

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



2019

Vol.40 No.8
第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM_{2.5}污染特征与浓度控制效果 张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)

北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)

合肥市PM_{2.5}和PM₁₀中元素组成特征及重污染成因分析 刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琬, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)

关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析 康宝荣, 刘立志, 刘焕武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)

长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源 吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)

中国城市扩张及空间特征变化对PM_{2.5}污染的影响 王桂林, 张炜 (3447)

不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM_{2.5}排放的影响 邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)

浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数 徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)

生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征 马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)

青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征 官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)

广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价 宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)

截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征 胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)

黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析 邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)

风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响 余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)

向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应 王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)

外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响 李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)

新疆喀什三角洲地下水SO₄²⁻化学特征及来源 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)

黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析 李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)

北京市河流秋季浮游动物群落特征分析 王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)

三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系 刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)

渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测 万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)

汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系 汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)

饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析 胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)

基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果 彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)

植被对绿色屋顶径流量和水质影响 章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)

光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制 范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)

多种材料对水中氨氮的吸附特性 焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)

不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响 常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)

3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程 刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)

铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制 韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)

缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)

连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响 薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)

FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制 马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)

ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件 董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)

全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析 张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比 刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)

异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析 杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)

Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现 高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)

高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N₂O产生特征 代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)

生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响 王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)

两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响 周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)

承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征 孙厚云, 卫晓锋, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)

厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析 张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)

宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析 张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)

铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果 林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)

铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用 周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)

生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响 刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)

有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响 汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)

土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响 罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)

宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响 高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)

不同浸提剂条件下生物炭溶解性有机物的浸出规律 何晶晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)

基于成组生物毒性测试的PM_{2.5}毒性 江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)

《环境科学》征订启事(3587) 《环境科学》征稿简则(3595) 信息(3611, 3705, 3745)

不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比

刘文如¹, 顾广发², 宋小康³, 杨殿海⁴

(1. 苏州科技大学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; 2. 苏州高新区浒墅关镇安全环保办公室, 苏州 215009; 3. 苏州净研环保科技有限公司, 苏州 215009; 4. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 运用高通量测序技术分析了不同溶解氧(DO)浓度下硝化工艺微生物种群结构。结果表明, 低氧硝化反应器(R_L , DO浓度为 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)比高氧硝化反应器[R_H , $\text{DO} = (2.0 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$]具有更高的种群多样性, 而 R_H 中微生物种群功能组织性更高。尽管 R_H 和 R_L 共有物种信息达85%以上, 但DO浓度的不同造成了单个物种在相对丰度上的显著差异。Proteobacteria门(80.7%)在 R_H 中被高度富集, 其中*Nitrosomonas*菌属相对丰度达到65.1%; 而在 R_L 中则以Proteobacteria(43.8%)、Firmicutes(20.0%)以及Bacteroidetes(15.1%)为共同主导者, 同时 R_L 中含有大量*Lactococcus*、*Anaerolineaceae*以及*Rhodocyclaceae*等可在厌氧或缺氧条件下进行水解发酵作用的菌属。*Nitrosomonas oligotropha*和*Nitrosomonas europaea*分别为 R_H 和 R_L 中优势氨氧化细菌, 而亚硝酸盐氧化细菌均以*Nitrospira defluvi*为主导。反应器中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度(而非DO浓度)是上述硝化菌群被选择性富集的关键因素。

关键词: 活性污泥; 硝化; 溶解氧; 微生物种群; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3706-07 DOI: 10.13227/j.hjx.201812117

Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations

LIU Wen-ru¹, GU Guang-fa², SONG Xiao-kang³, YANG Dian-hai⁴

(1. National & Local Joint Engineering Laboratory for Municipal Sewage Resource Utilization Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Safety and Environmental Protection Office of Xushuguan Town, Suzhou High-tech Zone, Suzhou 215009, China; 3. Suzhou Jingyan Environmental Protection Technology Co., Ltd., Suzhou 215009, China; 4. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: High-throughput sequencing was applied to analyze the microbial community structure of nitrifying reactors operated with different dissolved oxygen (DO) levels. Results showed that the nitrifying reactor (R_L) run with low DO ($0.2 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) exhibited greater microbial richness and diversity than the reactor run under the high DO condition [R_H , $\text{DO} = (2.0 \pm 0.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$]. In contrast, the microbial community in R_H was more highly functionally organized than that in R_L . Although the communities in R_H and R_L shared over 85% of the total sampled genetic information, the relative abundance of some individual species varied between the different DO conditions. Members of the Proteobacteria phylum, which accounted for 80.7% of the total microbes in R_H , were highly enriched, and the relative abundance of *Nitrosomonas* reached to 65.1%. However, the microbial community in R_L was dominated by Proteobacteria (43.8%), Firmicutes (20.0%), and Bacteroidetes (15.1%). In addition, a large fraction of bacteria possessing hydrolyzation and fermentation functions under anaerobic or anoxic conditions were also present in R_L including *Lactococcus*, *Anaerolineaceae*, and *Rhodocyclaceae*. As known ammonium-oxidizing bacteria, *Nitrosomonas oligotropha* and *Nitrosomonas europaea* were enriched in the R_H and R_L , respectively, while *Nitrospira defluvi*, being a nitrite-oxidizing bacteria, dominated both reactors. Rather than DO, ammonia and nitrite availability should be key factors in the selective enrichment of these nitrifiers.

Key words: activated sludge; nitrification; dissolved oxygen; microbial community; high-throughput sequencing

目前, 污水处理仍属于能耗密集型行业, 污水处理过程的节能降耗是污水处理厂实现可持续发展的一个重要环节。据统计, 现行市政污水处理厂有超过50%的能耗用于污水的好氧生物处理^[1]。特别地, 氨氮的硝化过程是污水好氧生物处理的重要组成部分, 为了保证良好的硝化效果, 现行污水处理厂在运行控制时一般维持硝化池中溶解氧(DO)浓度不低于 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[2]。

特定条件下(如氧分压、气压、水温及水质等), 硝化过程对供氧的要求主要取决于两个方面, 即微生物实际消耗量和氧传质效率^[3]。基于低DO

浓度条件下更高的氧传质效率(DO浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时氧传质效率比 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时提高16%^[4])和微生物细胞产率^[5], 有研究者致力于研究和开发低氧硝化工艺, 即在DO浓度不高于 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下完成硝化过程^[6, 7], 从而实现硝化反应能耗的节省。目前, 有关低氧硝化的研究主要

收稿日期: 2018-12-14; 修订日期: 2019-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51808367); 江苏省高等学校自然科学基金项目(18KJD610003); 城市生活污水资源化利用技术国家地方联合工程实验室开放课题项目(2018KF05)

作者简介: 刘文如(1987~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: liuwenru1987@126.com

集中在工艺效能、功能种群鉴定及其响应特征等方面^[6-10], 结果表明低氧硝化工艺虽然可以实现与高氧(DO 浓度 $>2.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 硝化工艺相似的硝化效能, 其涉及的硝化功能种群类别或代谢特征却与高氧硝化工艺有显著差异。

污水生物处理工艺(包括硝化工艺)作为多物种共存的复杂生态系统, 其所表现出的系统功能不仅受特定功能菌群的影响, 还与共存的其他物种有关^[11, 12]。如有研究证实活性污泥系统的功能稳定性与其所含微生物种群的多样性^[13, 14]和均匀性^[15]密切相关。DO 浓度作为硝化工艺一个重要的运行控制参数, 可以推测 DO 浓度变化不仅仅影响氨氧化细菌(AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(NO_B)的种类、数量和代谢特征, 亦会对系统中其他共存物种产生显著影响。了解低 DO 浓度下硝化工艺中微生物种群结构有助于深入掌握低氧硝化工艺的功能特征。遗憾的是, 现有研究对低氧硝化工艺中微生物种群结构及组成关注较少。

因此, 本研究借助高通量测序技术, 通过对分析不同 DO 浓度下硝化工艺中的微生物种群组成, 重点揭示低氧硝化工艺中的微生物结构特征, 以为低氧硝化工艺的开发和应用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验装置

如图 1 所示, 两个相同的全混式反应器(CSTR)并列运行, 每个反应器的反应区和沉淀区有效容积分别为 2.4 L 和 0.6 L。反应区底部装有曝气砂盘, 并连通空气泵用于反应区供氧, 曝气速率根据运行情况通过气体流量计进行调节, 保证两个反应器中 DO 浓度分别维持在 $0.2 \sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (R_L) 和 $(2.0 \pm 0.1) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (R_H)。反应区均设有机械搅拌装置, 搅拌强度控制在 $60 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 辅助实现进水与污泥的均匀混合。两反应器水力停留时间(HRT)和污泥停留时间(SRT)均分别控制在 8 h 和 20 d。两反应器中 pH 均通过外加 NaHCO₃ 缓冲液维持在 7.5 左右。本研究期间, 整个反应器置于同一恒温水浴中, 反应器中温度在 $20 \sim 22^\circ\text{C}$ 。

1.2 试验用水及接种污泥

反应器进水为人工配制低浓度 NH₄⁺-N 污水(以 N 计约为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 具体组成如下: NH₄Cl $190 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (N 约 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), K₂HPO₄ $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CaCl₂·2H₂O $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MgSO₄·7H₂O $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以及 $1 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微量元素, 微量元素配方见文献^[16]。为了降低异养菌的影响, 所配制污水中不外加任何有机物质。接种污泥来源于某城市污水处理

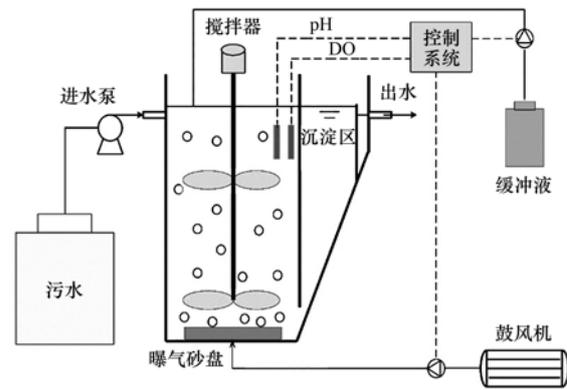


图 1 工艺装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

厂 A²O 工艺中的好氧池(污泥浓度约 $3.6 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 污泥 SVI 为 $95 \text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$), 该 A²O 工艺 SRT 为 10 d, HRT 为 8 h。接种后两反应器初始污泥浓度(以 MLVSS 计)均约为 $2.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.3 分析方法

NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、TN 和 MLSS/MLVSS 等水质指标分别按文献^[17]中规定的纳氏试剂光度法、N-(1-萘基)-乙二胺光度法、紫外分光光度法、过硫酸钾氧化法、重量法等进行测定; pH 由雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计测定; 温度和 DO 浓度采用哈希便携式溶解氧测定仪(HQ30d)分析; 污泥形态通过 OLYMPUS CX41 型显微镜及数码相机观察。

采用 Illumina PE250 测序平台进行生物信息学分析, 包括 DNA 抽提、PCR 扩增、PE 文库构建和 Illumina 测序, 具体分析步骤参见文献^[18]。

2 结果与讨论

2.1 反应器硝化效能及污泥形态

整个研究过程中, 两反应器均维持稳定的进水容积负荷[约为 $150 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$]。因 R_H 和 R_L 中 DO 浓度不同, 二者所表现出的硝化效能亦有不同。 R_H 中 NH₄⁺-N 去除率始终保持在约 100%, 即本研究期间 R_H 的硝化能力受进水负荷限制而维持在约 $150 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 对于 R_L , 因硝化菌活性受低氧环境抑制, R_L 的初始硝化效能较 R_H 显著下降, 即出水中较高浓度的 NH₄⁺-N 存在, 但持续运行约三周之后, R_L 中 NH₄⁺-N 去除负荷开始呈上升趋势, 第 70 d 时其数值达 $88.5 \text{ g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ (表 1)。需要指出的是, 本研究期间 R_H 和 R_L 中均无 NO₂⁻-N 累积的现象, 表明了单纯低氧控制难以用于短程硝化工艺的启动。

污泥表观特征观察结果也表明了不同溶氧条件下硝化污泥形态的不同。如图 2 所示, R_H 中污泥形态多以边缘清晰、结构致密的微聚体为主, 这亦

与其良好的污泥沉降性能 ($SVI = 82 \text{ mL} \cdot \text{g}^{-1}$) 相符; 而 R_L 中污泥形态则以松散且无规则构型的絮体为主. 污泥形态的不同表明了物质 (如 O_2) 传质阻力的不同^[19, 20], 即 R_L 中 DO 浓度较低 (O_2 扩散驱动力低), 松散的絮体结构有利于絮体内好氧微生物对 O_2 的获取. 需要指出的是, 不同于污泥微膨胀技术^[21], 本研究中长期低 DO 浓度下运行的 R_L 中并无丝状菌产生.

表 1 第 70 d 时 R_H 和 R_L 的运行状况

Table 1 Performance of the R_H and R_L reactors at day 70

项目	R_H	R_L
出水 $NH_4^+ -N/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.3	24.4
出水 $NO_2^- -N/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	<0.2	<0.5
出水 $NO_3^- -N/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	48.9	26.3
$NH_4^+ -N$ 去除负荷/ $\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	148.7	88.5

2.2 微生物种群多样性

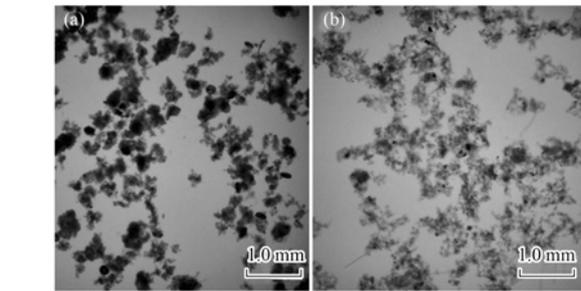
表 2 为第 70 d 时两反应器内细菌多样性的特征. 从 OUT 数以及 ACE 和 Chao1 指数可知 R_L 比

表 2 第 70 d 时 R_H 和 R_L 中细菌多样性指数

Table 2 Diversity estimators of the bacterial phylotypes in the R_H and R_L reactors at day 70

样品	OTU 数	ACE 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度/%
R_H	260	316	286	2.22	0.36	99.6
R_L	448	492	466	4.15	0.056	99.6

如前所述, 微生物种群与系统功能之间的关系除了与所含物种丰富度密切相关, 还受微生物组成的均匀性或功能组织性 (F_o) 显著影响^[15, 24]. 如 Wittebolle 等^[15] 指出的微生物种群的均匀性越高, 该系统在应对环境冲击时的功能稳定性越好. Pareto-Lorenz (PL) 曲线常被用于描述微生物种群的



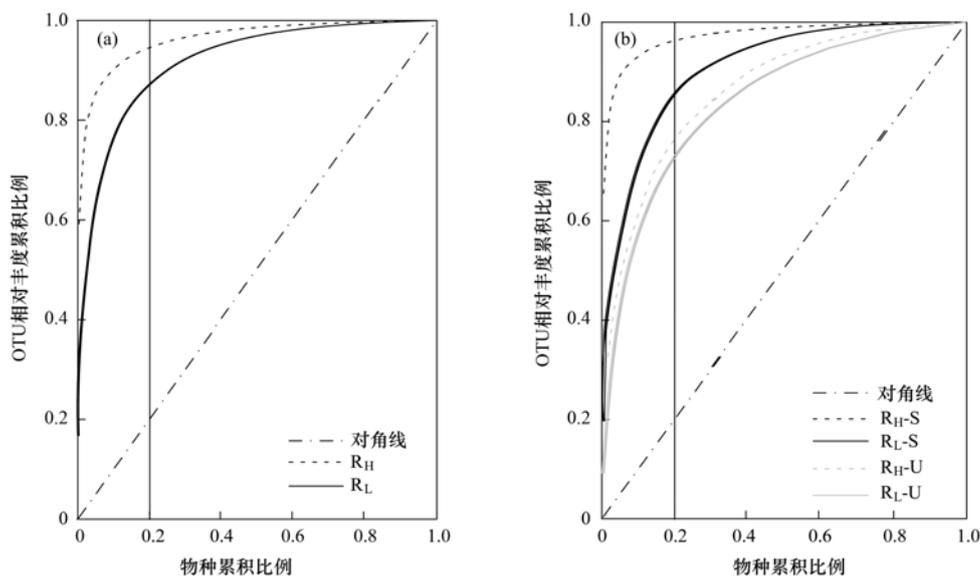
(a) R_H 中污泥形态; (b) R_L 中污泥形态

图 2 第 70 d 时的污泥形态

Fig. 2 Microscopic images of the sludge at day 70

R_H 具有更高的物种丰度; 由 Shannon 和 Simpson 指数也显示 R_L 中种群多样性显著高于 R_H . 低氧环境较高氧环境具有更高的物种多样性亦被其他研究者证实^[22, 23]. 正如 Girvan 等^[13] 报道: 高的物种多样性往往表明了该生物系统 (或工艺) 具有较高的功能稳定性. 因此, 成熟的低氧硝化工艺可能比高氧硝化工艺表现出更高的功能稳定性.

功能组织性特征, 如图 3 所示. 从中可以看出, 尽管两个反应器中的微生物种群都具有较好的功能组织性 ($F_o > 0.8$), 但 R_L 与 R_H 相比仍然表现出更好的微生物组成均匀性, 尤其针对二者共有的物种 [图 3(b)]. 因此, 基于上述结果可以推测低氧条件下运行的硝化工艺其功能稳定性可能更高.



(a) R_H 和 R_L 中总 OTUs; (b) R_H 和 R_L 共有的 OTUs (R-S) 与独有的 OTUs (R-U)

图 3 R_H 和 R_L 中 OTUs 的 Pareto-Lorenz 曲线

Fig. 3 Pareto-Lorenz curves derived from R_H and R_L OTUs

2.3 微生物种群结构

图 4 显示了不同 DO 浓度条件下微生物种群在门分类水平上的组成特征. 两个反应器中总共包含 21 个可被鉴定的门类, 尽管从门的种类上来看, R_L 与 R_H 的微生物种群组成基本相同. 但是从单个门类的相对丰度或构成来看, R_L 与 R_H 中的微生物种群

组成存在显著的差异. 例如, R_H 中以 Proteobacteria 门为绝对优势种群, 其相对丰度占 R_H 中总物种的百分比高达 80.7%; 而在 R_L 中则以 Proteobacteria (43.8%), Firmicutes (20.0%) 以及 Bacteroidetes (15.1%) 为共同主导者. 因此, 从图 4 中亦可看出 R_L 中微生物种群组成比 R_H 更加丰富、均匀.

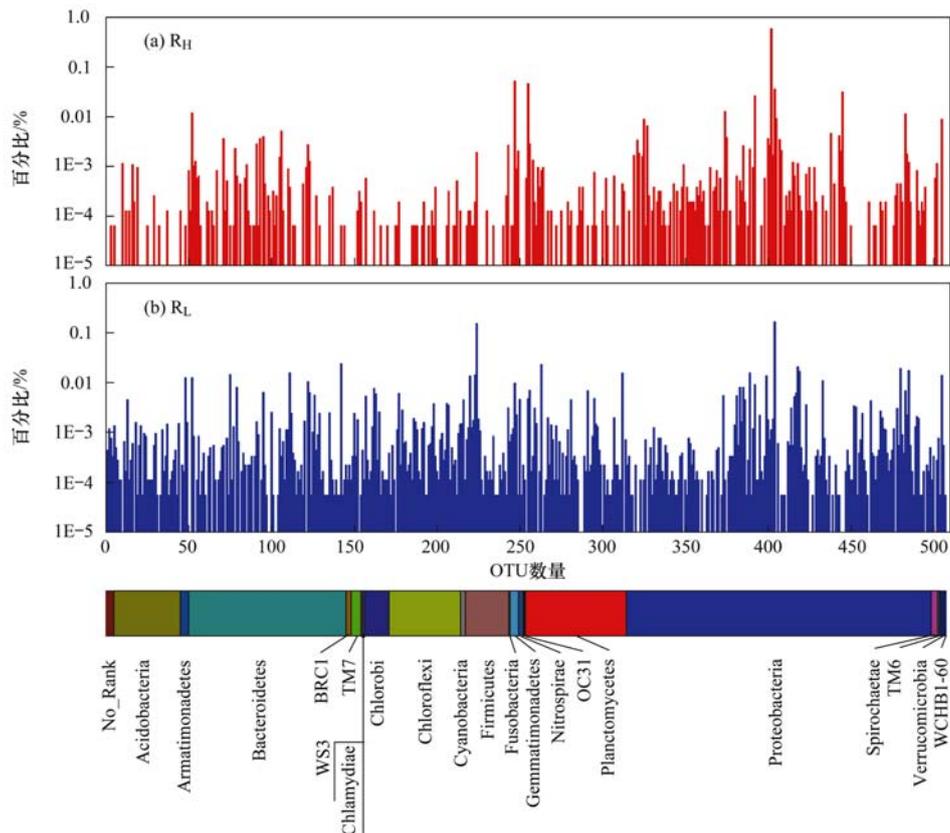


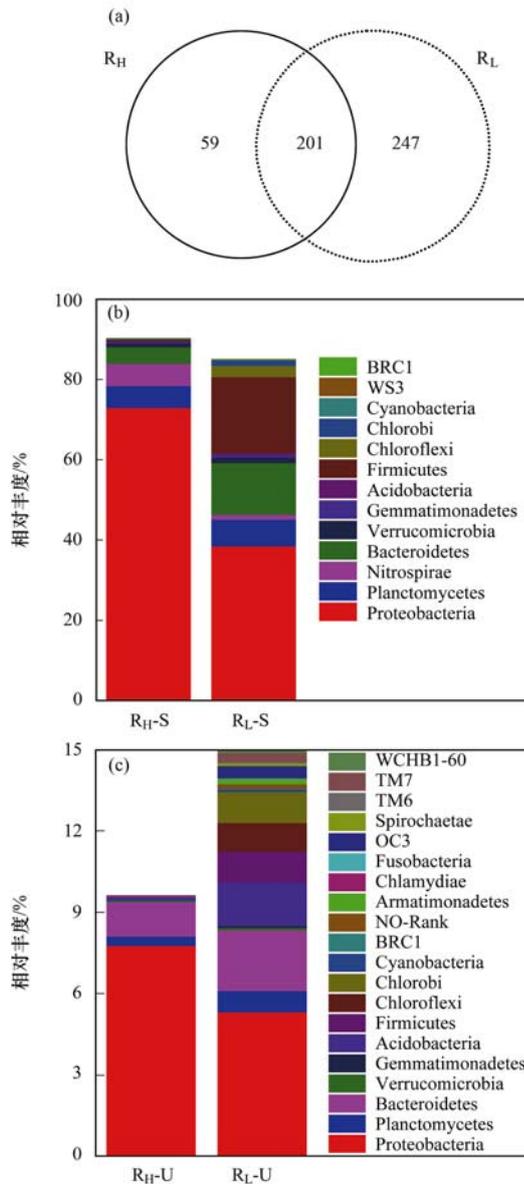
图 4 R_H 和 R_L 中微生物种群的系统发育光谱图

Fig. 4 Phylogenetic spectra of microbial communities from R_H and R_L

为了揭示 R_L 与 R_H 之间微生物种群的异同, 本文进一步对所得微生物种群信息进行了对比分析, 结果如图 5 所示. 两反应器中有 201 种 OTUs 属于共有[图 5(a)], 这些共用 OTUs 占两反应器中总微生物信息量的 85% 以上[图 5(b)], 如此高比例的共有信息亦表明了两反应器中微生物的同源性. 然而, 部分共有物种在相对丰度上的显著差异也说明了在不同 DO 浓度形成的选择压驱动下这些物种不同的生活特性, 如 Firmicutes 与 Bacteroidetes 在 R_H -S 与 R_L -S 中的相对丰度分别为 0.3% 与 4.1% 和 20.0% 与 12.9%, 表明了隶属于 Firmicutes 与 Bacteroidetes 的共有物种更倾向于在低 DO 浓度环境下生存; 而 Proteobacteria 与 Nitrospirae 在 R_H -S 与 R_L -S 中的相对丰度分别为 72.9% 与 5.5% 和 38.4% 与 1.2%, 表明 Proteobacteria 与 Nitrospirae 的部分种群更趋于在较高 DO 浓度条件下繁殖. 而对于独有物种, 尽管 R_L 中新生了大量的独有物种

(占 R_L 中所有 OTUs 的 55%), 但它们所含细菌序列信息仅占 R_L 中总序列信息的 15% 以下[图 5(c)], 同时, R_H 与 R_L 所含独有物种的功能组织性基本一致[图 3(b)], 说明这些独有物种对两反应器所表现出的微生物种群组成分化贡献较小. 换言之, 由于 DO 浓度不同造成的 R_H 与 R_L 之间微生物种群分化演变主要发生在共有物种之间, 这一结论与 Ma 等^[22] 的报道一致.

为了获得更加深入的对比信息, 本研究从属水平上对 R_H 与 R_L 所含主要物种(相对丰度 >1%) 进行了对比分析, 如图 6 所示. 可以看出 R_H 与 R_L 所含主要物种在属水平上的差异更加明显. 在高 DO 浓度下运行的 R_H 中 *Nitrosomonas* 菌属被高度富集, 相对丰度达 65.1%, 除 *Nitrospira*、OM190_norank、Polyangiaceae_uncultured、*Flexibacter* 及 *Aquimonas* 之外, 其他菌属相对丰度均在 1% 以下, 即 R_H 中微生物种群组成表现出极高的不均匀性. 对于 R_L 中



(a) OTUs 韦恩图; (b) 共有物种组成; (c) 独有物种组成

图 5 R_H 与 R_L 中微生物种群演化Fig. 5 Microbial evolution between R_H and R_L

微生物种群, 尽管以 *Nitrosomonas* (18.7%) 和 *Lactococcus* (17.0%) 占据主导, 但其中相对丰度 >1% 的菌属高达 18 类之多, 整体微生物种群均匀性显著高于 R_H 中微生物种群. 此外, 从所含菌属代谢特征上而言, 除了大量共有的好氧细菌 (如 *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira*), 与 R_H 相比 R_L 中还含有大量可进行水解发酵作用的菌属, 如 *Lactococcus*、*Anaerolineaceae* 以及 *Rhodocyclaceae* 等, 这亦和 R_L 中较低的 DO 浓度运行环境相呼应 (尽管絮体结构较为松散).

2.4 硝化功能菌群组成

图 7 展示了两反应器中硝化功能菌群的组成, 尽管 R_H 与 R_L 所含硝化菌 OTUs 种类基本一致, 但在个别 OUT 的相对丰度上差异显著. 如图 7(a) 所

示, R_H 与 R_L 中 AOB 种群所含 OTUs 均为 8 个, 但优势物种各不相同, 即 OUT-4 (*Nitrosomonas oligotropha*) 为 R_H 中优势 AOB 物种, 而 R_L 中 AOB 则以 OUT-6 (*Nitrosomonas europaea*) 为主导. 然而, R_H 与 R_L 中 NOB 种群不仅所含 OTUs 数目相同 (5 个) 且主导物种也一致, 即均为 OTU-12 (*Nitrospira defluvi*) [图 7(b)]. 有趣的是 R_H 和 R_L 中 AOB/NOB 相对丰度之比基本一致 (11.6 和 12.3).

根据生态学 r/K 对策理论, *Nitrosomonas oligotropha* 一般被认为属于 K-AOB (即具有高基质亲和性和低生长速率), 而 *Nitrosomonas europaea* 则被归为 r-AOB (即具有低基质亲和性和高生长速率)^[25]. 因此, DO 浓度或 NH_4^+ -N 浓度高低是筛选不同类型 AOB 的关键环境因子. 针对 DO 浓度高低与 AOB 种群的关系已有大量研究, 但所得结果不尽一致, 如 Bellucci 等^[10] 报道在高低 DO 条件下 *Nitrosomonas oligotropha*-AOB 均占据优势, 而 Liu 等^[6] 发现 *Nitrosomonas europaea*-AOB 在并行的高低 DO 浓度硝化工艺中均是优势物种, 更有 Park 等^[8] 报道 DO 浓度由高到低的变化导致了 AOB 优势物种由 *Nitrosomonas oligotropha* 转变为 *Nitrosomonas europaea*, 并且上述有关 DO 浓度与 AOB 种群关系的报道均与本研究结果不符. 综上可知, NH_4^+ -N 浓度 ($<0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 应是造成 R_H 与 R_L 中富集出不同 AOB 优势种群的关键因素, 即 R_H 始终在极低 NH_4^+ -N 浓度条件下运行从而筛选出对 NH_4^+ -N 有较高亲和力的 *Nitrosomonas oligotropha*-AOB, 而 R_L 中长期拥有较高浓度的剩余 NH_4^+ -N 得以使 r-AOB *Nitrosomonas europaea* 被富集. 正如 Bollmann 等^[26, 27] 证实的 *Nitrosomonas oligotropha* 比 *Nitrosomonas europaea* 具有更高的 NH_4^+ -N 亲和性.

Nitrospira defluvi 作为 *Nitrospira*-NOB 的一个重要分支, 其生态学特征属于典型的 K 对策者^[28]. 因此, 研究者对 *Nitrospira defluvi* 的富集亦多是在持续低 DO 浓度和低 NO_2^- -N 的环境下实现的^[29, 30], Lueker 等^[31] 甚至通过宏基因组技术发现所富集的 *Nitrospira defluvi* 细胞内缺乏超氧化物歧化酶 (SOD). 然而, 有别于上述报道, 本研究结果显示 *Nitrospira defluvi* 可以同时的高低 DO 浓度条件下被富集. 基于以上论述可以推测, 控制环境中较低的 NO_2^- -N 浓度 ($<0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 而非 DO 浓度才是筛选 *Nitrospira defluvi* 的关键因子. 如前文所述, 尽管 R_H 与 R_L 分别在不同的 DO 浓度下运行, 两反应器却表现出了相似硝化特征, 即均无 NO_2^- -N 累积现象的发生, 从而导致 R_H 与 R_L 中 NOB 优势种群均

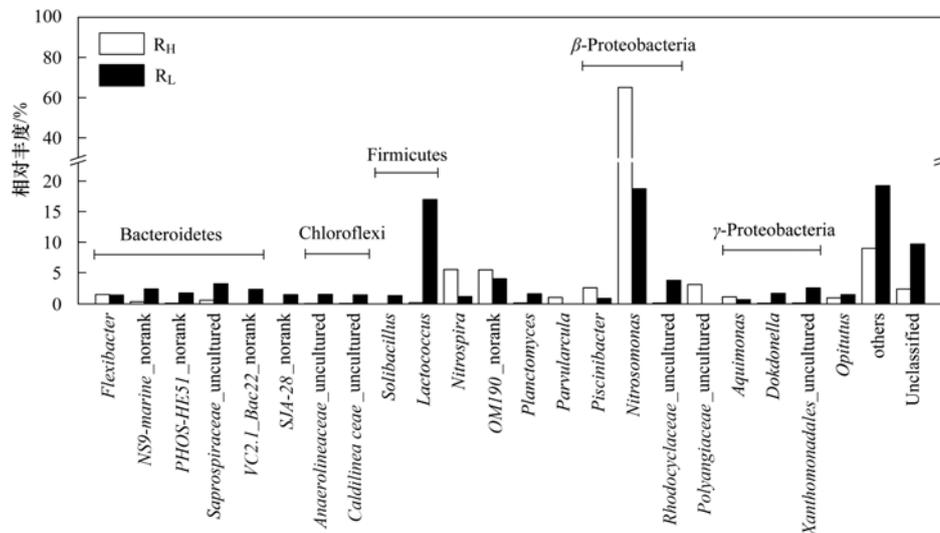


图6 R_H 和 R_L 中微生物种群在属水平上的相对丰度

Fig. 6 Relative abundances of the predominant phylogenetic groups of R_H and R_L at the genus level

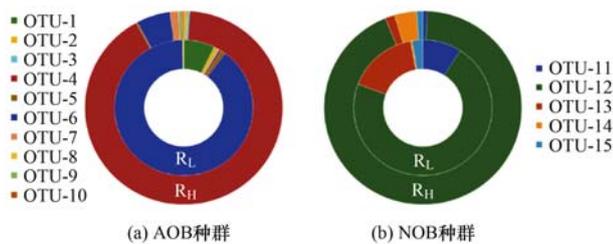


图7 R_L 和 R_H 中 AOB 和 NOB 的种群组成

Fig. 7 Community structure of AOB and NOB in the R_L and R_H reactors

为 *Nitrospira defluvi*. 至于为何 R_H 与 R_L 两反应器在 AOB 数量是 NOB 十几倍之多的前提下均未发生 NO_2^- -N 的显著累积有待深入研究.

3 结论

(1) 分别在高 DO 浓度 ($2.0 \pm 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和低 DO 浓度 ($0.2 \sim 0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下运行的 R_H 和 R_L 均可实现有效的硝化过程, 但低 DO 浓度导致 R_L 启动缓慢.

(2) 与 R_H 相比, R_L 中微生物种群具有更高的多样性和均匀性, 表明了低氧硝化工艺应有更高的功能稳定性.

(3) DO 浓度的不同造成了 R_H 和 R_L 中微生物种群组成的分化, 该分化主要表现为共有物种在相对丰度上的差异. Proteobacteria (80.7%) 在 R_H 中被高度富集, 而在 R_L 中则以 Proteobacteria (43.8%), Firmicutes (20.0%) 以及 Bacteroidetes (15.1%) 为共同主导者; 与 R_H 相比 R_L 中含有大量可进行水解发酵作用的菌属.

(4) R_H 和 R_L 中的 AOB 分别以 *Nitrosomonas oligotropha* 和 *Nitrosomonas europaea* 为优势物种, 而

NOB 均以 *Nitrospira defluvi* 为主导. 反应器中 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 浓度 (而非 DO 浓度) 是上述硝化菌群被选择性富集的关键因素.

参考文献:

- [1] McCarty P L, Bae J, Kim J. Domestic wastewater treatment as a net energy producer-Can this be achieved [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7100-7106.
- [2] 张自杰, 林荣忱, 金儒霖. 排水工程下册 [M]. (第四版). 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [3] Arnaldos M, Pagilla K R. Implementation of a demand-side approach to reduce aeration requirements of activated sludge systems: directed acclimation of biomass and its effect at the process level [J]. Water Research, 2014, **62**: 147-155.
- [4] Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment and reuse (4th ed.) [M]. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- [5] Abbassi B, Dullstein S, Rübiger N. Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs; Experimental and theoretical approach [J]. Water Research, 2000, **34**(1): 139-146.
- [6] Liu G Q, Wang J M. Long-term low do enriches and shifts nitrifier community in activated sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(10): 5109-5117.
- [7] Fitzgerald C M, Camejo P, Oshlag J Z, et al. Ammonia-oxidizing microbial communities in reactors with efficient nitrification at low-dissolved oxygen [J]. Water Research, 2015, **70**: 38-51.
- [8] Park H D, Noguera D R. Evaluating the effect of dissolved oxygen on ammonia-oxidizing bacterial communities in activated sludge [J]. Water Research, 2004, **38**(14-15): 3275-3286.
- [9] Arnaldos M, Kunkel S A, Stark B C, et al. Characterization of heme protein expressed by ammonia-oxidizing bacteria under low dissolved oxygen conditions [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, **98**(7): 3231-3239.
- [10] Bellucci M, Ofiteru I D, Graham D W, et al. Low-dissolved-oxygen nitrifying systems exploit ammonia-oxidizing bacteria with unusually high yields [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(21): 7787-7796.
- [11] Wagner M, Loy A. Bacterial community composition and function in sewage treatment systems [J]. Current Opinion in

- Biotechnology, 2002, **13**(3): 218-227.
- [12] Ju F, Zhang T. Bacterial assembly and temporal dynamics in activated sludge of a full-scale municipal wastewater treatment plant[J]. The ISME Journal, 2015, **9**(3): 683-695.
- [13] Girvan M S, Campbell C D, Killham K, *et al.* Bacterial diversity promotes community stability and functional resilience after perturbation[J]. Environmental Microbiology, 2005, **7**(3): 301-313.
- [14] Briones A, Raskin L. Diversity and dynamics of microbial communities in engineered environments and their implications for process stability[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2003, **14**(3): 270-276.
- [15] Wittebolle L, Marzorati M, Clement L, *et al.* Initial community evenness favours functionality under selective stress[J]. Nature, 2009, **458**(7238): 623-626.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Liu W R, Yang D H, Chen W J, *et al.* High-throughput sequencing-based microbial characterization of size fractionated biomass in an anoxic anammox reactor for low-strength wastewater at low temperatures[J]. Bioresource Technology, 2017, **231**: 45-52.
- [19] Manser R, Gujer W, Siegrist H. Consequences of mass transfer effects on the kinetics of nitrifiers[J]. Water Research, 2005, **39**(19): 4633-4642.
- [20] Arnaldos M, Amerlinck Y, Rehman U, *et al.* From the affinity constant to the half-saturation index: understanding conventional modeling concepts in novel wastewater treatment processes[J]. Water Research, 2015, **70**: 458-470.
- [21] 王中玮, 彭永臻, 王淑莹, 等. 不同运行方式下低溶解氧污泥微膨胀的可行性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(8): 2347-2352.
- Wang Z W, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Feasibility study for limited filamentous bulking under low dissolved oxygen at different operation regimes[J]. Environmental Science, 2011, **32**(8): 2347-2352.
- [22] Ma J X, Wang Z W, Yang Y, *et al.* Correlating microbial community structure and composition with aeration intensity in submerged membrane bioreactors by 454 high-throughput pyrosequencing[J]. Water Research, 2013, **47**(2): 859-869.
- [23] Gao D W, Fu Y, Tao Y, *et al.* Linking microbial community structure to membrane biofouling associated with varying dissolved oxygen concentrations[J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5626-5633.
- [24] Marzorati M, Wittebolle L, Boon N, *et al.* How to get more out of molecular fingerprints: practical tools for microbial ecology[J]. Environmental Microbiology, 2008, **10**(6): 1571-1581.
- [25] Dytczak M A, Londry K L, Oleszkiewicz J A. Activated sludge operational regime has significant impact on the type of nitrifying community and its nitrification rates[J]. Water Research, 2008, **42**(8-9): 2320-2328.
- [26] Bollmann A, Bär-Gilissen M J, Laanbroek H J. Growth at low ammonium concentrations and starvation response as potential factors involved in niche differentiation among ammonia-oxidizing bacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(10): 4751-4757.
- [27] Bollmann A, Laanbroek H J. Continuous culture enrichments of ammonia-oxidizing bacteria at low ammonium concentrations[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2001, **37**(3): 211-221.
- [28] Nowka B, Daims H, Spieck E. Comparison of oxidation kinetics of nitrite-oxidizing bacteria: nitrite availability as a key factor in niche differentiation [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2015, **81**(2): 745-753.
- [29] Park M R, Park H, Chandran K. Molecular and kinetic characterization of *Planktonic nitrospira* spp. selectively enriched from activated sludge[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(5): 2720-2728.
- [30] Spieck E, Hartwig C, McCormack I, *et al.* Selective enrichment and molecular characterization of a previously uncultured *Nitrospira*-like bacterium from activated sludge [J]. Environmental Microbiology, 2006, **8**(3): 405-415.
- [31] Lückner S, Wagner M, Maixner F, *et al.* A *Nitrospira* metagenome illuminates the physiology and evolution of globally important nitrite-oxidizing bacteria [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, **107**(30): 13479-13484.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i>	(3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian	(3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i>	(3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i>	(3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei	(3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i>	(3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i>	(3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i>	(3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao	(3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i>	(3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i>	(3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i>	(3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i>	(3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i>	(3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i>	(3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i>	(3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i>	(3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i>	(3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i>	(3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian	(3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i>	(3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i>	(3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i>	(3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i>	(3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i>	(3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i>	(3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i>	(3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i>	(3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i>	(3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i>	(3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua	(3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i>	(3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NPI	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i>	(3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i>	(3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i>	(3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan	(3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i>	(3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i>	(3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i>	(3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i>	(3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo	(3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i>	(3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i>	(3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan	(3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i>	(3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i>	(3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i>	(3840)