

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源: 基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法: 以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响

于莉芳^{1,2}, 汪宇¹, 滑思思¹, 李韧¹, 张兴秀¹, 惠晓飞¹

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 为考察进水氨氧化菌(AOB)对活性污泥系统的季节性影响, 对未设置初沉池的西安市第二污水处理厂中进水及活性污泥的氨氧化活性及群落结构进行长期调查分析. 结果表明, 进水及活性污泥的比氨氧化速率(SAUR)分别为 $0.48 \sim 3.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $0.68 \sim 2.25 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 相关性分析结果显示进水 SAUR 与次月活性污泥 SAUR 高度相关 ($r = 0.862, P < 0.05$), 表明进水硝化菌对活性污泥硝化性能有显著影响. 根据硝化活性计算的进水 AOB 对活性污泥的接种强度为 $0.21 \sim 0.92 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 因此, 在优化活性污泥模型及污水厂设计时, 有必要考虑到进水硝化菌的迁移作用. qPCR 结果显示, 进水及活性污泥中 AOB 丰度分别为 $1.32 \times 10^8 \sim 2.36 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1.12 \times 10^{10} \sim 1.19 \times 10^{10} \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, 而冬季活性污泥中 AOB 丰度虽有降低, 但仍保持在 $10^{10} \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, 这说明进水硝化菌的迁移能缓解因温度降低而导致的活性污泥硝化菌丰度下降. Illumina MiSeq 测序结果表明, 进水和活性污泥中具有共同的优势 AOB, 分为 *Nitrosomonas* sp. Nm58、*Nitrosomonas* sp. J121 和 bacterium CYCU-0253.

关键词: 进水硝化菌; 城市污水; 硝化性能; 群落结构; 相关性分析

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1923-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008075

Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System

YU Li-fang^{1,2}, WANG Yu¹, HUA Si-si¹, LI Ren¹, ZHANG Xing-xiu¹, HUI Xiao-fei¹

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology, Ministry of Education, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: The specific ammonia uptake rates (SAUR) and ammonia oxidizing bacteria (AOB) community of influent sewage and activated sludge in the 2nd wastewater treatment plant (WWTP) of Xi'an without the primary settling tank were analyzed over multiple years to explore the seasonal effects of the influent AOB on the activated sludge systems. During the experiment, the SAUR of the raw sewage and activated sludge were $0.48 \sim 3.02 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ and $0.68 \sim 2.25 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Meanwhile, the correlation analysis indicated that the monthly SAUR of the raw sewage was highly correlated with that of the activated sludge of the following month ($r = 0.862, P < 0.05$), which indicated that influent nitrifiers had a significant effect on the nitrification performance of activated sludge. Considering that the estimated AOB seeding intensities based on the ammonia oxidizing activity were $0.21 \sim 0.92 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, the nitrifier immigration from the raw sewage should be added to the design of WWTP and the activated sludge modeling. Moreover, the qPCR results revealed that the AOB abundance of activated sludge in winter decreased but remained at $10^{10} \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$, indicating that the immigration of influent nitrifiers could partially compensate for the reduction of the AOB abundance in the activated sludge caused by decreasing temperatures. Finally, the Illumina MiSeq sequencing demonstrated that the shared dominant AOB between the raw sewage and activated sludge were *Nitrosomonas* sp. Nm58, *Nitrosomonas* sp. J121, and bacterium CYCU-0253. These findings can provide theoretical support for the design and operation of a WWTP.

Key words: influent nitrifiers; municipal sewage; nitrification performance; community structure; correlation analysis

已有研究表明,城市污水处理厂进水中存在大量的活性硝化菌^[1~3]. Frigon 等^[4]的研究发现,进水硝化菌在迁移至活性污泥后仍能恢复硝化性能, Duan 等^[5]的研究发现进水硝化菌的迁移会引起系统短程硝化失效, Yu 等^[6]的研究证明进水硝化菌可以有效提高活性污泥硝化速率; Saunders 等^[7]的研究比较了3个污水厂进水与活性污泥中硝化菌,发现二者具有相似的群落结构,并认为硝化菌的选择机制在污水管网中就已经开始. 以上研究说明进水

硝化菌对活性污泥系统具有接种且强化活性污泥系统硝化性能的潜力. 但目前这些研究仅对进水硝化菌是否具有活性,其与活性污泥硝化菌群落结构是否相似进行调查. 在城市污水处理厂实际运行过程中,由于硝化菌对温度变化敏感,曝气池中硝化菌活

收稿日期: 2020-09-04; 修订日期: 2020-09-29

基金项目: 陕西省自然科学基金项目(2020JM-474); 陕西省重点研发计划项目(2019ZDLDF0605)

作者简介: 于莉芳(1981~),女,博士,副教授,主要研究方向为废水生物处理, E-mail: yulifang@xauat.edu.cn

性与群落结构随季节规律性变化,并且冬季硝化效率是曝气池容积设计的限制因素.然而,进水硝化菌对活性污泥系统硝化性能与群落结构的季节性变化规律之间是否具有相关性,进水硝化菌的迁移能否减缓季节性温度变化对活性污泥系统的影响,这些问题有待进一步研究.

本研究在未设置初沉池的西安市第二污水处理厂中,对其进水和活性污泥中氨氧化菌(AOB)的硝化性能和群落结构进行长达 12 个月的调查分析.研究进水和活性污泥的比氨氧化速率(SAUR)的季节性变化,并通过活性计算进水 AOB 对活性污泥系统的接种强度;采用 qPCR 检测进水与活性污泥 AOB 的丰度变化,揭示进水硝化菌对活性污泥系统的影响;同时,通过 Illumina MiSeq 测序比较进水和活性污泥系统中 AOB 的群落结构,以期优化污水处理厂设计与运行提供一定的理论支持.

1 材料与方法

1.1 实验样品

考虑到城市污水处理厂中初沉池污泥停留时间较长,进水硝化菌可能会在初沉池中被分离^[8],因此本实验样品取自未设置初沉池的西安市第二污水处理厂.西安市第二污水处理厂是西安市服务范围最大的污水处理系统,其污水管网的水量大约为 50 万 m³·d⁻¹,污水在管网中的平均停留时间约为十几个小时,高于该厂曝气池水力停留时间.

实验所用进水样品及活性污泥样品分别取自细格栅出水处及多段多级 AAO 好氧池末端.设置取样周期为每月一次(每月 10 日),并在相同时间段(09:30~12:00)进行取样,雨天则推迟 3 d 取样.

1.2 比氨氧化速率(SAUR)及接种强度测定

取进水样品 10 L,多次浓缩后用去离子水清洗 3 次以去除样品中残余基质(5 000 r·min⁻¹, 5 min),重悬至 1 000 mL 后用于氨氧化速率(AUR)的测定.取适量活性污泥样品直接进行离心操作,其预处理步骤与进水样品相同. AUR 采用耗氧速率法(OUR)在(20±1)℃条件下测定,具体方法见文献[9],并定义 AUR 与混合液挥发性悬浮固体浓度(MLVSS)的比值为比氨氧化速率(SAUR).

进水硝化菌对活性污泥系统的接种强度计算公式^[6]如下:

$$q_{\text{seed}} = \frac{Q_{\text{in}} \cdot X_{\text{RS}}}{V \cdot X_{\text{AS}}} = \frac{Q_{\text{in}} \cdot \text{AUR}_{\text{RS}}}{V \cdot \text{AUR}_{\text{AS}}} \quad (1)$$

式中, q_{seed} 为硝化菌连续接种强度, g·(g·d)⁻¹; Q_{in} 为城市污水处理厂的平均日进水量, L·d⁻¹; X_{RS} 为污水厂进水中硝化菌浓度, mg·L⁻¹; V 为城市污水

处理厂生物反应池容积, L; X_{AS} 为活性污泥中硝化菌浓度, mg·L⁻¹; AUR_{RS} 为进水硝化菌氨氧化活性, mg·(L·h)⁻¹; AUR_{AS} 为活性污泥硝化菌氨氧化活性, mg·(L·h)⁻¹.

1.3 群落结构测定

1.3.1 定量 PCR(qPCR)

取适量浓缩后的进水污泥和活性污泥样品(1.2 节)于 4℃ 下 10 000 r·min⁻¹ 离心 5 min, 弃上清液后置于 -20℃ 下密封保存. DNA 提取步骤及纯度鉴定方法见文献[10]. 采用 qPCR 技术对进水和活性污泥中 AOB(目标基因为 *amoA*) 进行定量分析, 正向引物为 *amoA-1F*(GGGGTTTCTACTGCTGCT), 反向引物为 *amoA-2R*(CCCCTCTGCAAAGCCTTCTTC), 具体 qPCR 扩增体系构建及扩增条件见文献[10]. 根据 Harms 等^[11] 的研究, 拷贝数与细胞数的比例为 2:1, 将 qPCR 所得拷贝数按比例转换为细胞数.

1.3.2 Illumina MiSeq 高通量测序

从 2% 琼脂糖凝胶中提取 PCR 产物, 用 AxyPrepDNA 凝胶回收试剂盒(AXYGEN 公司, 美国)进行纯化, 将 PCR 产物用 QuantiFlour^{MT}-ST 蓝色荧光定量系统(Promega 公司, 美国)进行检测定量, 之后按照每个样本的测序量要求, 进行相应比例的混合. 构建 MiSeq 文库, 通过 Illumina MiSeq PE300 平台进行测序. 对得到的原始数据进行质量控制, 并按照 barcode 标签序列识别并区分样品得到有效数据, 获得最终用于分析的序列. 应用 Qiime 软件根据序列相似度获得操作分类单元(OTU), 采用 Usearch 软件设置 97% 的相似性, 进行分类学分析, 在各个分类水平上统计样品的群落组成.

1.4 相关性分析

采用 SPSS 23.0 软件对实验数据进行统计学分析, 用 r 表示皮尔逊相关性系数, 当 $0 < r < 1$ 代表两变量正相关, $-1 < r < 0$ 代表两变量负相关. 其中, $|r| \geq 0.8$ 时, 代表两变量高度相关; $0.5 \leq |r| \leq 0.8$ 时, 代表两变量中度相关; $0.3 \leq |r| \leq 0.5$ 时, 代表两变量低度相关; $|r| < 0.3$ 时, 代表两变量相关性弱. 当显著性水平 $P < 0.05$, 代表两变量具有显著相关性.

2 结果与讨论

2.1 进水与活性污泥硝化性能相关性分析

图 1 为进水和活性污泥比氨氧化速率(SAUR)及温度的历时变化. 如图 1(a) 所示, 进水和活性污泥的 SAUR 分别为 0.48~3.02 mg·(g·h)⁻¹ 和 0.68~2.25 mg·(g·h)⁻¹, 从 1~12 月总体呈先下降后上

升的趋势,相关性分析结果表明,进水与次月活性污泥 SAUR 高度相关 ($r = 0.862, P < 0.05$),即进水 AOB 活性会对次月活性污泥的硝化性能有显著影响。

由图 1(b) 可得,冬季进水 SAUR [$(2.19 \pm 0.53) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 明显高于夏季 [$(0.77 \pm 0.25) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]. AOB 生长及活性受环境因素影响,如温度、溶解氧和 pH 等. 污水管道中氨氮充足, pH 在 7~8 之间,溶解氧约为 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [12],由此看出溶解氧是污水管网中 AOB 生长及活性的主要限制因素,而污水管网中的溶解氧恢复主要依靠自然复氧,温度与水中自然复氧速率呈负相关 [13]. 如图 1(b) 所示,冬季进水温度为 $(15.4 \pm 0.71)^\circ\text{C}$, 低于夏季进水温度 (22°C),从而导致冬季自然复氧速率高于夏季,因此冬季进水 SAUR 较高. 此外,秋、冬季进水 SAUR 分别为 $(1.14 \pm 0.45) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(2.19 \pm 0.53) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 高于同期活性污泥,这可能是由于污水管道常年埋在冻土层下方,在秋冬季节,管道中的水温高于曝气池水温,从而导致秋冬季进水 SAUR 高于同期活性污泥。

值得一提的是,冬季活性污泥 SAUR 为 $(2.11 \pm 0.73) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 明显高于春季 [$(1.93 \pm 0.18) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$] 和夏季 [$(1.13 \pm 0.33) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$]. 而多数研究表明城市污水处理厂冬

季 AOB 活性通常较低,容易导致出水氨氮上升 [14~16],造成这一矛盾可能有两方面原因:其一,正常运行的污水处理系统中,曝气池中硝化菌增殖速率的主要限制因素是氮浓度,且冬季与夏季氮负荷差异不大,硝化菌产率系数一致,但是夏季硝化菌衰减系数更大;其二,由于西安市第二污水处理厂未设置初沉池,使得绝大多数的进水硝化菌得以迁移至活性污泥系统中,起到强化硝化的作用. Duan 等 [5] 的研究同样指出,污水处理厂中初沉池的设置与否很大程度上会影响进水硝化菌的迁移效率. 迁移效率的高低表示进水硝化菌进入曝气池浓度的大小. Yu 等 [6] 研究进水硝化菌的迁移对活性污泥系统的影响,分别在 2 个序批式反应器 (SBR) 中以无菌污水 (对照组) 及含菌污水 (实验组) 为进水,结果表明实验组中的氨氧化活性是对照组的 1.15 倍. 这表明硝化菌的迁移能强化活性污泥系统硝化性能,进一步说明不设置初沉池的活性污泥系统硝化性能更强. 由图 1(b) 可知进水 SAUR 在冬季时最高,因此经进水硝化菌迁移后的活性污泥系统在冬季时的硝化性能也强于夏季。

综上可以推断,不设置初沉池可能更有利于强化污水处理厂冬季硝化活性,进水硝化菌的迁移能减缓季节性温度变化对活性污泥系统硝化性能的不利影响,但具有一定滞后性。

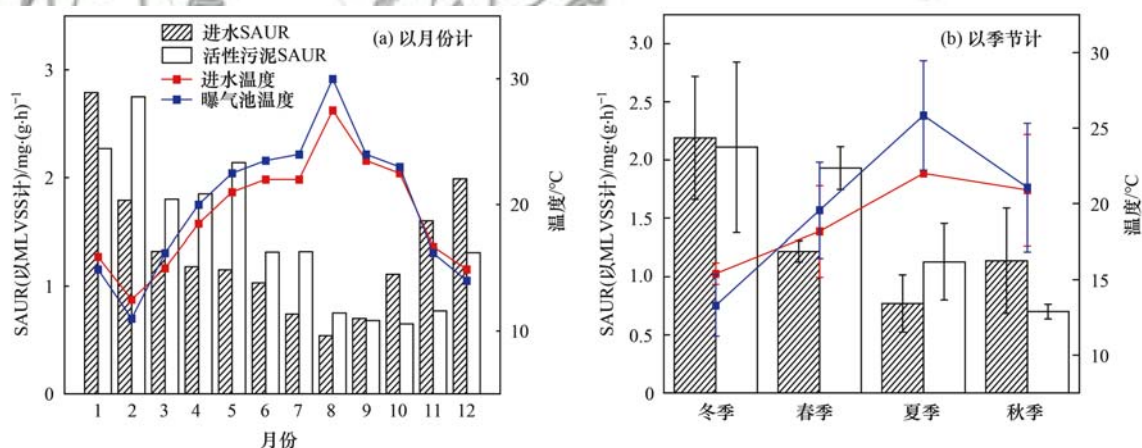


图 1 进水与活性污泥的 SAUR 及温度历时变化

Fig. 1 SAUR and temperature of raw sewage and activated sludge

2.2 进水氨氧化菌对活性污泥的接种强度

接种强度是衡量进水硝化菌对活性污泥系统影响的重要指标之一,采用式(1)计算进水 AOB 对活性污泥系统的接种强度,结果如图 2 所示. AOB 接种强度为 $0.21 \sim 0.92 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 平均接种强度为 $0.475 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 研究结果与蒙特利尔 LaPrairie 污水处理厂中进水硝化菌的接种强度类似 [$0.3 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$] [1]. 通常认为温度对接种强度有明显地

影响 [9], 分别对进水温度、曝气池温度与接种强度进行相关性分析,结果显示进水及曝气池温度与次月接种强度呈中度相关 ($r = 0.722, P < 0.05$; $r = 0.667, P < 0.05$). 这可能存在两方面原因,其一,进水温度较低时,污水管网中溶解氧浓度较高,进水硝化菌活性较大,经迁移后强化次月活性污泥硝化性能;其二,活性污泥中氨氮浓度受限,硝化菌产率系数一致,但在低温下硝化菌衰减系数较小,同样能在

次月表现出较大的活性。

值得一提的是,接种强度会影响污水处理厂最低污泥龄的设计^[17],以夏季 $[(0.43 \pm 0.05) \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 与冬季 $[(0.35 \pm 0.11) \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}]$ 的接种强度为例,根据 Jauffur 等^[1]的研究计算得出夏季最低污泥龄在理论上可以减少 0.39d,冬季最低污泥龄在理论上能减少 0.87 d,而最低污泥龄是生物脱氮系统曝气池容积设计的关键性因素^[18].由此可见,在活性污泥模型及污水厂工艺的设计优化中,有必要考虑到进水硝化菌的迁移对活性污泥系统的影响,特别是初沉池的设计会影响进水硝化菌的迁移效率。

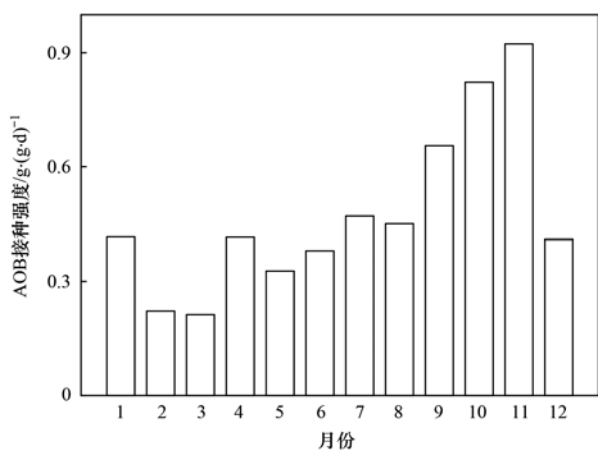


图2 进水 AOB 对活性污泥系统连续接种强度的历时变化

Fig. 2 Continuous seeding intensity of influent AOB to activated sludge

2.3 进水与活性污泥中硝化菌的丰度

采用 qPCR 技术对不同月份中进水和活性污泥的 AOB 丰度进行检测. 由图 3 可知,进水 AOB 丰度为 $1.32 \times 10^8 \sim 2.36 \times 10^9 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$,活性污泥 AOB 丰度为 $1.12 \times 10^{10} \sim 1.19 \times 10^{10} \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$. 进水 AOB 丰度较高是因为污水管道中是微氧环境^[12],污水在管道中停留时间较长且温度相对稳定,这为硝化菌的大量增殖创造了有利条件. 有关城市污水厂硝化菌丰度的研究中,处理水量与本研究取样水厂相似,但工艺流程中设有初沉池,其活性污泥系统中 AOB 丰度仅为 $10^8 \sim 10^9 \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[19,20]. 由此可推测,初沉池的设计会对进水硝化菌的迁移产生影响,并且进水硝化菌会对活性污泥系统硝化菌丰度做出贡献. 值得一提的是,进水及活性污泥中 AOB 丰度并不与其 SAUR 相对应,这可能是因为污水管网及活性污泥中, AOB 生长及活性都受到一定抑制,从而导致其活性与丰度不能相互对应^[21].

此外,活性污泥在夏季时的 AOB 丰度略高于秋冬季节. 理论上,硝化菌属于自养菌,增殖速率较慢,且易受温度的影响而产生数量波动^[22],尤其是在秋

冬季节活性污泥中硝化菌丰度可能会因温度降低而大幅下降. 在本研究中,秋冬季活性污泥 AOB 丰度虽有下降,但仍然保持在同一数量级上 ($10^{10} \text{ cells} \cdot \text{g}^{-1}$). 由此推断,进水硝化菌的迁移能缓解温度降低对活性污泥中硝化菌丰度的负面影响。

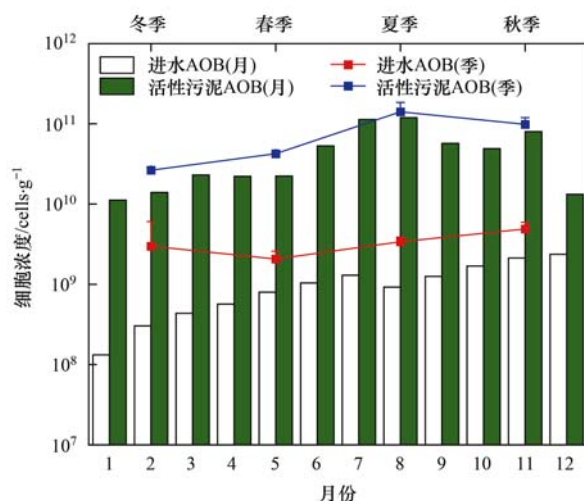


图3 进水与活性污泥 AOB 丰度的历时变化

Fig. 3 Abundance of AOB in raw sewage and activated sludge

2.4 进水 AOB 对活性污泥系统群落结构的影响

2.4.1 OTUs

从进水及活性污泥样品中 OTU 数来分析两者微生物多样性,具体结果如表 1 所示. 6 个进水样品及 6 个活性污泥样品中 AOB 有效 OTUs 分别在 126 ~ 280 和 104 ~ 116 范围内,这说明进水与活性污泥中 AOB 的生物多样性存在差异. 值得注意的是,各月份活性污泥样品中 OTUs 都低于进水样品,这是因为经过污水处理厂工艺条件的筛选,进水 AOB 中一些不适应曝气池环境的菌群被淘汰,从而导致活性污泥系统中生物多样性较低。

此外,每个月份中进水与活性污泥 AOB 中均具有一定的共有 OTUs (45 ~ 75),且共有 OTUs 在活性污泥中占比的范围为 40% ~ 50%,在进水中占比的范围为 15% ~ 30%,二者相关性分析结果表明,共有 OTUs 在进水中的占比与在活性污泥中的占比高度相关 ($r = 0.988, P < 0.05$),而每一类 OTUs 代表一类菌种^[23],因此,进水与活性污泥有相同的共有优势菌,且进水 AOB 的群落结构会显著影响活性污泥群落结构的形成. Frigon 等^[4]在研究污水厂进水硝化菌迁移理论中指出,硝化菌在污水处理厂中生物多样性较低,且竞争能力较弱,经迁移后的进水硝化菌能与活性污泥硝化菌进行竞争. 由此进一步推断,活性污泥群落结构的构建符合中性(迁移)理论,中性(迁移)理论遵循随机漂移的过程,微生物从一个群落迁移到另一个群落,认为具有相同生态功能的

物种具有中性竞争性,并考虑了出生、死亡和通过迁移的有限扩散的随机过程,以解释群落的组成和结构^[24~26]. Ofiteru 等^[27]研究 Palo Alto 污水厂细菌种群动态,结果表明 AOB 种群动态和丰度分布符合中性理论,并指出 AOB 群落结构可能是由中性(迁移)理论及生态位理论共同作用下构建的.

表 1 进水 AOB 和活性污泥 AOB 的多样性¹⁾
Table 1 Diversity of nitrifiers in raw sewage and activated sludge

进水样品	OTUs	活性污泥样品	OTUs	共有 OTUs	共有 OTUs 在活性污泥中占比/%	共有 OTUs 在进水中占比/%
RS2	212	AS2	116	58	50.00	27.36
RS4	264	AS4	104	45	43.27	17.05
RS6	280	AS6	112	55	49.11	19.64
RS8	126	AS8	107	75	70.09	59.52
RS10	223	AS10	109	53	48.62	23.77
RS12	234	AS12	109	52	47.71	22.22

1) 进水样品及活性污泥样品分别用 RS 及 AS 来表示,例如 2 月进水样品及活性污泥样品分别表示为 RS2 及 AS2; 共有 OTUs 表示进水及活性污泥样品中共同拥有的 OTUs; 共有 OTUs 在活性污泥中占比 = 共有 OTUs/活性污泥 OTUs; 共有 OTUs 在进水中占比 = 共有 OTUs/进水 OTUs

2.4.2 群落结构组成分析

在属和种水平上对测序结果进行归类,对比分析所取的 6 个进水与 6 个活性污泥样品在不同分类水平上的菌群组成及相对丰度,图 4 为进水和活性污泥 AOB 属水平群落结构组成. 其中, *Nitrosomonas* 菌属在进水和活性污泥中的相对丰度最高,为两者的共同优势菌属. 然而, *Nitrosomonas* 菌属在进水

AOB 中相对丰度为 38.3%~69.4%,而在活性污泥中相对丰度为 52.8%~89.7%. 刘文如等^[28]在研究不同溶解氧浓度下硝化菌群落结构变化中发现, *Nitrosomonas* 菌属在溶解氧较高的环境中相对丰度较高. 因此,污水管道与曝气池中环境因子的不同(如溶解氧和温度等环境因素)是造成进水和活性污泥中硝化菌相对丰度差异的重要原因.

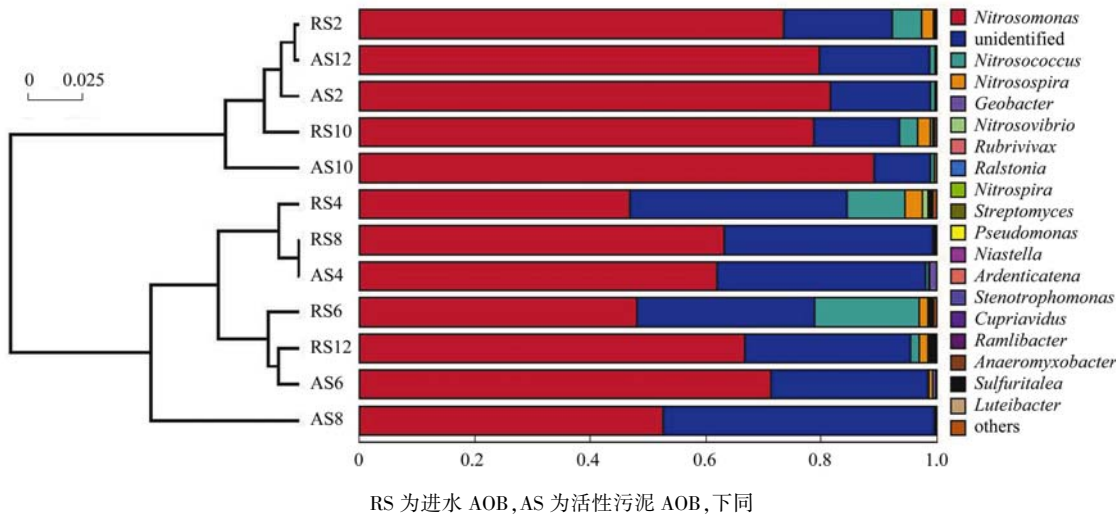


图 4 进水及活性污泥中 AOB 属水平群落结构

Fig. 4 Community structures of AOB in raw sewage and activated sludge by genus

进水与活性污泥 AOB 种水平群落结构组成如图 5 所示,进水和活性污泥 AOB 具有多种共同菌种,其中 *Nitrosomonas* sp. Nm58、*Nitrosomonas* sp. JL21 和 bacterium CYCU-0253 为两者共同的优势菌种. *Nitrosomonas* sp. Nm58 通常被认为广泛存在于下水道及低溶解氧的生物膜中^[29,30],因此城市污水处理厂进水中的 *Nitrosomonas* sp. Nm58 相对丰度较高. 然而如 *Nitrosococcus* sp. LT-3 存在于进水中却没有在活性污泥中被检测到, Ye 等^[31]对中国香港沙田污水处理厂进水和活性污泥等区域进行群落结构

分析后同样发现,进水中的一些菌群不会在活性污泥中增殖. 这表明进水硝化菌迁移至活性污泥系统后,受环境因子(如温度和溶解氧等)的影响而导致群落结构发生变化.

先前研究通常认为活性污泥群落结构的形成仅仅受环境因子(如温度和溶解氧等)的影响,并认为硝化菌的增殖仅来源于生物脱氮系统内部(如曝气池中),即通过生态位理论来解释活性污泥群落结构的形成并指导污水处理厂的设计. 本研究结果表明,在未设置初沉池的污水处理厂中,进水硝化菌与

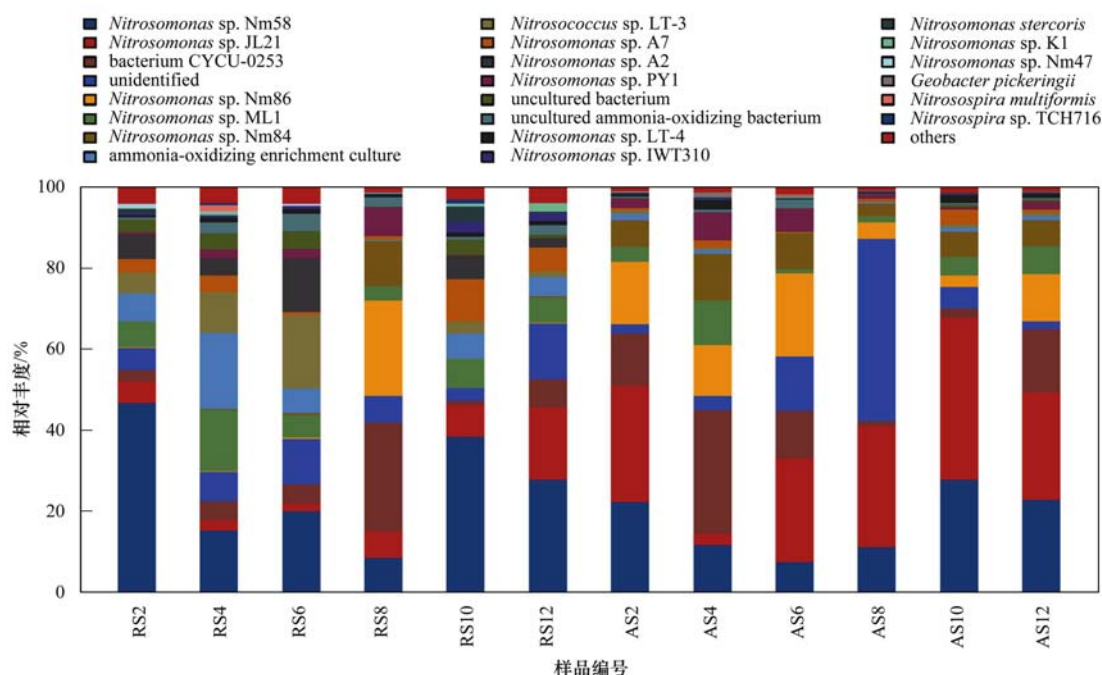


图5 进水及活性污泥中 AOB 种水平群落结构组成

Fig. 5 Community structures of AOB in raw sewage and activated sludge by species

活性污泥系统在硝化性能与群落结构方面有显著相关性,且由于活性污泥中硝化菌生物多样性较低,进水硝化菌能与活性污泥硝化菌进行中性竞争.因此,活性污泥群落结构的形成是中性(迁移)机制和生态机制共同作用的结果.

3 结论

(1)在未设置初沉池的污水处理厂中,进水硝化菌与活性污泥系统存在高度相关性,进水硝化菌的迁移能减缓秋冬季温度降低对活性污泥系统硝化性能不利的影响,但具有一定的滞后性.

(2)进水硝化菌的迁移能弥补季节性温度变化而引起的活性污泥硝化菌丰度降低,并起到接种作用,在活性污泥模型及污水处理厂设计中,应当考虑到进水硝化菌对活性污泥系统的影响.

(3)活性污泥硝化菌群落结构与进水硝化菌群落结构具有高度相关性,活性污泥群落结构的形成是中性(迁移)机制和生态机制共同作用的结果.

参考文献:

- [1] Jauffur S, Isazadeh S, Frigon D. Should activated sludge models consider influent seeding of nitrifiers? Field characterization of nitrifying bacteria[J]. Water Science & Technology, 2014, **70** (9): 1526-1532.
- [2] Chen G H, Leung D H W, Hung J C. Biofilm in the sediment phase of a sanitary gravity sewer[J]. Water Research, 2003, **37** (11): 2784-2788.
- [3] 金鹏康,王斌.城市污水管网对水质的生化改善特性[J].环境工程学报, 2016, **10**(7): 3401-3408.
- [4] Jin P K, Wang B. Improvement in biodegradability of wastewater quality in urban sewer system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(7): 3401-3408.
- [5] Frigon D, Wells G. Microbial immigration in wastewater treatment systems: analytical considerations and process implications[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2019, **57**: 151-159.
- [6] Duan H R, Ye L, Wang Q L, et al. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) contained in influent deteriorate mainstream NOB suppression by sidestream inactivation [J]. Water Research, 2019, **162**: 331-338.
- [7] Yu L F, Li R, Delatolla R, et al. Natural continuous influent nitrifier immigration effects on nitrification and the microbial community of activated sludge systems [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **74**: 159-167.
- [8] Saunders A M, Albertsen M, Vollertsen J, et al. The activated sludge ecosystem contains a core community of abundant organisms[J]. The ISME Journal, 2016, **10**(1): 11-20.
- [9] 张潇,赵博玮,岳秀萍.取消初沉池对 AAO 工艺活性污泥微生物结构的影响[J].工业水处理, 2019, **39**(6): 30-34.
- [10] Zhang X, Zhao B W, Yue X P. Influences of canceling primary settling tanks on the microbial structure of activated sludge in AAO process [J]. Industrial Water Treatment, 2019, **39**(6): 30-34.
- [11] 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,等.城市污水中硝化菌群落结构与性能分析[J].环境科学, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- [12] Yu L F, Du Q Q, Fu X T, et al. Community structure and activity analysis of the nitrifiers in raw sewage of wastewater treatment plants[J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- [13] 李韧,于莉芳,张兴秀,等.硝化生物膜系统对低温的适应性:MBBR 和 IFAS[J].环境科学, 2020, **41**(8): 3691-3698.
- [14] Li R, Yu L F, Zhang X X, et al. Adaptability of nitrifying biofilm systems to low temperature: MBBR and IFAS [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3691-3698.
- [15] Harms G, Layton A C, Dionisi H M, et al. Real-time PCR quantification of nitrifying bacteria in a municipal wastewater

- treatment plant [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(2): 343-351.
- [12] Jin P K, Wang B, Jiao D, *et al.* Characterization of microflora and transformation of organic matters in urban sewer system[J]. *Water Research*, 2015, **84**: 112-119.
- [13] 张自杰. 排水工程-下册[M]. (第五版). 北京: 建筑工业出版社, 2015. 113-135.
- [14] 陈翰, 马放, 李昂, 等. 低温条件下污水生物脱氮处理研究进展[J]. *中国给水排水*, 2016, **32**(8): 37-43.
Chen H, Ma F, Li A, *et al.* Research progress in biological nitrogen removal from wastewater under low temperature condition [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, **32**(8): 37-43.
- [15] 韩文杰, 吴迪, 周家中, 等. 长三角地区 IFAS 污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(11): 5037-5049.
Han W J, Wu D, Zhou J Z, *et al.* Microbial diversity analysis of WWTPs based on IFAS in low temperature season in Yangtze River delta [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(11): 5037-5049.
- [16] Delatolla R, Young B, Stintzi A. Application of the MBBR technology to achieve nitrification below 1°C: biofilm and microbiome analysis[A]. *Frontiers in Wastewater Treatment and Modelling*[C]. Cham: Springer, 2017. 513-517.
- [17] 于莉芳, 滑思思, 莫鹏程, 等. 原生硝化菌对活性污泥系统影响研究进展[J]. *工业水处理*, 2019, **39**(11): 12-16.
Yu L F, Hua S S, Mo P C, *et al.* Research progress on the effect of natural nitrifier immigration on the activated sludge system[J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, **39**(11): 12-16.
- [18] 李卫平, 韩剑宏, 延克军. 曝气池容积计算方法分析[J]. *环境工程*, 2004, **22**(4): 24-25.
Li W P, Han J H, Yan K J. Analysis of the calculative ways of aeration tanks' volumes [J]. *Environmental Engineering*, 2004, **22**(4): 24-25.
- [19] 曾薇, 张丽敏, 王安其, 等. 污水处理系统中硝化菌的菌群结构和动态变化[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(11): 3257-3265.
Zeng W, Zhang L M, Wang A Q, *et al.* Community structures and population dynamics of nitrifying bacteria in activated sludges of wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(11): 3257-3265.
- [20] Kayee P, Sonthiphand P, Rongsayamanont C, *et al.* Archaeal *amoA* genes outnumber bacterial *amoA* genes in municipal wastewater treatment plants in Bangkok [J]. *Microbial Ecology*, 2011, **62**(4): 776-788.
- [21] Liu W L, Yang Q, Ma B, *et al.* Rapid achievement of nitrification using aerobic starvation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(7): 4001-4008.
- [22] 尚越飞, 王申, 宗倪, 等. 污水生物处理工艺低温下微生物种群结构[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4636-4643.
Shang Y F, Wang S, Zong N, *et al.* Microbial community structure for sewage wastewater treatment plants in winter [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4636-4643.
- [23] 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.
- [24] Mei R, Liu W T. Quantifying the contribution of microbial immigration in engineered water systems [J]. *Microbiome*, 2019, **7**(1): 144.
- [25] 牛克昌, 刘恽宁, 沈泽昊, 等. 群落构建的中性理论和生态位理论[J]. *生物多样性*, 2009, **17**(6): 579-593.
Niu K C, Liu Y N, Shen Z H, *et al.* Community assembly: the relative importance of neutral theory and niche theory [J]. *Biodiversity Science*, 2009, **17**(6): 579-593.
- [26] 周淑荣, 张大勇. 群落生态学的中性理论[J]. *植物生态学报*, 2006, **30**(5): 868-877.
Zhou S R, Zhang D Y. Neutral theory in community ecology [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, **30**(5): 868-877.
- [27] Ofiteru I D, Lunn M, Curtis T P, *et al.* Combined niche and neutral effects in a microbial wastewater treatment community [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(35): 15345-15350.
- [28] 刘文如, 顾广发, 宋小康, 等. 不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3706-3712.
Liu W R, Gu G F, Song X K, *et al.* Comparison of the microbial community structure in nitrifying processes operating with different dissolved oxygen concentrations [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3706-3712.
- [29] Purkhold U, Pommerening-Roser A, Juretschko S, *et al.* Phylogeny of all recognized species of ammonia oxidizers based on comparative 16S rRNA and *amoA* sequence analysis; Implications for molecular diversity surveys [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(12): 5368-5382.
- [30] Park H D, Noguera D R. Characterization of two ammonia-oxidizing bacteria isolated from reactors operated with low dissolved oxygen concentrations [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2007, **102**(5): 1401-1417.
- [31] Ye L, Zhang T. Bacterial communities in different sections of a municipal wastewater treatment plant revealed by 16S rDNA 454 pyrosequencing [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, **97**(6): 2681-2690.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Huai-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)