特征	方双喜, 周凌晔, 栾天, 马千里, 王红阳 (2454)
南京北郊夏季大气颗粒物中有机碳和元素碳的污染特征	段卿, 安俊琳, 王红磊, 缪青 (2460)
西安冬季非灰霾天与灰霾天 PM _{2.5} 中水溶性有机氮污染特征比较	程玉婷, 王格慧, 孙涛, 成春雷, 孟静静, 任艳芹, 李建军 (2468)
沙尘天气对兰州市 PM ₁₀ 中主要水溶性离子的影响	王芳, 陈强, 张文煜, 郭勇涛, 赵连彪 (2477)
上海大气降水中细菌气溶胶的多样性研究	梁宗敏, 杜睿, 杜鹏瑞, 王亚玲, 李梓铭 (2483)
重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量	彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 王定勇 (2490)
宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析	李璇, 王雪松, 刘中, 吴梁, 翁燕波, 胡杰 (2497)
包装印刷行业挥发性有机物控制技术评估与筛选	王海林, 王俊慧, 祝春蕾, 聂磊, 郝郑平 (2503)
氨水混合吸收剂脱除 CO ₂ 实验研究	夏芝香, 项群扬, 周旭萍, 方梦祥 (2508)
焦炉烟气中二噁英类物质排放水平研究	孙鹏程, 李晓璐, 成钢, 陆勇, 吴昌敏, 罗锦洪 (2515)
2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源	邢建伟, 钱薇微, 绳秀珍 (2520)
千岛湖水体悬浮颗粒物吸收特性及其典型季节差异	王明珠, 张运林, 施坤, 高冀, 刘刚, 蒋浩 (2528)
千岛湖溶解氧的动态分布特征及其影响因素分析	殷燕, 吴志旭, 刘明亮, 何剑波, 虞左明 (2539)
太湖夏季水体中尿素的来源探析	韩晓霞, 朱广伟, 许海, Steven W. Wilhelm, 秦伯强, 李兆富 (2547)
鄱阳湖阻隔湖泊浮游植物群落结构演化特征: 以军山湖为例	刘霞, 钱奎梅, 谭国良, 邢久生, 李梅, 陈宇炜 (2557)
不同营养湖泊沉积物中 ²¹⁰ Pb _{ex} 和营养盐垂向分布特征及相关性分析	王小雷, 杨浩, 顾祝军, 张明礼 (2565)
地下水硝酸盐污染抽出处理优化方法模拟研究	姜烈, 何江涛, 姜永海, 刘菲 (2572)
预压力混凝沉淀除藻工艺中 DOC 变化规律研究	陈雯婧, 丛海兵, 徐亚军, 王巍, 蒋新跃, 刘玉娇 (2579)
类水滑石 Mg/Zn/Al 焙烧产物对高氯酸盐的吸附	王红宇, 刘艳 (2585)
粉煤灰对阴离子水溶性混合染料的吸附动力学	孙德帅, 郑强强, 张晓东, 方龙 (2590)
SDS 对两性修饰膨润土吸附 Cd ²⁺ 的影响	王建涛, 孟昭福, 杨亚提, 杨淑英, 李彬, 马麟莉, 许绍娥 (2596)
老化的生物质炭性质变化及对非吸持的影响	唐伟, 郭悦, 吴景贵, 黄兆琴, 代静玉 (2604)
TiO ₂ 光催化降解 PFOA 的反应动力学及机制研究	李明洁, 喻泽斌, 陈颖, 王莉, 刘晴, 刘钰鑫, 何丽丽 (2612)
荧光猝灭法研究洛克沙肿与腐殖酸的相互作用	朱江鹏, 梅婷, 彭云, 葛思怡, 李时银, 王国祥 (2620)
改性活性炭纤维电芬顿降解苯酚废水性能研究	马楠, 田耀金, 杨广平, 谢鑫源 (2627)
催化铁强化低碳废水生物反硝化过程的探讨	王梦月, 马鲁铭 (2633)
聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 为反硝化固体碳源的脱氮特性研究	刘佳, 沈志强, 周岳溪, 曹蓉, 李元志 (2639)
某造纸厂废水中二噁英含量及其电子束辐照降解	青宪, 黄锦琼, 余小巍, 张素坤, 杨艳艳, 任明忠, 温玉龙 (2645)
嘉兴市规模化养猪场沼液水质调查研究	卫丹, 万梅, 刘锐, 王根荣, 张讯达, 文晓刚, 赵远, 陈吕军 (2650)
提高污泥碱性发酵挥发酸积累的新方法	李晓玲, 彭永臻, 柴同志, 朱建平, 王淑莹 (2658)
滴水湖及其水体交换区沉积物和土壤中 PAHs 的分布及生态风险评价	郭雪, 毕春娟, 陈振楼, 王薛平 (2664)
舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征	江敏, Le Huy Tuan, 梅卫平, 阮慧慧, 吴昊 (2672)
青藏高原湖泊流域土壤与牧草中多环芳烃和有机氯农药的污染特征与来源解析	谢婷, 张淑娟, 杨瑞强 (2680)
福建鹭峰山脉土壤有机氯农药分布特征及健康风险评价	黄焕芳, 祁士华, 瞿程凯, 李绘, 陈文文, 张莉, 胡婷, 石燎 (2691)
不同功能区表层土中全氟化合物污染指纹及其来源解析	张鸿, 赵亮, 何龙, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (2698)
桑沟湾溶解态无机砷的分布、季节变化及影响因素	李磊, 任景玲, 刘素美, 蒋增杰, 杜金洲, 方建光 (2705)
引黄灌区不同尺度农田土壤重金属空间分布及污染评价: 以银川市兴庆区为例	王幼奇, 白一茹, 王建宇 (2714)
三峡水库消落区土壤、植物汞释放及其在斑马鱼体的富集特征	李楚娴, 孙荣国, 王定勇, 赵铮, 张金洋, 马明, 张成 (2721)
广东典型海水养殖区沉积物及鱼体中磺胺类药物的残留及其对人体的健康风险评价	何秀婷, 王奇, 聂湘平, 杨永涛, 程章 (2728)
青岛市区大气降尘重金属对人体健康风险的评价	张春荣, 吴正龙, 姚春卉, 高宗军 (2736)
焦炉排放多环芳烃与人体健康风险评价研究	伯鑫, 王刚, 温柔, 赵春丽, 吴铁, 李时蓓 (2742)
Cd、Cu 和 Pb 复合污染对蚯蚓抗氧化酶活性的影响	王辉, 谢鑫源 (2748)
3 种氯酚对嗜热四膜虫的毒性效应	李雅洁, 崔益斌, 蒋丽娟, 窦静, 李梅 (2755)
施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究	陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 刘孝利, 叶长城, 罗梅梅, 毛懿德 (2762)
保护性耕作对茬冬小麦土壤 CO ₂ 和 N ₂ O 排放的影响	潘莹, 胡正华, 吴杨周, 孙银银, 盛露, 陈书涛, 肖启涛 (2771)
渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系	贾曼莉, 郭宏, 李会科 (2777)
蒸汽-空气混合注射修复 TCE 污染的二维土箱实验研究	王宁, 彭胜, 陈家军 (2785)
铜离子对双室微生物燃料电池电能输出的影响研究	牟姝君, 李秀芬, 任月萍, 王新华 (2791)
连续流强制通风槽式污泥堆肥工艺的温室气体和氨气排放特征	赵晨阳, 魏源送, 葛振, 钟佳, 才兴, 张媛丽, 李洪枚 (2798)
冬季猪粪固体堆放过程中 NH ₃ 、N ₂ O 和 NO 排放特征研究	丁钢强, 韩圣慧, 袁玉玲, 罗琳, 王立刚, 李虎, 李萍 (2807)
填埋场渗滤液腐殖酸随填埋龄的变化特性及模型研究	黄友福, 许心雅, 范良鑫, 方艺民 (2816)
渗滤液反渗透浓缩液回灌出水水质变化规律的研究	王东梅, 刘丹, 刘庆梅, 陶丽霞, 刘颖 (2822)
中国铅流变化的定量分析	马兰, 毛建素 (2829)
半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展	赵志瑞, 侯彦林 (2834)
《环境科学》征稿简则 (2679)	
《环境科学》征订启事 (2735)	
信息 (2476, 2556, 2713, 2770)	

半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展

赵志瑞^{1,2}, 侯彦林^{3*}

(1. 石家庄经济学院水资源与环境学院, 石家庄 050031; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 半短程亚硝化-厌氧氨氧化脱氮技术具有良好的发展前景, 该工艺的发展以及应用分子生物学技术对好氧氨氧化菌种群和厌氧氨氧化种群生态学的研究备受人们关注. 本文综述了工艺原理和影响因子诸如温度、pH 值、氧的可利用性、游离氨浓度等对氨氧化菌及厌氧氨氧化菌的影响, 并介绍了应用分子生物学方法对氨氧化菌与厌氧氨氧化菌的类别及分布的研究结果, 并对该工艺提出了展望.

关键词: 生物脱氮; 半短程亚硝化; 厌氧氨氧化; 氨氧化菌; 厌氧氨氧化菌

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)07-2834-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.07.056

Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation

ZHAO Zhi-rui^{1,2}, HOU Yan-lin³

(1. College of Water Resources and Environment, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation is a very significant biological nitrogen removal technology for saving energy and carbon sources. The development of this technology and the community ecology of ammonia-oxidizing bacterium (AOB) and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (ANAOB) using molecular biological methods have attracted growing attention. The paper reviewed the technological mechanism and the effects of key factors such as temperature, pH, dissolve oxygen and free ammonia on the distribution of AOB and ANAOB. It was also introduced that the populations of AOB and ANAOB species and their abundance in various environments. At the end, some suggestions were provided for the development of this technology in the future.

Key words: biological nitrogen removal; partial nitrification; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); ammonia-oxidizing bacterium (AOB); anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (ANAOB)

低成本减少水体氮素污染, 是生物处理工艺面临的挑战. 传统生物脱氮工艺, 存在供氧动力消耗大, 需投加有机碳源, 产生大量剩余污泥和温室气体(CO₂)等先天性不足, 并且由于硝化菌和聚磷菌在污泥停留时间和碳源的需求上存在着竞争, 使得氮、磷的高效去除很难同时达标排放, 且投资成本和运行费用高^[1,2]. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺是 20 世纪 90 年代发展起来的一种新型高效脱氮工艺, 与传统脱氮工艺相比, 脱氮工艺反应途径较短, 减少供氧量, 不需要碱度和有机碳源的投加, 大大节约了能源和运行成本^[3,4]. 因此该工艺与其伴随的氨氧化菌与厌氧氨氧化菌的有关研究吸引了许多国内外学者的关注. 本文综述了该工艺特性并重点介绍了该工艺中的微生物特征, 并对应用前景提出展望.

1 新型的脱氮工艺

要想将 ANAMMOX 工艺, 应用于实际废水的生物脱氮, 首先必须解决合适的基质来源问题. 这就需要建立 ANAMMOX 菌和其它微生物的协同作用系统, 或者与其它工艺进行组合运行. 基于以上思路, 目前已开发出的 ANAMMOX 生物脱氮工艺主要有: SHARON-ANAMMOX 联合工艺^[5,6]、CANON 工艺^[7,8]等.

1.1 SHARON-ANAMMOX 工艺

Single Reactor for High Ammonium Removal Over Nitrite-ANAMMOX, 该工艺是荷兰 Delft 技术大学开

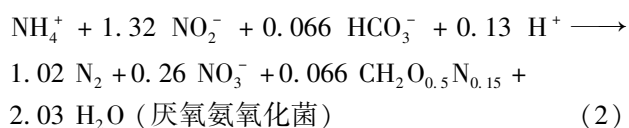
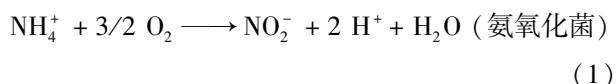
收稿日期: 2013-10-29; 修订日期: 2013-12-19

基金项目: 中国科学院重点部署项目(KZZD-EW-09-1)

作者简介: 赵志瑞(1975~), 女, 博士, 主要研究方向为水处理及环境微生物, E-mail: zhiruizh@163.com

* 通讯联系人, E-mail: bjyours@sina.com

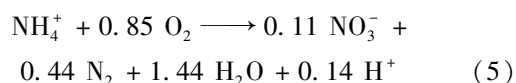
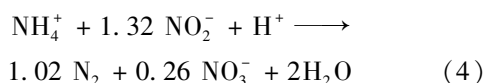
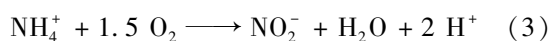
发的一种新型的脱氮工艺^[9],该工艺反应式即:



该组合工艺首先用于处理鹿特丹 Dokhaven 污水处理厂的污泥消化上清液,SHARON 采用 10 L 的 CSTR 反应器,水力停留时间(HRT)为 1 d, 53% 的氨氮转为 NO_2^- , 无 NO_3^- 形成. ANAMMOX 采用 SBR 反应器,在氮负荷为 $1.2 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,超过 80% 的氨氮被转化为 N_2 ^[10]. Dapena-mora 等^[11] 试验表明,SHARON-ANAMMOX 可以用于处理高氨氮和高盐度的工业废水,氨氧化菌将氨氧化到亚硝酸盐阶段;随后 ANAMMOX 菌将剩余的氨离子和生成的亚硝酸根离子转化成 N_2 ,从而实现自养脱氮. 系统平均氨氮去除率达 68%. 与传统生物脱氮工艺相比,优点较多,具有较高的实用推广价值.

1.2 CANON 工艺

该工艺是指在生物膜或单个反应器内,通过控制较低 DO 浓度来实现短程硝化和 ANAMMOX,从而达到脱氮的目的. CANON 反应已在实验中得到验证^[12,13]. 其主要进行好氧氨氧化作用[式(3)]和 ANAMMOX 作用[式(4)],总反应过程[式(5)]可表示为:



CANON 工艺的主要优点:两个反应过程在一个反应器中同时进行,缩短了工艺流程;硝化过程控制在亚硝化阶段,供氧量减少大约 25%;可以缩短 HRT,减少反应器的体积和占地面积.

CANON 工艺的主要缺点:单级反应器所能达到的全程自养脱氮效率较亚硝化-ANAMMOX 组合工艺要低;运行条件如温度、氨表面负荷等对脱氮效果有较大影响,从而不易控制;工艺运行的稳定性差^[14,15].

1.3 半短程亚硝化与 ANAMMOX 联合脱氮工艺

半短程亚硝化 ANAMMOX 工艺包含两个生物过程,废水中约 50% 的氨氮首先在 AOB 的作用下,在好氧条件下被氧化为亚硝酸盐;随后短程硝化器

的出水(包含生成的亚硝酸盐和未反应完的氨氮)作为 ANAMMOX 反应器的进水,ANAMMOX 菌在厌氧条件下,以亚硝酸盐为电子受体和氨氮作为直接电子供体反应生成氮气,达到废水中氨氮的全程自养脱氮^[16,17]. 在半短程硝化-ANAMMOX 联合工艺过程中,脱氮作用的微生物包括氨氧化菌与 ANAMMOX 菌^[18,19].

半短程硝化-ANAMMOX 工艺中需要将部分氨氮氧化为亚硝酸盐氮,然后此亚硝酸盐氮再氧化剩余部分的氨氮,实现脱氮(图 1)^[20].

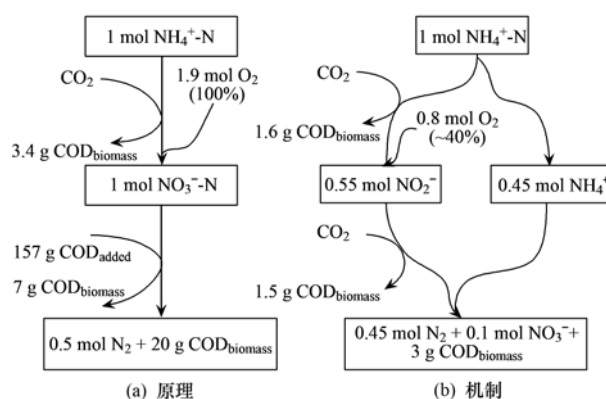


图 1 传统硝化反硝化生物脱氮与短程硝化/厌氧氨氧化自养生物脱氮工艺比较

Fig. 1 Comparison of nitrification/heterotrophic denitrification with the autotrophic nitrification/anammox process

该工艺只需消耗 0.8 mol 的氧气;无需有机物作为碳源,直接利用二氧化碳为碳源;该工艺是全程自养脱氮,因此污泥产生量低,减少污泥处置的费用. 该工艺可节省 60% 的供氧能耗;由于无需外加碳源,也节省了外加碳源所增加的运行费用. 此外 ANAMMOX 菌以二氧化碳为碳源,在代谢途径中没有 N_2O 等中间产物,因此也减少了温室气体的排放.

这些新工艺都力求缩短“氮”的转化途径和过程,就是将亚硝酸盐氧化菌(NO_B)从反应器中淘洗掉,同时将 AOB 有效保留在反应器中,从而实现把氨氮氧化为亚硝酸盐,而不再继续被氧化为硝酸盐. 要想实现 NO_B 被淘洗,首先使反应器内 AOB 的增长率大于 NO_B 的增率,通过适当的工艺运行条件将反应器内的 NO_B 逐渐淘洗出去.

2 影响亚硝酸盐积累与菌群增长的因素

2.1 温度

祖波等^[21] 研究发现温度为 30℃ 时,氨氧化速率最大,25℃ 和 35℃ 时依次降低,在温度大于 15℃

时,适于亚硝酸盐的积累,但只有当温度大于 15℃ 时,亚硝酸盐积累才有竞争优势. 在低温条件下 AOB 的最小污泥龄大于 NOB 的最小污泥龄,而在高温条件下 AOB 的最小污泥龄明显小于 NOB 的最小污泥龄,因此在该条件下可通过调整污泥龄来达到淘洗掉 NOB 的目的,这也解释了夏天为何更容易出现亚硝酸盐积累的情况. SHARON 工艺利用这一特点,在温度 30 ~ 35℃ 条件下, AOB 的生长率明显快于 NOB 的生长率,水力停留时间 (HRT) 介于 NOB 和 AOB 的最小停留时间之间,而使 AOB 得到积累 NOB 被逐渐淘汰,以维持稳定的亚硝酸积累.

近来研究认为^[22],在温度 28 ~ 38℃ 下, NOB 的最小倍增时间要小于 AOB,是最佳的脱氮温度. 杨洋等^[23]在 pH 值为 8.2、起始 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 质量浓度均为 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、污泥质量浓度 (VSS) 约为 1.6 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的试验条件下,控制反应温度为 30 ~ 35℃ 时, ANAOB 反应速率最高,温度升至 40℃ 时,反应活性明显下降,反应最适温度为 30 ~ 35℃,在水温 65℃ 的仍有 ANAOB 存在;且在水温为 52℃ 时 ANAOB 为 *Candidatus Brocadia fulgida*、*Candidatus Brocadia anammoxidans* 及 *Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*^[24].

2.2 溶解氧 (DO)

硝化反应是好氧过程,必须在有氧条件下才能进行. Perez 等^[25]研究发现氨氧化反应主要发生在前面两个曝气池,而亚硝酸盐氧化反应主要发生在最后面曝气池,认为 AOB 对氧亲和力大于 NOB 对氧亲和力,因此造成此现象的发生. Kornaros 等^[26]认为由缺氧转入好氧环境时, AOB 可以立即以最大生长速率增长,而 NOB 需要一定的恢复时间才可以达到其最大的生长速率. 当系统中 DO 的浓度低于 0.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, AOB 的亚硝化速率没有明显受到抑制,主要因为 AOB 产率快速增长抵消了低 DO 对氨氧化速率降低的影响,而 NOB 的产率和氧化亚硝态氮的速率却没有因溶解氧的降低而提高,且受到明显抑制^[27,28]. ANAMMOX 是严格的厌氧反应, ANAOB 对氧气很敏感,当 $\text{DO} > 2 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, ANAOB 的活性会完全被抑制,这种抑制是可逆的.

2.3 游离氨 (FA) 及 pH 值

废水中的氨根据不同的 pH 值,分别以离子态和分子态的形式存在. 分子态游离氨 (FA) 对硝化作用有着明显的抑制作用,而 NOB 比 AOB 更易受到 FA 的抑制,因此 FA 会抑制亚硝酸盐氧化成硝酸盐^[29]. 研究发现当 FA 浓度为 1.0 ~ 5.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

时,对硝化反应发生抑制作用,而对亚硝化反应不产生影响;当 FA 浓度为 24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,则硝化反应被完全抑制^[30,31]. 因此,要保证氨氧化反应的正常进行,就要控制系统中 FA 的浓度介于亚硝酸盐氧化菌抑制浓度和氨氧化菌抑制浓度之间. pH 值对 AOB 和 NOB 也有明显的影响,研究发现 AOB 的最适宜的 pH 值为 7.0 ~ 8.6,而 NOB 的 pH 值范围是 7.7 ~ 8.1, pH 在 8.0 附近时, NO_2^- -N 的生成速率最大,而 NO_3^- -N 的生成速率在 pH 为 7.0 附近为最大^[32,33]. 利用 AOB 和 NOB 的最适 pH 值不同,控制混合液的 pH 值,从而得到亚硝态氮的积累. 研究发现当 pH 为 (7.5 ± 0.22) 时, AOB 浓度开始降低,当 pH 提高到 9.3 ± 0.24 后, AOB 浓度降低非常明显^[34,35].

2.4 污泥龄

由于氨氮的硝化速率比亚硝氮的氧化速率明显快,当温度高于 15℃ 时, AOB 的世代周期比 NOB 的短. 因此,可以通过控制系统的污泥龄而实现亚硝酸型硝化,使泥龄介于 AOB 和 NOB 的最小停留时间之间,使得系统中 NOB 逐渐被冲洗掉, AOB 成为系统优势菌. 一般认为当供氧没有限制时,污泥龄是影响氨氧化菌增长的主要因素,控制污泥停留时间 (SRT) 在 10 d 左右,可以有效地促进氨氧化菌的增长.

3 氨氧化菌与厌氧氨氧化菌的研究

3.1 氨氧化菌的研究

3.1.1 氨氧化菌的分类及分布

AOB 是一类能够在好氧条件下将氨氧化为亚硝酸盐的化能无机自养型细菌,广泛存在于自然环境中,所有的 AOB、NOB 均属于变形菌纲 Proteobacteria 的 β 和 γ 亚纲. R 亚纲好氧氨氧化菌适合在海洋环境生长,主要是 *Nitrosococci* 属,该属由 3 种亲缘关系密切的 *Nitrosococcus* 组成, *Nitrosococcus oceanus*、*Nitrosococcus halophilus*^[36]. β 亚纲的亚硝化细菌又可分为两个类群:亚硝化单胞菌群 (*Nitrosomonas*) 和亚硝化螺菌群 (*Nitrospira*). β -Proteobacteria 亚纲至少可以分为 7 个 Cluster, 如图 2^[37,38].

3.1.2 氨氧化菌的研究应用

AOB 又名亚硝化菌,其氧饱和常数一般为 0.2 ~ 0.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NOB 又名硝化菌,其氧饱和常数为 1.2 ~ 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在污水处理中,低 DO 下亚硝酸氮大量积累的原因主要是由于亚硝化菌对

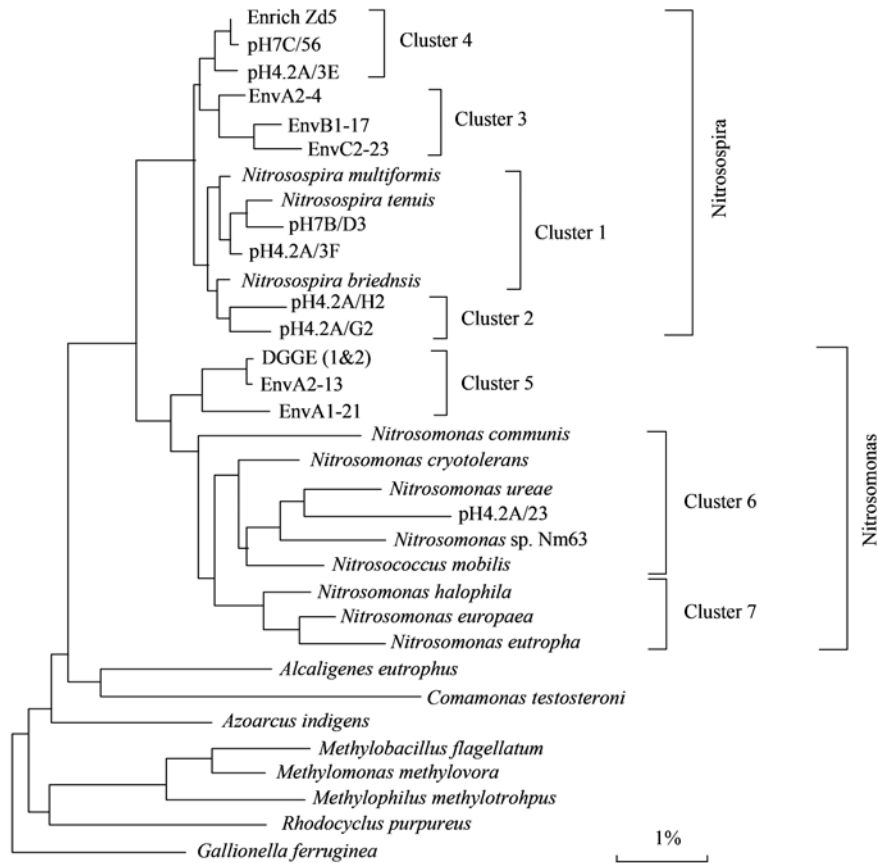


图 2 依据 16S rDNA 基因序列构建的氨氧化细菌的系统发育分类
Fig. 2 Phylogenetic relationships according to AOB 16S rDNA gene

DO 的亲合力要比硝化菌强^[39]。

Qin 等^[40]发现在膜生物反应器处理污水工艺中, DO 浓度较高的生物膜外侧主要聚集着 *Nitrosomonas europaea* 和 *Nitrosomonas oligotropha* 的氨氧化细菌,少数为 *Nitrosomonas communis*,而 *Nitrospira*-like 却偶尔存在;而在 DO 浓度低的内侧则只有 *Nitrosomonas oligotropha* 细菌的存在,Qin 等也发现在溶解氧低氧区域有 *Nitrosomonas mobilis* 和 *Nitrosomonas europaea/eutropha* 细菌的共存现象,并推测这可能是不同类型氨氧化细菌 AOB 的共生作用。其中,*Nitrosomonas mobilis* 细菌对氧气有较高的亲和力,而 *Nitrosomonas europaea/eutropha* 相关细菌优先利用亚硝酸盐为电子受体进行氨氧化作用,在低 DO 时表现出厌氧氨氧化活性。Kuai 等^[41]和 Lydmark 等^[42]在对处理高氨氮废水的生物反应器中微生物多样性的研究中发现:低 DO 条件出现了氮损失,而主要的 AOB 是类 *Nitrosomonas europaea*。

3.2 厌氧氨氧化菌的研究

3.2.1 厌氧氨氧化菌的分类及分布

目前发现的 ANAOB 有 5 个属,9 个种,全部为

自养菌(图 3)^[43],各种分别为待定黑海阶梯烷菌(*Candidatus Scalindua sorokinii*)、待定厌氧氨氧化布罗卡地菌(*Candidatus Brocadia anammoxidans*)、待定硫酸盐厌氧氨氧化球菌(*Candidatus Anammox ogobussulfate*)^[44]、待定荧光布罗卡地菌(*Candidatus Brocadia fulgida*)、待定丙酸厌氧氨氧化球菌(*Candidatus Anammox oglobus propionicus*)、待定韦格氏阶梯烷菌(*Candidatus Scalindua wagneri*)、待定布罗达氏阶梯烷菌(*Candidatus Scalindua brodae*)、待定亚洲杰特氏菌(*Candidatus Jettenia asiatica*)、待定斯图加特氏菌(*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*)。由于厌氧氨氧化同时需要亚硝酸和氨两种基质,在运行工艺中,当 DO 较低时,ANAOB 可与好氧 AOB 共存,互惠互利。好氧 AOB 产生的亚硝酸用作 ANAOB 的基质,而 ANAOB 消耗亚硝酸,可解除亚硝酸对好氧 AOB 的抑制^[45]。

3.2.2 厌氧氨氧化菌的代谢途径

根据同位素示踪及 ANAOB 基因组分析,其代谢机制为:第一步在亚硝酸盐氮氧化还原酶(NIR)的作用下,把 NO_2^- 还原为 NO ,同时吸收 1 个低能量

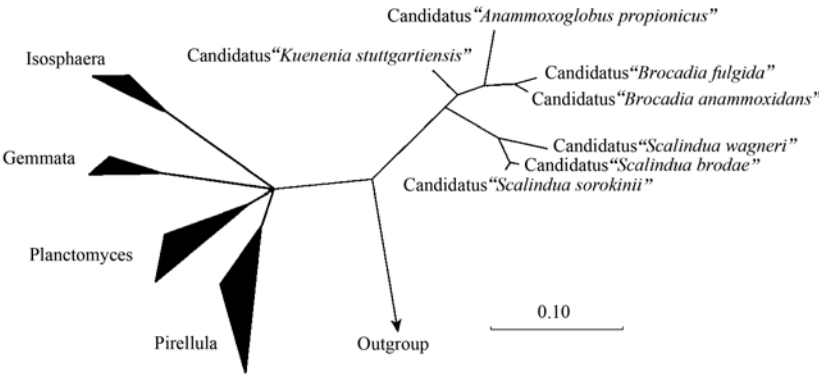


图 3 依据 16S rRNA 基因序列构建的厌氧氨氧化细菌的系统发育分类

Fig. 3 Phylogenetic relationships according to the 16S rDNA gene of ANAMMOX bacteria

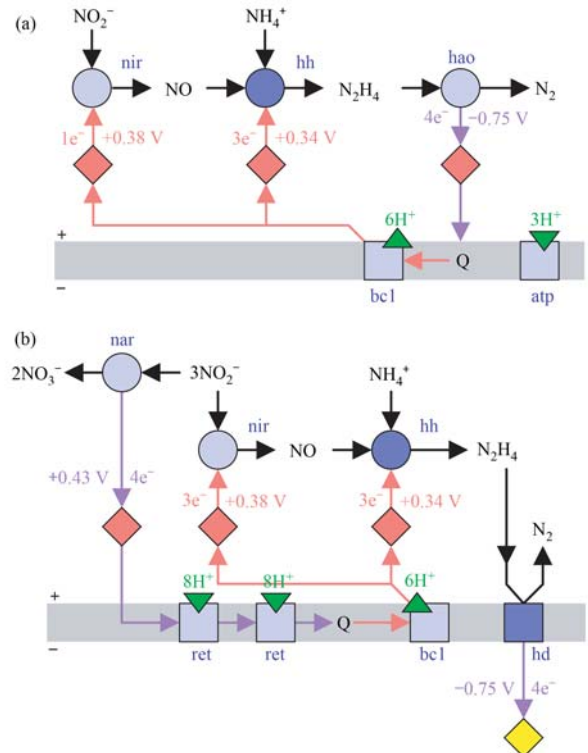
电子;然后在联氨水解酶的作用下,NO 氧化 NH_4^+ 产生联氨 N_2H_4 ,该过程吸收 3 个低能量的电子;联氨再提供电子产生还原态的铁氧还原酶,同时释放出 4 个高能量电子. 这些电子用于能量转化和产生质子运动势(PMF). 经过电子传递后的电子失去了能量,将进入下一个联氨合成的循环[图 4(a)]. PMF 可以激活位于厌氧氨氧化胞膜上的 ATP 酶产生 ATP. 还原态的铁氧化还原酶可为 CO_2 固定的乙

酰辅酶 A 途径提供电子. 在乙酰辅酶 A 途径中失去的电子由 NO_2^- -N 氧化为 NO_3^- -N 的氧化反应来补充. 此氧化反应中产生的电子为低能量的电子需要通过 PMF 驱动进行反向电子传递[图 4(b)]^[46,47].

Kartal 等^[48]以同位素示踪方法研究了 Candidatus “*Kuenenia stuttgartiensis*” 的异样代谢途径. 试验结果证明厌氧氨氧化菌 Candidatus “*Kuenenia stuttgartiensis*” 可以利用甲酸盐作为碳源,将 $^{15}\text{NO}_3^-$ 还原为 $^{15}\text{NO}_2^-$,进而再还原为 $^{15}\text{NH}_4^+$,随后利用 $^{15}\text{NO}_2^-$ 氧化 $^{15}\text{NH}_4^+$ 生成 ^{15}N .

3.2.3 厌氧氨氧化菌的研究应用

在厌氧菌方面,陈婷婷等发现发生厌氧氨氧化反应的前提条件是氨和亚硝酸盐同时存在,且没有氧存在,在湖泊底泥的好氧/缺氧界面上,氨和亚硝酸经常共存,是 ANAOB 的良好生境^[49]. 陈永等^[50]研究表明,当 NO_2^- 浓度大于 $84.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAOB 对 TN 的去除率明显下降,因此厌氧氨氧化过程受到抑制. 周少奇^[51]研究发现 ANAOB 在淡水生态系统中分布广,近来也发现 ANAOB 在海洋的氮循环起着很重要的作用. 在自然界高盐生态系统中已发现的厌氧氨氧化种群属于 Candidatus “*Scalindua sorokinii*”,其它种群发现在淡水系统中. Tsushima 等^[52]则报道 ANAOB 对 NO_2^- 的适应质量浓度可达 $710 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,这可能是由于反应器中富集了高浓度 ANAOB 的原因. Kartal 等^[53]采用 SBR 反应器对淡水厌氧氨氧化菌株进行了高盐废水的逐步驯化试验. 试验表明淡水厌氧氨氧化菌株能逐渐适应高盐废水,并且盐质量浓度可以达到 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 此外,也有研究发现 ANAOB 可以用来处理高氨氮高生物毒性的垃圾渗滤液^[54,55]. Lotti 等^[56]研究表明当亚硝态氮浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,厌氧氨氧化活性降低 50%,而且这种抑制可以迅速得到恢复,认



(a) 利用亚硝酸盐氮作为电子受体的氨氧化代谢途径;
(b) 硝酸盐氮还原酶产生乙酰辅酶 A 循环中
二氧化碳还原所需的铁氧还原酶

图 4 厌氧氨氧化菌代谢及电子传递途径

Fig. 4 Catabolism and reversed electron transport in the anammoxosome of anammox bacteria

为亚硝酸盐而非游离亚硝酸是真正的抑制剂。

4 氨氧化菌与厌氧氨氧化菌 16S rDNA 和功能基因引物比较

4.1 氨氧化菌 16S rDNA 和功能基因引物比较

废水处理中的 AOB 主要属于 β -变形菌亚纲(β -AOB),在研究废水处理中的 AOB 特性时,由于引物不同扩增的目的片段有很大差异引物,所以为了深入研究氨氧化菌的类型,比较了不同引物所扩增的菌群。李霜等^[57]用 NitF/NitR 扩增城市污水提取的 DNA, 结果与 *Nitrosomonas europaea* 具有 98.9% 的相似性,*Nitrosomonas nitrosa* 具有 99.3% 的同源性。Kowalchuk 等^[58]做变形梯度凝胶电泳(DGGE), 用不同的正向引物(CTO189 FA/B-GC, CTO189 FC-GC), 每一个引物前面加一个 GC 夹子(31 个碱

基)。正向引物分别为 CTO189 FA/B,CTO189 FC-GC。相同的反向引物 CTO654 R,这些引物扩增出 465 bp 氨氧化细菌 16S rDNA 的片段。经鉴定这些引物扩增结果为 *Nitrosospira briensis*、*Nitrosospira-like*, *Nitrosomonas europaea* 和 *Nitrosomonas-like*。吴宇澄等^[59]试验证明以 16S rDNA 通用引物作为第一轮引物,以 CTO 作为第二轮引物的巢式 PCR 可以提高扩增的敏感性,特异性也较好。David 等^[60]用 Nspra-675 F/Nspra-746 R 扩增 *Nitrospira* spp.。为了分析污水处理系统中氨氧化细菌的种群组成,筛选合成了一对氨氧化细菌 *amoA* 基因特异结合的引物序列, Hang 等^[61]用 *amoA*-1 F/*amoA*-2 R 来扩增功能基因片段(491bp),得到全部为目地片段,该引物特异性较好。各引物的详细序列如表 1 所示。

表 1 氨氧化菌引物及特征
Table 1 Primers and characteristics of AOB

引物名称	特异性	序列 5'-3'
NitF	<i>Nitrosomonas europaea</i>	ACTCCTACGGGAGGCAGCAGT
NitR	与 <i>Nitrosomonas nitrosa</i>	GGACTACCAGGTATCTAATCC
CTO189FA/B-GC	<i>Nitrosospira briensis</i>	CCGCCGCGCGCGGGCGGGCGGGGCACGG GGGAGRAAAGCAGGGGATCG
CTO654r	<i>Nitrosospira-like</i>	CTAGCYTTGTAGTTTCAAACGC
CTO189FC-GC	<i>Nitrosomonas europaea</i> <i>Nitrosomonas-like</i>	CGCCCCCGCGCGGGCGGGCGGGGCACGGGG GGAGGAAAGTAGGGGATCG
CTO654r		CTAGCYTTGTAGTTTCAAACGC
Nspra-675f	<i>Nitrospira</i> spp.	GCGGTGAA ATGCGTAGAKATCG
Nspra-746r		TCAGCGTCAGRWAYGTTC CAGAG
<i>amoA</i> -1F	功能基因	GGGGTTTCTACTGCTGGT
<i>amoA</i> -2R		CCCCTCKGS AAAGCCTTCTTC

4.2 厌氧氨氧化菌 16S rDNA 和功能基因引物比较

目前采用传统的微生物分离培养方法还未分离纯化出厌氧氨氧化菌,但分子生物学方法在一定程度上可以克服这些局限性,成为当前研究厌氧氨氧化菌的重要手段^[62],但不同引物得到效果不同。几种不同的引物已经被用来测定不同环境中的不同的厌氧氨氧化菌。Schmid 等^[63]采用通用引物 27 F/1492 R(表 2)进行 PCR 扩增,浮霉菌属出现较少,效果较差。采用特异引物 Pla46 F/1037 R 对取自生物滤池中的厌氧氨氧化污泥样品进行分子生物学鉴定,并确定了其在细菌系统进化树中属于分支较深的浮霉菌属(*Planctomycetes*)命名为 *Candidatus Brocadia anammoxidans*。采用 Pla46 F/1390 R 或 630 R 构建 16S rDNA 克隆文库,库中浮霉菌属明显增加^[64]。因此特异性引物对 16S rDNA 的扩增是十分必要的,应用不同的引物可能得到不同的厌氧氨氧化菌的微生物^[65]。Schmid 等^[66]和 Bae 等^[67]用正向

引物 Pla46 F, 反向引物 Amx820 R 扩增得到 *Brocadia-like*; 反向引物 Amx368 R 扩增得到所有已知的厌氧氨氧化菌。并且用 Pla46 F/Amx368 R 试验鉴定了 10 个不同的污水样品,得到了 5 种厌氧氨氧化菌的 16S rDNA,研究证明这种引物的特异性较强。通过以上研究说明,恰当的引物能很好把不同的厌氧氨氧化成功分离。同时为了更好地了解厌氧氨氧化菌,人们对厌氧氨氧化菌的功能基因也进行可深入的研究,研究表明厌氧氨氧化菌中联氨氧化还原酶基因在脱氮反应工艺中起着重要作用^[68]。各引物的详细序列如表 2 所示。

5 总结与展望

半短程亚硝化与厌氧氨氧化工艺是一种全新的生物脱氮工艺,与传统的生物脱氮工艺相比具有十分明显的优势,国外特别是荷兰 Delft 大学和 Schmid 等对其进行了较深入的研究,国内哈尔滨工

表 2 厌氧氨氧化菌引物及特征

Table 2 Primers and characteristics of ANAMMOX

引物名称	特异性	序列 5'-3'
27f	细菌	AGAGTTTGATCMTGGCTCAG
1492r		TACGGYTACCTTGTTACGACTT
Pla46		GACTTGCATGCCTAATCC
Amx820R	Candidatus “ <i>Brocadia</i> ” 和 Candidatus “ <i>Kuenenia</i> ”	AAAACCCCTCTACTTAGTGCCC
Pla46		GACTTGCATGCCTAATCC
Amx 1390	浮霉菌门	GACGGGCGGTGTGTACAA
Pla46		GACTTGCATGCCTAATCC
630R	浮霉菌门	CAKAAAGGAGGTGATCC
Pla46		CCTTTCGGGCATTCGAA
Amx368	所有厌氧氨氧化生物	GACTTGCATGCCTAATCC
Pla46		CCCGCTGGTAACATAAAACAAG
Amx 1114	<i>Scalindua</i> -like 细菌	TGYAAGACYTGCAAYTGG
hzocl1F1		ACTCCAGATRTGCTGACC
hzocl1R2	功能基因	TGYAAGACYTGCAAYTGGG
hzocl1F2		ACTCCAGATRTGCTGACC
hzocl1R2		

业大学也开展了一定的研究,但在这些研究中该工艺多数是用于处理含有较高浓度氨氮的废水,如污泥消化后的上清液或填埋场的渗滤液. 因此迫切需要寻找和开发适合于低浓度废水的高效生物脱氮工艺,因此在国内进行低浓度下短程硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺的研究具有极大的理论意义和应用前景.

参考文献:

[1] Kartal B, de Almeida N M, Maalcke W J, *et al.* How to make a living from anaerobic ammonium oxidation [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2013, **37**(3): 428-461.

[2] Kartal B, van Niftrik L, Keltjens J T, *et al.* Anammox--growth physiology, cell biology, and metabolism [J]. Advance in Microbial Physiology, 2012, **60**: 211-262.

[3] Zhao Z R, Chen Y Y, Ma B, *et al.* Comparison of bacterial communities in two partial nitrification systems for high-ammonia wastewater and sewage treatment [J]. American Journal of Research Communication, 2013, **1**(6): 1-17.

[4] 赵志瑞, 马斌, 张树军, 等. 高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 [J]. 环境科学, 2013, **34**(4): 1448-1456.

[5] Kartal B, Tan N C, van de Biezen E, *et al.* Effect of nitric oxide on anammox bacteria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, **76**(18): 6304-6306.

[6] Kartal B, Maalcke W J, de Almeida N M, *et al.* Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation [J]. Nature, 2011, **479**(7371): 127-130.

[7] Kartal B, Geerts W, Jetten M S. Cultivation, detection, and ecophysiology of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Methods in Enzymology, 2011, **486**: 89-108.

[8] de Almeida N M, Maalcke W J, Keltjens J T, *et al.* Proteins and protein complexes involved in the biochemical reactions of

anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. Biochemical Society Transactions, 2011, **39**(1): 303-308.

[9] 施汉昌, 胡志荣, 周军, 等. 污水生物处理: 原理、设计及模拟 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011. 92-93.

[10] Kartal B, Kuenen J G, van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox [J]. Science, 2010, **328**(5979): 702-703.

[11] 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 Technology, 2006, **53**(12): 265-274.

[12] Moussavi G, Khavanin A, Sharifi A. Ammonia removal from a waste air stream using a biotrickling filter packed with polyurethane foam through the SND process [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(3): 2517-2522.

[13] Rahimi Y, Torabian A, Mehrdadi N, *et al.* Simultaneous nitrification-denitrification and phosphorus removal in a fixed bed sequencing batch reactor (FBSBR) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **185**(2-3): 852-857.

[14] Walters E, Hille A, He M, *et al.* Simultaneous nitrification denitrification in a biofilm airlift suspension (BAS) reactor with biodegradable carrier material [J]. Water Research, 2009, **43**(18): 4461-4468.

[15] Wu C Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of sludge retention time on nitrite accumulation in real-time control biological nitrogen removal sequencing batch reactor [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2011, **19**(3): 512-517.

[16] Jaroszynski L W, Oleszkiewicz J A. Autotrophic ammonium removal from reject water: partial nitrification and anammox in one-reactor versus two-reactor systems [J]. Environmental Technology, 2011, **32**(3-4): 289-294.

[17] Van Hulle S W H, Vandeweyer H J P, Meesschaert B D, *et al.* Engineering aspects and practical application of autotrophic nitrogen removal from nitrogen rich streams [J]. Chemical

- Engineering Journal, 2010, **162**(1): 1-20.
- [18] De Clippeleir H, Yan X G, Verstraete W, *et al.* OLAND is feasible to treat sewage-like nitrogen concentrations at low hydraulic residence times [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, **90**(4): 1537-1545.
- [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] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Anammox brings Wwtp closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal [J]. Water Science and Technology, 2008, **57**(3): 383-388.
- [21] 祖波, 张代钧, 祖建, 等. 硝化过程中影响亚硝酸盐积累的因素 [J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(4): 1-5.
- [22] Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Control and optimization of nitrifying communities for nitrification from domestic wastewater at room temperatures [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, **45**(3): 226-232.
- [23] 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.
- [24] Jaeschke A, den Camp H J M, Harhangi H, *et al.* 16s rRNA gene and lipid biomarker evidence for anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (anammox) in California and Nevada hot springs [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2009, **67**(3): 343-350.
- [25] Perez J, Costa E, Kreft J U. Conditions for partial nitrification in biofilm reactors and a kinetic explanation [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, **103**(2): 282-295.
- [26] Kornaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial Nitrification/Denitrification Can Be Attributed to the Slow Response of Nitrite Oxidizing Bacteria to Periodic Anoxic Disturbances [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7245-7253.
- [27] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Nitrification and denitrification of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A²O) process at ambient temperatures [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [28] Ma Y, Peng Y, Wang S, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant [J]. Water Research, 2009, **43**(3): 563-572.
- [29] 韩晓宇, 张树军, 甘一萍, 等. 以 FA 与 FNA 为控制因子的短程硝化启动与维持 [J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 809-814.
- [30] Tora J A, Lafuente J, Baeza J A, *et al.* Combined effect of inorganic carbon limitation and inhibition by free ammonia and free nitrous acid on ammonia oxidizing bacteria [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(15): 6051-6058.
- [31] Jubany I, Lafuente J, Baeza J A, *et al.* Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on Oxygen Uptake Rate measurements [J]. Water Research, 2009, **43**(11): 2761-2772.
- [32] 葛士建, 王淑莹, 杨岸明, 等. 反硝化过程中亚硝酸盐积累特性分析 [J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(1): 140-146.
- [33] Ma J, Yang Q, Wang S, *et al.* Effect of free nitrous acid as inhibitors on nitrate reduction by a biological nutrient removal sludge [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **175**(1-3): 518-523.
- [34] Fisher I, Sathasivan A, Chuo P, *et al.* Effects of stratification on chloramine decay in distribution system service reservoirs [J]. Water Research, 2009, **43**(5): 1403-1413.
- [35] 周玲玲, 张永吉, 宋正国, 等. pH 和温度对氯胺消毒给水管网硝化作用的影响 [J]. 环境科学, 2011, **32**(6): 1627-1631.
- [36] Jia Z J, Conrad R. Bacteria rather than Archaea dominate microbial ammonia oxidation in an agricultural soil [J]. Environmental Microbiology, 2009, **11**(7): 1658-1671.
- [37] Hao Y J, Wu S W, Wu W X, *et al.* Research progress on the microbial ecology of aerobic ammonia-oxidizing bacteria [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, **27**(4): 1573-1582.
- [38] Xia W W, Zhang C X, Zeng X W, *et al.* Autotrophic growth of nitrifying community in an agricultural soil [J]. The International Society for Microbial Ecology Journal, 2011, **5**(7): 1226-1236.
- [39] Su C L, Yu Y C, Ji B J. Research advances in biological N₂ removal by partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **32**(4): 92-96.
- [40] Qin Y Y, Zhang X W, Ren H Q, *et al.* Population dynamics of ammonia-oxidizing bacteria in an aerated submerged biofilm reactor for micropolluted raw water pretreatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **79**(1): 135-145.
- [41] Kuai L P, Versraete W. Ammonium removal by the oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification system [J]. Applied Environmental Technology, 1998, **64**(11): 4500-4506.
- [42] Lydmark P, Almstrand R, Samuelsson K, *et al.* Effects of environmental conditions on the nitrifying population dynamics in a pilot wastewater treatment plant [J]. Environmental Microbiology, 2007, **9**(9): 2220-2233.
- [43] Kartal B, van Niftrik L. Candidatus 'Brocadia fulgida': an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, **63**(1): 46-55.
- [44] Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, *et al.* Development of high rate-anaerobic ammonium oxidizing (anammox) biofilm reactors [J]. Water Research, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [45] Isaka K, Date Y, Kimura Y, *et al.* Nitrogen removal performance using anaerobic ammonium oxidation at low temperatures [J]. FEMS Microbiology Letters, 2008, **282**(1): 32-38.
- [46] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, **6**(4): 320-326.
- [47] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, *et al.* Deciphering the

- evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome [J]. *Nature*, 2006, **440**(7085): 790-794.
- [48] Kartal B, Kuypers M M M, Lavik G, *et al.* Anammox bacteria disguised as denitrifiers; nitrate reduction to dinitrogen gas via nitrite and ammonium [J]. *Environmental Microbiology*, 2007, **9**(3): 635-642.
- [49] 陈婷婷, 郑平, 胡宝兰, 等. 厌氧氨氧化菌的物种多样性与生态分布 [J]. *应用生态学报*, 2009, **5**(20): 1229-1235.
- [50] 陈永, 张树德, 张杰, 等. 亚硝酸盐氮浓度对厌氧氨氧化反应的影响 [J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(17): 74-76.
- [51] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(5): 1-4.
- [52] Tsushima I, Kindaichi T, Okabe S. Quantification of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in enrichment cultures by real-time PCR [J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 785-794.
- [53] Kartal B, Rattray J, van Niftrik L A, *et al.* Candidatus “*Anammoxoglobus propionicus*” a new propionate oxidizing species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2007, **30**(1): 39-49.
- [54] Liang Z, Liu J X, Li J. Decomposition and mineralization of aquatic humic substances (AHS) in treating landfill leachate using the Anammox process [J]. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1315-1320.
- [55] Xu Z Y, Zeng G M, Yang Z H, *et al.* Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 79-86.
- [56] Lotti T, van der Star W R L, Kleerebezem R, *et al.* The effect of nitrite inhibition on the anammox process [J]. *Water Research*, 2012, **46**(8): 2559-2569.
- [57] 李霜, 沈珈琦, 范伟平. 应用 PCR 技术快速筛选和鉴定 *Nitrosomonas* 属细菌 [J]. *土壤学报*, 2005, **42**(6): 1050-1052.
- [58] Kowalchuk G A, Stephen J R, De Boer W, *et al.* Analysis of ammonia-oxidizing bacteria of the beta subdivision of the class *Proteobacteria* in coastal sand dunes by denaturing gradient gel electrophoresis and sequencing of PCR-amplified 16S ribosomal DNA fragments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(4): 1489-1497.
- [59] 吴宇澄, 王建军, 吴庆龙. 基于引物的湖泊沉积物氨氧化细菌 PCR 扩增策略比较 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(9): 2178-2183.
- [60] Graham D W, Knapp C W, Van Vleck E S, *et al.* Experimental demonstration of chaotic instability in biological nitrification [J]. *The ESME Journal*, 2007, **1**(5): 385-393.
- [61] Hang W H, Li M Z, Yu D, *et al.* pH-dependent distribution of soil ammonia oxidizers across a large geographical scale as revealed by high-throughput pyrosequencing [J]. *Journal of Soils Sediments*, 2013, **13**: 1439-1449.
- [62] 黄俊丽, 邹寒艳, 王贵学, 等. 单级自养脱氮系统中厌氧氨氧化菌的分子生物学鉴定 [J]. *中国生物工程杂志*, 2010, **30**(6): 60-64.
- [63] Schmid M, Schmitz E S, Jetten M, *et al.* 16S-23S rDNA intergenic spacer and 23 S rDNA of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: implications for phylogeny and in situ detection [J]. *Environmental Microbiology*, 2001, **3**(7): 450-459.
- [64] Schmid M., Walsh K, Webb R, *et al.* Candidatus “*Scalindua brodae*”, sp. nov., Candidatus “*Scalindua wagneri*”, sp. nov., two new species of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2003, **26**(4): 529-538.
- [65] 李斌, 赵志瑞, 马斌, 等. 克隆文库方法分析厌氧氨氧化反应器中细菌群落结构 [J]. *环境科学与技术*, 2012, **35**(12): 159-164.
- [66] Schmid M C, Maas B, Dapena A, *et al.* Biomarkers for *in situ* detection of anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(4): 1677-1684.
- [67] Bae H, Chung Y C, Jung J Y. Microbial community structure and occurrence of diverse autotrophic ammonium oxidizing microorganisms in the anammox process [J]. *Water Science and Technology*, 2010, **61**(11): 2723-2732.
- [68] Schmid M C, Hooper A B, Klotz M G, *et al.* Environmental detection of octahem cytochrome chydroxylamine/hydrazine oxidoreductase genes of aerobic and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(11): 3140-3149.

CONTENTS

Observation Study on Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Using the Ground-based and Satellite Remote Sensing at Background Station During the Regional Pollution Episodes	ZHANG Xiao-ling, XIA Xiang-ao, CHE Hui-zheng, <i>et al.</i>	(2439)
<i>In-situ</i> Measurement of Atmospheric Methyl Chloroform at the Shangdianzi GAW Regional Background Station	YAO Bo, ZHOU Ling-xi, LIU Zhao, <i>et al.</i>	(2449)
Distribution of CO at Lin'an Station in Zhejiang Province	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, LUAN Tian, <i>et al.</i>	(2454)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in Atmospheric Particles in Nanjing Northern Suburb in Summer	DUAN Qing, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(2460)
Characteristics of Water-soluble Organic Nitrogen of PM _{2.5} in Xi'an During Wintertime Non-haze and Haze Periods	CHENG Yu-ting, WANG Ge-hui, SUN Tao, <i>et al.</i>	(2468)
Effect of Sand Dust Weather on Major Water-soluble Ions in PM ₁₀ in Lanzhou, China	WANG Fang, CHEN Qiang, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i>	(2477)
Diversity of Bacterial Areasols in Precipitation of Shanghai Area	LIANG Zong-min, DU Rui, DU Peng-rui, <i>et al.</i>	(2483)
Concentrations and Deposition Fluxes of Heavy Metals in Precipitation in Core Urban Areas, Chongqing	PENG Yu-long, WANG Yong-min, QIN Cai-qing, <i>et al.</i>	(2490)
Anthropogenic VOC Emission Inventory and Contribution from Industrial Sources in Ningbo	LI Xuan, WANG Xue-song, LIU Zhong, <i>et al.</i>	(2497)
Evaluation and Selection of VOCs Treatment Technologies in Packaging and Printing Industry	WANG Hai-lin, WANG Jun-hui, ZHU Chun-lei, <i>et al.</i>	(2503)
Experimental Study on CO ₂ Absorption by Aqueous Ammonia-based Blended Absorbent	XIA Zhi-xiang, XIANG Qun-yang, ZHOU Xu-ping, <i>et al.</i>	(2508)
Preliminary Investigation on Emission of PCDD/Fs and DL-PCBs Through Flue Gas from Coke Plants in China	SUN Peng-cheng, LI Xiao-lu, CHENG Gang, <i>et al.</i>	(2515)
Distribution and Source of Particulate Organic Carbon and Particulate Nitrogen in the Yangtze River Estuary in Summer 2012	XING Jian-wei, XIAN Wei-wei, SHENG Xiu-zhen	(2520)
Characteristics of Optical Absorption Coefficients and Their Differences in Typical Seasons in Lake Qiandaohu	WANG Ming-zhu, ZHANG Yun-lin, SHI Kun, <i>et al.</i>	(2528)
Dynamic Distributions of Dissolved Oxygen in Lake Qiandaohu and Its Environmental Influence Factors	YIN Yan, WU Zhi-xu, LIU Ming-liang, <i>et al.</i>	(2539)
Source Analysis of Urea-N in Lake Taihu During Summer	HAN Xiao-xia, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i>	(2547)
Phytoplankton Community Structure and Its Succession in Isolated Lakes of Poyang-Junshan Lake	LIU Xia, QIAN Kui-mei, TAN Guo-liang, <i>et al.</i>	(2557)
Vertical Distribution and Relationship Between ²¹⁰ Pb _{ex} Activities and Nutrients in Sediment Cores of Two Different Eutrophication Level Lakes	WANG Xiao-lei, YANG Hao, GU Zhu-jun, <i>et al.</i>	(2565)
Simulation of Nitrate Pollution in Groundwater Using Pump-and-treat Optimization Method	JIANG Lie, HE Jiang-tao, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i>	(2572)
Variation of Water DOC During the Process of Pre-pressure and Coagulation Sedimentation Treatment	CHEN Wen-jing, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i>	(2579)
Adsorption of Perchlorate by Calcined Mg/Zn/Al Layered Double Hydroxides	WANG Hong-yu, LIU Yan	(2585)
Adsorption Kinetic Mechanism of Ionic Soluble Dye Mixture on Fly Ash	SUN De-shuai, ZHENG Qiang-qiang, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i>	(2590)
Effect of SDS on the Adsorption of Cd ²⁺ onto Amphoteric Modified Bentonites	WANG Jian-tao, MENG Zhao-fu, YANG Ya-ti, <i>et al.</i>	(2596)
Structural Changes of Aged Biochar and the Influence on Phenanthrene Adsorption	TANG Wei, GUO Yue, WU Jing-gui, <i>et al.</i>	(2604)
Photocatalytic Degradation Kinetics of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) in TiO ₂ Dispersion and Its Mechanism	LI Ming-jie, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2612)
Characterizing the Interaction Between Roxarsone and Humic Acid by Fluorescence Quenching Experiment	ZHU Jiang-peng, MEI Ting, PENG Yun, <i>et al.</i>	(2620)
Modification of Activated Carbon Fiber for Electro-Fenton Degradation of Phenol	MA Nan, TIAN Yao-jin, YANG Guang-ping, <i>et al.</i>	(2627)
Investigation of Enhanced Low Carbon Wastewater Denitrification by Catalytic Iron	WANG Meng-yue, MA Lu-ming	(2633)
Denitrification Performance of PBS as a Solid Carbon Source of Denitrification	LIU Jia, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(2639)
Concentrations, Distribution Characteristics and Electron Beam Radiolysis Degradation of PCDD/Fs in Waste Water from a Paper Mill	QING Xian, HUANG Jin-qiong, YU Xiao-wei, <i>et al.</i>	(2645)
Study on the Quality of Digested Piggery Wastewater in Large-Scale Farms in Jiaxing	WEI Dan, WAN Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2650)
New Ways to Improve Volatile Fatty Acids Accumulation in Sludge Alkaline Fermentation System	LI Xiao-ling, PENG Yong-zhen, CHAI Tong-zhi, <i>et al.</i>	(2658)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments and Soils from Dishui Lake and Its Water Exchange Areas	GUO Xue, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i>	(2664)
Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and Sediment from Zhoushan Coastal Area, China	JIANG Min, Le Huy Tuan, MEI Wei-ping, <i>et al.</i>	(2672)
Contamination Levels and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Soils and Grasses from Lake Catchments in the Tibetan Plateau	XIE Ting, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang	(2680)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Soil from Jiufeng Mountain Range in Fujian, China	HUANG Huan-fang, QI Shi-hua, QU Cheng-kai, <i>et al.</i>	(2691)
Pollution Fingerprints and Sources of Perfluorinated Compounds in Surface Soil of Different Functional Areas	ZHANG Hong, ZHAO Liang, HE Long, <i>et al.</i>	(2698)
Distribution, Seasonal Variation and Influence Factors of Dissolved Inorganic Arsenic in the Sanggou Bay	LI Lei, REN Jing-ling, LIU Su-hui, <i>et al.</i>	(2705)
Distribution of Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation on the Different Sampling Scales in Farmland on Yellow River Irrigation Area of Ningxia; A Case Study in Xingqing County of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu	(2714)
Release of Mercury from Soil and Plant in Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area and Its Accumulation in Zebrafish	LI Chu-xian, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i>	(2721)
Residues and Health Risk Assessment of Sulfonamides in Sediment and Fish from Typical Marine Aquaculture Regions of Guangdong Province, China	HE Xiu-ting, WANG Qi, NIE Xiang-ping, <i>et al.</i>	(2728)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Dust of Qingdao City	ZHANG Chun-rong, WU Zheng-long, YAO Chun-hui, <i>et al.</i>	(2736)
Health Risk Assessment of Coke Oven PAHs Emissions	BO Xin, WANG Gang, WEN Rou, <i>et al.</i>	(2742)
Effects of Combined Pollution of Cd, Cu and Pb on Antioxidant Enzyme Activities of Earthworm in Soils	WANG Hui, XIE Xin-yuan	(2748)
Toxicity of Three Chlorophenols to Protozoa <i>Tetrahymena thermophila</i>	LI Ya-jie, CUI Yi-Bin, JIANG Li-juan, <i>et al.</i>	(2755)
Phytoexclusion Potential Studies of Si Fertilization Modes on Rice Cadmium	CHEN Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, <i>et al.</i>	(2762)
Effects of Conservation Tillage on Soil CO ₂ and N ₂ O Emission During the Following Winter-Wheat Season	PAN Ying, HU Zheng-hua, WU Yang-zhou, <i>et al.</i>	(2771)
Mineralization of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Soil Enzyme Activities in Apple Orchard in Weibei	JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke	(2777)
Steam and Air Co-injection in Removing TCE in 2D-Sand Box	WANG Ning, PENG Sheng, CHEN Jia-jun	(2785)
Effect of Cu ²⁺ on the Power Output of Dual-chamber Microbial Fuel Cell	MU Shu-jun, LI Xiu-fen, REN Yue-ping, <i>et al.</i>	(2791)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from Sewage Sludge Composting by Continuous Aerated Turning Pile	ZHAO Chen-yang, WEI Yuan-song, GE Zhen, <i>et al.</i>	(2798)
Emissions of NH ₃ , N ₂ O, and NO from Swine Manure Solid Storage in Winter	DING Gang-qiang, HAN Sheng-hui, YUAN Yu-ling, <i>et al.</i>	(2807)
Variation Characteristics and Mathematical Model of Humic Substances in Landfill Leachates with Different Landfill Ages	HUANG You-fu, XU Xin-ya, FAN Liang-xin, <i>et al.</i>	(2816)
Research on the Variation Regularity of Effluent from the Leachate Reverse Osmosis Concentrate Recirculation	WANG Dong-mei, LIU Dan, LIU Qing-mei, <i>et al.</i>	(2822)
Quantitative Analysis on the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su	(2829)
Research Progress in Microbiological Characteristics in Combined N ₂ Removal Process by Partial Nitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation	ZHAO Zhi-rui, HOU Yan-lin	(2834)

《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7月15日 第35卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 7 Jul. 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