

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

A^2/O 与倒置 A^2/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析

李金成^{1,2}, 郭雅妮^{1*}, 齐嵘^{2*}, 杨敏²

(1. 西安工程大学环境与化学工程学院, 西安 710048; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085)

摘要: 对相同进水、平行运行的 A^2/O 与倒置 A^2/O 工艺的冬季氨氮 (NH_4^+-N) 去除能力进行了全面解析。在运行水温为 14°C 时, 倒置 A^2/O 工艺表现出更低的 NH_4^+-N 容积去除负荷 [$0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] 和氨氧化速率 (AOR) [$0.07 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $0.11 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$], 而 26°C 时两个工艺则相差无几。两个平行工艺中的氨氧化菌 (AOB) 种群定量结果几乎始终相等 (倒置 A^2/O 工艺为 $3.2\% \pm 0.24\%$, A^2/O 工艺为 $3.4\% \pm 0.31\%$)。克隆文库分析的结果表明, 造成低温时倒置 A^2/O 工艺中具有较低氨氮去除能力的原因是其 AOB 优势种属为 AOR 较慢的慢生型 (K-生长策略) 亚硝化螺菌属 (*Nitrosospira*), 而在 A^2/O 工艺中则为 AOR 较快的快生型 (r-生长策略) 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*); 而在 26°C 环境下两个工艺中的优势种属则均为 *Nitrosomonas*。结合对污染物沿程去除过程的全面分析, 发现尽管温度是决定 AOB 优势种属演替的首要原因, 但由于倒置 A^2/O 的工艺结构变化造成其好氧单元具有较高的 COD 负荷和高 NH_4^+-N 浓度等不利于 AOB 生长的因素, 决定了其可以在常规城市污水的条件下出现 K-生长策略型的优势 AOB 种属。因此倒置 A^2/O 针对异养菌 (聚磷菌与反硝化菌) 的工艺构造变化却通过 COD 负荷等间接影响到自养型氨氧化菌的种群分布与演替, 并最终造成工艺在低温条件下硝化能力的减弱。

关键词: 倒置 A^2/O ; 氨氧化细菌; 克隆文库; COD 负荷; 低温

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3866-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202011157

Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A^2/O Sewage Treatment Processes in Winter

LI Jin-cheng^{1,2}, GUO Ya-ni^{1*}, QI Rong^{2*}, YANG Min²

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Ammonia nitrogen (NH_4^+-N) removal capacities of the A^2/O and inverted A^2/O processes were analyzed with the same inlet and parallel operation during winter. When the operating water temperature was 14°C , the inverted A^2/O process exhibited lower NH_4^+-N removal from the volumetric load [$0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ vs. $0.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$] and a lower ammonia oxidation rate (AOR) [$0.07 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ vs. $0.11 \text{ kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$] than the A^2/O process, whereas the two processes exhibited similar performance at 26°C . The quantitative results for the ammonia oxidizing bacteria (AOB) population were almost the same in the two parallel processes ($3.2\% \pm 0.24\%$ for the inverted A^2/O process and $3.4\% \pm 0.31\%$ for the A^2/O process). Clone library analysis showed that at low temperatures, the inverted A^2/O process had a lower capacity for ammonia nitrogen removal than A^2/O process. This is because the particular AOB species [*spirillum* (*Nitrosospira*)] facilitated the slower AOR type (K-growth strategy) of nitrosation in the inverted A^2/O process, whereas in the A^2/O process, the faster AOR type (r-growth strategy) of nitrosation was facilitated by bacterium (*Nitrosomonas*). At 26°C , the dominant species in the two processes were *Nitrosomonas*. Through comprehensive analysis of the pollutants during the removal process, we found that although temperature is the leading cause of AOB advantage in species succession, the changes in the inverted A^2/O process structure, caused by the aerobic unit, resulted in high COD load and high NH_4^+-N concentration, which were unfavorable for the growth of AOB. This shows that under conventional sewage conditions, the K-growth strategy is advantageous for the AOB species. Therefore, the structure of the inverted A^2/O process for heterotrophic bacteria (phosphorus accumulating bacteria and denitrifying bacteria) indirectly affects the population distribution and succession of autotrophic ammonia-oxidizing bacteria, through COD load and other factors, thereby leading to weakened nitrification capacity at low temperatures.

Key words: inverted A^2/O ; ammonia-oxidizing bacteria; clone library; COD load; low temperature

收稿日期: 2020-11-18; 修订日期: 2021-01-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0400804)

作者简介: 李金成 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物与水处理技术, E-mail: 760077275@qq.com

* 通信作者, E-mail: guoyani2002@163.com; qirong@cees.ac.cn

A²/O 工艺(厌氧/缺氧/好氧)通过在不同工艺单元中创建适宜不同重要功能种群(如硝化菌、反硝化菌和聚磷菌等)的生存环境,以保持种群数量的总体动态平衡,从而保证工艺对碳、氮、磷具有较高的整体去除能力^[1]. 为了减缓其在运行中发生的聚磷种群与反硝化种群间的碳源竞争现象,倒置 A²/O 工艺(缺氧/厌氧/好氧)通过取消混合液回流、交换厌氧与缺氧单元顺序等工艺变化,有针对性地增强了工艺生物除磷效果,但在低温运行条件下却易出现氨氮(NH₄⁺-N)去除性能下降的现象^[2,3].

NH₄⁺-N完整的生物去除过程主要由氨氧化菌(AOB)和亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)分步承担. 由于氨氧化为主要限速步骤,因此在一定条件下, AOB 中优势种属的数量及其氨氧化能力可以被看作系统 NH₄⁺-N去除能力的代表;而系统NH₄⁺-N去除性能的下降,往往认为是特殊运行条件下(如低温)优势 AOB 种属功能的抑制,或极端条件下优势 AOB 种属数量的减少^[4]. 因此, AOB 的优势种属及其在工艺中比例的变化则对工艺的氨氮去除能力显得尤为重要. 前期研究指出,决定这两类 AOB 种属优势地位的因素往往与系统关键工艺参数存在着一定联系,如 pH 值、污泥停留时间(SRT)、溶解氧(DO)、底物浓度和季节性温度变化^[5-8]. 同时也有研究指出,当传统 A²/O 工艺因增强除磷性能而改造为倒置 A²/O 时,系统硝化作用的弱化与 AOB 分布的可能存在一定关联^[9,10].

本文针对中国北方大型城市污水处理厂中两个

相同进水、平行运行(工艺参数条件基本一致)的 A²/O 与倒置 A²/O 工艺,通过系统沿程采样监测,详细比较了水温波动期(14~26℃)两个工艺中 NH₄⁺-N去除能力与氨氧化速率(AOR)的变化过程,通过荧光原位杂交(FISH)定量及克隆文库对不同温度时期两类工艺中优势 AOB 种属分布的异同及演替过程进行了系统分析,阐明在这两个广泛使用的城市污水生物处理系统中,优势 AOB 种属分布与工艺结构及主要运行工艺参数间关系,确认影响其演替变化的主要因素,以期对未来城市污水生物处理工艺的稳定运行提供坚实的科学基础.

1 材料与方法

1.1 研究对象和水样采集

以中国北方地区某大型城市污水处理厂中 A²/O 与倒置 A²/O 工艺为研究对象,具体工艺参数和运行流程分别如表 1 和图 1 所示. 温度波动期间(2~7 月,水温 14~26℃)每周从各工艺段中采混合液样品以进行水质监测,并每月通过从好氧池末端取出的泥样对活性污泥进行表征. 取样后,样品按照标准程序测定化学需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)、混合液悬浮固体浓度(MLSS)、氮类污染物和磷的浓度. COD 采用重铬酸钾法, BOD 采用标准稀释法, MLSS 采用重量法, NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法, NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法, NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法, TN 通过碱性过硫酸钾氧化分光光度法测定, PO₄³⁻-P 采用钼酸铵分光光度法^[11].

表 1 倒置和常规 A²/O 工艺基本参数
Table 1 Basis of parallel inverted and conventional A²/O system

项目	流量 /m ³ ·d ⁻¹	工艺段	体积/m ³	池深/m	HRT/h	SRT(均值) /d	DO(均值) /mg·L ⁻¹
倒置 A ² /O	200 000	缺氧	3 060	6	1.5	9.89 ± 2.41	2.1 ± 0.27
		厌氧	5 034	6	2.4		
		好氧	19 986	6	9.6		
常规 A ² /O	200 000	厌氧	3 221	6	1.5	9.17 ± 4.71	2.0 ± 0.32
		缺氧	6 441	6	3		
		好氧	22 544	6	10.8		

1.2 微生物群落结构测定分析

活性污泥样品 DNA 序列提取并克隆由上海美吉生物医药科技有限公司完成. 从倒置 A²/O 工艺中收集的 3 月和 7 月样本的克隆库分别命名为 IM 和 IJ, 从常规 A²/O 工艺收集的 3 月和 7 月样本的克隆库分别命名为 CM 和 CJ. 将已构建的这 4 个 *amoA* 基因克隆库生成的克隆序列(MF590747-MF590811), 通过 BLASTN 程序在 GenBank 数据库中进行搜索, 检索出高度相似的参考序列与本研究

的序列进行比对分析. 在优化序列的基础上按照 97% 相似性对非重复序列进行 OTU 聚类分析及物种多样性分析, 利用 Uparse(7.0.1090)进行 OTU 聚类. 通过 MEGA(v. 4.0)对系统进化树计算绘制. 利用 Canoco(v. 5.0)对 *amoA* 微生物群落和影响因素进行冗余分析.

1.3 FISH 测定分析

两种工艺的活性污泥样品在 4℃ 下用 4% 多聚甲醛固定 3 h, 并在 -20℃ 温度下将其保存在磷酸

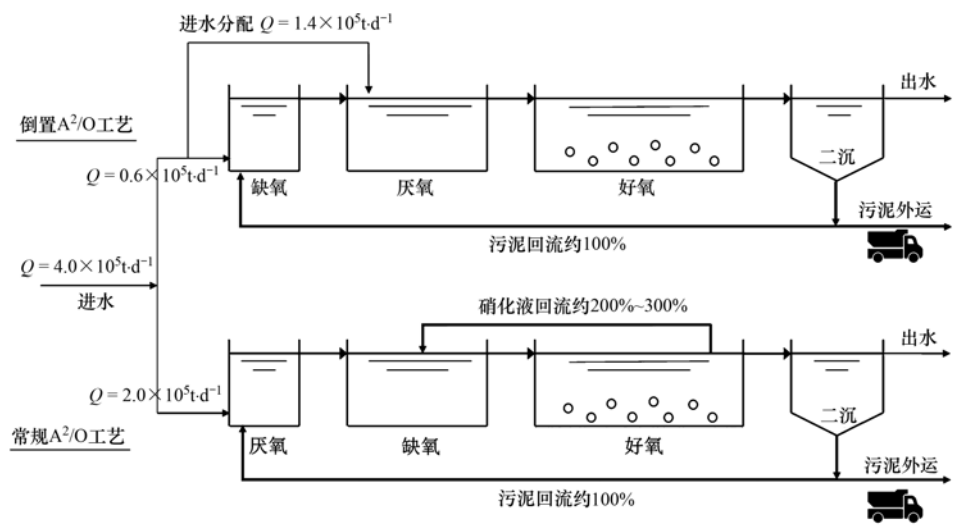


图 1 倒置和常规 A²/O 工艺流程示意

Fig. 1 Configuration of the inverted A²/O and conventional A²/O processes

盐缓冲溶液 (PBS, pH = 7.4) 和乙醇 1:1 的混合物中. 为了分散絮凝体, 样品在冰块上超声处理约 3 min. 将 3 mL 样品放在载玻片的孔中并固定 3 h, 然后使用 50%、80% 和 98% 的乙醇将载玻片脱水 5 min^[12]. 荧光杂交细胞用带有冷却电荷

耦合摄像头 (CCD) 的辐射荧光显微镜分析. 通过软件 Axio (v. 4.1) 计算硝化细菌的比例. 每个样本被观察并拍照不少于 40 次, 然后平均得到最终结果. 本研究使用 16S rRNA 靶向寡核苷酸探针如表 2 所示.

表 2 本研究使用 16S rRNA 靶向寡核苷酸探针

Table 2 16S rRNA-targeted oligonucleotide probes used in this study

探针	序列	标签	甲酰胺化/%	特征
EUBmix ¹⁾	EUB338: GCT GCC TCC CGT AGG AGT	FITC	0 ~ 60	绝大部分细菌
	EUB338-II: GCA GCC ACC CGT AGG TGT			
	EUB338-III: GCT GCC ACC CGT AGG TGT			
Nso1225	CGC CAT TGT ATT ACG TGT GA	Cy3	35	AOB

1) EUBmix 为 EUB338、EUB338-II 和 EUB338-III 混合探针

1.4 COD 污泥负荷计算

好氧段活性污泥的 COD 负荷 (以 MLSS 计) 通过公式 (1) 计算:

$$\text{COD}_{\text{负荷}} = \frac{\text{COD}_{\text{进水}} \times Q_{\text{进}}}{\text{MLSS} \times V_{\text{好氧}}} \quad (1)$$

式中, $\text{COD}_{\text{进水}}$ 为好氧池前端进水 COD 浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $Q_{\text{进}}$ 为好氧池进水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); MLSS 为好氧池污泥浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $V_{\text{好氧}}$ 为好氧池有效容积 (m^3).

1.5 NH_4^+ -N 容积去除负荷计算

好氧段 NH_4^+ -N 容积去除负荷通过公式 (2) 计算:

$$\text{NH}_4^+\text{-N}_{\text{容积去除负荷}} = \frac{(c_{\text{进}} - c_{\text{出}}) \times Q_{\text{进}}}{V_{\text{好氧}}} \quad (2)$$

式中, $c_{\text{进}}$ 为好氧池前端进水 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $c_{\text{出}}$ 为好氧池末端 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $Q_{\text{进}}$ 为进水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); $V_{\text{好氧}}$ 为好氧池有效容积 (m^3).

1.6 氨氧化速率计算

好氧段氨氧化速率 (以 MLSS 计) 通过公式 (3) 计算:

$$\text{氨氧化速率} = \frac{(c_{\text{进}} - c_{\text{出}}) \times Q_{\text{进}}}{\text{MLSS} \times V_{\text{好氧}}} \quad (3)$$

式中, $c_{\text{进}}$ 为好氧池前端进水 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $c_{\text{出}}$ 为好氧池末端 NH_4^+ -N 浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $Q_{\text{进}}$ 为进水流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); MLSS 为好氧池污泥浓度 ($\text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$); $V_{\text{好氧}}$ 为好氧池有效容积 (m^3).

2 结果与分析

2.1 A²/O 与倒置 A²/O 中 NH_4^+ -N 的去除性能

平行运行的 A²/O 与倒置 A²/O 工艺的进出水质如表 3 所示. 可以看出在连续采样监测的 6 个月期间, 在进水水质相同的条件下, 倒置 A²/O 工艺的出水 TP 浓度较低, 近两年历史平均数据 (表 4) 也证明了其在除磷方面具有一定优势, 但倒置 A²/O 工艺对 COD 和 NH_4^+ -N 的去除能力则较弱于 A²/O

工艺. 如图 2(a) 所示, 低温时 ($T = 14^{\circ}\text{C}$) 倒置 A²/O 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的容积去除负荷仅为 $0.13 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 显著低于同期 A²/O 工艺 $0.29 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 而当运行水温为 26°C 时, 两种工艺的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积去除负荷则相差无几 [$0.40 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 与 $0.41 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$]. 同时又对两个平行工艺的氨氧化速率 (AOR) 进行了比较, 如图 2(b) 所示. A²/O 在 14°C 和 26°C 时的 AOR 分别为 $0.11 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.18 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$, 倒置 A²/O 工艺同期 AOR 分别为 $0.07 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $0.17 \text{ kg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$. 与工艺的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 容积去除负荷变化类似, 无论是常规还是倒置 A²/O 工艺, 系统氨氧化速率变化与温度变化存在一定正相关性, 即随着温度升高而增大^[13], 但温度的变化对倒置 A²/O 工艺的影响更大; 14°C 时倒置 A²/O 工艺的 AOR 仅是同期常规 A²/O 工艺 AOR 的 69%, 而 26°C 时, 它的 AOR 则与 A²/O 的 AOR 基本相等. 这也是造成其容积去除负荷变化远远大于 A²/O 工艺的重要原因.

表 3 2~7 月倒置和常规 A²/O 工艺的特征污染物和浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 3 Major parameters of the inverted and conventional A ² /O systems from February to July/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
项目	特征污染物	2~7 月 Q 水厂污染物平均浓度	
进水 ¹⁾	COD	506 ± 163	
	BOD ₅	235 ± 75	
	TN	63 ± 10	
	TP	6 ± 1	
项目	特征污染物	倒置 A ² /O	A ² /O
出水	COD	47 ± 17	37 ± 12
	BOD ₅	7 ± 1	6 ± 1
	TN	24 ± 6	17 ± 3
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	11 ± 9	3 ± 3
	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	10.41 ± 3.71	3.48 ± 0.57
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	6 ± 5	10 ± 4
	TP	0.29 ± 0.25	0.71 ± 0.64

1) 进水 C/N 比为 8.02 ± 2.47

表 4 近两年倒置和常规 A²/O 工艺的特征污染物和浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 4 Major parameters of the inverted and conventional A ² /O systems in the recent two years/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			
项目	特征污染物	Q 水厂近两年污染物平均浓度	
进水 ¹⁾	COD	429 ± 120	
	BOD ₅	208 ± 61	
	TN	61 ± 11	
	TP	6 ± 1	
项目	特征污染物	倒置 A ² /O	A ² /O
出水	COD	43 ± 11	43 ± 11
	BOD ₅	10 ± 3	9 ± 2
	TN	22 ± 5	17 ± 4
	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	4 ± 6	3 ± 4
	$\text{NO}_2^-\text{-N}$	3.08 ± 3.51	0.93 ± 0.87
	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	13 ± 6	12 ± 4
	TP	0.41 ± 0.75	0.82 ± 0.72

1) 进水 C/N 比为 7.18 ± 2.10

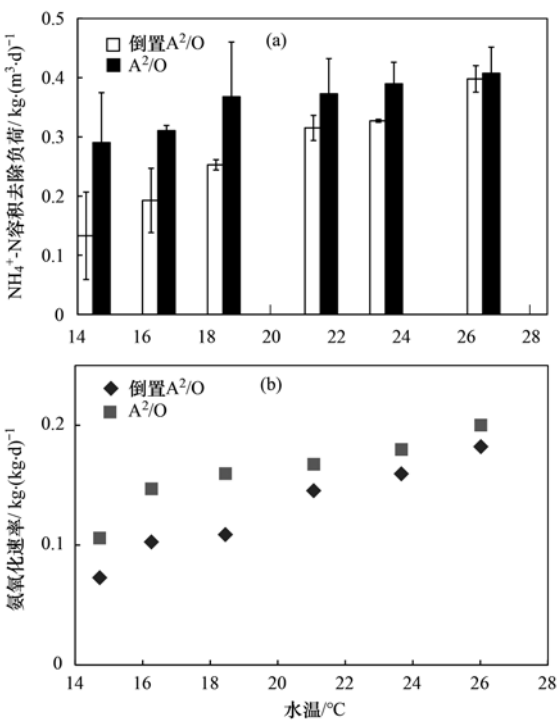


图 2 两种工艺 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除能力在不同温度下的变化
Fig. 2 Variations in $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal capability of the two systems with temperature

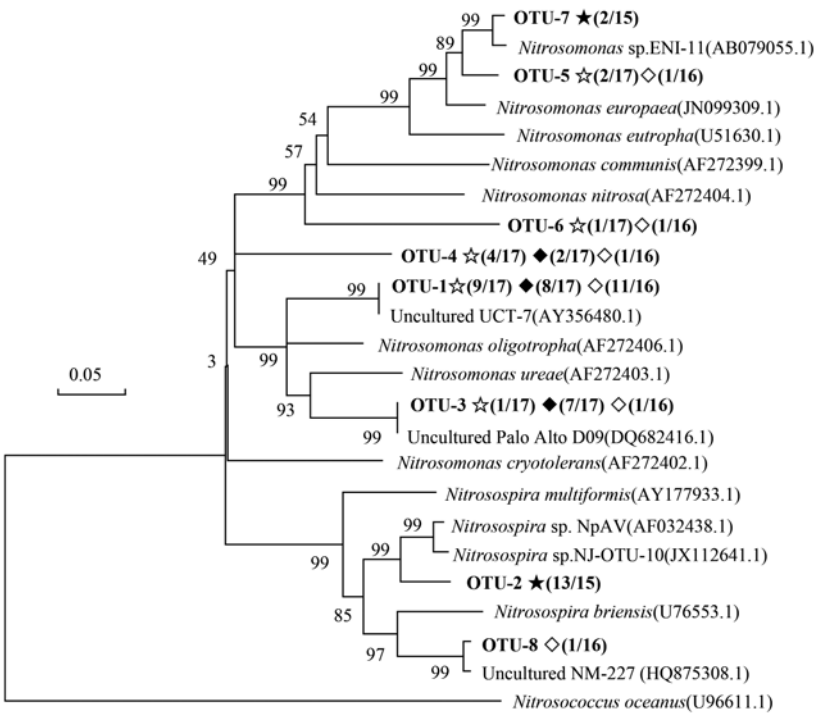
2.2 A²/O 与倒置 A²/O 中优势 AOB 的种属分布

容积去除负荷和 AOR 的变化往往是由 AOB 种群数量变化或其优势种属演替造成的. 首先利用 FISH 对两个平行工艺中 AOB 的季节性数量变化进行了定量表征. 结果表明, 在 $T = 14^{\circ}\text{C}$ 和 $T = 26^{\circ}\text{C}$ 时, 倒置 A²/O 工艺中 AOB 的比例为 $3.2\% \pm 0.24\%$ 和 $3.3\% \pm 0.21\%$, 而常规 A²/O 中 AOB 的比例为 $3.4\% \pm 0.31\%$ 和 $3.5\% \pm 0.19\%$. 这表明无论温度高低, 无论是常规 A²/O 还是倒置 A²/O 工艺, 活性污泥中的 AOB 数量变化并不是很大, 并不是造成容积去除负荷与 AOR 的季节性波动和工艺间差异的主要原因.

又利用克隆文库对 AOB 的优势种属进行了半定量表征. 在 4 个 *amoA* 基因克隆文库 (图 3), 共包含了 65 个序列, 分属于 8 类 OTU, 均与 β -Proteobacteria 变形菌纲中 AOB 种属相关 (表 5), 为亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonas*) 和亚硝基螺菌属 (*Nitrospira*). 其中 *Nitrosomonas* 包括 *N. oligotropha*、*N. ureae*、*N. europaea* 和 *N. nitrosa*, 而 *Nitrospira* 为 *Nitrospira-like* 和 *Nitrospira briensis*. 值得注意的是, 常规活性污泥中较为少见的亚硝化螺菌属在倒置 A²/O 和 $T = 14^{\circ}\text{C}$ 的克隆文库 (IM) 中占优, 15 个 OTU 中 13 个均为 *Nitrospira-like*, 而其余 3 个克隆文库 (IJ、CM 和 CJ) 中, 大部分的优势 AOB 种属均为 *N. oligotropha*.

常规 A²/O 工艺中, *Nitrosomonas* 始终为 AOB 的优势种属; 而在倒置 A²/O 工艺中, 低温期优势种属为 *Nitrosospira*, 而常温期则演替为 *Nitrosomonas*. 有研究指出, 纯培养的 *Nitrosospira* AOR 仅为 0.002 pmol·(h·cell)⁻¹, 比 *Nitrosomonas* 低 3 倍左右^[14]; 本课题组之前的模拟反应器研究结果也证明, 当 *Nitrosospira* 为活性

污泥中的优势 AOB 时(4.9%), 其 AOR [0.14 kg·(kg·d)⁻¹] 要低于仅含有 3.5% *Nitrosomonas-like* 的活性污泥 [0.22 kg·(kg·d)⁻¹]^[15]. 因此, 低温期 *Nitrosospira-like* 为活性污泥中的优势 AOB 是倒置 A²/O 工艺中 AOR 较大波动的原因, 并且造成其与 A²/O 工艺存在较大的容积去除负荷差异.



★表示 IM,倒置 A²/O 工艺 3 月的样本, T=14℃; ☆表示 IJ,倒置 A²/O 工艺 7 月的样本, T=26℃;
◆表示 CM,常规 A²/O 工艺 3 月的样本, T=14℃; ◇表示 CJ,常规 A²/O 工艺 7 月的样本, T=26℃

图 3 利用 *amoA* 引物从常规和倒置 A²/O 工艺中提取的样本中部分 *amoA* 序列的系统发育树

Fig. 3 Neighbour-joining tree of partial *amoA* sequences recovered from samples with inverted and conventional A²/O systems using *amoA* primers

表 5 *amoA* OTU 在两种工艺克隆库中的分布情况¹⁾

Table 5 Distribution of *amoA* OTU in the clone libraries of the two systems

项目 ²⁾	OTU1	OTU2	OTU3	OTU4	OTU5	OTU6	OTU7	OTU8	样本 OTU 数量
IM (iA ² /O, T=14℃)		13					2		15
IJ (iA ² /O, T=26℃)	9		1	4	2	1			17
CM (A ² /O, T=14℃)	8		7	2					17
CJ (A ² /O, T=26℃)	11		1	1	1	1		1	16
种属 OTU 数量	28	13	9	7	3	2	2	1	65

1) OTU 类型中, 数字代表该类 OTU 在克隆库中的编号, OTU1 ~ OTU8 的属名分别为: *N. oligotropha*、*Nitrosospira-like*、*N. ureae*、*Nitrosomonas-like*、*N. europaea*、*N. nitrosa*、*Nitrosomonas-like*、*Nitrosospira briensis*; 2) IM, 倒置 A²/O 工艺 3 月的样本, T=14℃; IJ, 倒置 A²/O 工艺 7 月的样本, T=26℃; CM, 常规 A²/O 工艺 3 月的样本, T=14℃; CJ, 常规 A²/O 工艺 7 月的样本, T=26℃

3 讨论

有研究指出, 难降解的工业废水、低温和低 DO 等均是 *Nitrosospira* 占据优势的主要因素^[16]. 但作为平行运行的 A²/O 工艺, 其进水水质、工艺运行条件与运行参数(温度、SRT 和 DO)等均与倒置 A²/O 工艺基本相同, 但 A²/O 工艺的优势种属始终为

Nitrosomonas; 同时两个工艺的 SVI 均小于 150 mL·g⁻¹, 也排除了冬季污泥膨胀对 *Nitrosomonas* 的定向洗脱作用^[17,18]. 平行工艺间最大的不同则是倒置 A²/O 工艺的结构变化, 而这种变化会引起污染物在两个工艺间的去除过程存在一定不同, 对 AOB 优势种属的生存环境可能带来一定影响.

对两个工艺典型时期的 COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N

和 NO₂⁻-N 的去除过程进行了平行分析比较(图 4 ~ 6). 图 4 反映出两种工艺好氧池活性污泥的 COD 负荷随温度正相关,但在污泥浓度基本相同的前提下,倒置 A²/O 工艺好氧池污泥 COD 去除负荷比常规 A²/O 工艺约高 26%. 图 5 和图 6 反映了 COD 和 NH₄⁺-N 以及 NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 浓度随工艺段长度的变化趋势. 倒置 A²/O 工艺优化的初衷是针对系统除磷功能进行优化,即通过取消内回流减少反硝化碳源竞争,同时改变空间顺序保证释磷反应发生得更充分. 由于大比例内回流的取消,稀释作用被减弱,因此工艺内部沿程的 NH₄⁺-N 浓度与 COD 浓度要始终高于常规 A²/O 工艺(图 5 和图 6); 高 COD 负荷可以通过 COD 与氨氮去除发生的先后顺序,影响工艺中 NH₄⁺-N 去除的停留时间; 而倒置 A²/O 工艺 AOR 速率又慢于 A²/O 工艺,所以其生物池出水中 NH₄⁺-N 浓度也要高于 A²/O 工艺.

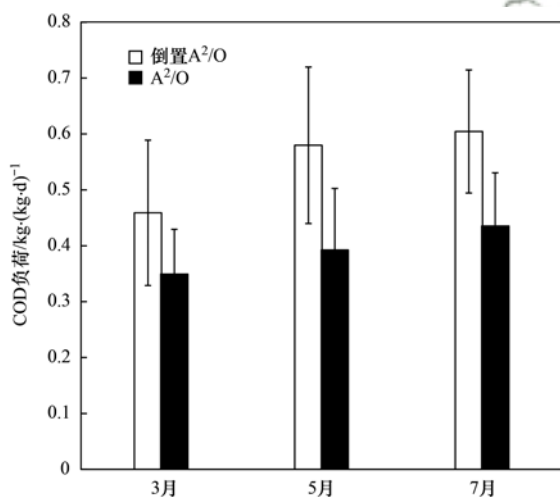
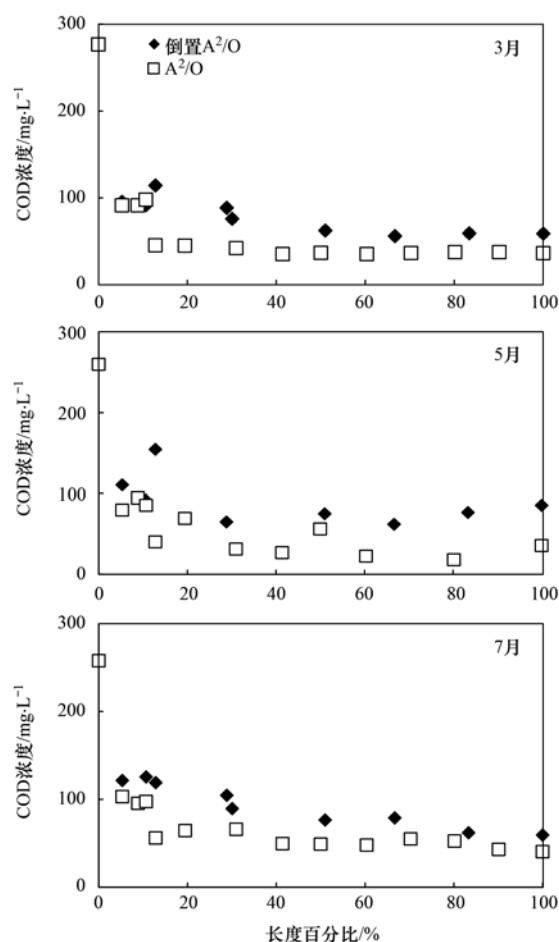


图 4 分别在 3、5 和 7 月中两种工艺好氧池中活性污泥的 COD 负荷

Fig. 4 Comparison of COD sludge load in the aerobic sections of the two systems in March, May, and July

对平行工艺中所含有的 AOB 种属进行了环境因子 RDA 分析,结果显示(图 7), COD 和 NH₄⁺-N 与 *Nitrosospira-like* 具有显著的正相关,而温度与 *N. oligotropha* 具有一定的正相关性. 这两类 AOB 属于不同策略的生长类型, *N. oligotropha* 为快生型(r-生长策略),而 *Nitrosospira-like* 为慢生型(K-生长策略). K-生长策略表现为微生物生长速率低,代谢活性低,但耐受恶劣的生存环境^[19,20]. 常规污水生物处理的环境一般均为微生物的适宜生长环境,所以 AOB 的优势种属大多为快生型的 *Nitrosomonas*; 而在极端寒冷、工业废水等恶劣环境中才会出现慢生型 *Nitrosospira* 占据优势的现象^[21]. 相对于 A²/O 工艺,倒置 A²/O 工艺中的高 COD 负荷及其与低温的结合,则会对 AOB 种群生长环境产生不利影响^[22];

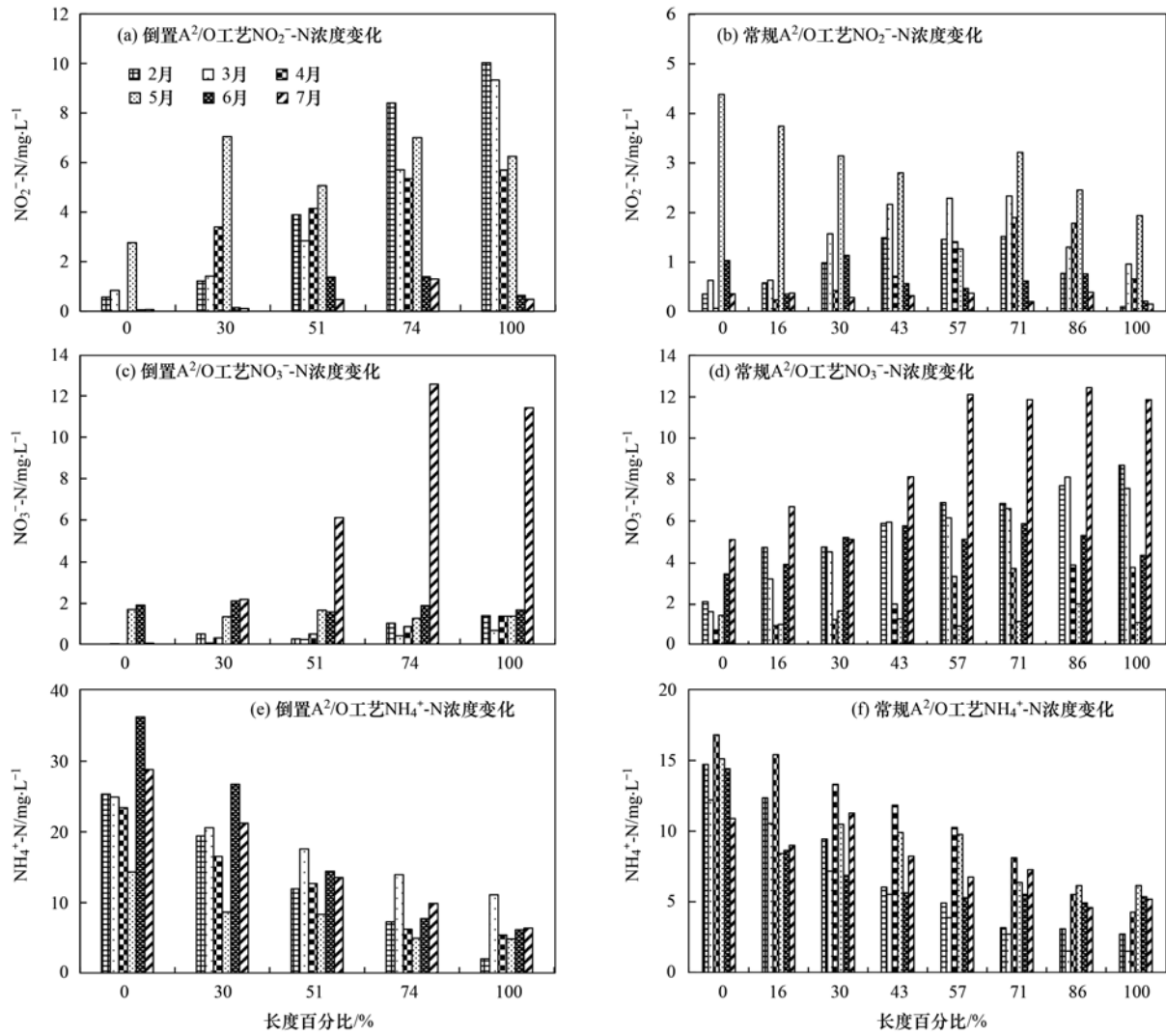


以好氧工艺段起始为 0%, 末端为 100%, 横坐标为取样点在好氧段中的长度百分比
图 5 分别在 3、5 和 7 月中两种工艺中 COD 浓度随好氧段长度的变化

Fig. 5 COD concentration variation through the length of the aerobic tanks in March, May, and July

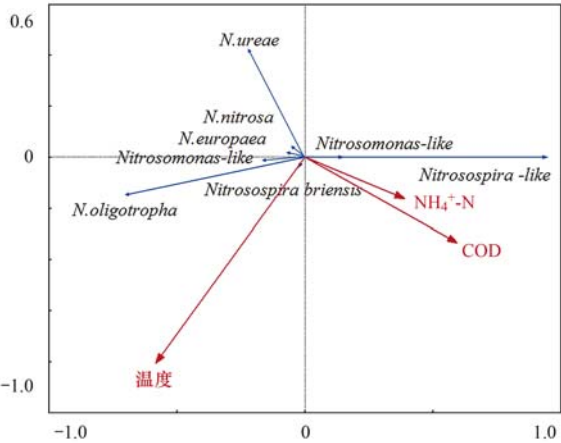
同时发现了在土壤环境中高浓度 NH₄⁺-N 有利于 *Nitrosospira* 在微生物群落中占主导地位的类似现象^[23,24],而倒置 A²/O 中较高的 NH₄⁺-N 浓度也可能在一定程度上促进了 *Nitrosospira* 的优势地位.

对平行运行工艺的 AOB 优势种属变化与环境因素间的影响机制进行了详细分析. 倒置 A²/O 工艺始终存在 NH₄⁺-N 浓度高、NH₄⁺-N 氧化时间短和 COD 负荷高等不利于 r-生长策略型 AOB 生存的环境条件. 当 $T = 14^{\circ}\text{C}$ 时,存在不利因素的倒置 A²/O 中 AOB 的优势种属为 K-生长策略型,比例占全体 AOB 的 87%; 没有不利因素的 A²/O 工艺尽管是 r-生长策略型占据优势,但 *N. oligotropha* 的数量比例仅为 47%. 当 T 升至 26°C 时,倒置 A²/O 中的 AOB 优势种属由 K-生长策略型演替为 r-生长策略型,且占整体 AOB 的比例为 53%,而 A²/O 工艺中的 r-生长策略型 AOB 的比例则升至 69%. 这意味着,温度依然是决定 AOB 优势种属演替的首要原因. 当温度较低时($T = 14^{\circ}\text{C}$),尽管常规 A²/O 工艺中 AOB 是



以好氧工艺段起始为0%,末端为100%,横坐标为取样点为好氧段中的长度百分比
图6 两种工艺在2~7月 NO_2^- -N, NO_3^- -N和 NH_4^+ -N浓度随好氧池长度的变化

Fig. 6 Variation in NO_2^- -N, NO_3^- -N, and NH_4^+ -N concentrations through the length of the aerobic tanks in each inverted and conventional A^2/O system, from February to July



蓝色为相应 AOB 功能菌属,红色为工艺运行的环境因子
图7 基于属水平上对于 AOB 种群影响因素的冗余分析
Fig. 7 RDA (redundancy analysis) of impacting factors and AOB community (at genus level)

r-生长策略型的 *N. oligotropha* 占据优势地位,但其比例不高;而倒置 A^2/O 在低温与不利因素的迭加作用下,其 AOB 的优势种属为高比例的 K-生长策略型 *Nitrosospira-like*;当运行水温升至 $T = 26^\circ\text{C}$ 时,尽管倒置 A^2/O 工艺依旧存在着不利于 r-生长策略型 AOB 的生存因素,但在温度的作用下其优势 AOB 演替为适宜环境中快速生长的 r-生长策略型 *N. oligotropha*;而 A^2/O 工艺中 r-生长策略型的 *N. oligotropha* 则大大提高了其占整体 AOB 的比例.但高 COD 负荷、高 NH_4^+ -N等不利因素的影响也不可忽视,在低温条件的前提下,正是高 COD 负荷、高 NH_4^+ -N等因素决定了倒置 A^2/O 工艺中可以在常规城市污水的条件下出现 K-生长策略型的优势 AOB 种属,而平行运行的 A^2/O 工艺依旧是 *Nitrosomonas*.

倒置 A²/O 工艺的结构改造是为优化除磷过程而进行, 尽管达到了生物强化除磷的目的^[25,26], 但由于活性污泥是复杂的微生物生态聚集, 微生物的功能发挥、数量变化及优势种群演替只会按照自身客观规律在实际条件下发生, 并不以人的主观意志而转移。因此倒置 A²/O 针对异养菌(聚磷菌与反硝化菌)的工艺构造变化却通过 COD 负荷等间接影响到自养型氨氧化菌的种群分布与演替^[27], 并最终造成工艺在低温条件下硝化能力的减弱^[28,29]。这也提示人们需要从整体和互动的角度看待活性污泥中功能种群的反应机制, 完善对微生物群落的整体认知, 从而为未来工艺的优化设计开发提供更加完全的科学知识基础。

4 结论

针对倒置 A²/O 工艺冬季 NH₄⁺-N 去除能力下降的现象, 对实际平行运行的大型 A²/O 工艺和倒置 A²/O 工艺进行的连续监测和系统分析, 发现在 T = 14℃ 条件下, 倒置 A²/O 工艺具有较低的 NH₄⁺-N 去除能力和较慢的 AOR 速率, 而水温恢复至 26℃ 时, 两个工艺的 NH₄⁺-N 去除能力和 AOR 速率则基本相同。FISH 定量结果显示, 两个工艺不同阶段的 AOB 数量基本相同, 而去除能力下降主要是由于优势 AOB 种属的分布及演替规律不同所造成: 倒置 A²/O 工艺低温时 AOB 优势种属为慢生长策略型(K-生长策略)的 *Nitrosospora-like*, 而 A²/O 工艺为快生长策略型的 *N. oligotropha*; 当水温恢复时, 两个工艺的优势 AOB 种属均为 *N. oligotropha*。造成两个工艺 AOB 不同演替规律的主要原因是低温及倒置 A²/O 工艺结构变化引起工艺沿程的高 COD 负荷、高 NH₄⁺-N 浓度等因素。

参考文献:

- [1] Seyedsalehi M, Jaafari J, Hélix-Nielsen C, et al. Evaluation of moving-bed biofilm sequencing batch reactor (MBSBR) in operating A²O process with emphasis on biological removal of nutrients existing in wastewater [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(1): 199-206.
- [2] 金鹏康, 郑未元, 王先宝, 等. 倒置 A²/O 与常规 A²/O 工艺除磷效果对比[J]. 环境工程学报, 2015, 9(2): 501-505.
Jin P K, Zheng W Y, Wang X B, et al. Comparison of phosphorus removal efficiency between reversed and conventional A²/O processes [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(2): 501-505.
- [3] Fang F, Qiao L L, Cao J S, et al. Quantitative evaluation of A²O and reversed A²O processes for biological municipal wastewater treatment using a projection pursuit method [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 166: 164-170.
- [4] Sims A, Gajaraj S, Hu Z Q. Seasonal population changes of ammonia-oxidizing organisms and their relationship to water quality in a constructed wetland [J]. Ecological Engineering, 2012, 40: 100-107.
- [5] Siripong S, Rittmann B E. Diversity study of nitrifying bacteria in full-scale municipal wastewater treatment plants [J]. Water Research, 2007, 41(5): 1110-1120.
- [6] Liu F, Hu X M, Zhao X, et al. Microbial community structures' response to seasonal variation in a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. Environmental Engineering Science, 2019, 36(2): 172-179.
- [7] Cydzik-Kwiatkowska A, Zielińska M. Bacterial communities in full-scale wastewater treatment systems [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2016, 32(4): 66.
- [8] 于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 等. 城市污水中硝化菌群落结构与性能分析[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4366-4371.
Yu L F, Du Q Q, Fu X T, et al. Community structure and activity analysis of the nitrifiers in raw sewage of wastewater treatment plants [J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4366-4371.
- [9] Qi R, Yu T, Li Z, et al. Comparison of conventional and inverted A²/O processes: phosphorus release and uptake behaviors [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(4): 571-578.
- [10] Flowers J J, Cadkin T A, McMahon K D. Seasonal bacterial community dynamics in a full-scale enhanced biological phosphorus removal plant [J]. Water Research, 2013, 47(19): 7019-7031.
- [11] 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.
- [12] Schurig C, Mueller C W, Höschen C, et al. Methods for visualising active microbial benzene degraders in situ microcosms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, 99(2): 957-968.
- [13] Limpiyakorn T, Sonthiphand P, Rongsayamanont C, et al. Abundance of *amoA* genes of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in activated sludge of full-scale wastewater treatment plants [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(4): 3694-3701.
- [14] Taylor A E, Bottomley P J. Nitrite production by *Nitrosomonas europaea* and *Nitrosospora* sp. AV in soils at different solution concentrations of ammonium [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(4): 828-836.
- [15] Yu T, Qi R, Li D, et al. Nitrifier characteristics in submerged membrane bioreactors under different sludge retention times [J]. Water Research, 2010, 44(9): 2823-2830.
- [16] 杜江. 贫营养条件下 MBR、IAMB 脱氮效果与微生物群落结构分析 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
Du J. Analysis of MBR or IAMB on nitrogen removal and microbial community constructure in the oligotrophic condition [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [17] Wang J, Li Q, Qi R, et al. Sludge bulking impact on relevant bacterial populations in a full-scale municipal wastewater treatment plant [J]. Process Biochemistry, 2014, 49(12): 2258-2265.
- [18] 高晨晨, 游佳, 陈轶, 等. 丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 [J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2794-2801.
Gao C C, You J, Chen Y, et al. Effect of denitrification and phosphorus removal microorganisms in activated sludge bulking caused by filamentous bacteria [J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2794-2801.
- [19] 范念斯, 齐嵘, 杨敏. 未培养微生物的培养方法进展 [J]. 应

- 用与环境生物学报, 2016, **22**(3): 524-530.
- Fan N S, Qi R, Yang M. Current technical progresses in the cultivation for uncultured microorganism[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, **22**(3): 524-530.
- [20] 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.
- [21] Yao Q, Peng D C. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) dominating in nitrifying community in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants[J]. Amb Express, 2017, **7**(1): 1-11.
- [22] Sato Y, Hori T, Navarro R R, *et al.* Fine-scale monitoring of shifts in microbial community composition after high organic loading in a pilot-scale membrane bioreactor [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2016, **121**(5): 550-556.
- [23] Avrahami S, Liesack W, Conrad R. Effects of temperature and fertilizer on activity and community structure of soil ammonia oxidizers[J]. Environmental Microbiology, 2003, **5**(8): 691-705.
- [24] 徐白璐. 长期施肥和温度对酸性旱地土壤硝化微生物和总细菌群落的影响[D]. 南京: 南京师范大学, 2017.
- [25] Chen Y S, Zhao Z, Peng Y K, *et al.* Performance of a full-scale modified anaerobic/anoxic/oxic process: high-throughput sequence analysis of its microbial structures and their community functions[J]. Bioresource Technology, 2016, **220**: 225-232.
- [26] 郭玉梅, 吴毅辉, 郭昉, 等. 某污水厂 A²O 和倒置 A²O 工艺脱氮除磷性能分析[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(5): 2185-2190.
- Guo Y M, Wu Y H, Guo F, *et al.* Analysis of nitrogen and phosphorus removal in A²O and Inverted A²O processes in a wastewater treatment plant[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, **9**(5): 2185-2190.
- [27] Yang R L, Wang X J, Guo Y, *et al.* Evaluation of anammox pathway recovery after high COD loading using water quality, molecular biology and isotope labelling analysis[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020, **43**(4): 625-636.
- [28] Zeng M, Yang J F, Li X F, *et al.* Enhancement of mainstream nitrogen removal *via* simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification by the gel entrapment technique [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2020, **6**(3): 767-778.
- [29] Ahmed W, Tian X, Delatolla R. Nitrifying moving bed biofilm reactor: Performance at low temperatures and response to cold-shock[J]. Chemosphere, 2019, **229**: 295-302.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)