

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.8
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 李源遽, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM_{2.5} 中 12 种微量元素特征及来源解析 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO₂) 联合生物炭对河道底泥的修复 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ($\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N₂O 排放的影响 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响

侯晓薇¹, 牛永健², 李维维², 王光杰³, 孙洪伟^{1,4*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省轻工研究院, 兰州 730030; 3. 山东同济测试科技股份有限公司, 烟台 264000; 4. 烟台大学环境与材料工程学院, 烟台 264005)

摘要: 为了进一步了解在亚硝酸盐氧化过程中, 高温冲击对活性污泥微生物菌群结构的影响, 本研究中, 以在不同 NO_2^- -N浓度条件下富集的硝化活性污泥为研究对象, 利用 16S rRNA 高通量测序技术分析, 通过改变环境温度考察活性污泥微生物菌群丰度变化及结构特征. 高通量测序分析结果表明, 25℃时易于微生物生长, 系统活性污泥微生物菌群多样性最丰富. 随着高温冲击试验进行, 系统内菌群丰富度、均匀度和多样性呈下降趋势. 此外, 分析发现本系统主要硝化功能菌为 *Nitrospirae* 的 *Nitrospira*, 更适宜在 35℃ 生长. 且高温冲击试验同样引起了活性污泥中非硝化功能微生物 (*Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Halomonas* 和 *Pseudomonas* 等) 的菌群结构差异. 试验结果可为高温冲击条件下亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群分布特点的研究提供部分理论参考, 并为相关高温冲击试验给予部分借鉴.

关键词: 温度; 硝化细菌; 亚硝酸盐氧化细菌; 比亚硝态氮氧化速率; 16S rRNA 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3773-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201910220

Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing

HOU Xiao-wei¹, NIU Yong-jian², LI Wei-wei², WANG Guang-jie³, SUN Hong-wei^{1,4*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Province Light Industry Research Institute, Lanzhou 730030, China; 3. Shandong Tongji Testing Technology Co., Ltd., Yantai 264000, China; 4. School of Environment and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: In order to further understand the influence of high temperature shock on the microbial community structure of activated sludge during the process of nitrite oxidation, the enriched nitrifying activated sludge under different NO_2^- -N concentration was taken as the research object in this study. 16S rRNA high-throughput sequencing technology was used to analyze the changes in the microbial community abundance and structural characteristics of activated sludge by changing the environmental temperature. The results of high-throughput sequencing showed that microorganisms were more likely to grow at 25℃, and the diversity of the microbial community in the activated sludge was the most abundant. With increased temperature, the richness, evenness, and diversity of the flora in the system decreased. In addition, it was found that the main nitrifying bacterium in the system was *Nitrospira* of *Nitrospirae*, whereby 35℃ was more suitable for its growth. Meanwhile, a higher temperature also caused differences in the structure of non-nitrifying functional microorganisms (e.g., *Bacteroidetes*, *Chloroflexi*, *Halomonas*, and *Pseudomonas*) in the activated sludge. The results of this study provide some theoretical reference for the investigation of the distribution characteristics of microbial flora during the process of nitrite oxidation under high temperature shock, and can also be used as reference for relevant high temperature shock tests.

Key words: temperature; nitrobacteria; nitrite-oxidizing bacteria; specific nitrite oxidation rate; 16S rRNA high-throughput sequencing

温度是影响细菌活性的主要因素之一. 温度过低细胞膜呈凝胶状, 营养物质跨膜运输受阻, 细胞会停止生长. 超过温度上限时, 对温度敏感的细胞组成开始变性, 细胞生长难以维持甚至死亡^[1,2]. 硝化细菌属于中温细菌, 对温度变化较为敏感^[3]. 顾升波等^[4]的研究发现在 11~16℃ 下, 低温对两种硝化菌活性均存在不利影响, 但对氨氧化细菌(AOB)的抑制作用大于对亚硝酸盐氧化细菌(NO₂⁻)的抑制作用. Gabarró 等^[5]将温度控制在 10~15℃ 条件下, 发现出水 NO_2^- -N浓度升高, 半亚硝化系统稳定运行遭到破坏, 证实了 NOB 的活性略高于 AOB. 但于莉芳等^[6]在 25℃ 和 30℃ 条件研究发现随温度升高, AOB 活性增强而 NOB 活性变化则恰好相反, 因而 AOB 成为系统实现短程硝化的优势菌种. 目前探究温度

对硝化细菌的影响主要集中于 AOB 和 NOB 共存的硝化系统中, 而对于研究 AOB 受到抑制的硝化系统中微生物菌群结构影响却鲜见报道.

近几年, 先进的高通量测序技术被广泛用于城市污水处理厂活性污泥微生物群落结构的研究. 其具有通量高、测序快、准确度高等特点. 同时能定性分析微生物菌群的多样性、群落结构及功能, 对城市污水处理厂活性污泥微生物优势菌群确定和群落相对完整性的研究有重要意义^[7~9].

本试验考察了高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中

收稿日期: 2019-10-29; 修订日期: 2020-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668031)

作者简介: 侯晓薇(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水生物脱氮理论与技术, E-mail: 374463768@qq.com

* 通信作者, E-mail: 12821306@qq.com

微生物菌群结构的影响,该系统经过前期富集阶段已抑制 AOB 的生长,并着重考察了高温对亚硝酸盐氧化过程中主要菌属 (NOB) 及系统内菌群结构变化的影响,以期为应对实际工程中出现的水温过高突发状况提供可靠的理论依据.此外,本研究采用 Illumina MiSeq 第二代测序方法探究高温冲击对亚硝酸盐氧化过程菌群结构的影响,比较温度变化下微生物菌群结构的差异性,同时量化分析主要脱氮微生物的菌群丰富度和多样性,以深入研究温度对亚硝酸盐氧化过程中微生物的影响.

1 材料与方法

1.1 试验用水及接种污泥

本试验用水为人工模拟废水,包括:0.4 g NaHCO_3 、0.9 g KH_2PO_4 、1.2 g K_2HPO_4 及 5 mL 微量元素母液(成分为:1.25 g EDTA、0.55 g $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、0.4 g $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、1.275 g $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.4 g $\text{CuSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、0.05 g $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、1.375 g $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、1.25 g $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、44.4 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$),每周进水 NO_2^- -N 浓度由计算量投加 NaNO_2 . 试验接种污泥取自兰州市西固区兰炼污水处理厂氧化沟好氧段污泥,具有良好生物脱氮性能,驯化后污泥 $\text{MLVSS} = (1490 \pm 30) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 试验装置及运行方案

本试验采用序批式反应器 (sequencing batch reactor, SBR),有效容积 3 L,排水比 1:3. 试验考察温度梯度分别为:25、35、38 和 40℃. 为了不使 pH 和 DO 成为限制因素,控制两者浓度分别为 7.5 ± 0.1 和 $4.0 \sim 4.5 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 每周反应器运行方式为:进水(1 min)、硝化(通过实时监测 DO 值控制硝化终点)、沉淀(30 min)、排水(5 min). 通过观察比亚硝态氮氧化速率以判断硝化细菌反应活性,其按公式(1)计算.

$$\text{SNiOR} = \frac{[\text{NO}_2^- \text{-N}]_{\text{硝化开始}} - [\text{NO}_2^- \text{-N}]_{\text{硝化结束}}}{\text{MLVSS} \times t_{\text{N}}} \times 1440 \quad (1)$$

式中,SNiOR 为比亚硝态氮氧化速率 [$\text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 以 N/VSS 计]; $[\text{NO}_2^- \text{-N}]_{\text{硝化开始}}$ 为曝气开始时 NO_2^- -N 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{NO}_2^- \text{-N}]_{\text{硝化结束}}$ 为曝气结束时 NO_2^- -N 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); MLVSS 为污泥浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); t_{N} 为曝气反应时间 (min).

1.3 水质分析项目及测定方法

进出水 NO_2^- -N 浓度及可挥发性悬浮固体 (MLVSS) 浓度采用国家标准方法测定^[10],温度、pH 值及 DO 均采用 WTW Multi-3420 多参数测定仪及相应检测探头进行实时监测.

1.4 微生物高通量测序

分别取 25℃ (第 67 周期)、35℃ (第 87 周期) 及 40℃ (第 97 周期) 活性污泥样品 (每个温度包括 3 个平行样品),通过冷冻干燥 (-80°C) 处理后保存,利用 DNA 提取试剂盒 (DNeasyPowerSoil Kit) 提取样品的总 DNA. 采用紫外分光光度计对 DNA 进行定量,并通过 0.8% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 提取质量. 以 3 组样品原液作为 PCR 模板,利用 16S rRNA 通用引物进行 V4 和 V5 区扩增,所用引物为 515F (GTGCCAGCMGCCGCGGTAA) 和 907R (CCGT CAATTCMTTTRAGTTT). PCR 扩增反应条件为:预加热 95°C , 2 min; 随后进行 25 周期扩增反应 (变性 95°C , 30s; 退火 55°C , 30 s; 延伸 72°C , 40 s); 终止延伸 72°C , 10 min. 反应结束后将 PCR 扩增产物通过 2% 琼脂糖凝胶电泳进行检测,并对目标片段进行切胶回收. DNA 扩增样品利用 Illumina MiSeq 测序仪进行上机测序.

1.5 生物信息学分析

采用 QIIME 软件对原始数据进行聚类分析,主要步骤为双末端序列装配、去除低质量序列、去重复,运用 Mothur 软件去嵌合体,得到优质序列. 对优质序列按 97% 的相似性作为一个单元来划分,进行 OTU (operational taxonomic unit) 分类学鉴定. 利用 Mothur 软件中的 summary. single 命令,计算 Chao1、ACE、Simpson 和 Shannon 多样性指数. 计算各 OTUs 在 3 组样品中的相对丰度并分别在门、属水平上进行汇总,使用 R 语言,对相对丰度大于 5% 的属进行聚类分析并绘制热图.

2 结果与讨论

2.1 反应器运行状况分析

为了进一步研究高温冲击对亚硝酸盐氧化过程的影响,本试验共进行 2 个阶段. 如图 1 所示,阶段 I 在 25℃ 条件下对活性污泥进行驯化,经过 67 个周期的运行,通过逐步提升 NO_2^- -N 浓度联合高溶解氧成功实现亚硝酸盐氧化过程中主要菌属 (NOB) 的富集培养. SNiOR (以 N/VSS 计,下同) 从开始时的 $0.01 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 提高到 $0.46 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 阶段 II 通过逐步升温考察高温冲击对系统的影响,分别在 35、38 和 40℃ 进行了 30 个周期的批次试验,可以看出高温冲击对亚硝酸盐氧化过程产生明显抑制作用;系统 SNiOR 在 35℃ 达到峰值后随即开始逐渐降低,从 $1.04 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 降为 $0.29 \text{g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$. 因此,本试验分别在 25、35 和 40℃ 反应末期取活性污泥样品,进行高通量测序拟从分子生物学角度探究高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中菌群结构的影响.

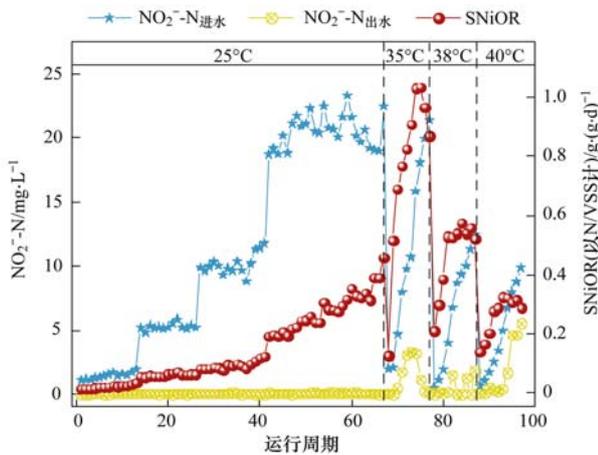


图1 SBR 系统内NO₂⁻-N浓度和 SNIOR 变化规律

Fig. 1 Variations of NO₂⁻-N concentration and SNIOR in the SBR system

2.2 微生物群落丰富度和多样性分析

利用高通量测序技术,经过序列过滤与去除嵌合体序列,3种温度下活性污泥样品得到可用于后续分析的优质序列数共计326 392条,优质序列长度分布在387~395 nt之间,其中以长度为393 nt序列居多.进行 OTU 聚类分析,统计各样品在不同 OTU 中的丰度信息,3组样品共产生4 923条 OTU,其中25、35和40℃特有的 OTU 数目(图2)分别为1 341、814和587.25℃样品特有 OTU 数目最多,预示含有较多特有的细菌种类.25℃与35℃共有 OTU 数目较多,为714条.对 OTU 利用 QIIME 软件生成从门到属依次进行分类,结果见表1.结合图3丰度等级曲线分析,25℃和35℃样品的等级丰度曲线在横轴上的长度都比较长,且下降较为平滑,表明这两个温度所含群落组成的均匀度较好,群落丰度差异较小.40℃样品的

等级丰度曲线则在横轴上的长度都比较短,且快速下降,表明该温度下所含物种均匀度较低.

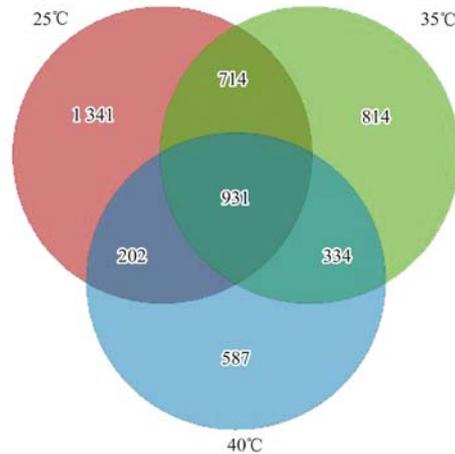


图2 OTU 分布维恩图

Fig. 2 Venn diagram showing the distribution of OTUs

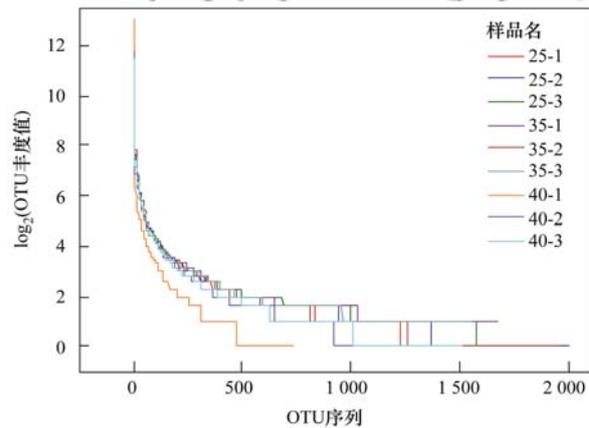


图3 OTU 丰度等级曲线

Fig. 3 OTU rank-abundance distribution curves of samples diagrams showing the distribution of OTUs

表1 硝化细菌 16S rRNA 序列及丰富度

Table 1 Pearson's correlation coefficient of sequence and abundance of bacterial 16S rRNA in nitrifying bacteria

温度/℃	样品名	序列数	门	纲	目	科	属	种
25	25-1	114 997	21	45	66	103	166	92
	25-2		20	46	61	95	151	80
	25-3		19	39	61	97	149	89
35	35-1	105 589	18	41	61	87	133	70
	35-2		22	46	64	97	158	84
	35-3		19	42	61	90	135	70
40	40-1	105 806	16	33	51	80	116	53
	40-2		22	46	64	102	155	77
	40-3		19	42	66	101	159	85

利用 α 多样性分析样品微生物群落的丰富度和多样性.各样品的丰富度指数(Chao1)、均匀度指数(ACE)和多样性指数(Simpson、Shannon),如表2所示.

就物种丰富度而言,可以看出各温度样品中菌群丰富度 Chao1 数值^[11]表现为减小的趋势,表明随

温度的升高系统内菌群丰富度逐渐下降.ACE 指数变化显示随温度升高系统内菌群均匀度下降,这表明高温条件下系统内菌群中某些细菌种群发育较好,在群落中的优势度上升;可推测本系统中优势菌群的变化与菌群丰富度的变化有关,高温环境可能为某些菌群提供良好的生长繁殖环境,使其成为

系统内的优势菌种. 但高温冲击明显降低了系统内菌群的丰富度以及均匀度.

结合 Shannon 和 Simpson 指数, 25℃ 和 35℃ 样品 Shannon 指数(8.24 和 8.16)明显高于 40℃ 样品(5.98), Simpson 指数(0.98 和 0.97)也高于 40℃(0.87). 由此可见, 25℃ 和 35℃ 条件下系统内菌群多样性要高于 40℃ 条件, 进一步证实了随着温度的升高菌群的多样性逐渐降低^[12].

表 2 多样性指数统计

Table 2 The α diversity indices

温度/℃	Chao1 指数	ACE 指数	Simpson 指数	Shannon 指数
25	2 140.18	2 189.78	0.98	8.24
35	1 906.93	1 969.10	0.97	8.16
40	1 513.29	1 572.26	0.87	5.98

根据样品间微生物进化信息及丰度信息进行 Unifrac 分析, 计算得出样品差异距离矩阵, 并在距

离矩阵的基础上采用非度量多维尺度法(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)进行 beta 多样性分析. 基于 Unifrac 加权 NMDS(图 4)分析, 由于同时计算了样品的进化信息及丰度信息, 各温度样品点虽能大致实现组内聚类, 样品点之间均保持一定的距离, 无重叠现象; 但仍存在距离差异较明显的样点(25-2 和 40-1). 由此可知高温冲击条件下各样品中菌群群落由于进化信息和丰度信息的不同而产生显著差异, 该差异主要由微生物不同的最适生长条件所决定^[13]. 基于 Unifrac 非加权 NMDS 分析可知(图 4), 相同温度条件下平行样品点与点间的距离较小, 能很好地聚为一类, 说明所取相同温度条件下样品组内菌群群落结构在进化关系上相似度高, 具有较好的代表性; 而不同温度条件下组间样品点与点间距离较大, 表明温度变化可导致系统内菌群群落结构在进化关系上产生明显差异.

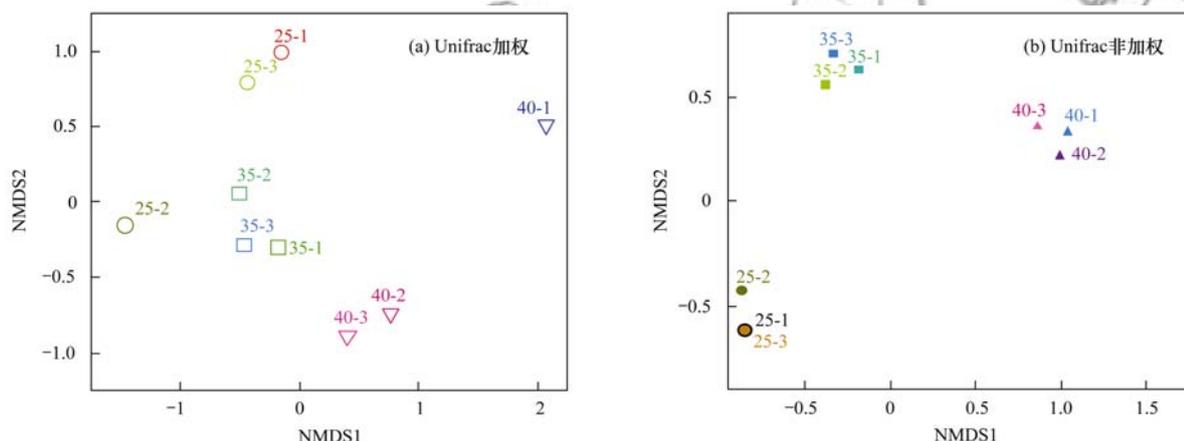


图 4 样品群落结构 Unifrac 无度量多维尺度排序

Fig. 4 Unifrac nonmetric multidimensional scaling of the samples

2.3 微生物群落组成差异分析

2.3.1 门水平上微生物群落分布

高温冲击条件下亚硝酸盐氧化过程微生物群落在门水平上的组成如图 5 所示, 其中检测出相对丰度大于 1% 的菌门, 分别有 10 种(25℃)、9 种(35℃)及 9 种(40℃), 可检测到微生物总量关系为: 97.59% (25℃) > 96.69% (35℃) > 95.46% (40℃). 3 组样品中群落组成百分比比较高的菌门相对比例如图 5 所示, 主要包括 Proteobacteria、Bacteroidetes、Nitrospirae、Chloroflexi、Gemmatimonadetes、Planctomycetes、Deinococcus、Armatimonadetes、Acidobacteria 和 Firmicutes 等. 其中 Proteobacteria、Bacteroidetes、Nitrospirae 和 Chloroflexi 在样品中所占百分比最高, 4 种菌门总和在 3 组样品中的相对比例均占 80% 以上.

大量研究表明: 具有硝化功能的微生物菌属大多属于 Proteobacteria 和 Nitrospirae, 如 NOB 中 *Nitrosira* 属于 Nitrospirae, AOB 中 *Nitrosomonas*、

Nitrosococcus 和 NOB 中的 *Nitrobacter*、*Nitrococcus* 和 *Nitrotoga* 均属于 Proteobacteria^[14-16]. 因此, 本研究主要富集 NOB 的 3 组样品中 Proteobacteria 和 Nitrospirae 所占百分比比较高, 但其比例在样品组间却有所差异. Proteobacteria 是细菌中最大的一门, 同时也是污水处理中微生物门水平上的主导门类^[17]. 在高温冲击的条件下, 40℃ 时 Proteobacteria 占比增大, 主要由于高温对微生物具有抑制作用, 使能够适应高温的 Proteobacteria 占据优势并得以增殖. Nitrospirae 作为亚硝酸盐氧化过程中的主导微生物菌门, 在不同温度条件下相对丰度存在一定的差异: 14.03% (25℃) > 13.86% (35℃) > 7.97% (40℃), 随着温度的上升, Nitrospirae 相对丰度逐渐下降, 但在 25℃ 和 35℃ 条件下样品丰度差异较小. 这说明当温度大于 35℃ 时, Nitrospirae 受抑制程度较明显.

另外, 在关于活性污泥反应器生物菌群结构相关报道中, Bacteroidetes 和 Chloroflexi 也经常被检测

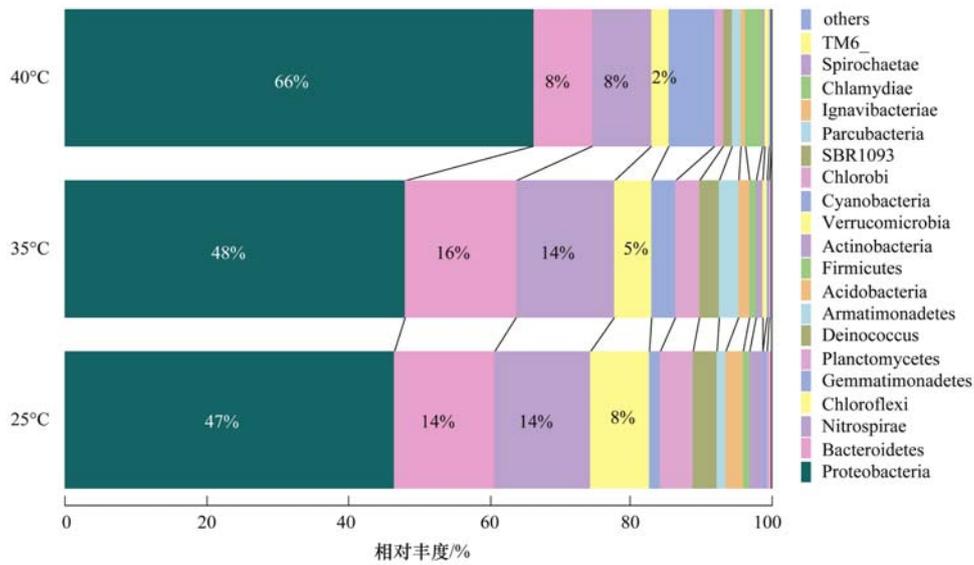


图 5 门水平细菌群落结构及分布

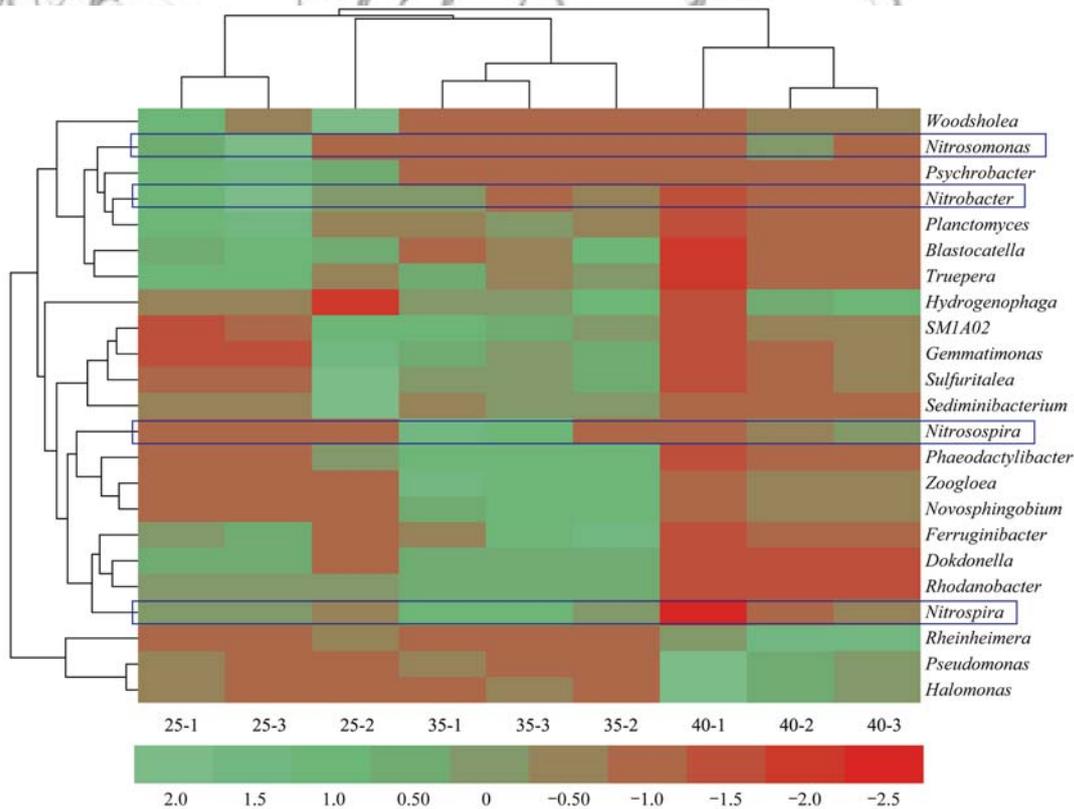
Fig. 5 Bacterial community structure and distribution of the samples at the phylum level

到,但占总菌门相对丰度较低,约为 1%^[18~20],同时所检测的样品大多为处理实际城市生活污水的活性污泥.然而本试验活性污泥样品是用来处理底物较为单一且成分简单的人工配水,导致 Bacteroidetes 和 Chloroflexi 在研究中丰度较高. Bacteroidetes 在 25°C 和 35°C 丰度差异较小,在 40°C 时丰度下降明显.但在高温冲击 35°C 时, Bacteroidetes 丰度呈现上升趋势,说明 35°C 高温冲击有利于 Bacteroidetes 生长.

Chloroflexi 在高温冲击条件下,丰度占比呈现明显下降趋势,说明高温不利于该菌门的生长.由此可见,高温冲击条件对亚硝酸盐氧化过程微生物群落的门水平菌群结构影响存在差异.

2.3.2 属水平微生物群落分布特征

为了更深入了解高温冲击条件对亚硝酸盐氧化过程微生物菌群结构的影响,本研究还从属水平上对 3 组样品进行聚类分析及比较.将相对丰度前 20



蓝色框表示硝化菌

图 6 属水平热图及聚类分析

Fig. 6 Heatmap and clustering tree analysis of dominant genera

位的微生物菌属以及具有硝化功能的微生物菌属进行相似性聚类分析,并绘制属水平热图(图6),通过颜色阶梯及相似程度来反映不同温度条件下活性污泥样品在属分类水平上群落组成的相似性和差异性^[21].对于系统中的硝化菌属,由图7可知,在高温冲击下的亚硝酸盐氧化系统中,均检测到了两类氨氧化细菌(*Nitrosomonas*和*Nitrosospira*)和两类亚硝酸盐氧化细菌(*Nitrospira*和*Nitrobacter*),但检测到的AOB相对丰度极低(相对丰度均 $<0.05\%$),进一步表明该硝化系统活性污泥中仅含有NOB.

作为3组样品中占绝对优势的NOB菌,属于Nitrospirae的*Nitrospira*^[22],其相对丰度为: 15.73% (35°C) $> 14.20\%$ (25°C) $> 8.37\%$ (40°C).由图6可知,35-1和35-3样品中*Nitrospira*含量远大于其他样品,同时结合亚硝酸盐氧化过程中系统SNiOR可以看出,在 35°C 达到峰值为 $1.04\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,说明高温冲击条件在 35°C 时有利于*Nitrospira*的生长.这与姚倩等^[23]的研究结果一致:运用SBR反应器

及人工配水进水研究发现,当温度变化范围在 $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ 时,*Nitrospira*的活性随着温度的上升而不断增大, 35°C 左右时*Nitrospira*的活性达到最大值.但当温度达到 40°C 时,*Nitrospira*的相对丰度减少一半,其对应温度下的SNiOR也降为 $0.29\text{ g}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$,活性降低70%.在检测到的另一种NOB菌,属于Proteobacteria的*Nitrobacter*,其相对丰度为: 0.10% (25°C) $> 0.04\%$ (35°C) $> 0.02\%$ (40°C).由于含量过低,可认为*Nitrospira*为该系统内亚硝酸盐氧化过程中的主要硝化菌属.

另外,属水平上不同温度条件下,样品的微生物系统中还存在2个优势菌属(相对丰度大于5%),*Halomonas*和*Pseudomonas*.*Halomonas*在高温冲击条件下,相对丰度呈现逐渐上升的趋势, 40°C 时在系统中大量富集,推测是高温条件下混合液蒸发致使系统中盐度增加,适宜*Halomonas*生长^[24,25]; *Pseudomonas*是专性好氧菌,具有好氧反硝化功能^[26].高温冲击条件均有利于这两种菌属的生长.

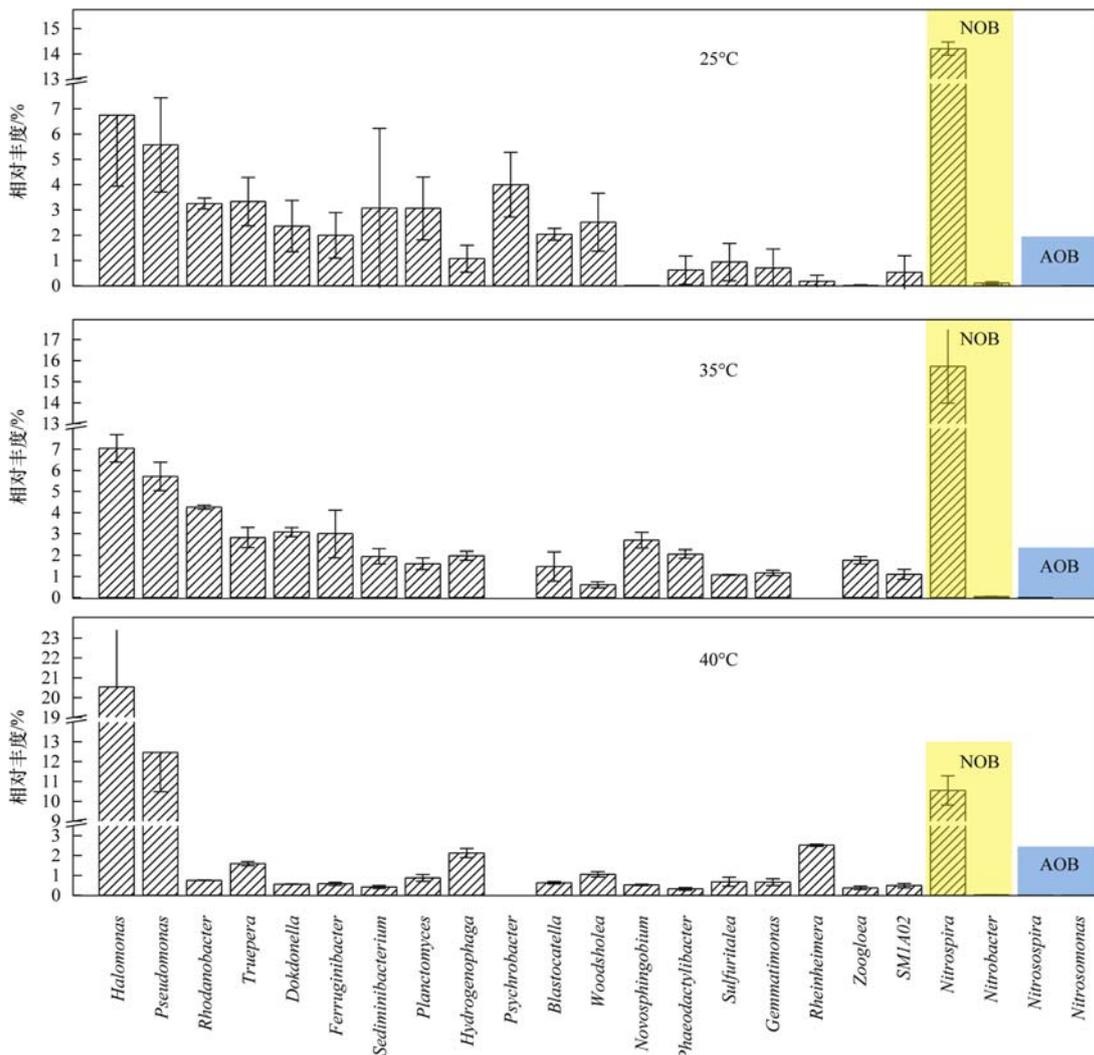


图7 属水平细菌群落丰度柱状图

Fig. 7 Bacterial community abundance histogram of the samples at the genus level

综上所述,高温冲击条件会导致亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构的差异性变化。由此可见,温度突变是导致实际污水处理系统菌群结构变化的重要因素之一。同时,本试验证明了作为 NOB 中的主要菌属, *Nitrospira* 菌属可以抵抗 35℃ 高温冲击,同时在 25 ~ 35℃ 的温度区间内,该菌属相对丰度能够逐步提升,系统内 SNIOR 可以达到峰值,NOB 活性达到最强。而对于实际脱氮污水处理系统来说,亚硝酸盐氧化过程是生物脱氮的一个主要环节,因此可以通过适当提高温度优化系统亚硝态氮去除效果。在实际工程中如遇 35℃ 以下的高温冲击情况,亚硝酸盐氧化过程不会受到冲击影响。

3 结论

(1) 本研究无论从微生物群落丰富度、多样性以及组成差异分析,均表明高温冲击对亚硝酸盐氧化过程活性污泥微生物菌群造成了明显的结构差异。

(2) 本研究高温冲击试验表明,随温度的升高亚硝酸盐氧化过程系统内菌群丰富度和均匀度逐渐下降,同时多样性也逐渐降低。不同温度各样品组间菌群群落由于进化信息和丰度信息的不同而产生显著差异,该差异主要由微生物不同的最适生长条件所决定;但相同温度各样品组内菌群群落结构在进化关系上相似度高,具有较好的代表性。

(3) 本研究活性污泥样品中的 NOB 隶属于 Nitrospirae 的 *Nitrospira*, 当温度在 25 ~ 35℃ 条件下该菌属具有良好的硝化活性;当温度达到 40℃ 时,其活性降低 70%。

参考文献:

- [1] Ruiz-Hernando M, Martín-Díaz J, Labanda J, et al. Effect of ultrasound, low-temperature thermal and alkali pre-treatments on waste activated sludge rheology, hygienization and methane potential[J]. *Water Research*, 2014, **61**: 119-129.
- [2] Guo J B, Fu X, Baquero A, et al. Trade-off between carbon emission and effluent quality of activated sludge processes under seasonal variations of wastewater temperature and mean cell retention time[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **547**: 331-344.
- [3] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰, 等. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [4] 顾升波, 王淑莹, 彭永臻. 短程深度脱氮中试工艺的低温启动和维持[J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 3164-3170.
Gu S B, Wang S Y, Peng Y Z. Start-up and maintenance method for short-cut advanced nitrogen removal process in a pilot-scale reactor at low temperature[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 3164-3170.
- [5] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, et al. Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration [J]. *Bioresour Technol*, 2012, **126**: 283-289.
- [6] 于莉芳, 傅学焄, 杨秀玲, 等. 2 种温度下污泥水富集硝化菌的对比[J]. *环境工程学报*, 2018, **12**(1): 102-109.
Yu L F, Fu X T, Yang X L, et al. Comparison of nitrifier accumulation in sludge liquor treatment system at two different temperatures[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, **12**(1): 102-109.
- [7] 曾涛涛, 蒋小梅, 韩科昌, 等. 生活污水处理厂微生物群落结构解析[J]. *安全与环境学报*, 2018, **18**(2): 697-703.
Zeng T T, Jiang X M, Han K C, et al. Analysis of microbial community constituent composition of some sewage treatment and processing plant[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2018, **18**(2): 697-703.
- [8] 宋云龙, 张金松, 朱佳, 等. 基于高通量测序的微生物强化污泥减量工艺中微生物群落解析[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2099-2107.
Song Y L, Zhang J S, Zhu J, et al. Analysis of microbial community in in-situ sludge reduction process by bioaugmentation using high-throughput sequencing technology [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2099-2107.
- [9] 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.
- [10] 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. 210-285.
- [11] Chao A N, Shen T J. Nonparametric prediction in species sampling [J]. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 2004, **9**(3): 253-269.
- [12] 于雪, 孙洪伟, 李维维, 等. 温度对硝化杆菌 (*Nitrobacter*) 活性动力学影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1426-1430.
Yu X, Sun H W, Li W W, et al. Effect of temperature on the activity kinetics of *nitrobacter*[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1426-1430.
- [13] 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 等. 温度对 ABR-MBR 复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3466-3472.
Wu P, Lu S J, Xu L Z, et al. Effects of temperature on combined process of ABR and MBR for domestic sewage treatment and analysis of microbial community[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3466-3472.
- [14] Ida T, Kugimiya M, Takahashi R, et al. Phylogenetic relationships among ammonia-oxidizing bacteria as revealed by gene sequences of glyceraldehyde 3-phosphate dehydrogenase and phosphoglycerate kinase [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, **99**(6): 569-576.
- [15] Nogueira R, Melo L F. Competition between *Nitrospira* spp. and *Nitrobacter* spp. in nitrite-oxidizing bioreactors [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, **95**(1): 169-175.
- [16] Marin B, Nowack E C, Glöckner G, et al. The ancestor of the *Paulinella chromatophore* obtained a carboxysomal operon by horizontal gene transfer from a *Nitrococcus*-like γ -proteobacterium [J]. *BMC Evolutionary Biology*, 2007, **7**(1): 85.
- [17] 包鹏, 王淑莹, 高瑶远, 等. 利用高通量测序技术分析不同溶解氧条件下硝化活性污泥的菌群结构特性[J]. *北京工业大学学报*, 2017, **43**(5): 801-808.
Bao P, Wang S Y, Gao Y Y, et al. Effect of dissolved oxygen on microbial community of nitrify activated sludge based on high-throughput sequencing technology [J]. *Journal of Beijing*

- University of Technology, 2017, **43**(5): 801-808.
- [18] 王腾旭, 马星宇, 王萌萌, 等. 中高温污泥厌氧消化系统中微生物群落比较[J]. 微生物学通报, 2016, **43**(1): 26-35.
Wang T X, Ma X Y, Wang M M, *et al.* A comparative study of microbial community compositions in thermophilic and mesophilic sludge anaerobic digestion systems [J]. *Microbiology China*, 2016, **43**(1): 26-35.
- [19] 闫媛, 黎力, 王亚宜, 等. 采用高通量测序分析全程自养脱氮(CANON)系统不同脱氮效能下的微生物群落结构[J]. 北京工业大学学报, 2015, **41**(10): 1485-1492.
Yan Y, Li L, Wang Y Y, *et al.* Microbial community characteristics of a completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) system based on high-throughput sequencing technology [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(10): 1485-1492.
- [20] Fernandes H, Jungles M K, Hoffmann H, *et al.* Full-scale sequencing batch reactor (SBR) for domestic wastewater: Performance and diversity of microbial communities [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **132**: 262-268.
- [21] 张冰, 吴林蔚, 文湘华. 全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3699-3705.
Zhang B, Wu L W, Wen X H. Potential source environments for microbial communities in wastewater treatment plants (WWTPs) in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3699-3705.
- [22] 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.
- [23] 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 等. 活性污泥中硝化螺菌(*Nitrospira*)的富集及其动力学参数[J]. 环境科学, 2017, **38**(12): 5201-5207.
Yao Q, Peng D C, Zhao Q D, *et al.* Enrichment of *nitrospira* in activated sludge and kinetic characterization [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5201-5207.
- [24] 王越, 李秋芬, 张艳. 嗜碱盐单胞菌 X3 中异化型硝酸盐还原酶编码基因簇的功能验证及蛋白结构预测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, **49**(4): 33-40.
Wang Y, Li Q F, Zhang Y. Function verification and protein structure prediction of gene cluster narGYJV encoding dissimilatory nitrate reductase in *Halomonas alkaliphila* X3 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2019, **49**(4): 33-40.
- [25] Wang T, Li J, Zhang L H, *et al.* Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at high concentrations of NaCl and ammonia nitrogen by *Halomonas* bacteria [J]. *Water Science and Technology*, 2017, **76**(2): 386-395.
- [26] Niu H J Y, Leung D Y, Wong C, *et al.* Nitric oxide removal by wastewater bacteria in a biotrickling filter [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(3): 555-565.

环境科学

CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM _{2.5} During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO ₂) Combined with Biochar	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i>	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N ₂ O Emissions from Saline Soil	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)