

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.9
第41卷 第9期

目次

2020年天津市两次重污染天气污染特征分析·····	肖致美,徐虹,蔡子颖,李鹏,刘彬,元洁,郑乃源,唐遨,陈魁,邓小文(3879)
基于高分辨率MARGA分析成都市PM _{2.5} 中水溶性离子污染特征·····	尹寒梅,陈军辉,冯小琼,姜涛,钱骏,刘政(3889)
宿迁市PM _{2.5} 中水溶性无机离子的季节特征和来源分析·····	马红璐,赵欣,陆建刚,王辉,许纯领,欧阳琰,朱新胜,殷堂兵,漆丹,陆亚秋,汪玖阳,陆声兴(3899)
鼎湖山大气颗粒物中OC与EC的浓度特征及粒径分布·····	李安娜,温天雪,华维,杨员,孟泽,胡波,辛金元(3908)
鞍山市道路扬尘碳组分特征及来源解析·····	林孜,姬亚芹,林宇,国纪良,马妍,赵静琦(3918)
西安市冬季PM _{2.5} 中WSOC的光谱特性和来源解析·····	杨毅,张亚楠,刘焕武,田萍萍,李亚飞,雷颖,王一博(3924)
长三角地区气溶胶光学性质与新粒子生成观测·····	杜盈盈,陈军,张家洛,甘桂城,刘瑜存,苏明旭,楼晟荣,周敏,陶士康,乔利平(3932)
连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析·····	崔金梦,王体健,李秋潼,董立文,黄丛丞,曹云擎(3941)
成都市城区大气VOCs季节污染特征及来源解析·····	王成辉,陈军辉,韩丽,徐晨曦,王波,李英杰,刘政,钱骏(3951)
德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案·····	严茹莎(3961)
超低改造下中国火电排放清单及分布特征·····	屈加豹,王鹏,伯鑫,薛晓达,董广霞,崔磊,康明雄,王彤,汤铃,朱法华,李时蓓(3969)
浙江省人为源氨排放清单建立及分布特征·····	赵睿东,于兴娜,侯新红,沈丽(3976)
垃圾焚烧烟气中二噁英控制技术的评估与筛选·····	赵思岚,奚鹏飞,郭凤艳,邓双,贾建丽(3985)
兰州市两场典型降水事件稳定同位素特征及其水汽来源·····	韩婷婷,张明军,王圣杰,杜勤勤,马转转,郭蓉,曹晏风(3993)
然乌湖流域地表水水化学特征及控制因素·····	张涛,王明国,张智印,刘廷,何锦(4003)
河套灌区地下水化学演变特征及形成机制·····	崔佳琪,李仙岳,史海滨,孙亚楠,安海军,邢进平(4011)
石期河流域地下水化学特征及物质来源分析·····	李笑,于爽,李亮,郭永丽(4021)
长江中下游湖泊水体氮磷时空变化特征及其影响因素·····	季鹏飞,许海,詹旭,朱广伟,邹伟,朱梦圆,康丽娟(4030)
2016~2017年长荡湖流域湖库系统营养盐时空分布机制分析·····	李新艳,李恒鹏,姜三元,马培,赖锡军,邓建才,陈东强,耿建伟(4042)
菹草对湖泊水质及浮游植物群落结构的影响·····	康丽娟,许海,邹伟,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,陈洁(4053)
金泽水库库区细菌群落构建过程与关键驱动因子分析·····	刘明坤,童俊,朱慧峰,白晓慧(4062)
典型氟工业园周边河流沉积物中全(多)氟化合物的分布特征·····	孙琳婷,赵祯,唐建辉(4069)
微塑料对河水抗生素抗性基因的影响·····	周昕原,王言仔,苏建强,黄福义(4076)
莲花水库水体中抗生素污染特征及生态风险评价·····	廖杰,魏晓琴,肖燕琴,李青松,范洪勇,刘学军,庄马展,刘超翔(4081)
拟柱孢藻生长及碱性磷酸酶活性对不同磷浓度和磷形态响应的株系间差异·····	叶金梅,赵莉,罗旭,彭亮,雷腊梅(4088)
奶水河湿地植物作用及调水水质响应模拟·····	李亚娟,杜彦良,毕二平,王亮,陈翠柏(4095)
浅基质层干植草沟运行效果的现场实验·····	张佳炜,李田,张庭秀(4105)
海绵城市地块汇水区颗粒污染物的传输·····	李佳,谢文霞,姜智绘,单溪环,廖云杰,赵洪涛,李叙勇(4113)
天然黄铁矿吸附去除水中Sb(V):性能与机制·····	石松,吴乾元,李新正,黄满红(4124)
过硫酸盐氧化处理含苯磺酸废水·····	章晋门,卢钧,刘晓琛,陈泉源(4133)
温度对城市污水厌氧生物滤池运行效果与菌群结构的影响·····	刘智斌,刘秀红,周桐,章世勇,李健敏,杨庆(4141)
ABR-MBR耦合工艺启动及优化反硝化除磷性能·····	缪新年,汪倩,郭凯成,刘文如,沈耀良(4150)
低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能·····	刘雨馨,王建芳,钱飞跃,陈倩苗,乔伟,沈聪(4161)
雄安新区土壤重金属地球化学监测关键问题探讨·····	郭志娟,周亚龙,杨峥,赵传冬,成杭新,孔牧,彭敏(4169)
基于土壤重金属及PAHs来源的人体健康风险定量评价:以北京某工业污染场地为例·····	吴志远,张丽娜,夏天翔,贾晓洋,李慧颖,王世杰(4180)
基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价·····	张富贵,彭敏,王惠艳,马宏宏,徐仁廷,成晓梦,侯召雷,陈子万,李括,成杭新(4197)
云南兰坪铅锌矿区优势植物重金属富集特性及应用潜力·····	张龙,张云霞,宋波,吴勇,周子阳(4210)
水培试验下水稻Pb吸收累积关键生育期·····	胡雨丹,周航,辜娇峰,霍洋,邓鹏辉,魏宾纭,刘俊,廖柏寒(4218)
田间条件下养分调控八宝景天Cd修复效率·····	郭俊梅,杨俊兴,杨军,郑国砥,周小勇,陈同斌,卞建林,孟晓飞,李玉峰(4226)
桉树枝条生物炭输入对桂北桉树人工林酸化土壤的作用效果·····	段春燕,沈育伊,徐广平,滕秋梅,张德楠,何成新,张中峰,周龙武,孙英杰(4234)
秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响·····	杨彩迪,卢升高(4246)
土壤微生物群落结构对生活源和工业源再生水灌溉的差异化响应·····	王燕,程东会,檀文炳,余红,席北斗,姜永海,党秋玲(4253)
粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响·····	理鹏,吴建强,沙晨燕,叶春梅,黄沈发(4262)
松花江下游沿江湿地土地利用变化对土壤细菌群落多样性的影响·····	张拓,徐飞,怀宝东,杨雪,隋文志(4273)
黄土高原草地土壤细菌群落结构对于降水变化的响应·····	李娜,王宝荣,安韶山,焦峰,黄倩(4284)
土地利用方式对会仙岩溶湿地土壤真菌群落和功能类群的影响·····	程跃扬,靳振江,王晓彤,贾远航,袁武,周军波(4294)
黑土真菌群落互作及其与梯度有机质碳分子结构的关系·····	尚秋彤,黄瑞林,倪浩为,隋跃宇,孙波,梁玉婷(4305)
贵州茂兰喀斯特森林不同演替下土壤真核微生物多样性·····	王显,龙健,李娟,刘灵飞,廖洪凯,李宜蓉,杨睿(4314)
玉米秸秆生物炭固化细菌对镉砷吸附·····	刘玉玲,朱虎成,彭鸥,李丹阳,杨蕊嘉,彭晶,铁柏清(4322)
无机态氮素转化机制及水土体氮源识别方法·····	梁杏,孙立群,张鑫,张洁,付鹏宇(4333)
《环境科学》征订启事(4061)	
《环境科学》征稿简则(4132)	
信息(4233, 4293, 4304)	

低温下全自养脱氮颗粒污泥适应低基质效能

刘雨馨¹, 王建芳^{1,2,3*}, 钱飞跃^{1,3,4}, 陈倩苗², 乔伟², 沈聪²

(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:以室温培养的单级 PN-ANAMMOX (PN/A) 颗粒污泥为对象, 基于颗粒污泥的全自养脱氮工艺, 研究在低温条件下处理低浓度氨氮废水的脱氮效能及微生物群落结构。结果表明, 在 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$ 条件下, 维持氨氮负荷在 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 进水氨氮质量浓度从 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐级降低至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 溶解氧比剩余氨氮 (DO/TAN) 维持在 $0.22 \sim 0.25$, 总氮去除率可维持在 $(85 \pm 4)\%$, 出水总氮平均质量浓度约为 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 运行期内无亚硝酸氧化菌 (nitrite-oxidizing bacteria, NOB) 显著增殖, *Nitrospira* 丰度小于 1% 。淘洗絮体污泥和控制低 DO/TAN 值可作为抑制 NOB 增殖的有效调控策略。全自养脱氮颗粒污泥在低温低基质条件下运行, 颗粒粒径会变小, 颜色由棕红色变为棕黄色。PS 总量略有下降, PN/PS 的比值稳定在 $2.5 \sim 3$ 。浮霉菌门 (Planctomycetes) 和变形菌门 (Proteobacteria) 在微生物系统中占主导, 污泥中存在 *Candidatus_Kuenenia* 和 *Candidatus_Brocadia* 两种厌氧氨氧化菌属。

关键词:颗粒污泥; 全自养脱氮; 低温; 低基质; DO/TAN; NOB 抑制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)09-4161-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202003036

Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature

LIU Yu-xin¹, WANG Jian-fang^{1,2,3*}, QIAN Fei-yue^{1,3,4}, CHEN Qian-miao², QIAO Wei², SHEN Cong²

(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: A single-stage PN-ANAMMOX (PN/A) granular sludge cultured at room temperature was used to investigate the completely autotrophic nitrogen removal efficiency and microbial community structure of low-strength wastewater based on the completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in granular sludge at a low temperature. The results showed that at the low temperature $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$, the ammonia nitrogen load was maintained at $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the ammonia nitrogen concentration in the injection was gradually reduced from $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ to $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. DO/TAN was controlled at $0.22 \sim 0.25$. The total nitrogen removal rate was maintained at $(85 \pm 4)\%$, and the average TN concentration in the effluent was $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. There was no significant proliferation of nitrite-oxidizing bacteria (NOB) during the operation period, and the *Nitrospira* abundance was less than 1% . Elutriation of the floc sludge and the control of low DO/TAN values can be used as effective control strategies to inhibit NOB proliferation. Through completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in granular sludge operated under low-temperature and low-substrate conditions, the particle size became smaller, and the color changed from brown red to brown yellow. The total amount of PS decreased slightly, and the ratio of PN/PS stabilized at $2.5 \sim 3.0$. Planctomycetes and Proteobacteria dominated the community, and *Candidatus_Kuenenia* and *Candidatus_Brocadia* were two AMX bacteria in the sludge.

Key words: granular sludge; completely autotrophic nitrogen removal; low temperature; low-strength; DO/TAN; NOB repressure

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 工艺具有高效脱氮、节省碳源、节约能源等优点, 在低碳氮比、高浓度氨氮废水生物脱氮中有越来越多的应用^[1-3]。但目前城市污水处理厂中, 氨氮主要仍是通过传统的硝化-反硝化主流工艺去除, 资源和能源消耗高, 亟待可持续生物脱氮技术。以厌氧氨氧化为核心的自养脱氮工艺应用于污水处理厂主流工艺, 最大的挑战受制于低温低基质条件工艺的稳定高效。城市污水处理厂冬季水温低, 直接影响微生物种群结构、生长及其代谢速率, 再加上污水中氨氮浓度较低 ($20 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 系统处理负荷下降, 出水水质难以稳

定达标, 且自养脱氮工艺在低温低基质条件下维持一定容积负荷, 需要良好的污泥截留性能和较高的污泥活性^[4,5]。

基于 CANON 颗粒污泥的单级 PN-ANAMMOX 工艺, 微生物富集度高, 功能微生物在自絮凝颗粒不

收稿日期: 2020-03-03; 修订日期: 2020-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51878430, 51578353); 江苏省高等学校自然科学研究项目 (18KJ B610019); 苏州市科技计划项目 (SS 201834); 苏州科技大学研究生科研创新计划项目 (SKCX 18_003); 江苏省高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目

作者简介: 刘雨馨 (1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: perihelionliu@163.com

* 通信作者, E-mail: wj302@163.com

同空间分布,实现单级部分硝化-厌氧氨氧化,曝气量低,无需外加碳源,污泥产量低^[6,7],沉降性能好,具有良好的污泥截留效能,有利于维持体系高污泥浓度,可在一定程度上弥补低浓度基质传质限制和生物活性下降的限制.单级反应器构造简单、控制灵活,不易受游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)的毒性抑制,在城市污水自养脱氮中备受青睐. Lotti 等^[8]采用气提序批式反应器,颗粒污泥体系在 20℃ 和 15℃ 都能有效抑制亚硝化菌,氮去除速率稳定在 $400 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,氮和总氮去除效率均在 85% 和 75% 以上. Hendrickx 等^[9]的研究表明,在 10℃ 条件下处理 $61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 含氮废水($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^-$)比降解活性(以 N/VSS 计)达到 $30 \sim 44 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$,厌氧氨氧化菌 *Candidatus Brocadia* 成为富集污泥中的主要微生物.本课题组前期的研究证实,采用全自养脱氮颗粒污泥在室温下稳定处理低浓度氨氮废水的可行性^[10].

基于 AOB 和 AMX 在颗粒污泥不同空间分布的全自养脱氮,温度从 35℃ 降到 15℃,微生物活性大幅下降,且不同微生物对温度的响应有差异,微生物间的平衡与协同受到挑战^[11].在温度 15℃ 时, AOB、NOB 和 AMX 活性变化受温度影响较大,往往成为全自养脱氮低温运行的重要节点^[12],但关于较低基质自养脱氮效能及微生物种群间的协同影响研究鲜见报道.

因此,本文以稳定运行的全程自养颗粒污泥为研究对象,在 15℃ 条件下,逐级降低进水氨氮浓度,分析自养脱氮颗粒污泥处理低浓度氨氮废水的效能、微生物活性、种群间的协同影响以及运行调控策略,以期为基于颗粒污泥的全自养脱氮工艺处理低温低浓度氨氮废水提供理论支撑和运行参数.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行控制

本实验采用有效容积为 2 L 的气提式连续流反应器,其装置构造见文献[10].反应器底部曝气,由气体流量计来控制曝气强度.采用蠕动泵调节进水,反应器外层设有水浴夹套控制水温,反应器温度维持在 $(15 \pm 1)^\circ\text{C}$. pH 值控制在 7.6 ~ 8.0.

实验期间,进水氨氮负荷(ammonia load rate, ALR)始终控制在 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,通过联合调控反应器进水氨氮质量浓度($70 \rightarrow 50 \rightarrow 40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)及水力停留时间 HRT($1.1 \rightarrow 0.93 \rightarrow 0.75 \text{ h}$),将整个研究过程分为 3 个阶段,具体运行调控参数见表 1.

表 1 反应器不同阶段运行参数

Table 1 Operating parameters of the reactor at different operational stages

阶段	运行时间 /d	ALR / $\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	HRT/h
I	1 ~ 51	1.29	70	1.1
II	52 ~ 117	1.29	50	0.93
III	118 ~ 204	1.29	40	0.75

1.2 接种污泥和实验水质

反应器接种污泥为实验室在室温下稳定运行的 PN/A 颗粒污泥,其平均粒径在 1.6 mm,总氮去除率在 $(60 \pm 3)\%$.进水采用人工无机氨氮配水, $160 \sim 280 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{Cl}$ 为无机氮源,使进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 $40 \sim 70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,以 NaHCO_3 作为无机碳源,并调节碱度.其余组分包括 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KH}_2\text{PO}_4$ 及 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 微量元素^[13].

1.3 颗粒污泥活性测定

采用批次实验考察不同运行工况下污泥的脱氮性能^[14],并且结合拟合线性分析,通过测定氮素含量变化分别计算氨氮比降解速率 $[q(\text{NH}_4^+ - \text{N})]$ 、硝态氮比累积速率 $[q(\text{NO}_3^- - \text{N})]$ 、亚硝态氮的比累积速率 $[q(\text{NO}_2^- - \text{N})]$ 和总氮比降解速率 $[q(\text{TN})]$,以 N/MLVSS 计,单位为 $\text{mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$.

1.4 常规指标分析

采用纳氏试剂比色法、紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法和过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 TN 浓度; MLSS 和 MLVSS 采用标准重量法测定^[15].采用便携式 pH 计(METTLER TOLEDO)测定体系中 pH,便携式溶解氧仪(HACH HQ30d 型)测定溶解氧 DO;通过显微镜(OLYMPUS CX41 型)进行观察污泥形态.

粒径分布采用湿网筛分法测算.从反应器中取出污泥样品,经生理盐水反复清洗后,依次通过孔径为 2.0、1.6、1.4、1.0、0.80、0.60、0.50、0.30 和 0.20 mm 的筛子筛分,并计算各粒径区间样品占总质量的质量分数. $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积率、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 累积率、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除负荷和 TN 去除负荷的计算方法详见文献[13].

微生物取自反应器运行过程中的 0、50、113 和 180 d 的污泥作为样品,采用 Illumina MiSeq 测序平台对 4 个样品中的微生物进行测序分析,包括 DNA 提取、PCR 扩增、MiSeq 文库构建和 MiSeq 测序.

颗粒污泥 EPS 的提取采用甲醇-NaOH 法^[16],其主要包含蛋白质(PN)和多糖(PS).组分 PN 和 PS 分别采用 Lowry 法和改进苯酚-硫酸法测定^[17].

2 结果与讨论

2.1 PN/A 单级自养脱氮效能研究

实验期间反应器运行效能如图 1 所示,第 I 阶段(1~51 d),接种污泥适应低温阶段,进水氮素浓度 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 1.1 h, 反应器负荷 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 接种污泥的总氮去除率和氨氮去除率分别为 56% 和 65%,第 I 阶段初期,尽管温度降

低影响脱氮效果,但冲击较为缓和,在低温条件下仍有稳定的脱氮性能,表明长期室温条件运行的颗粒污泥,微生物对温度有良好的适应性,这一结果在 Reino 等^[18]的研究中也得到证实. 在温度 15°C 条件下运行 20 d 左右,微生物逐渐适应低温,氨氮去除率稳定在 85% 左右,总氮去除率达到 75%. 平均出水氨氮最低达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水水质优于 Isanta 等^[19]在低温下的研究结果.

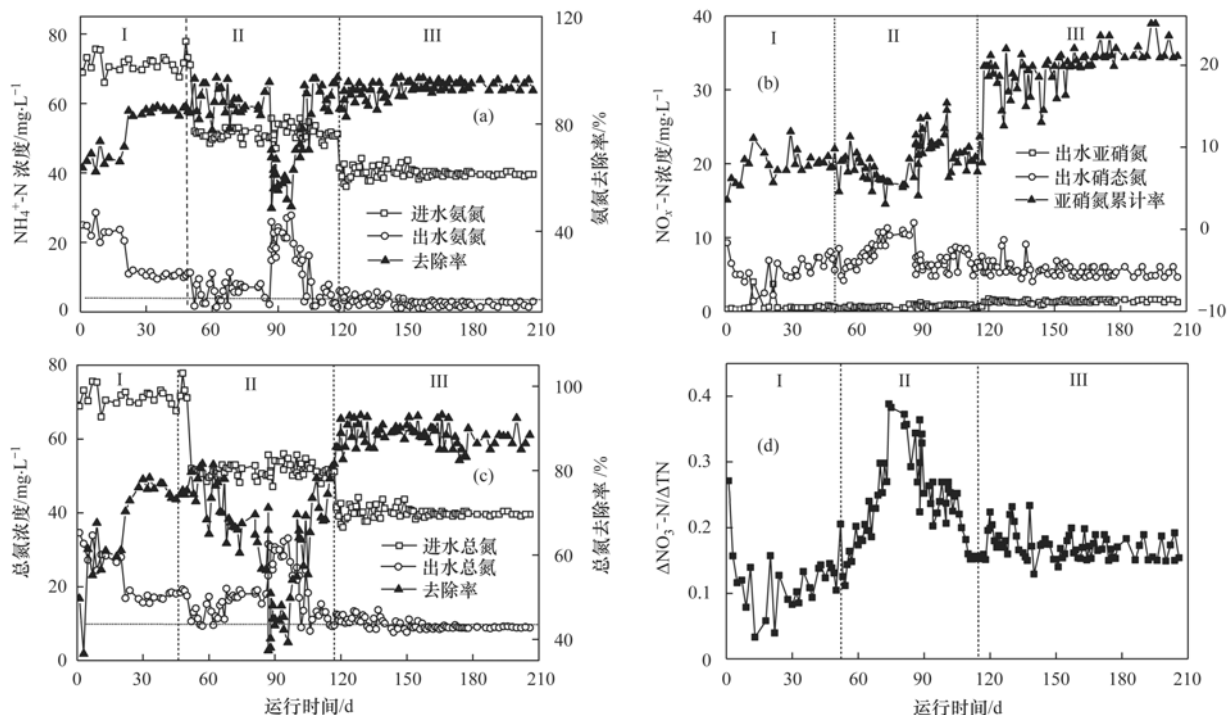


图 1 全自养脱氮颗粒污泥反应器脱氮性能与其 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 变化

Fig. 1 Variations in nitrogen removal performance of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite granular sludge reactor and $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$

在第 II 阶段(52~117 d),维持进水氨氮负荷不变,降低进水氮素浓度至 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,缩短 HRT 至 0.9 h. 为了进一步提高氨氧化效率,DO 浓度从 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 $1.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,DO/TAN 控制在 0.22 左右,氨氮平均去除率达 92%,系统的总氮去除率却稳定在 75% 左右,低于第 I 阶段. $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 的平均值高达 0.29,远高于第 I 阶段,表明 NOB 增殖较快. 在低基质条件下,低温时 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 值会稍高于理论值 0.11,但若长期高于理论值,AOB、NOB 和 AMX 微生物间的协同被打破,导致出水水质下降,自养脱氮系统崩溃^[20, 21]. 为了调整这种状况,本研究在第 87 d,降低溶解氧至 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,并适当排出系统中的絮体污泥,抑制系统中 NOB 过度增殖. 运行 18 d 后,由于污泥流失和 DO 受限,系统中氨氮去除率快速下降至 60%,总氮去除率也降至 50% 左右,在 106~117 d,调整 DO/TAN 在 0.04, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 的比值稳定在 0.15 左右,表明 NOB

得以有效抑制. 反应器的脱氮性能上升,氨氮去除率可达 96%,总氮去除率达到 80%. 尽管本阶段溶解氧浓度变化较显著,AMX 菌位于颗粒污泥内部,未受显著影响.

第 III 阶段(118~204 d),维持负荷不变,HRT 缩短至 0.75 h,进一步降低进水氮素浓度至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,探究体系自养脱氮效能. 经过前期排泥,体系中污泥颗粒化程度高,基本无絮体,尽管氨氮浓度下降过程中,DO/TAN 有波动,这阶段氨氮去除率稳定在 95% 左右,亚硝氮累积率有所上升,总氮去除率在 85% 左右, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N}/\Delta\text{TN}$ 的比值稳定在 0.14~0.22. 结果表明,在 15°C 条件下,维持进水氨氮负荷不变,在升流式反应器中,控制合适的运行条件,全自养脱氮颗粒污泥能适应低温运行,且 AMX 较 NOB 对 NO_2^- 和 NH_4^+ 有更高亲和度^[9, 22],有利于颗粒污泥处理低浓度氨氮废水时保持良好的自养脱氮效果.

2.2 PN/A 体系中抑制 NOB 的调控策略

基于颗粒污泥的自养脱氮, AOB、NOB 和 AMX 分布于颗粒不同空间, 利用 DO、基质传质的梯度差异, AOB 和 AMX 间良好协同, NOB 被有效抑制, 系统才能高效脱氮. 通常情况下, AOB 位于颗粒最外层, 对 DO 有更强的亲和力, 只要液相中有剩余氨氮, 好氧氨氧化完全消耗 DO, 位于内层的 NOB 因 DO 限制不能进一步硝化. 但在低温 15℃ 条件下, NOB 比 AOB 具有更高的比生长速率, 在低基质体系中, 对 NOB 的抑制难度加大^[23, 24]. 因此, 在低温低基质的条件下, 如何抑制 NOB 显得尤为重要, 成为 PN/A 工艺低温运行的关键^[25].

通过控制反应器中 DO 与总氨氮浓度之比 (DO/TAN), 调控氧气浓度在颗粒径向的梯度分布来抑制 NOB. 如图 2 所示, 在 I ~ III 阶段初期, 氨氮浓度降低, DO/TAN 出现陡然升高的趋势, 随着各阶段反应运行 3 ~ 5 d 后达到稳定. 第 I 阶段, 污泥中微生物适应温度下降的调控过程, 适当提高 DO/TAN 至 0.14, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN}$ 比值在 0.12 左右, 未出现 NOB 明显增殖. 在第 II 阶段, 降低进水氨氮浓度, DO 消耗量减少, 且在这阶段前期 (52 ~ 105 d), 调控过程追求高氨氧化效能, 期间 DO/TAN 比值升高, 最高可达 0.35, 结果导致 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN}$ 比值逐渐升高至 0.29, TN 去除率下降, 系统中絮体增加, 但未出现亚硝酸盐积累. 有研究发现, 对于自养硝化体系, 絮体或细小颗粒中 NOB 丰度较高, DO 容易渗透入絮体或细小颗粒污泥中, 有利于 NOB 的增殖^[26]. 本研究采用水力淘洗并排出体系中的絮体污泥, 同时利用 AOB 比 NOB 更强的氧亲和力, 降低 DO, 维持 DO/TAN 在 0.02 ~ 0.04 来抑制 NOB. 结果发现, 虽然由于 DO 的限制, 氨氧化性能出现下降的趋势, 但 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN}$ 比值逐渐下降至 0.12, NOB 得到有效控制. 在第 II 阶段后期 (106 ~ 117 d), 为了提高好氧氨氧化效能, 提高 DO 至 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO/TAN 控制在 0.041 ~ 0.096, $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN}$ 比值稳定在 0.15 左右. 第 III 阶段 (118 ~ 204 d), 进水基质浓度降至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, DO 消耗量降低, 使得 DO/TAN 比值升高至 0.43 ~ 0.50. 但与前阶段相比, 系统中 $\Delta\text{NO}_3^- \text{-N} / \Delta\text{TN}$ 并未出现明显升高. 分析认为, 由于在第 II 阶段后期, 通过淘洗, 系统内 NOB 丰度很低, 为了防止 NOB 再次增殖, 在 153 ~ 204 d, 降低 DO, DO/TAN 降至 0.22 左右, 但高于 Bartrolii 等^[27] 处理高氨氮废水获得完全亚硝化效果时对应的 DO/TAN 值. 结果表明在这阶段, 氨氧化效果好, 出水氨氮浓度低, 若将 DO 控制在较低水平, 不仅有利于较低的 DO/TAN 抑制 NOB, 同时也有利于节能. 但实验采

用气提式反应器, 利用上升气流推动颗粒污泥维持良好的水力流态, 需要一定的曝气量使污泥充分悬浮于液相中, 因此本研究平均 DO/TAN 维持在 0.22 左右. 在这种工况下运行, 出水氨氮在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, TN 去除负荷稳定在 $0.97 \sim 1.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, NOB 并未明显增殖. 但能否长期有效抑制 NOB 还值得进一步探讨.

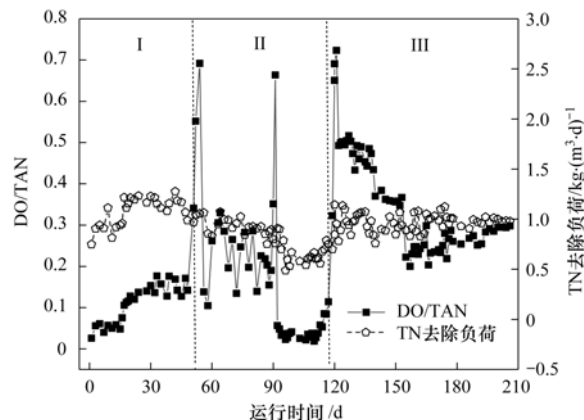


图 2 反应器中 DO/TAN 与 TN 去除负荷关系变化

Fig. 2 Relationship between DO/TAN and TN removal rate in reactor

2.3 低温低基质运行对污泥活性影响

在单级 PN/A 工艺中, 部分 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化成 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 与剩余 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 一起作为厌氧氨氧化的基质, 不出现 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累, 属于限 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 模式^[28]. 颗粒污泥各类微生物对温度的响应不同, 刘文如等^[29] 也证实温度从 20℃ 降至 10℃ 时, AMX 活性下降至运行初期的 18%, AOB 活性下降至运行初期的 53%. 各阶段氮素比降解/比积累率如图 3 所示, 第 I 阶段初始, $q(\text{NH}_4^+ \text{-N})$ 和 $q(\text{TN})$ 较低, $q(\text{NO}_2^- \text{-N})$ 相对较高, 有 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累, 在第 II、III 阶段, 微生物适应低温后, 没有 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累现象, 说明温度下降过程, AMX 对温度变化敏感, 适应低温

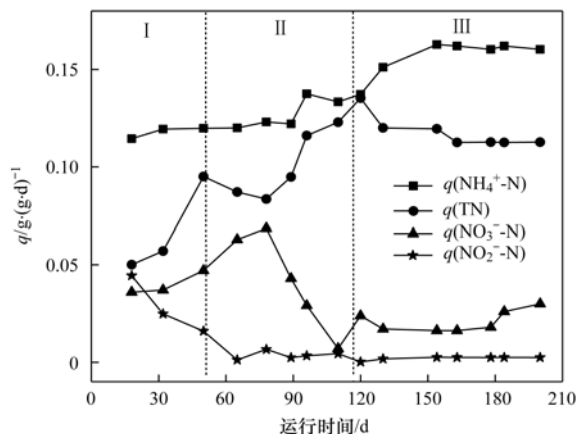


图 3 反应器运行过程中不同阶段氮素比降解/比积累率变化

Fig. 3 Variations in specific nitrogen removal/accumulation rates during the operation

的周期较长.

第Ⅱ阶段前期(52~86 d), $q(\text{TN})$ 略有下降的情况下, $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 升高, 证实 NOB 活性提升, 这与图 1(d) 中 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\Delta\text{TN}$ 比值升高结果相一致. 第Ⅱ阶段后期, $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 从 $0.069 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 降至 $0.007 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 说明淘洗絮体与降低 DO/TAN, 可有效抑制系统 NOB 活性.

第Ⅲ阶段初期, 进水氨氮浓度降至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 约在 $0.15 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, $q(\text{TN})$ 稳定在 $0.13 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 说明颗粒污泥中 AMX 与 AOB 协同效果良好, NOB 得到有效抑制, 这与颗粒污泥密实度也有关. 较小的 HRT 条件下, 进水流速提升, 改进选择压, 水力剪切力也提升, 有利于絮体污泥淘洗和颗粒污泥内微生物的空间分布和协同,

有利于总氮的去除^[30].

2.4 适应低基质运行过程中污泥形态及胞外聚合物变化特征

接种颗粒污泥颜色呈棕褐色, 平均粒径 1.6 mm. 在运行不同阶段, 典型污泥的形态如图 4 所示. 在第Ⅰ、Ⅱ阶段, 颗粒颜色无明显变化, 期间有少量絮体产生. 第Ⅲ阶段后期, 颗粒污泥由棕褐色变为棕黄色, 颗粒污泥逐渐变小, 平均粒径范围从 1.3~1.6 mm 变为 0.6~1.2 mm. 在这一阶段, $q(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 和 $q(\text{TN})$ 稳定, 氨氮去除率和总氮去除率分别稳定在 95% 和 85%, 颗粒粒径分化变小, 并未影响系统脱氮效能. 由于适应低浓度氨氮传质后, 颗粒污泥粒径产生分化, 小颗粒具有更大的比表面积, 有利于微生物适应低氨氮浓度传质限制.

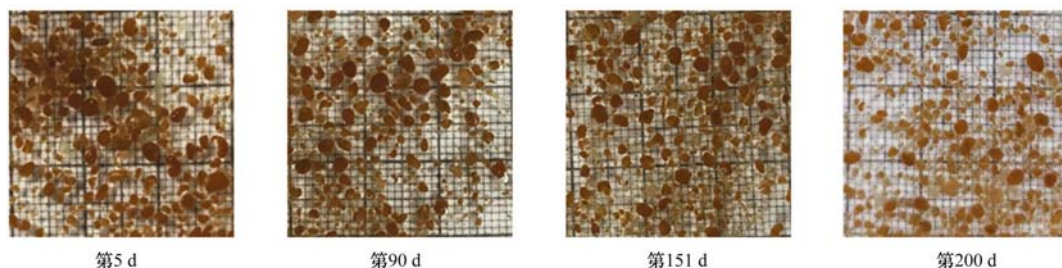


图 4 运行不同阶段污泥形态

Fig. 4 Variations in sludge morphology at different stages

胞外聚合物 (extracellular polymeric substance, EPS) 是微生物在生长以及适应变化时分泌的一种黏性物质, 主要由蛋白质 (PN) 和多糖 (PS) 等组成^[26]. 微生物自保护和适应环境条件的变化, 群落结构的调整, EPS 的组分和总量也会有相应的变化, 影响微生物聚集生长, 从而影响污泥形态结构与降解活性^[31,32]. 如图 5 所示, 第Ⅰ阶段, 颗粒污泥适应低温的过程, 微生物分泌 EPS 总量呈上升趋势, 达 $163 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. 第Ⅱ阶段, 由于进水氨氮浓度下降, DO 升高, NOB 增殖, 采用淘洗法去除絮体污泥, 体系中 EPS 从 $163 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 降至 $138.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 但微生物适应低温低基质环境, 脱氮效能高效稳定后, EPS 总量稳定在 $158.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右. EPS 的变化与图 2 中 TN 的比降解速率变化规律基本一致, 说明颗粒污泥活性与 EPS 呈现正相关, 与 Chen 等^[34]的研究结果相似. 第Ⅲ阶段, 颗粒污泥粒径变小, 部分絮体随出水流失, EPS 含量维持稳定在 $135.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右.

系统稳定后, EPS 总量有所下降, PN/PS 的比值稳定在 2.5~3. EPS 中的蛋白质和多糖所含的氨基和羧基分别带有正电荷和负电荷, 当蛋白质含量高于多糖含量, 就能中和污泥表面的负电荷进而降低污泥絮体间的排斥力, 促进絮体的絮凝, 利于颗粒污泥的形成^[33]. 一般来说好氧污泥的 PN/PS 在 1.5~

6 左右^[34,35], 本研究在低温低基质环境条件下, 虽然 EPS 总量下降, 但 PN/PS 相对稳定, 这也是整个反应器仍有良好脱氮性能的原因.

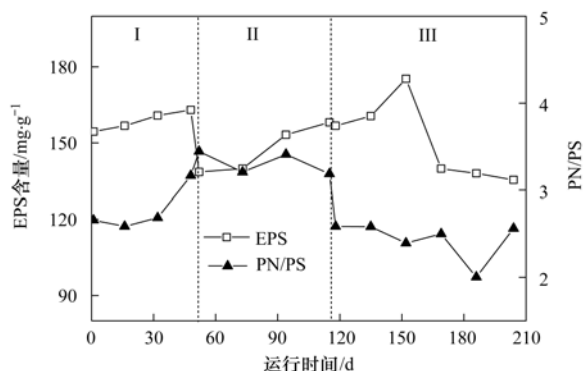


图 5 EPS 组分含量随运行时间的变化过程

Fig. 5 Variations in the extracellular polymeric substance content throughout the operation

2.5 系统中微生物群落变化分析

微生物群落变化结果如图 6 所示. 浮霉菌门 (Planctomycetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、酸杆菌门 (Acidobacteria) 占据绝对优势, 丰度达 95%. 涉及到脱氮功能微生物的浮霉菌门 (Planctomycetes) 和变形菌门 (Proteobacteria) 在系统中占主导, 达 50% 以上, 说明在低温低基质单级脱氮反应器中, 功

能微生物富集度高. 污泥在适应低基质的过程中, 浮霉菌门(Planctomycetes)和变形菌门(Proteobacteria)总量变化不大, 但浮霉菌门(Planctomycetes)略有下降, 变形菌门(Proteobacteria)略有上升, 与系统内不同形态氮转化相关. Chloroflexi 在不同污泥样品中稳定存在, 丰度稳定在 23%~25%. Chloroflexi 属于厌氧氨氧化系统中常见菌门, 有利于颗粒污泥的形成^[36], 易降解有机物为反硝化菌属提供碳源^[37]. 本研究全程无外加碳源, 这类微生物稳定存在, 表明自养脱氮体系在低基质条件下运行, 存在内源消化现象. Bacteroidetes 也具有对复杂的有机物有较强的代谢能力^[38], 且与反硝化作用和颗粒形成紧密相关^[39], 在第 I 阶段末(50 d)和第 II 阶段(113 d)污泥样品中, 拟杆菌门(Bacteroidetes)略有增殖, 也证实与系统内源消化以及硝酸盐积累有关.

为了进一步探明污泥适应低温和低基质过程中微生物种群分布的变化, 对属水平上的优势菌群进行分析如图 7 所示. 污泥中存在 *Candidatus_Kuenenia* 和 *Candidatus_Brocadia* 两种厌氧氨氧化菌属, *Candidatus_Kuenenia* 占主导, *Candidatus_Brocadia* 相对丰度稳定在 1% 左右. 与常温运行的接种污泥相比, *Candidatus_Kuenenia* 在适应低温和低基质的过程中丰度略有下降, 最终丰度达 27% 左右, 仍占有绝对优势, 有利于单级自养脱氮颗粒污泥

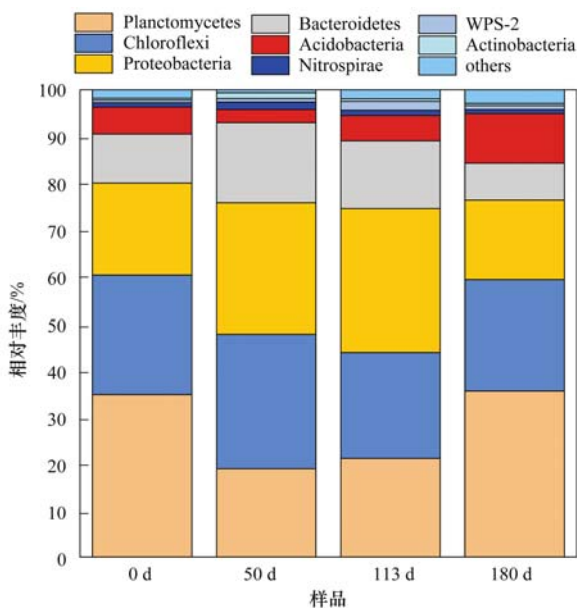


图 6 微生物种群分类(门)的群落组成相对丰度

Fig. 6 Relative percentage of community composition (phylum) of microbial population classification

在低温低基质条件下稳定脱氮. 硝化螺菌属(*Nitrospira*)属于硝化螺旋菌门, 是生物脱氮过程中占主导地位的亚硝酸盐氧化菌(NO_B)^[40], 在单级自养脱氮工艺中, NO_B 能否有效被抑制直接影响反应器脱氮性能. 接种污泥 *Nitrospira* 丰度为 0.9% 左右, 在第 50 d 的样品中测得 *Nitrospira* 丰度增加近 1 倍,

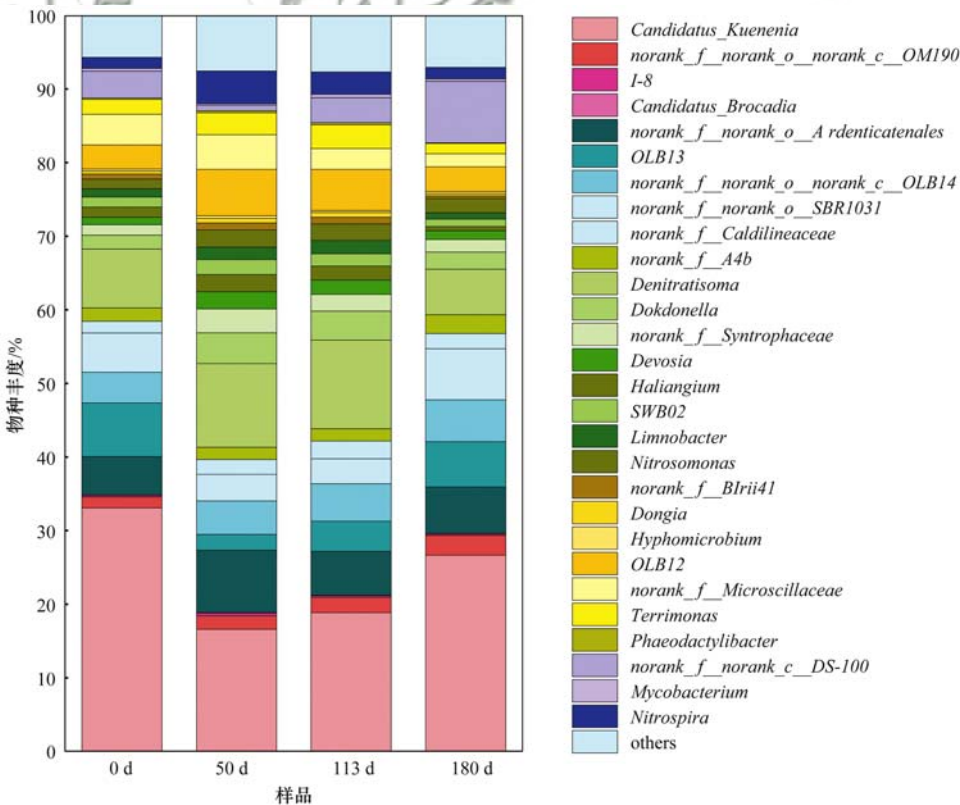


图 7 微生物种群分类(属)的群落组成相对丰度

Fig. 7 Relative abundance of community composition (genus) of microbial population classification

并在后续的运行中逐渐下降至 0.95%。这与第 I 阶段后期与第 II 阶段初期运行过程中出水硝态氮浓度增加, $q(\text{NO}_3^- - \text{N})$ 升高的结果相一致。在第 II 阶段后期通过降低 DO/TAN 至 0.041 ~ 0.096 控制 NOB 的策略, 在第 113 d 样品微生物群落分布 *Nitrospira* 丰度下降得到验证。在低温低基质自养脱氮污泥微生物体系中, 存在一定数量的反硝化菌, 如 *Denitratisoma*、*Terrimonas*、*Dokdonella* 和 *Devosia* 等, 这些菌属的增长可优化脱氮途径^[41,42]。

3 结论

(1) 以室温运行的单级 PN/A 颗粒污泥为接种污泥, 维持负荷在 $1.29 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 进水氨氮浓度从 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐级降低至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 总氮去除率维持在 $(85 \pm 4)\%$, 出水 TN 平均浓度 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 成功获得适应低温低基质的全自养脱氮颗粒污泥。

(2) 全自养脱氮颗粒污泥在低温条件下适应低浓度氨氮废水处理, 淘洗絮体污泥和控制低 DO/TAN 值(0.041 ~ 0.096) 可作为抑制 NOB 增殖的有效调控策略。在 15°C 处理 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 氨氮废水, DO/TAN 维持在 0.22 ~ 0.25, 运行期内无 NOB 显著增殖, *Nitrospira* 丰度小于 1%, DO/TAN 作为调控有显著效果。

(3) 全自养脱氮颗粒污泥在低温低基质条件下运行, 颗粒粒径变小, 颜色由棕红色变为棕黄色。PS 总量略有下降, PN/PS 的比值稳定在 2.5 ~ 3。

(4) 污泥中存在 *Candidatus _Kuenenia* 和 *Candidatus _Brocadia* 两种厌氧氨氧化菌属, *Candidatus _K.* 占主导, 丰度达 27% 左右。在适应低温和低基质的过程中, 反硝化微生物增殖。

参考文献:

- [1] Dalsgaard T, Canfield D E, Petersen J, et al. N_2 production by the anammox reaction in the anoxic water column of Golfo Dulce, Costa Rica[J]. Nature, 2003, **422**(6932): 606-608.
- [2] Zhu G B, Wang S Y, Zhou L L, et al. Ubiquitous anaerobic ammonium oxidation in inland waters of China: an overlooked nitrous oxide mitigation process[J]. Scientific Reports, 2015, **5**(1): 17306.
- [3] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial nitrification/anammox experiences-an application survey [J]. Water Research, 2014, **55**: 292-303.
- [4] Oshiki M, Satoh H, Okabe S. Ecology and physiology of anaerobic ammonium oxidizing bacteria [J]. Environmental Microbiology, 2016, **18**(9): 2784-2796.
- [5] 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.
- [6] Daverey A, Chen Y C, Dutta K, et al. Start-up of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process in sequencing batch biofilm reactor using novel biomass carriers[J]. Bioresource Technology, 2015, **190**: 480-486.
- [7] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, et al. Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 等. 室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1396-1404.
- [11] Xie L L, Wang J F, Qian F Y, et al. Start-up performance and sludge characteristics of single-stage autotrophic nitrogen removal system with granular sludge at low ammonia nitrogen concentration at room temperature[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1396-1404.
- [12] Soler-Jofra A, Wang R, Kleerebezem R, et al. Stratification of nitrifier guilds in granular sludge in relation to nitrification [J]. Water Research, 2019, **148**: 479-491.
- [13] 王振, 朱振华, 丁亚男, 等. 低温对 CANON 型序批式生物膜反应器脱氮的影响[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1533-1541.
- [14] Wang Z, Zhu Z H, Ding Y N, et al. Effect of low temperature on nitrogen removal in a sequencing batch biofilm reactor with CANON process[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1533-1541.
- [15] Qian F Y, Wang J F, Shen Y L, et al. Achieving high performance completely autotrophic nitrogen removal in a continuous granular sludge reactor[J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, **118**: 97-104.
- [16] 吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 等. 启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4578-4584.
- [17] Ji X Q, Qi Z K, Qian F Y, et al. Start-up of a three-stage PN/A granular sludge reactor for treating wastewater with high concentrations of ammonia[J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4578-4584.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Isanta E, Reino C, Carrera J, et al. Stable partial nitrification for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor[J]. Water Research, 2015, **80**: 149-158.
- [24] Ge S J, Wang S Y, Yang X, et al. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. Chemosphere, 2015, **140**: 85-98.

- [21] Winkler M K H, Kleerebezem R, Kuenen J G, *et al.* Segregation of biomass in cyclic anaerobic/aerobic granular sludge allows the enrichment of anaerobic ammonium oxidizing bacteria at low temperatures[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7330-7337.
- [22] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [23] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor[J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4359-4370.
- [24] 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.
- [25] Guillén J A S, Vazquez C M L, De Oliveira Cruz L M, *et al.* Long-term performance of the Anammox process under low nitrogen sludge loading rate and moderate to low temperature[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **110**: 95-106.
- [26] Laurenzi M, Falås P, Robin O, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox: long-term process stability and effluent quality at low temperatures[J]. *Water Research*, 2016, **101**: 628-639.
- [27] Bartolif A, Peérez J, Carrera J. Applying ratio control in a continuous granular reactor to achieve full nitrification under stable operating conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(23): 8930-8935.
- [28] Cao S B, Peng Y Z, Du R, *et al.* Feasibility of enhancing the denitrifying ammonium oxidation (DEAMOX) process for nitrogen removal by seeding partial denitrification sludge[J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 403-407.
- [29] 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 等. 主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效脱氮过程[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5580-5586.
- Liu W R, Yang D H, Sheng Y L, *et al.* High-rate nitrogen removal in a two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX process under mainstream Conditions[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5580-5586.
- [30] Li X M, Xiao Y, Liao D X, *et al.* Granulation of simultaneous Partial nitrification and anammox biomass in one single SBR system[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2011, **163**(8): 1053-1065.
- [31] Shao Y X, Zhang H X, Buchanan I, *et al.* Comparison of Extracellular Polymeric Substance (EPS) in nitrification and nitrification bioreactors [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, **143**: 104713, doi: 10.1016/j.ibiod.2019.06.001.
- [32] 王琰, 钱飞跃, 王建芳, 等. 亚硝化颗粒污泥中 EPS 提取方法与组成特性的比较研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(11): 3515-3521.
- Wang Y, Qian F Y, Wang J F, *et al.* Comparative study on extraction methods and composition of extracellular polymeric substances (EPS) in granular nitrosation sludge [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(11): 3515-3521.
- [33] 宋悦, 魏亮亮, 赵庆良, 等. 活性污泥胞外聚合物的组成与结构特点及环境行为[J]. *环境保护科学*, 2017, **43**(2): 35-40.
- Song Y, Wei L L, Zhao Q L, *et al.* Chemical structure and environmental behavior of extracellular polymeric substances in sludge: a review[J]. *Environmental Protection Science*, 2017, **43**(2): 35-40.
- [34] Chen H, Li A, Cui D, *et al.* Evolution of microbial community and key genera in the formation and stability of aerobic granular sludge under a high organic loading rate [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, **7**: 100280, doi: 10.1016/j.biteb.2019.100280.
- [35] Deng L J, Guo W S, Ngo H H, *et al.* A comparison study on membrane fouling in a sponge-submerged membrane bioreactor and a conventional membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **165**: 69-74.
- [36] 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 等. 厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5184-5191.
- Wang Y Q, Zhang M, Jiang Y, *et al.* Start-up and characteristics of the microbial community structure of ANAMMOX[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5184-5191.
- [37] Qian F Y, Gebreyesus A T, Wang J F, *et al.* Single-stage autotrophic nitrogen removal process at high loading rate: granular reactor performance, kinetics, and microbial characterization[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, **102**(5): 2379-2389.
- [38] Hill V R, Kahler A M, Jothikumar N, *et al.* Multistate evaluation of an ultrafiltration-based procedure for simultaneous recovery of enteric microbes in 100-liter tap water Samples[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(19): 6327-6327.
- [39] Du R, Cao S B, Zhang H Y, *et al.* Formation of partial-denitrification (PD) granular sludge from low-strength nitrate wastewater: the influence of loading rates [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **384**: 121273, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121273.
- [40] 钱飞跃, 王琰, 王建芳, 等. 长期储存亚硝化颗粒污泥的活化及菌群结构变化[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(4): 1052-1058.
- Qian F Y, Wang Y, Wang J F, *et al.* Reactivation performance of nitrosation granular sludge after long-term storage and microbial community variation[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(4): 1052-1058.
- [41] 彭永臻, 钱雯婷, 王琦, 等. 基于宏基因组的城市污水处理厂生物脱氮污泥菌群结构分析[J]. *北京工业大学学报*, 2019, **45**(1): 95-102.
- Peng Y Z, Qian W T, Wang Q, *et al.* Unraveling microbial structure of activated sludge in a full-scale nitrogen removal plant using metagenomic sequencing[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2019, **45**(1): 95-102.
- [42] 刘文龙, 刘超, 沈琛, 等. 活性污泥长期好氧饥饿下的微生物种群结构演化[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, **51**(8): 20-27.
- Liu W L, Liu C, Shen C, *et al.* Microbial community evolution in activated sludge during long-term aerobic starvation period [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, **51**(8): 20-27.

CONTENTS

Characterization of Two Heavy Pollution Episodes in Tianjin in 2020	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3879)
Analysis of Characteristics of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Chengdu Based on the MARGA	YIN Han-mei, CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3889)
Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Suqian City	MA Hong-lu, ZHAO Xin, LU Jian-gang, <i>et al.</i> (3899)
Characterization and Size Distribution of Carbonaceous Aerosols at Mountain Dinghu	LI An-na, WEN Tian-xue, HUA Wei, <i>et al.</i> (3908)
Characteristics and Source Apportionment of Carbon Components in Road Dust in Anshan	LIN Zi, JI Ya-qin, LIN Yu, <i>et al.</i> (3918)
Spectral Characteristics and Source Analysis of WSOC of PM _{2.5} in Winter of Xi'an	YANG Yi, ZHANG Ya-nan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3924)
Observation of Aerosol Optical Properties and New Particle Formation in the Yangtze River Delta	DU Ying-ying, CHEN Jun, ZHANG Jia-luo, <i>et al.</i> (3932)
Component Characteristics and Source Appointment of Volatile Organic Compounds in Lianyungang City	CUI Jin-meng, WANG Ti-jian, LI Qiu-tong, <i>et al.</i> (3941)
Seasonal Pollution Characteristics and Analysis of the Sources of Atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area	WANG Cheng-hui, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3951)
Ozone Sensitivity Analysis and Emission Controls in Dezhou in Summer	YAN Ru-sha (3961)
Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction	QU Jia-bao, WANG Peng, BO Xin, <i>et al.</i> (3969)
Establishment and Spatial Distribution of Anthropogenic Ammonia Emission Inventory in Zhejiang Province	ZHAO Rui-dong, YU Xing-na, HOU Xin-hong, <i>et al.</i> (3976)
Evaluation and Screening of Dioxin Control Technology in Waste Incineration Flue Gas	ZHAO Si-lan, XI Peng-fei, GUO Feng-yan, <i>et al.</i> (3985)
Characteristics of Stable Isotopes and Moisture Sources of Two Typical Precipitation Events in Lanzhou City	HAN Ting-ting, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (3993)
Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of the Surface Water in Ranwu Lake Basin	ZHANG Tao, WANG Ming-guo, ZHANG Zhi-yin, <i>et al.</i> (4003)
Chemical Evolution and Formation Mechanism of Groundwater in Hetao Irrigation Area	CUI Jia-qi, LI Xian-yue, SHI Hai-bin, <i>et al.</i> (4011)
Chemical Characteristics of Groundwater and Material Sources Analysis in Shiqi River Basin	LI Xiao, YU Shi, LI Liang, <i>et al.</i> (4021)
Spatial-temporal Variations and Driving of Nitrogen and Phosphorus Ratios in Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	JI Peng-fei, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (4030)
Spatiotemporal Variations in Nutrient Loads in River-lake System of Changdang Lake Catchment in 2016-2017	LI Xin-yan, LI Heng-peng, JIANG San-yuan, <i>et al.</i> (4042)
Influence of <i>Potamogeton crispus</i> on Lake Water Environment and Phytoplankton Community Structure	KANG Li-juan, XU Hai, ZOU Wei, <i>et al.</i> (4053)
Phylogenetic Processes and Key Driving Factors of Bacterial Communities in Jinze Reservoir	LIU Ming-kun, TONG Jun, ZHU Hui-feng, <i>et al.</i> (4062)
Distribution Characteristics of Per-/polyfluoralkyl Substances in River Sediments Around Typical Fluorine Industrial Parks	SUN Lin-ting, ZHAO Zhen, TANG Jian-hui (4069)
Microplastics-Induced Shifts of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in River Water	ZHOU Xin-yuan, WANG Yan-zi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4076)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Lianhua Reservoir	LIAO Jie, WEI Xiao-qin, XIAO Yan-qin, <i>et al.</i> (4081)
Intraspecific Variation in Growth and Alkaline Phosphatase Activity of <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> Strains in Response to Different Phosphorus Concentrations and Sources	YE Jin-mei, ZHAO Li, LUO Xu, <i>et al.</i> (4088)
Simulation of Water Quality Response of Guishui River Wetland Plants and Water Diversion	LI Ya-juan, DU Yan-liang, BI Er-ping, <i>et al.</i> (4095)
Performance Assessment of Field-scale Dry Grass Swale with Shallow Substrate Layer	ZHANG Jia-wei, LI Tian, ZHANG Ting-xiu (4105)
Transition of Particulate Pollutant in the Parcel-based Catchment of Sponge City	LI Jia, XIE Wen-xia, JIANG Zhi-hui, <i>et al.</i> (4113)
Adsorption of Sb(V) in Water by Natural Pyrite: Performance and Mechanism	SHI Song, WU Qian-yuan, LI Xin-zheng, <i>et al.</i> (4124)
Treatment of Wastewater Containing Naphthalene Sulfonic Acid by Persulfate Oxidation	ZHANG Jin-men, LU Jun, LIU Xiao-chen, <i>et al.</i> (4133)
Effect of Temperature on Performance and Microbial Community Structure of Anaerobic Biofilter-Treated Domestic Wastewater	LIU Zhi-bin, LIU Xiu-hong, ZHOU Tong, <i>et al.</i> (4141)
Start-up and Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal in ABR-MBR Coupling Process	MIAO Xin-nian, WANG Qian, GUO Kai-cheng, <i>et al.</i> (4150)
Adaptability of Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Granular Sludge to Low-Strength at Low Temperature	LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4161)
Discussion on Key Issues of Geochemical Monitoring of Soil Heavy Metal in Xiongan New District	GUO Zhi-juan, ZHOU Ya-long, YANG Zheng, <i>et al.</i> (4169)
Quantitative Assessment of Human Health Risks Based on Soil Heavy Metals and PAHs Sources: Take a Polluted Industrial Site of Beijing As an Example	WU Zhi-yuan, ZHANG Li-na, XIA Tian-xiang, <i>et al.</i> (4180)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals at Township Scale in the High Background of Heavy Metals, Southwestern, China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, WANG Hui-yan, <i>et al.</i> (4197)
Potential of Accumulation and Application of Dominant Plants in Lanping Lead-zinc Mine, Yunnan Province	ZHANG Long, ZHANG Yun-xia, SONG Bo, <i>et al.</i> (4210)
Key Growth Stage of Pb Accumulation in Rice Through a Hydroponic Experiment with Pb Stress	HU Yu-dan, ZHOU Hang, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Nutrient Regulation and Control on Cd Accumulation Efficiency of <i>Hylotelephium spectabile</i> Under Field Conditions	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (4226)
Effects of <i>Eucalyptus</i> Branches Biochar Application on Soil Physicochemical Properties of Acidified Soil in a <i>Eucalyptus</i> plantation in Northern Guangxi	DAUN Chun-yan, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (4234)
Dynamic Effects of Direct Returning of Straw and Corresponding Biochar on Acidity, Nutrients, and Exchangeable Properties of Red Soil	YANG Cai-di, LU Sheng-gao (4246)
Different Responses of Soil Microbial Community Structure to Irrigation with Treated Wastewater from Domestic and Industrial Sources	WANG Yan, CHENG Dong-hui, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (4253)
Effects of Manure and Organic Fertilizer Application on Soil Microbial Community Diversity in Paddy Fields	LI Peng, WU Jian-qiang, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Land Use Changes on Soil Bacterial Community Diversity in the Riparian Wetland Along the Downstream of Songhua River	ZHANG Tuo, XU Fei, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (4273)
Response of Soil Bacterial Community Structure to Precipitation Change in Grassland of Loess Plateau	LI Na, WANG Bao-rong, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (4284)
Effect of Land-use on Soil Fungal Community Structure and Associated Functional Group in Huixian Karst Wetland	CHENG Yue-yang, JIN Zhen-jiang, WANG Xiao-tong, <i>et al.</i> (4294)
Interactions of Fungi Community and Relationship with the Carbon Structure in Arable Mollisols with Gradient Organic Matter Content	SHANG Qiu-tong, HUANG Rui-lin, NI Hao-wei, <i>et al.</i> (4305)
Diversity of Soil Eukaryotic Microbes in Different Succession Stages in Maolan Karst Forest of Guizhou	WANG Xian, LONG Jian, LI Juan, <i>et al.</i> (4314)
Adsorption of Cadmium and Arsenic by Corn Stalk Biochar Solidified Microorganism	LIU Yu-ling, ZHU Hu-cheng, PENG Ou, <i>et al.</i> (4322)
Mechanism of Inorganic Nitrogen Transformation and Identification of Nitrogen Sources in Water and Soil	LIANG Xing, SUN Li-qun, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4333)