

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古铂铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析

钱飞跃¹, 刘雨馨¹, 王建芳^{1,2,3,*}, 刘文如^{1,2,4}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技大学天平学院, 苏州 215009; 3. 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室, 苏州 215009; 4. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009)

摘要: 低温驯化是提高部分亚硝化-厌氧氨氧化(PN/A)组合工艺低温脱氮效能和运行稳定性的有效方法. 为探究低温驯化对污泥特性的具体影响, 本文从温度敏感性、颗粒外观形态、胞外聚合物(EPS)组成和微生物群落结构等方面, 对中高温培养(30℃)和低温驯化(15℃)PN/A颗粒污泥之间的差异性进行了分析. 反应热力学的研究表明, 驯化污泥(G_L)在低温区(10~20℃)的脱氮性能较中高温培养污泥(G_H)有了显著提高, 总无机氮去除的表观反应活化能(E_a)降低了28.4%. 与 G_H 相比, G_L 的平均粒径减小了25.8%, EPS含量增长了16.6%, 颗粒的沉降性能明显下降. 由高通量测序结果可知, G_L 具有更高的菌群多样性, 同时, 污泥中好氧氨氧化菌(*Nitrosomonas*)与厌氧氨氧化菌(*Candidatus_Kuenenia*)的丰度比值(0.04)远小于 G_H 的0.34. 这意味着颗粒污泥在低温环境中对慢速生长自养菌仍具有较强的截留能力. 上述发现为解析PN/A污泥在低温条件下的自适应机制, 推动组合工艺的工程化应用提供了重要参考.

关键词: 低温驯化; 颗粒污泥; 全自养脱氮; 反应自由能; 污泥形态; 菌群结构

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3422-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012003

Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure

QIAN Fei-yue¹, LIU Yu-xin¹, WANG Jian-fang^{1,2,3,*}, LIU Wen-ru^{1,2,4}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. College of Tianping, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. National and Local Joint Engineering Laboratory of Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu High Education Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Material, Suzhou 215009, China)

Abstract: Cold acclimation is an effective approach for improving the nitrogen removal performance and operational stability of partial nitrification/ANAMMOX (PN/A) combined processes at low temperatures. To explore the specific effects of cold acclimation on the characteristics of sludge, differentiations in temperature sensitivity, granular morphology, composition of extracellular polymer substance (EPS), and bacterial community structure between PN/A granular sludges cultivated at medium-high temperature (30℃) and acclimated to low temperature (15℃) were investigated in this study. The results of reaction thermodynamics showed that the nitrogen removal performance of the granules acclimated to low temperature (G_L) was significantly higher than that of those cultivated at medium-high temperature (G_H) under the low temperature (10-20℃), and the apparent activation energy (E_a) of total inorganic nitrogen removal for the former was decreased by 28.4%. Compared with G_H , G_L had a smaller average particle size of 25.8% and higher EPS contents of 16.6%, resulting in a significant lower settling property. Based on the high-throughput sequencing results, G_L exhibited a higher diversity of bacterial community, and a lower relative abundance ratio (0.04) of aerobic ammonium-oxidizing bacteria (*Nitrosomonas*) and anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (*Candidatus_Kuenenia*) than 0.34 for G_H . It indicated that the PN/A granules held a strong ability to retain slow-growing autotrophic bacteria in the system, even under low temperatures. These findings could provide meaningful references for analyzing the self-adaption mechanisms of PN/A sludge to low temperature conditions and promote the industrial application of combined processes.

Key words: cold acclimation; granular sludge; completely autotrophic nitrogen removal; apparent activation energy of reaction; sludge morphology; bacterial community structure

部分亚硝化-厌氧氨氧化(partial nitrification/ANAMMOX, PN/A)是一种全自养生物脱氮工艺, 其首先通过好氧氨氧化菌(AOB)将一部分氨氮氧化为亚硝态氮, 再由厌氧氨氧化菌(AMX)将剩余的氨氮和亚硝态氮转化为氮气, 并产生少量硝态氮, 理论脱氮率在85%以上^[1]. 一般认为, 生物脱氮反应对环境温度较为敏感. 在中高温条件(30~35℃)下, AOB和AMX的比生长速率可以分别达到0.81~

0.85 d⁻¹和0.0027 d⁻¹, 污泥脱氮活性处于最佳状

收稿日期: 2020-12-01; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878430, 51808367); 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室开放课题项目(2019KF02); 江苏高校“青蓝工程”中青年优秀骨干教师培养对象项目; 江苏省高等学校自然科学基金资助项目(18KJB610019); 苏州市科技计划项目(SS201834)

作者简介: 钱飞跃(1986~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: qfywater@163.com

* 通信作者, E-mail: wjfb02@163.com

态^[2].当环境温度低于 15℃时,PN/A 污泥的增殖速率和反应活性均会大幅降低,并容易出现亚硝酸盐氧化菌(NOB)过度生长,导致厌氧氨氧化反应路径受阻等现象,这在很大程度上限制了 PN/A 工艺在大规模市政污水处理中的推广应用^[3,4].

有研究表明,经过长期驯化后,以颗粒污泥为核心的单级 PN/A 反应器能够在低温环境中实现稳定的脱氮过程. Gonzalez-Martinez 等^[5]在 260 d 内将 PN/A 系统的反应温度由 35℃逐级降低至 15℃,并使总氮去除负荷稳定在 0.28~0.32 kg·(m³·d)⁻¹. Lotti 等^[6]的研究表明,经低温驯化后,PN/A 颗粒污泥反应器在 15℃下的处理效能仍远高于传统活性污泥法,对总氮去除负荷可达到 0.4 kg·(m³·d)⁻¹的水平. Gilbert 等^[7]的研究发现,颗粒污泥在低温适应性方面较悬浮污泥有明显优势,前者能够在 13℃下保持较高的脱氮效率,出水中没有出现亚硝酸盐氮的大量累积.以往的报道大多关注 PN/A 颗粒污泥在低温驯化过程中的性能演变,但对污泥驯化后反应热力学特征、颗粒外观形态和微生物多样性的变化仍缺乏系统阐述.

为此,本文将中高温培养和低温驯化后的 PN/A 颗粒污泥作为研究对象,通过对比分析,深入探究两者在环境温度敏感性、颗粒密实程度和微生物群落结构等方面的差异,并对导致差异的可能原因进行论述,以期为全自养生物脱氮技术在低温条件下的运行优化提供理论指导.

1 材料与方法

1.1 PN/A 颗粒污泥

在本研究中,中高温培养的 PN/A 颗粒污泥(G_H)取自 1 个实验室规模的连续流反应器,曝气区有效容积为 1.7 L.进水采用无机人工配水,以氨氮(浓度约 70 mg·L⁻¹)作为唯一氮源.运行初期,反应器内水温控制在(30±1)℃,氨氮容积负荷为 2.2 kg·(m³·d)⁻¹.稳定运行 100 d 后,对 G_H 进行取样,颗粒呈现深红棕色,总氮比去除负荷为 0.25 g·(g·d)⁻¹^[8].随后,逐级降低反应器水温至(15±1)℃,并采取限制曝气和延长水力停留时间(HRT)等控制方法,实现了反应器在低温条件下的稳定运行^[9].低温驯化 200 d 后,颗粒污泥(G_L)呈棕黄色,粒径明显减小,总氮比去除负荷降至 0.11 g·(g·d)⁻¹.

1.2 污泥活性测定和活化能计算

在批次反应中,控制水温分别为 10、15、20、25、30 和 35℃.分别取 10 mL 颗粒污泥混合液,装入多个配备有透气硅胶塞的 150 mL 锥形瓶中,加入

90 mL 反应器进水(pH 7.6~7.8),并置于机械摇床中振荡反应.控制转速为 160 r·min⁻¹,确保溶液处于好氧状态.每隔 10 或 20 min 取样测定上清液中氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)浓度,并计算总无机氮(TIN)的比降解速率 $[q(\text{TIN}), \text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}]$,见式(1):

$$q(\text{TIN}) = -\Delta\rho(\text{TIN})/(\Delta t \cdot \text{MLVSS}) \quad (1)$$

式中, $\Delta\rho(\text{TIN})$ 为反应前后总无机氮的消耗量,mg·L⁻¹; Δt 为浓度线性变化对应的反应时间,h; MLVSS 为混合液中挥发性悬浮固体浓度,mg·L⁻¹.

依据阿伦尼乌斯(Arrhenius)方程,对两种 PN/A 颗粒污泥在不同温度区间内的 $q(\text{TIN})$ 进行线性拟合,计算相应的反应活化能 E_a ^[8]:

$$\ln(q) = E_a \cdot (R \cdot T)^{-1} \quad (2)$$

为表征颗粒污泥对环境温度的敏感性,使用下式计算 PN/A 反应的温度系数 θ ^[10]:

$$\ln(\theta) = 0.0015 \cdot E_a \quad (3)$$

式中, E_a 为反应活化能,J·mol⁻¹; R 为气体常数,8.314 J·(K·mol)⁻¹; T 为热力学温度,K.

1.3 分析方法

水中NH₄⁺-N、NO₃⁻-N和NO₂⁻-N浓度分别采用纳氏试剂光度法、紫外分光光度法和N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定,污泥 MLVSS 采用标准重量法测定^[11].采用便携式 pH 计(METTLER TOLEDO)和溶解氧仪(HACH HQ30d 型)测定溶液 pH 和溶解氧(DO)浓度.

使用 OLYMPUS CX41 型显微镜观察污泥形态变化.采用湿网筛分法测算污泥粒径分布,具体为从反应器中取出一定量污泥样品,经生理盐水反复清洗后,依次经孔径 2.0、1.6、1.4、1.0、0.8、0.6、0.5、0.3 和 0.2 mm 筛网筛分,并计算各粒径区间样品占总质量的质量分数.

通过静态沉降实验,测定颗粒污泥沉降性能.随机选取 20 个颗粒污泥,在 1 L 量筒(高 45 cm)内测定污泥下降 30 cm 的沉降时间,并计算平均沉降速率 $v(\text{m} \cdot \text{h}^{-1})$.

采用甲醇-NaOH 法提取颗粒污泥的胞外聚合物(EPS)^[12],其主要组分中蛋白质(PN)和多糖(PS)含量分别采用 Lowry 法和改进苯酚-硫酸法测定^[13].

1.4 高通量测序

对 G_H 和 G_L 污泥,分别采集 6 个平行样品,置于 -80℃ 条件下保存.使用试剂盒(Fast DNA Spin kit for soil, M. P., U. S.)对所有污泥样品同时进行 DNA 的提取.选择引物 338F (5'-ACTCCTACGGG AGGCAGCA-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWT

CTAAT-3')进行 16S rRNA V3-V4 区基因扩增. 在完成 PCR 扩增后,使用 AxyPrep™ DNA 凝胶提取试剂盒(Axygen Biosciences, Union City, U. S.)对产物进行纯化和定量. 12 个样品的高通量测序在 Illumina MiSeq 测序平台上完成. 基于测序结果,在 OTU 水平上,对样品进行 α 多样性分析、主坐标分析(PCA)和 ANOSIM 分析(bray_curtis 算法). 在门和纲水平上,对两种污泥菌群结构进行 Wilcoxon 秩和检验,并绘制属水平的系统发育树,方法详见文献[14].

2 结果与讨论

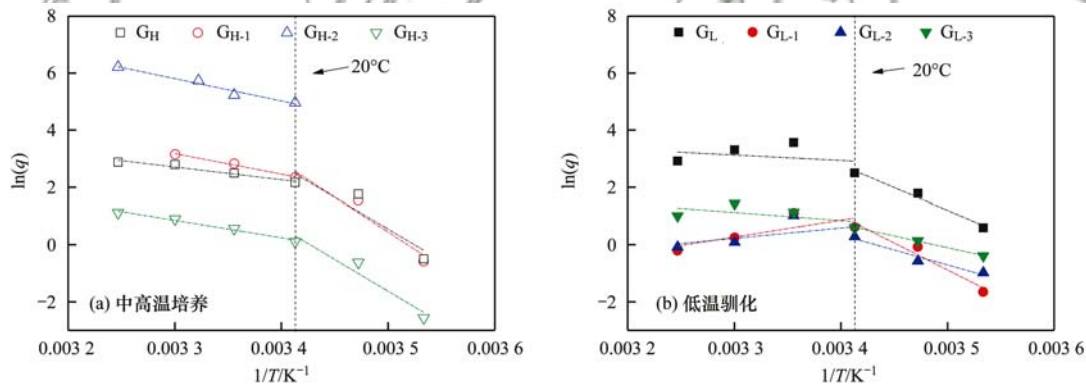
2.1 污泥活性对温度的敏感性

根据污泥在不同温度下的脱氮活性可知, G_H 的最大 $q(TIN)$ 值出现在 35℃ 条件下,其脱氮活性随着水温的下降而显著降低,10℃ 对应的 $q(TIN)$ 值仅相当于 35℃ 的 4% 左右,并出现了明显的亚硝态氮累积现象. 相比之下,低温驯化使 G_L 的最适脱氮温度降至 25℃,对应 $q(TIN)$ 值分别比 35℃ 和 10℃ 的脱氮速率高出 42.8% 和 97.0%. Hu 等[15] 和 Park 等[16] 的研究也发现,AMX 污泥经长期低温驯化($<15^\circ\text{C}$)后,最适反应温度会由 30~35℃ 降至 25℃

左右.

如图 1 所示,在低温(10~20℃)和中高温(20~35℃)区间内,两种 PN/A 颗粒的 $\ln(q)$ 与 $1/T$ 呈现线性相关. 依据 Arrhenius 方程,计算出不同温度区间内自养脱氮反应的表现活化能 E_a ,并与已有数据进行比较,结果如表 1 所示. 在本研究中, G_H 在 20~35℃ 区间的 E_a 值约为 10~20℃ 对应值的 6.2 倍,明显高于已有报道的 3.9 倍均值[4,15~17]. 这表明低温环境会显著抑制未经驯化污泥的自养脱氮活性. 相比之下, G_L 在 10~20℃ 区间的 E_a 值较 G_H 降低了约 28.4%, 20~35℃ 区间的 E_a 值则升高了 1.1 倍. 尽管 G_L 在低温区间的脱氮效能仍然较差,但低温驯化明显降低了 PN/A 反应对温度变化的敏感性.

从工程应用的角度,温度系数 θ 更适合用于表征污泥性能随反应温度的变化特征. 有研究表明,传统活性污泥和厌氧氨氧化污泥的 θ 值通常随温度的降低而增大[4,18,19]. 在本研究中, G_H 和 G_L 在中高温区间的 θ 值分别为 1.046 和 1.097,低温区间的数值则相应升至 1.317 和 1.218,驯化过程使得污泥 θ 值的相对增幅明显减小. 上述变化可以作为评判 PN/A 污泥是否成功适应低温环境的重要依据.



G_H 数据来自本研究, $G_{H-1} \sim G_{H-3}$ 数据来自文献[4,17,15]; G_L 数据来自本研究, $G_{L-1} \sim G_{L-3}$ 数据来自文献[15,16,17]

图 1 使用 Arrhenius 方程对中高温培养和低温驯化污泥的脱氮速率进行拟合

Fig. 1 Arrhenius plot for nitrogen removal rates of sludges cultivated at medium-high temperatures and acclimated to low temperatures

表 1 不同温度区间内污泥自养脱氮反应的表现活化能

培养方式		活化能 $E_a/\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$		最适温度/ $^\circ\text{C}$	文献
		10~20℃	20~35℃		
中高温培养 (20~35℃)	G_H	183.53	29.76	35	本研究
	G_{H-1}	167.50	57.00	30	[4]
	G_{H-2}	94.00	33.00	30	[17]
	G_{H-3}	185.01	42.25	37	[15]
	平均	157.51	40.50	>30	/
低温驯化 (10~20℃)	G_L	131.45	61.62	25	本研究
	G_{L-1}	156.78	70.90	25	[15]
	G_{L-2}	107.40	84.65	25	[16]
	G_{L-3}	72.80	65.39	30	[17]
	平均	117.11	70.64	<30	/

2.2 颗粒污泥形态的差异

如表 2 所示,低温驯化使得 PN/A 颗粒污泥的粒径明显减小,其中,主导粒径区间由 0.9 ~ 1.0 mm(占比 61.3%)减小至 0.2 ~ 0.5 mm(占比 45.2%),平均粒径由 1.20 mm 减小至 0.89 mm.同时,污泥 EPS 含量增加,PN/PS 比值上升,

污泥结构更加松散,边缘变得不规则(图 2).由沉降实验结果可知, G_L 的平均沉降速率 v 较驯化前(G_H)降低了 53.4%,颗粒的密实程度变差. He 等^[20]和 Guo 等^[21]在研究低温驯化(2.5 ~ 13℃)对厌氧氨氧化颗粒污泥性能影响时也有类似结论.

表 2 低温驯化前后 PN/A 颗粒污泥的形态结构特性

Table 2 Morphological characteristics of PN/A granular sludges before and after cold acclimation				
颗粒类型	粒径范围/mm	EPS/mg·L ⁻¹	PN/PS 比值	沉降速率 v /m·h ⁻¹
G_H	0.8 ~ 1.32	152.35 ± 9.60	3.02 ± 0.36	73 ± 6
G_L	0.2 ~ 0.98	182.73 ± 20.20	4.43 ± 0.23	34 ± 4

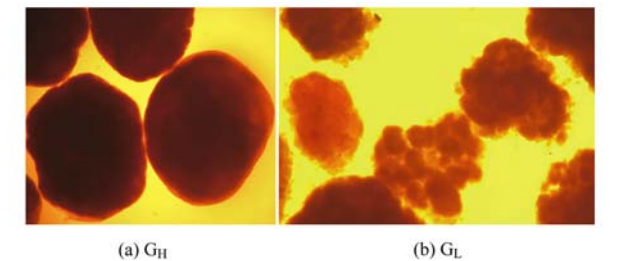


图 2 低温驯化前后,PN/A 颗粒污泥的外观形态对比
Fig. 2 Morphological comparison of PN/A granular sludges before and after cold acclimation

实际上,低温环境不仅导致了自养菌生长速率和反应活性的下降,还会使流体的黏度增大,水力剪切作用增强,大颗粒很难稳定存在^[22].通常认为,产生大量 EPS 有利于削弱低温环境对功能菌活性的胁迫作用,是微生物聚集体自适应策略的重要体现^[23,24].作为亲水性较强的 EPS 组分,PN 含量的持续增加将使得更多的结合水进入到微生物聚集体

中,形成密度较低的多孔絮状结构,削弱污泥的沉降性能^[25,26].

2.3 污泥菌群结构的差异

使用 MiSeq 高通量测序技术对低温驯化前后 PN/A 颗粒污泥的菌群结构进行分析.如表 3 所示,6 个 G_L 样品中的运算分类单位(OTU)数量较 G_H 组多出了 255 个,另有 384 个 OTU 在两组中均能找到.有研究认为,低温环境容易导致污泥中菌群多样性和丰度的降低^[27,28],但本研究中 G_L 组的多样性指数(高 Shannon 指数、低 Simpson 指数)和菌群丰度(Ace、Chao 指数更大)均明显高于 G_H 组.这说明改变菌群结构也是 PN/A 颗粒污泥适应低温条件的重要策略之一.从 PCoA 分析的结果上看[图 3(a)], G_H 组和 G_L 组在主坐标 PCoA1(贡献率 57.71%)方向上呈现区域聚集性分布,同时,OTU 水平上的 ANOSIM 分析进一步说明了组间的显著差异[图 3(b)].

表 3 低温驯化前后,PN/A 颗粒污泥的微生物多样性指数

Table 3 The α diversity indices of PN/A granular sludges before and after cold acclimation						
颗粒类型	OTU/个	Shannon 指数	Simpson 指数	Ace 指数	Chao 指数	覆盖度/%
G_H	497	3.61 ± 0.22	0.080 ± 0.030	382.58 ± 24.55	391.92 ± 25.44	99.79
G_L	752	3.80 ± 0.26	0.076 ± 0.030	545.87 ± 52.52	544.88 ± 49.06	99.80

图 4 分别给出了两组污泥样品在门和纲水平上相对丰度前 15 位的细菌分布情况.其中, G_H 组的优势菌门依次为 Proteobacteria(34.8%,丰度)、Planctomycetes(22.2%,丰度)、Chloroflexi(16.8%,丰度)、Bacteroidetes(17.8%,丰度)和 Acidobacteria(4.7%,丰度).在 G_L 组中,Planctomycetes、Chloroflexi 和 Acidobacteria 菌门的相对丰度有所增长(1.6% ~ 7.7%),Proteobacteria 和 Bacteroidetes 菌门的占比则分别减少了 10.2% 和 6.1%.在纲水平上,低温驯化后 PN/A 颗粒污泥中 AOB 所属的 γ -Proteobacteria 丰度较驯化前下降了 12.8%,AMX 所属的 Brocadiae 和异养菌 Anaerolineae 丰度分别增长

了 3.0% 和 4.2%,NOB 占比始终低于 1%.

图 5 为 PN/A 颗粒污泥在属水平上的系统发育树.尽管 *Candidatus_Brocadia* 属 AMX 被认为具有很强的低温适应能力,其在运行温度 10 ~ 18℃ 的 A/O 颗粒污泥反应器^[29]、气提式反应器^[30]和上流式厌氧污泥床(UAnSB)^[31,32]中都有检出,但本研究中 *Candidatus_Kuenenia* 始终是占绝对主导的 AMX 菌属.根据 Dosta 等^[33]的测算,*Candidatus_Kuenenia* 脱氮反应的活化能 E_a 约为 63 kJ·mol⁻¹,这与 G_L 在高温区间的 E_a 值 61.62 kJ·mol⁻¹(表 1)非常接近.另外, G_L 组中 AOB(*Nitrosomonas*)与 AMX(*Candidatus_Kuenenia*)的丰度比值为 0.03,明显小于 G_H 组的

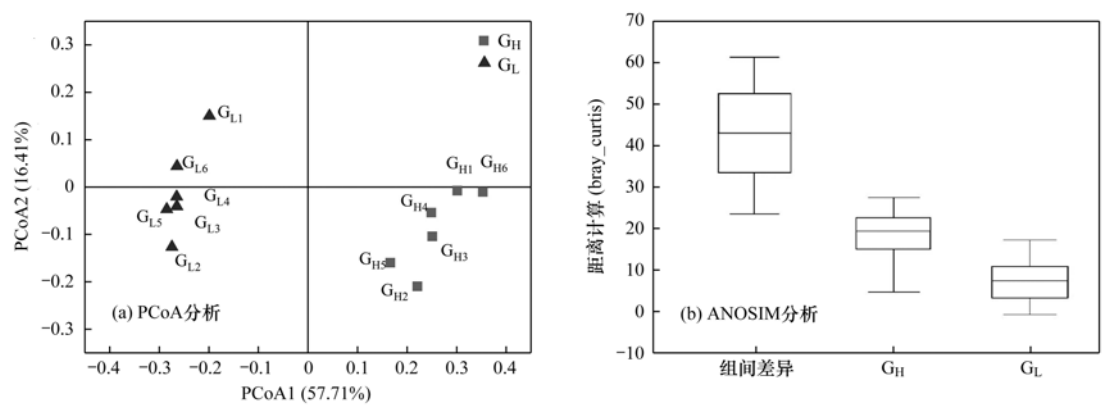


图 3 两组污泥样品间的菌群结构差异性分析 (OTU 水平)

Fig. 3 Difference analysis of the bacterial community structure in two sample groups (OTU level)

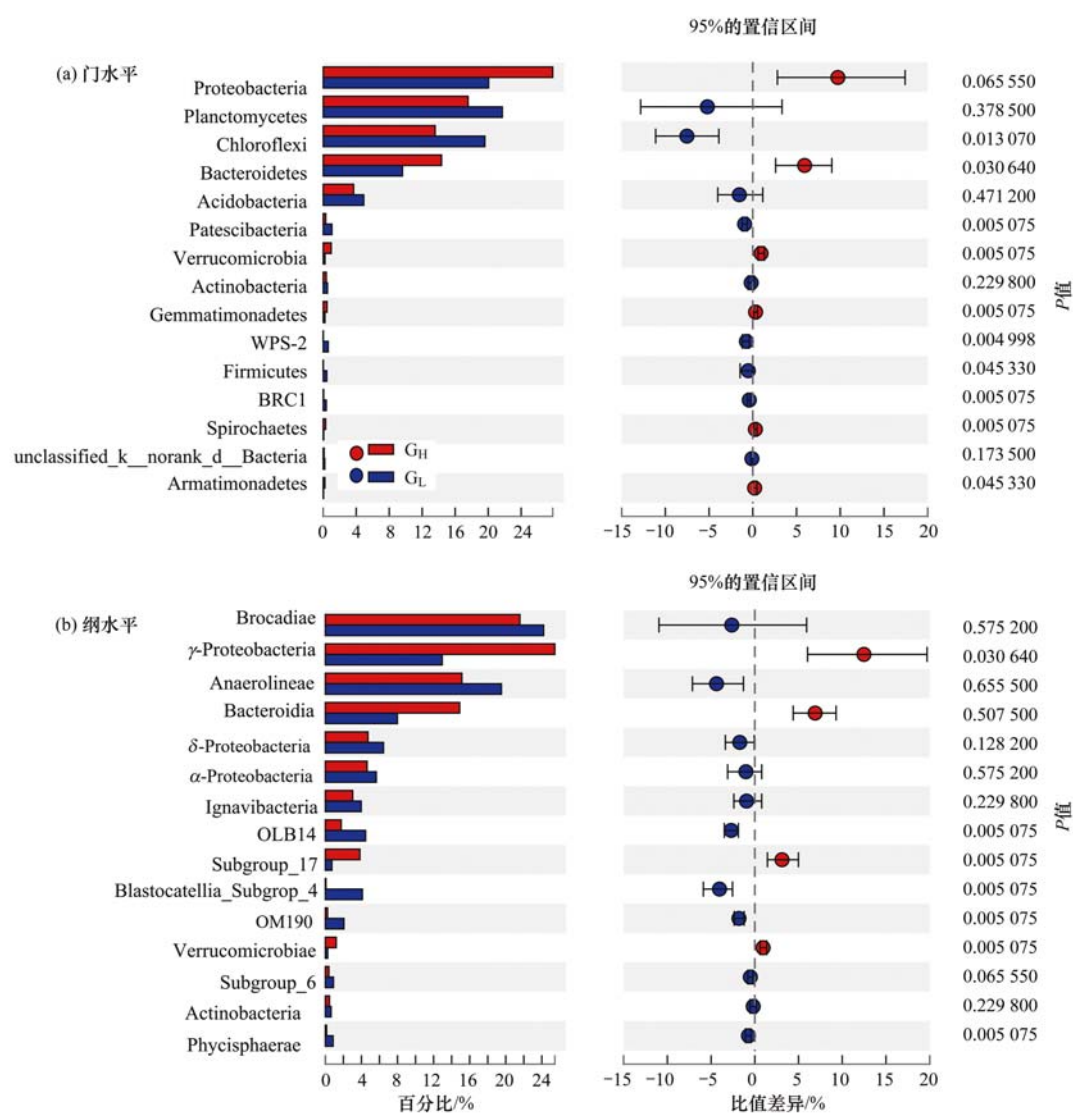


图 4 两组污泥样品中丰度前 15 的细菌组成差异分析

Fig. 4 Statistical analyses of top 15 taxa in two sample groups

0.34. 在低温环境中,占据颗粒表面的 AOB 生长速率放缓,经水力剪切和碰撞摩擦后,AOB 菌簇容易从污泥上脱落并随出水淘洗,造成相对丰度下降.相比之下,位于颗粒内层的 AMX 获得了较好的保护,有利于发生缓慢富集过程.有研究表明,在 13 ~

16℃ 条件下, *Candidatus_Kuenenia* 在厌氧氨氧化颗粒污泥中仍可持续增殖,相对丰度可达 42.4% ~ 55.2%,使系统脱氮效率稳定在 60% ~ 80%^[20,23].此外, G_H 和 G_L 中反硝化菌 *Denitratisoma* 的占比相差不大,但低温驯化使 *Haliangium* 和 *norank_*

Caldilineaceae 出现了明显的富集现象. 有研究认为, 后两种菌属可利用 AMX 细胞残体作为生长基质, 发生部分反硝化反应, 参与生物脱氮过程^[34,35].

与 Gilbert 等^[7]的报道相似, 本研究中低温驯化并未改变 PN/A 污泥中的 AMX 菌属类型, 同时, AMX 丰度的增长并不能直接解释脱氮反应自由能 E_a 的显著变化. 为此, Rattray 等^[35]的研究认为, 低温驯化改变了 AMX 中重要细胞器——厌氧氨氧化体 (ANAMMOXOSOME) 的膜结构. 当水温由 20℃ 降

至 12℃ 时, AMX 可通过调高 C_{20} -梯烷脂肪酸产量, 抑制 C_{18} -梯烷脂肪酸形成, 改变生物膜的双层结构, 以适应温度变化. Lin 等^[36]使用代谢蛋白组学技术, 从蛋白质表达的层面, 对不同 AMX 菌属在低温环境中的自适应策略进行了表征. 结果表明, 当温度由 35℃ 降至 20℃ 时, *Candidatus_Kuenenia* 细胞中与脱氮相关的蛋白酶表达 (NirS、HZS 和 HDH) 没有发生明显改变, 但继续降至 15℃ 时, 类脱氢酶 (kustc0824 和 kustc0827) 丰度降低, 并导致电子流

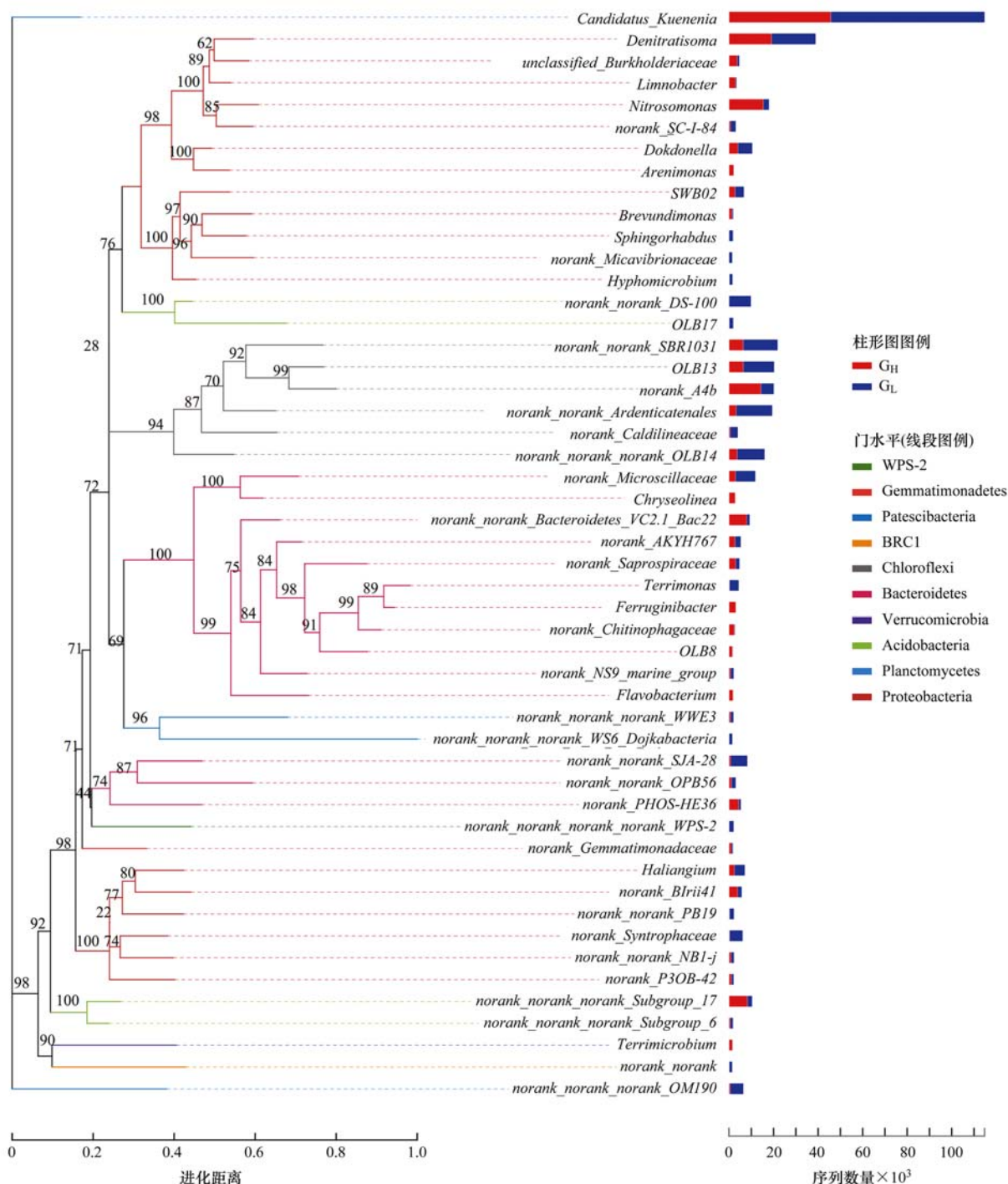


图5 PN/A 颗粒污泥的微生物系统发育树(属水平)

Fig. 5 Microbial phylogenetic tree (genus level) of PN/A granules

失衡,氨氧化和亚硝酸盐还原速率均受到抑制,负责能量供给的功能蛋白数量也相应减少.在经过低温驯化后,上述电子流失现象有可能得到缓解,污泥通过优化 AMX 菌群的功能性结构,可以有效提高系统的脱氮效能.类似地,在低温环境中,*Candidatus_Jettenia* 属 AMX 可以通过调节自身基因转录水平,由翻译启动因子(IF-3)形成大量负责能量供给的功能蛋白,以驱动自养脱氮反应.目前,关于低温驯化对自养脱氮反应调控机制的影响仍有待进一步研究.

3 结论

(1)经低温驯化后,PN/A 颗粒污泥进行脱氮反应的最适温度由原先的 35℃ 下降至 25℃.在 10 ~ 20℃ 条件下, G_L 的反应自由能 E_a 较 G_H 降低了 28.4%,前者的 θ 值也更小.这意味着低温驯化显著降低了 PN/A 颗粒污泥对环境温度的敏感性.

(2)低温驯化使得 G_L 的平均粒径较 G_H 减小了 25.8%,EPS 含量的增长有利于维持颗粒污泥结构的稳定性,但也使颗粒的沉降性能显著降低,平均沉降速率 v 减小了 53.4%.

(3)低温驯化并未改变 PN/A 颗粒污泥中的 AOB 和 AMX 菌属类型,但 G_L 中菌群多样性有所提高.*Candidatus_Kuenenia* 属 AMX 在颗粒污泥中的有效富集是实现菌群功能结构优化,适应低温环境的重要基础.

参考文献:

- [1] Third K A, Paxman J, Schmid M, *et al.* Treatment of nitrogen-rich wastewater using partial nitrification and Anammox in the CANON process[J]. *Water Science & Technology*, 2005, **52**(4): 47-54.
- [2] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [3] Lotti T, Kleerebezem R, van Erp Taalman Kip C, *et al.* Anammox growth on pretreated municipal wastewater[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(14): 7874-7880.
- [4] Lotti T, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Effect of temperature change on anammox activity[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015, **112**(1): 98-103.
- [5] Gonzalez-Martinez A, Rodriguez-Sanchez A, Garcia-Ruiz M J, *et al.* Performance and bacterial community dynamics of a CANON bioreactor acclimated from high to low operational temperatures[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **287**: 557-567.
- [6] Lotti T, Kleerebezem R, Hu Z, *et al.* Simultaneous partial nitrification and anammox at low temperature with granular sludge[J]. *Water Research*, 2014, **66**: 111-121.
- [7] Gilbert E M, Agrawal S, Schwartz T, *et al.* Comparing different reactor configurations for Partial Nitrification/Anammox at low temperatures[J]. *Water Research*, 2015, **81**: 92-100.
- [8] 陈希,钱飞跃,王建芳,等.环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1756-1762.
Chen X, Qian F Y, Wang J F, *et al.* Effects of environmental factors on the synergy of functional bacteria in completely autotrophic granular sludge[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1756-1762.
- [9] 刘雨馨,王建芳,钱飞跃,等.低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4161-4168.
Liu Y X, Wang J F, Qian F Y, *et al.* Adaptability of completely autotrophic nitrogen removal over granular sludge to low-strength at low temperature[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4161-4168.
- [10] Grady C P L Jr, Lim H C. *Biological wastewater treatment: theory and applications*[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1980.
- [11] 国家环境保护局.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] 李金璞,张雯雯,杨新萍.活性污泥污水处理系统中胞外多聚物的作用及提取方法[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(9): 2825-2833.
Li J P, Zhang W W, Yang X P. The roles and extraction methods of extracellular polymeric substances in activated sludge wastewater treatment system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(9): 2825-2833.
- [13] Adav S S, Lee D J. Extraction of extracellular polymeric substances from aerobic granule with compact interior structure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 1120-1126.
- [14] Wang J F, Qian F Y, Liu X P, *et al.* Cultivation and characteristics of partial nitrification granular sludge in a sequencing batch reactor inoculated with heterotrophic granules[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, **100**(21): 9381-9391.
- [15] Hu Z Y, Lotti T, De Kreuk M, *et al.* Nitrogen removal by a nitrification-anammox bioreactor at low temperature[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, **79**(8): 2807-2812.
- [16] Park G, Takekawa M, Soda S, *et al.* Temperature dependence of nitrogen removal activity by anammox bacteria enriched at low temperatures[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, **123**(4): 505-511.
- [17] 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.
- [18] Zhu W Q, Li J, Dong H Y, *et al.* Nitrogen removal performance and operation strategy of anammox process under temperature shock[J]. *Biodegradation*, 2017, **28**(4): 261-274.
- [19] 彭永臻,张自杰.活性污泥法处理系统中温度对动力学常数的影响[J]. *环境科学学报*, 1990, **10**(2): 226-232.
Peng Y Z, Zhang Z J. Effects of temperature on the reaction kinetics of an activated sludge process[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1990, **10**(2): 226-232.
- [20] He S L, Chen Y, Qin M, *et al.* Effects of temperature on anammox performance and community structure[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **260**: 186-195.
- [21] Guo Q, Xing B S, Li P, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (anammox) under realistic seasonal temperature variations: characteristics of biogranules and process performance[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **192**: 765-773.

- [22] Lauren M, Weissbrodt D G, Szivák I, *et al.* Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2015, **80**: 325-336.
- [23] Wang Y Y, Xie H C, Wang D L, *et al.* Insight into the response of anammox granule rheological intensity and size evolution to decreasing temperature and influent substrate concentration[J]. *Water Research*, 2019, **162**: 258-268.
- [24] Wang S Y, Peng Y Z, Ma B, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation in traditional municipal wastewater treatment plants with low-strength ammonium loading: Widespread but overlooked[J]. *Water Research*, 2015, **84**: 66-75.
- [25] Jin R C, Ma C, Yu J J. Performance of an Anammox UASB reactor at high load and low ambient temperature[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **232**: 17-25.
- [26] Yang S F, Li X Y. Influences of extracellular polymeric substances (EPS) on the characteristics of activated sludge under non-steady-state conditions[J]. *Process Biochemistry*, 2009, **44** (1): 91-96.
- [27] Parijs I, Steenackers H P. Competitive inter-species interactions underlie the increased antimicrobial tolerance in multispecies brewery biofilms[J]. *The ISME Journal*, 2018, **12**(8): 2061-2075.
- [28] Palmer M W, Earls P G, Hoagland B W, *et al.* Quantitative tools for perfecting species lists[J]. *Environmetrics*, 2002, **13** (2): 121-137.
- [29] Winkler M K H, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M V. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures[J]. *Water Research*, 2012, **46**(1): 136-144.
- [30] Hendrickx T L G, Kampman C, Zeeman G, *et al.* High specific activity for anammox bacteria enriched from activated sludge at 10°C[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **163**: 214-221.
- [31] Gong X F, Wang B, Qiao X, *et al.* Performance of the anammox process treating low-strength municipal wastewater under low temperatures: Effect of undulating seasonal temperature variation[J]. *Bioresource Technology*, 2020, **312**, doi: 10.1016/j.biortech.2020.123590.
- [32] Reino C, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Stable long-term operation of an upflow anammox sludge bed reactor at mainstream conditions[J]. *Water Research*, 2018, **128**: 331-340.
- [33] Dosta J, Fernández I, Vázquez-Padín J R, *et al.* Short-and long-term effects of temperature on the Anammox process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 688-693.
- [34] 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.
- [35] Rattray J E, Van de Vossenberg J, Jaeschke A, *et al.* Impact of temperature on ladderane lipid distribution in anammox bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, **76**(5): 1596-1603.
- [36] Lin X M, Wang Y Y, Ma X, *et al.* Evidence of differential adaptation to decreased temperature by anammox bacteria[J]. *Environmental Microbiology*, 2018, **20**(10): 3514-3528.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)