

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.4  
第41卷 第4期

目次

基于深度学习的华东地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感反演 ..... 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)

秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 .....  
..... 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)

基于 GAM 模型的西安市 O<sub>3</sub> 浓度影响因素解析 ..... 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)

北京及周边 6 个城市大气 PM<sub>2.5</sub> 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 ..... 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)

典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 ..... 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 ..... 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)

天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响 ..... 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)

涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 ..... 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)

典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 ..... 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)

中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 ..... 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)

中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 ..... 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)

小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 ..... 范新风, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)

浙江省 H 市水处理及供水系统 4 种人工甜味剂的分布特征 ..... 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)

三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 ..... 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书哈, 吴忠兴(1636)

骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 ..... 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)

拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 ..... 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)

基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 .....  
..... 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)

岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 ..... 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)

巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 ..... 李如忠, 王莉, 刘超(1684)

镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 ..... 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)

氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 ..... 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)

北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 ..... 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)

新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 ..... 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)

Ni 掺杂 Sb-SnO<sub>2</sub> 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 ..... 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)

磁性 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CuO 非均相活化过碳酸钠降解 A07 ..... 徐劫, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)

赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星, 性能和机制 ..... 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)

工业废水水质对微气泡臭氧氧化深度处理影响 ..... 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)

污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 ..... 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)

改性西瓜皮生物炭的制备及其对 Pb(II) 的吸附特性 ..... 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)

A<sup>2</sup>/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 ..... 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)

基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 ..... 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)

HRT 对 CSTR 亚硝化颗粒污泥性能影响 ..... 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)

低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 ..... 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)

不同 HRT 下污水中有机物在 ABR 中的转化过程及污泥形态特征 ..... 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)

投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 ..... 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)

中国 193 个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 .....  
..... 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)

基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 ..... 胡梦瑶, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)

扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 ..... 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)

桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 ..... 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)

重庆市主要农耕地土壤 Cd 生物有效性及影响因素 ..... 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)

棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 ..... 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)

连续 4 a 施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 ..... 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颖榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)

纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 ..... 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)

矿业废弃地复垦土壤-作物晒吸收特征及其对重金属拮抗效应 ..... 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)

不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 ..... 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)

化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 ..... 朱浩宇, 高明, 龙翼, 徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)

紫色土旱坡地氮流失通量对减肥施肥秸秆的响应 ..... 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)

浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 ..... 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)

极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 ..... 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)

红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 ..... 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)

稻田土壤 N<sub>2</sub>O 消纳能力及 nosZ-I 型功能种群应答机制 ..... 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)

京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 ..... 陈盼, 施晓清(1976)

中国城市工业化发展与 PM<sub>2.5</sub> 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制 ..... 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)

《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

# A<sup>2</sup>/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性

刘小钗<sup>1</sup>, 荣懿<sup>1</sup>, 汶丽杰<sup>1</sup>, 李党勇<sup>2</sup>, 金鹏康<sup>1\*</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 陕西建工安装集团有限公司, 西安 710068)

**摘要:** 针对现有城市污水处理厂普遍面临进水碳源不足影响脱氮效率的问题, 通过调控 A<sup>2</sup>/O 系统曝气分区比例、溶解氧 (DO) 浓度和污泥龄 (SRT) 构建短程硝化耦合厌氧氨氧化系统, 以研究不同工况下该系统的脱氮性能、脱氮途径和微生物种群结构的变化情况. 研究表明在低 C/N 进水 (C/N = 5) 情况下, 该系统具有稳定优良的脱氮性能. 在 140 d 试验过程中, 反应器经历了氨氧化细菌 (AOB)、亚硝酸盐氧化细菌 (NOB) 共培养阶段 (阶段 I)、AOB 筛分阶段 (阶段 II ~ III) 与厌氧氨氧化细菌 (AnAOB) 富集阶段 (阶段 IV), 系统的脱氮途径也由初始的全程硝化反硝化逐步转化为短程硝化耦合厌氧氨氧化脱氮; 系统的脱氮效率在阶段 IV 达到最佳状态, 此时该系统出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的平均浓度分别为 1.20 mg·L<sup>-1</sup> 和 7.03 mg·L<sup>-1</sup>, 其对应的去除率分别为 97.69% 和 87.83%; Illumina MiSeq 测序结果表明, 短程硝化耦合厌氧氨氧化的系统中 *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira* 这两类 AOB 的富集和 *Nitrospira*、*Nitrococcus* 和 *Nitrobacter* 这三类 NOB 的淘洗是系统发生短程硝化的主要原因, *Candidatus Kuenenia* 和 *Candidatus Jettenia* 这两类 AnAOB 的富集是系统发生厌氧氨氧化的关键所在, 对实现深度脱氮具有重要作用.

**关键词:** A<sup>2</sup>/O; 短程硝化耦合厌氧氨氧化; 脱氮途径; 脱氮性能; 微生物种群结构

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)04-1779-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201910190

## Construction and Denitrification Performance of A<sup>2</sup>/O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System

LIU Xiao-chai<sup>1</sup>, RONG Yi<sup>1</sup>, WEN Li-jie<sup>1</sup>, LI Dang-yong<sup>2</sup>, JIN Peng-kang<sup>1\*</sup>

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Construction Engineering Installation Group Co., Ltd., Xi'an 710068, China)

**Abstract:** To resolve the issue of existing municipal wastewater treatment plants (WWTPs) in China with an insufficient influent carbon source, a bench-scale A<sup>2</sup>/O process based on partial nitrification coupled with ANAMMOX was constructed by controlling aeration partition ratio, dissolved oxygen (DO) concentration, and sludge retention time (SRT). In this study, the nitrogen removal performance, nitrogen removal pathway, and microbial community structure of the system under different conditions were investigated. The results showed that the system had excellent nitrogen removal efficiency at low-C/N influent (C/N = 5). The A<sup>2</sup>/O reactor had experienced the co-culture stage (Phase 1), screening stage (Phase 2-3), and enrichment stage (Phase 4) successively during the 140-day experiment, and the nitrogen removal pathway changed from nitrification and denitrification to partial nitrification coupled ANAMMOX in the end. The optimal removal efficiencies of 97.69% for NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and 87.83% for TN were obtained in the enrichment stage (Phase 4), and the effluent concentration of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and TN were 1.20 mg·L<sup>-1</sup> and 7.03 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. Illumina MiSeq sequencing results showed that the enrichment of AOB including *Nitrosomonas* and *Nitrospira* and the elimination of NOB including *Nitrospira*, *Nitrococcus*, and *Nitrobacter* were the main causes of achieving partial nitrification in the system. The enrichment of AnAOB including *Candidatus Kuenenia* and *Candidatus Jettenia* was the key point for the occurrence of ANAMMOX in the system, and thus, played an important role in the achievement of advanced nitrogen removal.

**Key words:** A<sup>2</sup>/O process; partial nitrification ANAMMOX; nitrogen removal pathway; nitrogen removal performance; microbial community structure

氮类污染物超标是导致水体富营养化的主要根源之一, 水体污染使原本并不丰富的水资源日渐短缺, 水资源问题已经严重影响人类的日常生活、甚至威胁部分地区人类的生存. 因此, 如何高效稳定地去除污水中氮类污染物就显得尤为重要. 污水处理工艺中传统的脱氮方式是通过硝化反硝化作用将污水中的氨氮转化为氮气来实现脱氮的目的<sup>[1]</sup>, 但这种方式的脱氮效率存在一定的局限性, 在进水碳源不足的情况下愈发明显. 随着国家对水环境治理力度的加强, 城镇污水排放标准日益严格<sup>[2]</sup>, 难以满足污水排放标准的污水处理厂提标改造势在必行<sup>[3]</sup>.

与此同时, 我国多数地区的城镇污水处理厂还普遍面临着进水碳源不足的问题<sup>[4]</sup>, 从而进一步抑制其脱氮效率. 基于以上的双重阻力, 寻找一种新型有效的脱氮途径或调控策略已成为当务之急.

短程硝化反硝化<sup>[5]</sup>和厌氧氨氧化<sup>[6]</sup>作为新兴的两种理论工艺, 不仅能节省曝气量、降低能耗, 且能在

收稿日期: 2019-10-25; 修订日期: 2019-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400701); 陕西省科技统筹创新工程计划项目 (2016TZC-S-19-3); 陕西高校新型智库

作者简介: 刘小钗 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水和废水的深度处理技术, E-mail: chaichailiu@163.com

\* 通信作者, E-mail: pkjin@hotmail.com

一定程度上降低碳源需求<sup>[7,8]</sup>,因此成为近些年的研究热点. 比如, Cui 等<sup>[9]</sup>通过向原水中投加  $5.30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的亚硝酸盐, 在  $16.6^\circ\text{C}$  下, 30 d 内成功诱导短程硝化, 且与传统的脱氮方式相比节省了 40% 的碳源; 钱允致等<sup>[10]</sup>在  $30^\circ\text{C}$ 、溶解氧 (DO)  $2.0 \sim 2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  条件下, 18 d 内成功启动短程硝化, 并同样节省了大量的碳源需求. 黄利等<sup>[11]</sup>在 SBR 反应器中, 通过调控温度、pH 和水力停留时间 (SRT) 成功启动厌氧氨氧化, 在提高脱氮效率的同时大大降低了曝气量和碳源需求; Tang 等<sup>[12]</sup>在 UASB 反应器中通过缩短 SRT, 成功启动了厌氧氨氧化, 实现高效脱氮. 以上研究表明短程硝化反硝化和厌氧氨氧化两种脱氮途径均可通过一定调控策略实现, 并且可在提高脱氮效率的同时减少碳源需求, 然而目前大多数研究都集中在间歇式反应器中, 而关于国内最为主流的  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺<sup>[13]</sup>的相关研究却鲜见报道.

针对污水处理的主流  $\text{A}^2/\text{O}$  工艺, 课题组在短程硝化方面已做了相关研究, 比如吴春雷等<sup>[14]</sup>通过调控分区比例和 DO 浓度构建的短程硝化系统, 当该系统好氧区 DO 浓度为  $0.5 \sim 0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $V_{\text{缺}}:V_{\text{好}}$  为 1:1 时, 系统中 AOB 得到富集, NOB 被淘汰, 好氧区末端的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度为  $4.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , NAR 可达 62% 以上, 出水 TN 可降至  $9.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 能实现深度

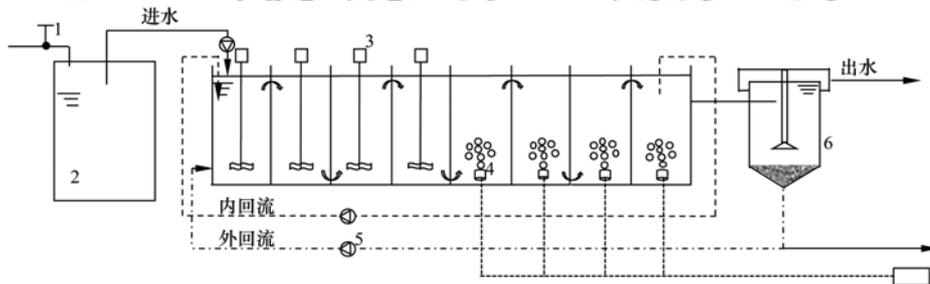
脱氮的目标. 基于上述研究基础, 本文拟通过调控  $\text{A}^2/\text{O}$  系统的曝气分区比例、DO 浓度和 SRT 进一步构建短程硝化耦合厌氧氨氧化系统, 并对系统的脱氮性能、脱氮途径以及微生物种群结构进行长期监测和研究, 以期对  $\text{A}^2/\text{O}$  城镇污水处理厂的提标改造和运行调控提供新思路.

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验装置及运行方式

反应器的平面示意图如图 1 所示.  $\text{A}^2/\text{O}$  反应器由厚约 8 mm 的无色有机玻璃制成, 反应区的整体尺寸为长 0.8 m, 宽 0.25 m, 高 0.65 m, 有效容积为 91.8 L; 反应区内部设置了 7 块隔板, 将反应区均匀分割为 8 个首尾相连的隔室; 通过对隔板上下开孔的方式, 保证了装置内部的污水流态; 通过设置独立的曝气调节系统, 可随时改变系统的曝气分区比例, 能满足不同分区研究的需求; 反应器进水量、混合液回流比和污泥回流比等均由蠕动泵控制, DO 浓度由气体转子流量计控制; 厌、缺氧区域均设置了搅拌系统以保证活性污泥的完全混合状态.

整个试验过程中, 进水流量为  $6 \text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$ , 实验室温度在  $22^\circ\text{C}$  左右, 内回流比为 2, 外回流比为 1, 每个试验阶段的具体工况参数如表 1 所示.



1. 进水阀; 2. 进水箱; 3. 搅拌器; 4. 曝气孔; 5. 蠕动泵; 6. 二沉池; 7. 曝气泵

图 1 反应器平面示意

Fig. 1 Reactor plane diagram

表 1 反应器工况控制参数

Table 1 Reactor operating condition control parameters

阶段	天数/d	$\text{A}^2/\text{O}$ 分区比例 <sup>1)</sup>	好氧 $\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SRT/d	MLSS/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT/h
I	1 ~ 30	2:2:4	2.0 ~ 3.0	25	$3\ 742 \pm 300$	15
II	31 ~ 60	2:3:3	2.0 ~ 3.0	25	$3\ 659 \pm 300$	15
III	61 ~ 90	2:3:3	0.3 ~ 0.7	15	$3\ 576 \pm 500$	15
IV	91 ~ 140	4:4	0.3 ~ 0.7	15	$3\ 240 \pm 300$	15

1) 厌氧: 缺氧: 好氧

### 1.2 试验用水及接种污泥

反应器的进水为模拟污水, 其配方:  $\text{CH}_3\text{COONa}$  为  $0.32 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$  为  $0.191 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{HPO}_4$  为  $0.026 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{CaCl}_2$  为  $0.027 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$  为  $0.225 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 微量元素为混合溶液<sup>[15]</sup>, 浓度为

$1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ , 进水水质情况如表 2 所示. 反应器的活性污泥取自西安市某污水处理厂好氧池的活性污泥, 污泥维持了较高的活性, 经过连续 20 d 的培养, 活性污泥絮体性状良好, 系统进入稳定运行阶段.

表 2 进水水质情况/mg·L<sup>-1</sup>Table 2 Influent characteristics/mg·L<sup>-1</sup>

项目	pH	COD	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N
平均值	7.64	253.26	53.82	52.35	0.97	0.74

### 1.3 试验指标及测定方法

#### 1.3.1 常规指标测定

检测 COD、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 等常规指标,采用国标方法检测;温度和 DO 采用便携式哈希 WWT 测定仪现场测定。

#### 1.3.2 SAOR 和 SNOR 的测定

SAOR 测定:采用 3 个 2 L 的烧杯 A、B 和 C,从反应器好氧区中取 6 L 的污泥完全混合均匀,均分后放入 3 个烧杯中,将污泥液静置 30 min 后倒去 1 L 的上清液,然后加入等量的超纯水进行搅拌淘洗,再静置 30 min 倒去上清液;重复此操作 3 次,在 3 个烧杯中分别加入 1 L 等浓度的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 溶液,将 DO 控制在 4~6 mg·L<sup>-1</sup>,每反应 15 min 取一次样测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度,根据公式(2-1)计算 SAOR。

SNOR 测定:采用 3 个 2L 的烧杯 A、B 和 C,从反应器缺氧区中取 6 L 的污泥完全混合均匀,均分后放入 3 个烧杯中,将污泥液静置 30 min 后倒去 1 L 的上清液,然后加入等量的超纯水进行搅拌淘洗,再静置 30 min 倒去上清液;重复此操作 3 次,在 3 个烧杯中分别加入 1 L 等浓度的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 溶液,将 DO 控制在 4~6 mg·L<sup>-1</sup>[16],每反应 15 min 取一次样测定 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度,根据公式(2-2)计算 SNOR。

#### 1.3.3 厌氧氨氧化速率测定

采用 3 个 2 L 的烧杯 A、B 和 C,从反应器厌氧区中取 6 L 的污泥完全混合均匀,均分后放入 3 个烧杯中,将污泥液静置 30 min 后倒去 1 L 的上清液,然后加入等量的超纯水进行搅拌淘洗,再静置 30 min 倒去上清液;重复此操作 3 次,在 3 个烧杯中分别加入 1 L c(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N):c(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N)=1<sup>[17,18]</sup>的溶液,然后通入氮气直至处于厌氧条件(DO < 0.2 mg·L<sup>-1</sup>)[16],最后将反应器用黑色塑料袋密闭严实[19],每反应 15 min 取一次样测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度,在保证 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度降低且 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度基本未变的前提下,根据公式(3)计算厌氧氨氧化速率。

### 1.4 指标计算方法

#### 1.4.1 亚硝酸积累率(NAR)

亚硝酸积累率的计算公式为:

$$\text{NAR} = \frac{\text{NO}_2^- - \text{N}}{\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}} \quad (1)$$

式中,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 分别表示好氧区末端 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>。

#### 1.4.2 比氨氧化速率(SAOR)、比亚硝酸盐氧化速率(SNOR)

比氨氧化速率和比亚硝酸盐氧化速率的计算公式为:

$$\text{SAOR} = \frac{\text{NH}_{4,s}^+ - \text{NH}_{4,e}^+}{\text{MLVSS} \times t} \quad (2-1)$$

$$\text{SNOR} = \frac{\text{NO}_{2,s}^- - \text{NO}_{2,e}^-}{\text{MLVSS} \times t} \quad (2-2)$$

式中,NH<sub>4,s</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>2,s</sub><sup>-</sup> 分别表示硝化开始时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;NH<sub>4,e</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>2,e</sub><sup>-</sup> 分别为硝化结束时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;MLVSS 为污泥浓度,mg·L<sup>-1</sup>;t 为硝化反应时间,h。

#### 1.4.3 厌氧氨氧化速率(AMXR)

厌氧氨氧化速率的计算公式为:

$$\text{AMXR} = \frac{\text{NH}_{4,s}^+ - \text{NH}_{4,e}^+}{\text{MLVSS} \times t} \quad (3)$$

式中,NH<sub>4,s</sub><sup>+</sup> 表示厌氧氨氧化开始时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;NH<sub>4,e</sub><sup>+</sup> 表示厌氧氨氧化结束时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;MLVSS 为污泥浓度,mg·L<sup>-1</sup>;t 为厌氧氨氧化反应时间,h。

#### 1.4.4 污染物质量平衡计算<sup>[20]</sup>

系统中氮污染物质平衡如图 2 所示,根据公式(4)可计算出厌氧、缺氧和好氧区的氮污染物质平衡,式中 c<sub>1N</sub>、c<sub>2N</sub> 和 c<sub>3N</sub> 分别为厌氧区末端、缺氧区末端和好氧区末端污染物浓度。

$$Q \times c_{\text{inf},N} + Q_{\text{内}} \times c_{2N} + Q_{\text{内}} \times c_{3N} = (Q + Q_{\text{内}} + Q_{\text{外}}) \times c_{1N} + \Delta c_{\text{厌}} \quad (4)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 氮污染物的去除性能研究

系统运行过程中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的去除情况如图 3 所示。由图 3(a) 可以看出,各阶段 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均出水浓度分别为 1.75、2.20、3.97 和 1.20 mg·L<sup>-1</sup>,平均去除率为 96.64%、95.77%、92.36% 和 97.69%,各阶段出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均浓度均能满足一级 A 标准水质限值。系统较好的硝化作用与阶段 I 和 II 好氧区中充足的 DO 浓度(2~3 mg·L<sup>-1</sup>)以及阶段 IV 好氧区中充足的 HRT(7.5 h) 直接相关,这与荣懿等<sup>[21]</sup> 研究结果相符,其研究表明 A<sup>2</sup>/O 系统好氧区 DO 浓度为 2~3 mg·L<sup>-1</sup>、HRT 为 5.25 h 时,好氧区硝化作用可达最佳状态,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率高达 95.30%~97.32%,出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度为 1.15~1.85 mg·L<sup>-1</sup>。阶段 III 系统硝化效果不佳的主要原因是好

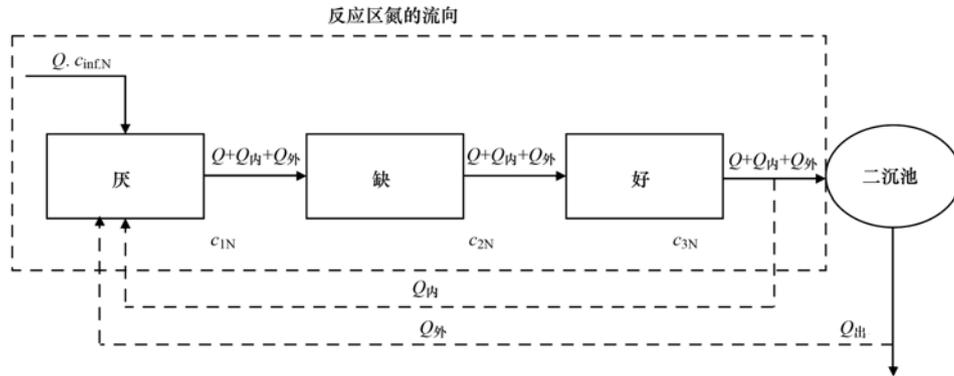


图 2 反应区内氮污染物平衡

Fig. 2 Balance of nitrogen pollutants in the reaction zone

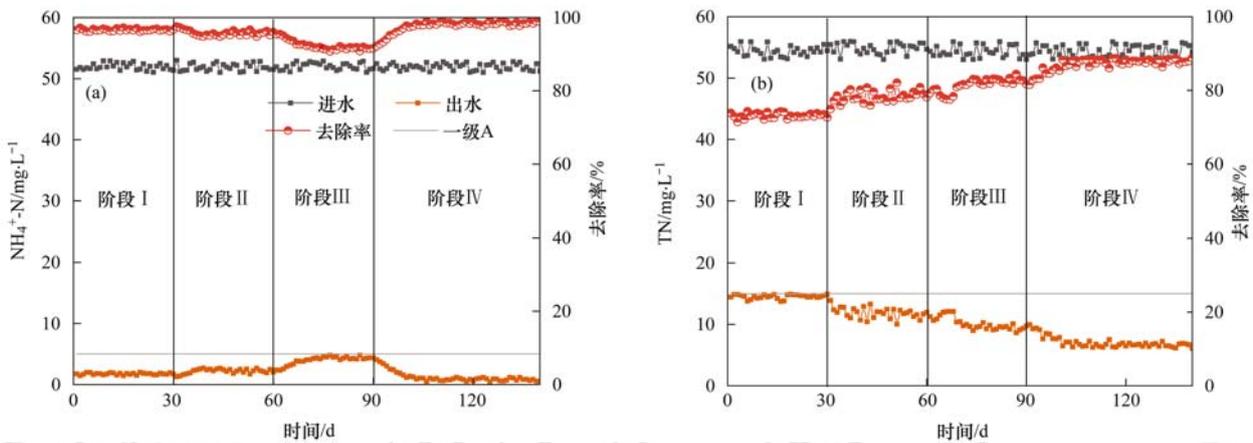


图 3 各阶段下反应器对污染物的去除效果

Fig. 3 Removal performance of nutrients at different stages

氧区 DO 浓度低 ( $0.3 \sim 0.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), 且好氧区 HRT 不足 (5.6 h). 由图 3(b) 可以看出, 系统运行过程中 TN 的去除效率呈递增趋势, 各阶段平均出水 TN 浓度分别为  $14.55$ 、 $11.86$ 、 $10.11$  和  $7.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率为  $73.22\%$ 、 $78.37\%$ 、 $81.34\%$  和  $87.83\%$ .

系统运行过程中氮类污染物的沿程变化如图 4 所示. 经物料衡算分析可以得出, 除了系统的稀释作用外, 各阶段  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  主要是在生物池 IV ~ VIII (好氧区) 中通过硝化作用去除, 好氧区对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率分别为  $86.98\%$ 、 $60.31\%$ 、 $47.86\%$  和  $86.17\%$ , 除了阶段 III 以外, 各阶段好氧区均具有较高的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除效率. 与阶段 I 和 II 相比, 阶段 IV 在降低好氧区 DO 浓度并提高好氧区分区比例的工况下, 仍能保证好氧区对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的高效去除. 然而阶段 I ~ IV 厌氧和缺氧区对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除情况却有着明显的差异, 经物料衡算分析可以得出, 各阶段厌氧缺氧区域  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率分别  $3.3\%$ 、 $11.78\%$ 、 $18.56\%$  和  $28.06\%$ , 可以看出系统运行过程中, 厌氧和缺氧区对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除效率呈现出明显的增长趋势. 与阶段 I ~ III 相比, 阶段 IV 缺氧区对  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的去除率已

高达  $28.06\%$ , 推测此时缺氧区已发生一定程度的厌氧氨氧化现象, 这是阶段 IV 高效脱氮的主要原因. 由图 4(b) 可以看出,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  主要是在缺氧区中通过反硝化作用去除, 经物料衡算分析可以得出, 缺氧区在阶段 I ~ IV 对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效率分别为  $62.51\%$ 、 $58.37\%$ 、 $62.77\%$  和  $66.69\%$ , 各阶段下缺氧区对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除情况无明显差异, 然而好氧区在阶段 I ~ IV 对  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的生成情况却有着明显的降低趋势 ( $334.19\%$ 、 $137.97\%$ 、 $129.45\%$  和  $103.01\%$ ), 阶段 IV 好氧区  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的转化率仅为  $103.01\%$ , 这与阶段 IV 好氧区高效的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率相矛盾, 因此推测此时系统好氧区已发生一定程度的短程硝化现象. 由图 4(c) 可以看出, 阶段 I 和 II 系统沿程  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度几乎无明显变化, 然而在阶段 III 和 IV 系统好氧区内已发生了明显的  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累, 各阶段好氧末端  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的浓度分别为  $0.21$ 、 $0.50$ 、 $3.30$  和  $3.31 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ .

## 2.2 系统脱氮途径变化研究

系统运行过程中氮类污染物在宏观层面发生一定程度的变化, 为了进一步验证系统脱氮途径的转变, 还应在微观层面进行分析. 系统运行过程中

NAR、SAOR、SNOR 和 AMXR 的变化规律如图 5 所示. 由图 5(a)可以看出, 4 个阶段好氧末区 NAR 平均分别为 1.74%、5.72%、40.47% 和 42.41%, 阶段 III 开始系统的 NAR 开始大幅增加. 由图 5(b)可以看出, 4 个阶段 SAOR(以 N/VSS 计)平均分别为 0.248 3、0.237 0、0.158 8 和 0.138 5 g·(g·h)<sup>-1</sup>, SNOR(以 N/VSS 计)平均分别为 0.293 5、0.278 7、0.165 6 和 0.092 1 g·(g·h)<sup>-1</sup>, 阶段 II 增大缺氧区域使 NOB 活性降低幅度大于 AOB, 这与 Irvin 等<sup>[22]</sup>的研究结果不谋而合, 其研究表明厌氧/缺氧期的延长使微生物长期处于饥饿状态, 由于 NOB 比 AOB 更

容易腐烂, NOB 活性可能大幅度降低, 从而实现 AOB 富集. 阶段 III 开始通过降低好氧区 DO 浓度与系统 SRT 可在一定程度上抑制 AOB 与 NOB 的活性, 然而由于 AOB 具有更强的低氧亲和力和倍增速率, 因此通过一定时间的适应, AOB 的活性开始恢复, NOB 的活性进一步降低, 最终实现 AOB 的富集和 NOB 的淘洗, 这与吴春雷等<sup>[14]</sup>的研究成果相符, 其运行的 A<sup>2</sup>/O 反应器在 DO 浓度为 0.5 ~ 0.8 mg·L<sup>-1</sup> 的工况下实现了 AOB 的富集、NOB 的淘洗, NAR 可达 62%. 从阶段 III 开始, 系统好氧区中的优

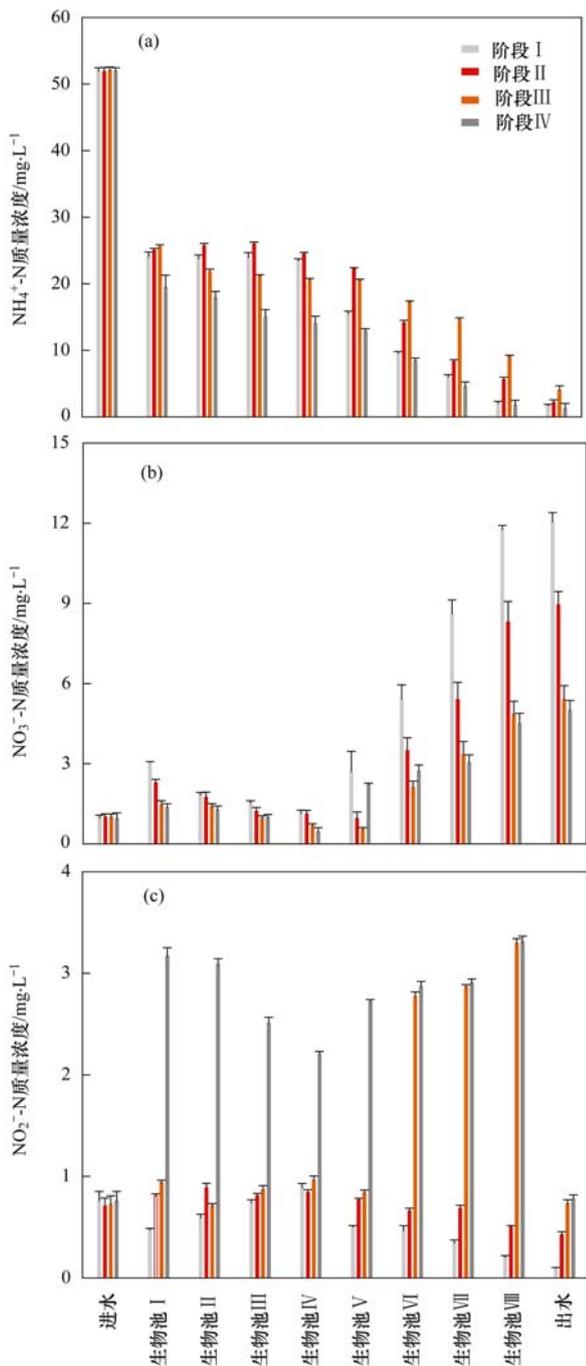


图 4 各阶段 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 浓度变化趋势  
Fig. 4 Changes trend of nutrients at different stages

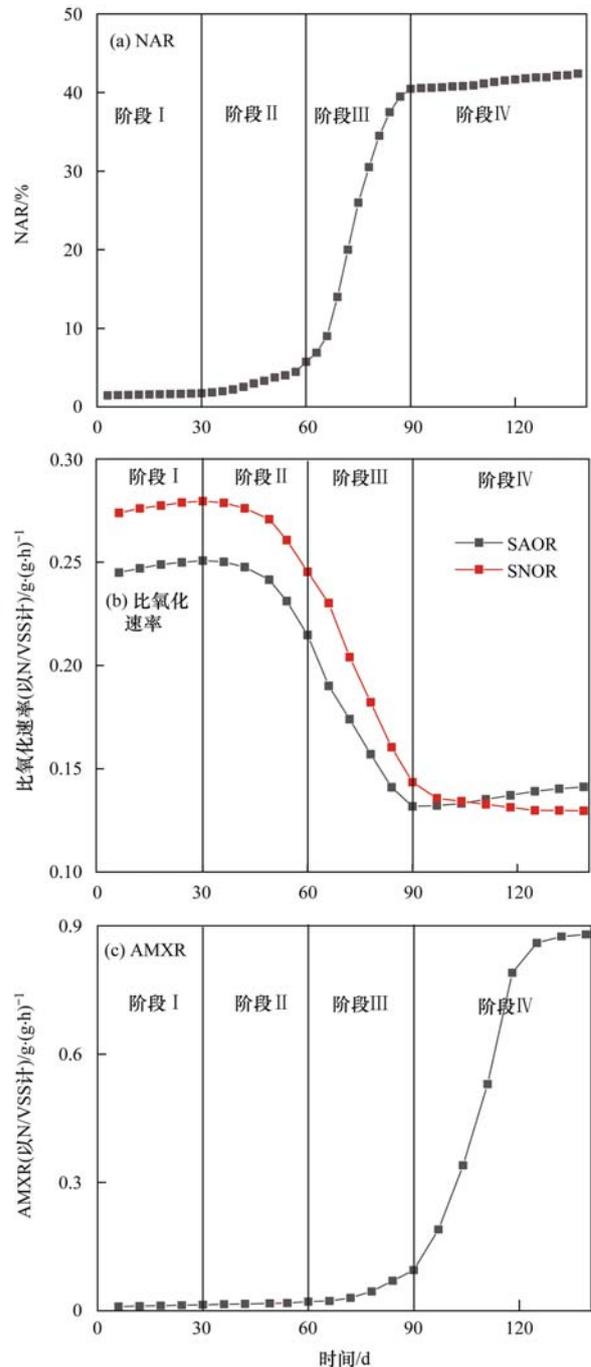


图 5 各阶段 NAR、SAOR、SNOR 和 AMXR 变化情况  
Fig. 5 Changes in NAR, SAOR, SNOR, and AMXR at different stages

势硝化菌群逐渐由 AOB 和 NOB 转变为 AOB,因此系统好氧区中的脱氮途径也随之发生了转变,即由传统的全程硝化转变为短程硝化,从而实现了 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的积累.系统通过内回流将好氧末端积累的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 回流至生物池 I (厌氧区),从而为 AnAOB 提供电子受体,这为厌氧氨氧化作用的发生创造了必要条件<sup>[6]</sup>.从图 5(c)中可以看出,系统缺氧区 AMXR 呈现出明显的升高趋势,各阶段 AMXR (以 N/VSS 计)平均分别为 0.012、0.017、0.053 和 0.79 g·(g·h)<sup>-1</sup>.由于一些客观因素,如无法实现理想的厌氧环境、无法同时满足 AOB 和 AnAOB 的最佳污泥龄、较低的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 积累量以及光合作用细菌对 AnAOB 的竞争性抑制等,致使系统的厌氧氨氧化速率无法进一步得到提升,即便如此与阶段 I 相比,系统在阶段 IV 对 TN 的去除率提高了 14.61%,出水平均 TN 浓度由 14.55 mg·L<sup>-1</sup> 降至 7.03 mg·L<sup>-1</sup>,最终实现了深度脱氮的目的.

2.3 系统微生物种群结构

为了进一步在微生物层面上探究系统高效脱氮性能的原因,对系统内各阶段末的活性污泥(分别为 A1、A2、A3 和 A4)进行微生物群落检测,由表 3 可以看出每个样品的覆盖度均大于 99%,说明测序量能够涵盖样品中微生物群落结构信息,多样性指数分析结果具有较高的可靠性和真实性.表中 Ace 代表丰富度估计值;Shannon 指数是常用的多样性指数;Heip 指数表示群落均匀度;系统细菌群落的丰富度、多样性和均匀度数值均是先降低后增加的趋势.细菌属水平上的 Venn 图如图 6 所示,4 个样本在属水平上共有的 OTU 数是 620,占总 OTU 数的 12.75%,这些菌群是各阶段活性污泥共有的菌群,说明 4 个样本的生物相似性不高,各阶段独有的 OUT 数分别为 758、689、502 和 627,独有的 OUT 数占总

OTU 数分别为 15.59%、14.17%、10.32% 和 12.89%,这表明系统中细菌多样性先减少后增加,这与从丰富度、多样性和均匀度方面得到的结论一致,主要归因于异养菌和好氧菌由于无法适应阶段 II 增加缺氧区和阶段 III 降低溶解氧而裂解死亡,随着阶段 IV 好氧区的增加,细菌活性又有所恢复<sup>[23]</sup>.

表 3 样本测序数据

Table 3 Sample sequencing data

样品	Ace 指数	Shannon 指数	Heip 指数	覆盖度指数/%
A1	551	9.76	0.26	99.9
A2	438	9.59	0.18	99.8
A3	378	7.98	0.16	99.5
A4	401	8.01	0.17	99.9

属水平上 7 种功能细菌群落结构如图 7 所示.可以看出,AOB 以 *Nitrosospira* (其 4 个阶段的对比丰度分别为 27.0%、29.4%、29.8% 和 36.6%,实测丰度分别为 3.4%、3.2%、2.7% 和 3.1%) 和 *Nitrosomonas* (27.4%、29.4%、30.9% 和 33.4%,3.4%、3.3%、2.8% 和 2.9%) 为主,NOB 以 *Nitrospira* (14.5%、12.9%、12.2% 和 7.7%,1.8%、1.4%、1.1% 和 0.7%)、*Nitrococcus* (17.8%、15.6%、15.4% 和 10.6%,2.2%、1.7%、1.4% 和 0.9%) 和 *Nitrobacter* (12.9%、11.9%、9.9% 和 7.7%,1.6%、1.3%、0.9% 和 0.7%) 为主,这与吴春雷等<sup>[14]</sup>的研

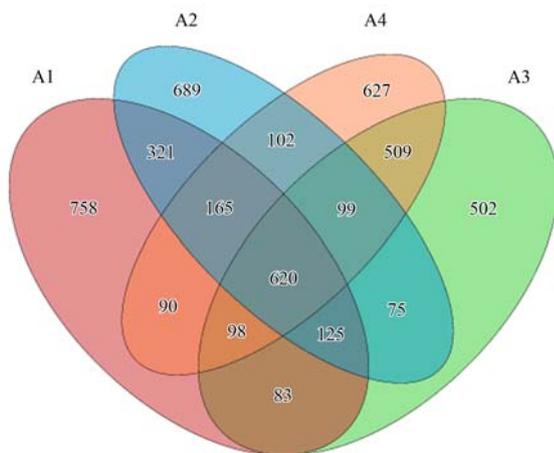
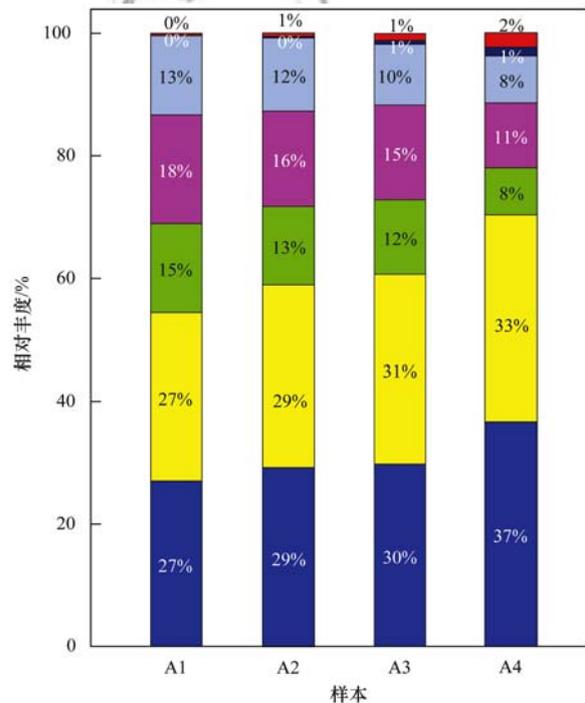


图 6 属水平上的 Venn 图

Fig. 6 Venn diagram of the bacteria at the genus level



菌属从柱状图低端往上依次为 *Nitrosospira*、*Nitrosomonas*、*Nitrospira*、*Nitrococcus*、*Nitrobacter*、*Candidatus Jettenia* 和 *Candidatus Kuenenia*

图 7 属水平上 7 种功能细菌群落结构

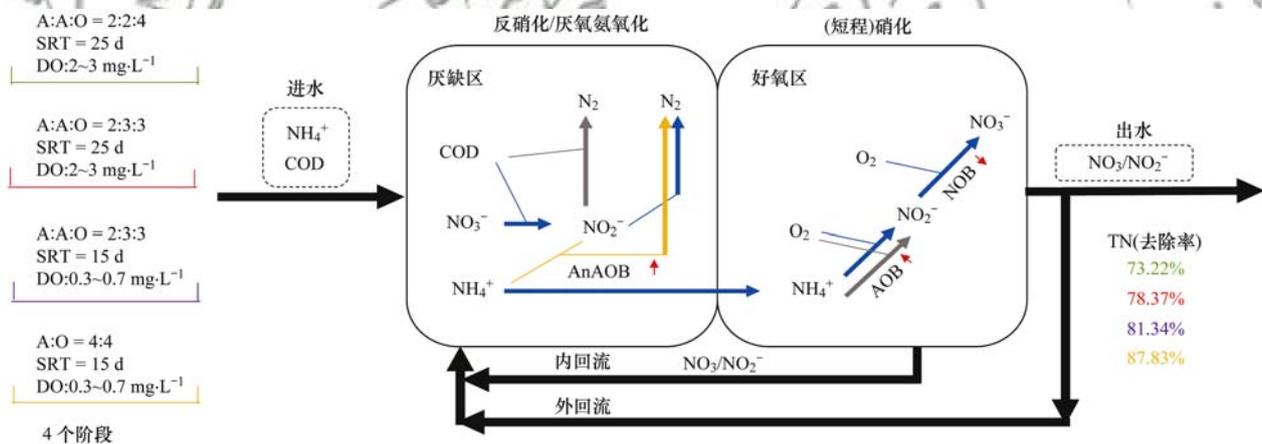
Fig. 7 Community structure of 7 functional bacteria at the genus level

究结果一致. 通过增大好氧分区、降低 DO 浓度和 SRT 可提高系统中 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas* 这两类 AOB 在属水平上的相对丰度, 但降低了 *Nitrosospira*、*Nitrococcus* 和 *Nitrobacter* 这 3 类 NOB 在属水平上的相对丰度, 这就是系统 NAR 宏观表现的原因. AnAOB 以 *Candidatus Kuenenia* (0.1%、0.3%、0.7% 和 1.4%, 0.01%、0.03%、0.06% 和 0.1%) 和 *Candidatus Jettenia* (0.3%、0.5%、1.1% 和 2.4%, 0.04%、0.06%、0.1% 和 0.2%) 为主, 这与 Ma 等<sup>[24]</sup> 的研究结果相符. 阶段 I 和 II 系统中 AnAOB 含量极少, 从阶段 III 开始 AnAOB 在属水平上的相对丰度有所增加, 阶段 IV 大幅上升, 说明在阶段 III 出现短程硝化反硝化的基础上, 调整系统内的工况为阶段 IV 时, 有利于 AnAOB 的生长, 然而较低的 SRT 阻碍了 AnAOB 的进一步富集, 并且异养菌在 COD 高于 200 mg·L<sup>-1</sup> 的厌氧区内对 AnAOB 具有竞争抑制性作用, 但 Molinuevo 等<sup>[25]</sup> 的研究表明当 COD 浓度高于 292 mg·L<sup>-1</sup> 时才会对 AnAOB 产生绝对性的抑制作用, 本系统 COD 浓度并没有达到对 AnAOB 造成绝对抑制作用的浓度, 当然较高浓度的 COD 是本系统内 AnAOB 活性和相对丰度持续上升的主要

限制因素, 这也是 AnAOB 在属水平上的相对丰度最终只能稳定在 2% 的主要原因, 即便如此, 系统中厌氧区仍发生了较明显的厌氧氨氧化现象. 如何在 A<sup>2</sup>/O 系统内消除较高 COD 浓度和较短 SRT 对 AnAOB 的抑制作用, 从而进一步提升 AnAOB 的活性与相对丰度也是本课题组后续研究的重点.

## 2.4 系统脱氮机制初探

结合系统脱氮性能、脱氮途径和微生物种群结构 (图 1~7) 的研究, 推测系统脱氮机制如图 8 所示, 系统脱氮的关键环节为 AOB 和 NOB 共培养阶段 (阶段 I)、AOB 筛分阶段 (阶段 II~III) 与 AnAOB 富集阶段 (阶段 IV), 因此可将系统氮类污染物转化途径分为好氧区的 (短程) 硝化反应 (阶段 II~III), 厌氧区域的 (短程) 反硝化反应和厌氧氨氧化反应 (阶段 IV). 好氧区 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在 AOB 的作用下被氧化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, 有一部分 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在 NOB 的作用下被氧化为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N; 回流系统将好氧区和出水中的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 回流至缺氧区, 使 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在 AnAOB 的作用下生成 N<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 在反硝化菌和碳源的作用下也生成 N<sub>2</sub>, 最终达到深度脱氮的目的.



红色向上和向下箭头代表细菌丰度的增加和减少, 蓝色代表 4 个阶段均发生的反应、灰色代表 II、III 和 IV 阶段均发生的反应

图 8 系统机制初探示意

Fig. 8 Schematic diagram of system mechanism

## 3 结论

(1) A<sup>2</sup>/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统具有优良的脱氮性能, 其最佳工况为阶段 IV, 即  $V_{\text{反硝化}}:V_{\text{好氧}}=4:4$ 、DO 为 0.3~0.7 mg·L<sup>-1</sup> 和 SRT = 15 d, 此时系统出水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TN 的平均浓度分别为 1.20 mg·L<sup>-1</sup> 和 7.03 mg·L<sup>-1</sup>, 去除率分别为 97.69% 和 87.83%.

(2) 增大曝气分区比例、降低好氧区 DO 浓度和 SRT 等参数可实现 A<sup>2</sup>/O 系统中 NOB 的淘洗, AOB 和 AnAOB 的富集, 在阶段 IV 实现了部分短程硝化

耦合厌氧氨氧化系统脱氮构建, 此时 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在缺氧区的去除率为 28.06%, 好氧区末端 NAR 为 42.41%, 系统 SAOR、SNOR 和 AMXR (以 N/VSS 计) 分别为 0.138 5、0.092 1 和 0.79 g·(g·h)<sup>-1</sup>.

(3) Illumina MiSeq 测序结果表明, A<sup>2</sup>/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统中 AOB 以 *Nitrosospira* 和 *Nitrosomonas* 为主, NOB 以 *Nitrosospira*、*Nitrococcus* 和 *Nitrobacter* 为主, AnAOB 以 *Candidatus Kuenenia* 和 *Candidatus Jettenia* 为主, AOB、NOB 和 AnAOB 在属水平上的实测丰度在阶段 IV 时分别为 5.95%、

## 2.2% 和 0.32%.

## 参考文献:

- [ 1 ] Mousavi S A, Mehralian M, Khashij M, *et al.* Effect of air flow rate and C/N ratio on biological nitrogen removal through the CANON process treating reject water [ J ]. *Environmental Technology*, 2018, **39**(22): 2891-2899.
- [ 2 ] Lu J Y, Wang X M, Liu H Q, *et al.* Optimizing operation of municipal wastewater treatment plants in China: the remaining barriers and future implications [ J ]. *Environment International*, 2019, **129**: 273-278.
- [ 3 ] 姜晓华, 宋德安, 董萌青, 等. 一级 A 污水处理厂提标改造可行性分析: 以青岛市某污水处理厂为例 [ J ]. *环境工程*, 2019, **37**(8): 58-65.
- Jiang X H, Song D A, Dong M Q, *et al.* Feasibility analysis on further upgrading wastewater treatment plant executing the first level A standard: a case study in Qingdao [ J ]. *Environmental Engineering*, 2019, **37**(8): 58-65.
- [ 4 ] 肖丽君. 城镇污水处理厂进水碳源利用潜力及分配策略研究 [ D ]. 青岛: 青岛理工大学, 2018.
- Xiao L J. Study on the utilizing potential and the strategy of distribution of influent carbon source in urban sewage treatment plant [ D ]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018.
- [ 5 ] Kunapongkiti P, Limpiyakorn T, Sonthiphand P, *et al.* Partial nitrification in entrapped-cell-based reactors with two different cell-to-matrix ratios: performance, microenvironment, and microbial community [ J ]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2019, **54**(9): 874-883.
- [ 6 ] Choi D, Cho K, Jung J. Optimization of nitrogen removal performance in a single-stage SBR based on partial nitrification and ANAMMOX [ J ]. *Water Research*, 2019, **162**: 105-114.
- [ 7 ] 徐浩, 李捷, 罗凡, 等. 低 C/N 比城市污水短程硝化特性及微生物种群分布 [ J ]. *环境工程学报*, 2017, **11**(3): 1477-1481.
- Xu H, Li J, Luo F, *et al.* Characteristics and microbial populations distribution of shortcut nitrification with low C/N ratio urban sewage [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(3): 1477-1481.
- [ 8 ] 彭永臻, 邵和东, 杨延栋, 等. 基于厌氧氨氧化的城市污水处理厂能耗分析 [ J ]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(4): 621-627.
- Peng Y Z, Shao H D, Yang Y D, *et al.* Energy consumption of the municipal wastewater treatment plant with anammox process [ J ]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(4): 621-627.
- [ 9 ] Cui H H, Zhang L, Zhang Q, *et al.* Stable partial nitrification of domestic sewage achieved through activated sludge on exposure to nitrite [ J ]. *Bioresource Technology*, 2019, **278**: 435-439.
- [ 10 ] 钱允致, 马华继, 苑宏英, 等. 内循环接触氧化型膜生物反应器部分硝化启动与运行条件 [ J ]. *化工进展*, 2019, **38**(9): 3995-4002.
- Qian Y Z, Ma H J, Yuan H Y, *et al.* Partial nitrification start-up and operation process of internal circulation contact oxidation membrane bioreactor [ J ]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, **38**(9): 3995-4002.
- [ 11 ] 黄利. 低基质厌氧氨氧化反应器快速启动特征 [ J ]. *兰州交通大学学报*, 2019, **38**(2): 93-98.
- Huang L. Characteristic of rapid start-up of low substrate anammox reactor [ J ]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2019, **38**(2): 93-98.
- [ 12 ] 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.
- [ 13 ] Zhang Q H, Yang W N, Ngo H H, *et al.* Current status of urban wastewater treatment plants in China [ J ]. *Environment International*, 2016, **92-93**: 11-22.
- [ 14 ] 吴春雷, 荣懿, 刘晓鹏, 等. 基于分区供氧与溶解氧调控的低 C/N 比污水短程硝化反硝化 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40**(5): 2310-2316.
- Wu C L, Rong Y, Liu X P, *et al.* Partial nitrification and denitrification of low C/N ratio sewage based on zoning oxygen and dissolved oxygen control [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40**(5): 2310-2316.
- [ 15 ] Li L, Dong Y H, Qian G S, *et al.* Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen [ J ]. *Bioresource Technology*, 2018, **258**: 168-176.
- [ 16 ] 李水秀, 朱静平, 胡小宇. 厌氧条件下不同种类污泥的释磷效果 [ J ]. *西南科技大学学报*, 2019, **34**(2): 39-44.
- Li S X, Zhu J P, Hu X Y. Phosphorus release effect of different kinds of sludge under anaerobic condition [ J ]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2019, **34**(2): 39-44.
- [ 17 ] 陈胜, 孙德智, 遇光禄, 等. 填充床快速启动厌氧氨氧化反应器及脱氮性能研究 [ J ]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 691-696.
- Chen S, Sun D Z, Yu G L. Rapid startup and nitrogen removal characteristic of anaerobic ammonium oxidation reactor in packed bed biofilm reactor with suspended carrier [ J ]. *Environmental Science*, 2010, **31**(3): 691-696.
- [ 18 ] 刘晓萍. 厌氧氨氧化菌的富集及其与反硝化菌协同脱氮研究 [ D ]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.
- Liu X P. Enrichment of anaerobic ammonium oxidation bacteria and coupled with denitrification bacteria for nitrogen removal [ D ]. Qingdao: Tsingtao University of Science & Technology, 2018.
- [ 19 ] Du R, Cao S B, Li B K, *et al.* Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters [ J ]. *Water Research*, 2017, **108**: 46-56.
- [ 20 ] Cao G H, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Biological nutrient removal by applying modified four step-feed technology to treat weak wastewater [ J ]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**: 604-611.
- [ 21 ] 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 等. A<sup>2</sup>/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 [ J ]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 4113-4120.
- Rong Y, Liu X C, He Y X, *et al.* Enhanced nutrient removal and microbial community structure in a step-feed A<sup>2</sup>/O process treating low-C/N municipal wastewater [ J ]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 4113-4120.
- [ 22 ] Li B K, Irvin S, Baker K. The variation of nitrifying bacterial population sizes in a sequencing batch reactor (SBR) treating low, mid, high concentrated synthetic wastewater [ J ]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, **6**(6): 651-663.
- [ 23 ] Chen H, Hu H Y, Chen Q Q, *et al.* Successful start-up of the anammox process: influence of the seeding strategy on performance and granule properties [ J ]. *Bioresource Technology*, 2016, **211**: 594-602.
- [ 24 ] Ma B, Qian W T, Yuan C S, *et al.* Achieving mainstream nitrogen removal through coupling anammox with denitrification [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(15): 8405-8413.
- [ 25 ] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: effect of organic matter content on process performance [ J ]. *Bioresource Technology*, 2008, **100**(7): 2171-2175.

## CONTENTS

PM <sub>2.5</sub> Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning .....	LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, <i>et al.</i> (1513)
Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities .....	LI Rui, LI Qing, XU Jian, <i>et al.</i> (1520)
Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models .....	HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (1535)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in PM <sub>2.5</sub> in Beijing and Six Surrounding Cities .....	ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, <i>et al.</i> (1544)
Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period .....	LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, <i>et al.</i> (1550)
Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu .....	WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1561)
Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer .....	YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Xiao-ling, <i>et al.</i> (1573)
Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry .....	WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, <i>et al.</i> (1582)
Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants .....	DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1589)
Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China .....	ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, <i>et al.</i> (1594)
Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea .....	YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, <i>et al.</i> (1607)
Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Years .....	FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, <i>et al.</i> (1619)
Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province .....	MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, <i>et al.</i> (1629)
Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, <i>et al.</i> (1636)
Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province .....	ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, <i>et al.</i> (1648)
Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland .....	WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (1657)
Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir .....	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> (1666)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake .....	ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1676)
Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone .....	LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)
Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar .....	DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (1692)
Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments .....	YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (1700)
Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing .....	CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, <i>et al.</i> (1709)
3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment .....	HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, <i>et al.</i> (1716)
Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO <sub>2</sub> Ceramic Ring Particle Electrode .....	SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, <i>et al.</i> (1725)
Degradation of AO7 with Magnetic Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System .....	XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (1734)
Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism .....	SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, <i>et al.</i> (1743)
Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation .....	ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, <i>et al.</i> (1752)
Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue .....	CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, <i>et al.</i> (1761)
Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(II) .....	BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, <i>et al.</i> (1770)
Construction and Denitrification Performance of A <sup>2</sup> /O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System .....	LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, <i>et al.</i> (1779)
Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants .....	YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, <i>et al.</i> (1787)
Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (1794)
Realization Process of Nitrification and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment .....	ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, <i>et al.</i> (1801)
Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs .....	CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (1808)
Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO <sub>2</sub> ) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge .....	YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, <i>et al.</i> (1816)
Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities .....	LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, <i>et al.</i> (1825)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests .....	HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, <i>et al.</i> (1838)
Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China .....	YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, <i>et al.</i> (1847)
Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi .....	CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, <i>et al.</i> (1855)
Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing .....	WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, <i>et al.</i> (1864)
Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar .....	LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, <i>et al.</i> (1871)
Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer .....	XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, <i>et al.</i> (1880)
Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil .....	DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)
Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals .....	YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, <i>et al.</i> (1904)
Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland .....	YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)
Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field .....	ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (1921)
Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw .....	XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i> (1930)
Effect and Approach of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar to Improve Coastal Saline Soil .....	WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, <i>et al.</i> (1941)
Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert .....	MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, <i>et al.</i> (1950)
Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation .....	LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, <i>et al.</i> (1960)
Consumption Capacity of N <sub>2</sub> O in Paddy Soil and the Response Mechanism of <i>nosZ-I</i> -containing Communities .....	GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1968)
Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei .....	CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)
Relationship Between Urban Industrialization and PM <sub>2.5</sub> Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC .....	LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, <i>et al.</i> (1987)