

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCAAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数

姚倩¹, 彭党聪¹, 赵俏迪¹, 王博²

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055; 2. 中国航天空气动力技术研究院第三研究所, 北京 100074)

摘要: 采用连续进水的进水方式对污水处理厂活性污泥系统中的 *Nitrospira* 富集培养并对其相关动力学参数进行研究. 结果表明, 在控制反应器亚硝酸盐浓度不高于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下可以成功富集出以 *Nitrospira* 为优势种属的活性污泥, 其最大比亚硝酸盐氧化速率 (以 N/VSS 计) 为 $48.72 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 荧光原位杂交结果显示 *Nitrospira* 占活性污泥总微生物量的 75% 左右, 而 *Nitrobacter* 仅占总微生物的 0.1%. 此外通过对 *Nitrospira* 在 20°C 时的动力学参数进行测定, 结果表明 *Nitrospira* 的最适生长温度为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$, 温度修正系数 τ_N 为 1.046, 其基质半饱和常数 K_s 和氧半饱和常数 K_o 分别为 $(0.32 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(1.52 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. *Nitrospira* 动力学参数的研究为污水处理厂的设计运行及工艺优化提供理论参考.

关键词: 硝化螺菌; 富集培养; 连续进水; 动力学参数; 荧光原位杂交

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5201-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201704114

Enrichment of *Nitrospira* in Activated Sludge and Kinetic Characterization

YAO Qian¹, PENG Dang-cong¹, ZHAO Qiao-di¹, WANG Bo²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. The Third Research Institute of China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract: *Nitrospira* was enriched from activated sludge by using fed-batch cultivation, and its related kinetic characterization was studied. The results showed that *Nitrospira* could be successfully enriched from the activated sludge for a controlled nitrite concentration no higher than $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The maximum nitrate oxidation rate was $48.72 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. The fluorescence for the in situ hybridization results showed that *Nitrospira* accounted for about 75% of the total biomass, while *Nitrobacter* accounted for only 0.1%. In addition, the kinetic parameters of *Nitrospira* at 20°C were also investigated. The results showed that the optimum growth temperature for *Nitrospira* was $30 \sim 35^\circ\text{C}$. The temperature correction coefficient τ_N was 1.046. The nitrite half-saturation constant K_s and oxygen half-saturation constant K_o were $(0.32 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(1.52 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. This study on the kinetic characterization of *Nitrospira* provided a theoretical foundation for the treatment plant design and process optimization.

Key words: *Nitrospira*; enrichment; feed batch; kinetics characterization; FISH

亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 是完成硝化过程中亚硝酸盐氧化的关键微生物, 它主要是由进化上截然不同的四类菌构成: 硝化杆菌属 (*Nitrobacter*)、硝化球菌属 (*Nitrococcus*)、硝化刺菌属 (*Nitrospina*) 和硝化螺菌门 (*Nitrospira*)^[1]. 其中 *Nitrobacter* 是最早从污水处理厂中分离培养出来的, 所以很长一段时间它都被认为是污水处理厂活性污泥系统中亚硝酸盐氧化菌群的优势种属^[2]. 然而, 随着分子生物学技术的不断发展与利用, 国内外学者对活性污泥系统中硝化菌的种群结构进行深入研究发现, 虽然硝化螺菌门的硝化螺菌属 (*Nitrospira*) 的比增长速率较低, 但其对基质的亲和力大, 在氨氮浓度较低的环境中更具竞争优势^[3].

生活污水中的氨氮主要来源于日常生活污水中混入的食物残渣、尿液粪便等含氮有机物, 它们通过微生物的分解形成氨氮且浓度一般在 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

左右^[4], 硝化菌所处的生物池中的氨氮及亚硝酸盐浓度也处于相对较低的水平^[5], 因此 *Nitrospira* 通常为此类活性污泥中 NOB 的优势菌属^[6~8]. 然而, 在以往的污水厂设计中, *Nitrobacter* 的动力学参数通常被作为亚硝酸盐转化过程的设计标准^[9,10], 但这一标准并不适用于以 *Nitrospira* 为优势菌属的活性污泥体系. 此外 *Nitrospira* 对基质浓度极其敏感, 且易受到来自 *Nitrobacter* 的竞争, 很难从活性污泥中单独富集出来^[11]. 目前虽然有通过控制反应器中的亚硝酸盐浓度从活性污泥中成功富集 *Nitrospira* 的案例^[3,11], 但这些研究者并未对其相关动力学参数进行研究, 而一些有关 *Nitrospira* 的动

收稿日期: 2017-04-12; 修订日期: 2017-06-20

基金项目: 陕西省住房和城乡建设厅科技计划项目 (2015-K65)

作者简介: 姚倩 (1990~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为活性污泥系统中硝化菌的种群结构, E-mail: qian Yao@hotmail.com

力学参数的报道^[10]，其微生物来源多源于实验室购买的纯种 *Nitrospira*，由此获得的动力学参数与实际可能会有一定的差异。因此，若能从实际污水处理厂中富集培养高份额的 *Nitrospira* 并深入了解其生理特性及其动力学参数将对污水处理厂的设计运行具有一定的参考价值。

本实验通过控制反应器中亚硝酸盐浓度模拟 *Nitrospira* 在实际污水厂中的生存环境，研究了较低亚硝酸盐水平下实现 *Nitrospira* 富集的可行性，采用荧光原位杂交技术对富集后的活性污泥的种群结构进行分析，并在此基础上对 *Nitrospira* 在 20℃ 时的基质半饱和常数及氧半饱和常数以及温度对其亚硝酸盐氧化性能进行测定，以期为污水处理厂的设计运行及工艺优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验装置与运行

实验采用 SBR 反应器，有效容积为 4.5 L。装置运行周期 8 h，其中反应、沉淀、排水、闲置时间固定，分别为 430、30、10、10 min。为了保证反应器内较低的基质浓度，采用连续进水 (feed-batch) 的进水方式，进水时间为 400 min。反应器温度控制在 (26 ± 1)℃，水力停留时间 24 h，污泥停留时间 10 d。溶解氧变化范围为 3 ~ 4 mg·L⁻¹，pH 在 7.3 ~ 7.7 之间。

1.2 实验用水及接种污泥

实验进水采用人工配制。NaNO₂ 作为唯一能源，其进水浓度为 100 mg·L⁻¹。每升配水中其他组分如下^[12]：0.4 g NaHCO₃；1 g KH₂PO₄；1.31 g K₂HPO₄ 和 2 mL 微量元素。每升微量元素溶液包括：1.25 g EDTA；0.55 g ZnSO₄·7H₂O；0.4 g CoCl₂·6H₂O；1.275 g MnCl₂·4H₂O；0.4 g CuSO₄·4H₂O；0.05 g Na₂MoO₄·2H₂O；1.375 g CaCl₂·2H₂O；1.25

g FeCl₃·6H₂O；44.4 g MgSO₄·7H₂O。

接种污泥取自西安市第四污水处理厂生物处理池好氧段，取样时间为 2016 年 7 月。由于夏季适宜的温度条件，接种污泥具有良好的硝化功能。

1.3 常规指标测定

NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、MLSS 及 MLVSS 的测定参照文献[13]推荐的标准分析方法。其中 NO₂⁻-N 测定采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法，NO₃⁻-N 测定采用紫外分光光度法，MLSS 和 MLVSS 测定采用重量法；pH 由 pH 计 (PHS-3C，雷磁) 测定，溶解氧 (DO) 由便携式溶氧仪 (SG6-FK1，梅特勒) 测定。

1.4 硝化活性的测定

硝化菌的活性采用氧吸收速率法进行表征^[14]。测定方法如下：取 1 000 mL 泥水混合物，在与反应器温度一致的条件下充分曝气。曝气结束后，将其分别置于 500 mL 广口瓶中搅拌并记录 DO 随时间的变化情况，由此得到微生物内源氧消耗速率 (OUR_i)。然后向其中一份样品中加入 NaNO₂ (NO₂⁻-N: 30 mg·L⁻¹) 并记录 DO 变化，测定亚硝酸盐吸收速率 (NUR)，另一份污泥样品中加入 NH₄HCO₃ (NH₄⁺-N: 20 mg·L⁻¹) 和 0.02 mol·L⁻¹ 的 NaClO₃，记录 DO 变化，测定氨吸收速率 (AUR)。监测结束后，分别测定两个样品中的污泥浓度并计算硝化菌的活性。

1.5 荧光原位杂交

活性污泥样品的荧光原位杂交参照 Amann 等^[15]描述的标准方法进行。杂交后的污泥样品通过激光共聚焦显微镜 (TCS SP8，莱卡) 进行观察，并在 100 倍的物镜下采集图像。硝化菌的定量是在每个污泥样品共随机采集 50 张图像，经 Image-Pro Plus 软件处理后，统计目标微生物占总生物量的比例^[16]。实验中所使用的 16S rRNA 探针如表 1 所示。

表 1 荧光原位杂交实验中检测硝化菌所用的探针

Table 1 Probes for nitrifying bacteria in FISH

探针名称	RNA 序列 (5'-3')	标记细菌种属	文献
Eub338 Eub338 II Eub338 III	GCTGCCTCCCGTAGGAGT GCAGCCACCCGTAGGTGT GCTGCCACCCGTAGGTGT	Real bacteria	[15,17]
Nso1225	CGCCATTGTATTACGTGTGA	β-Proteobacterial ammonia-oxidizing bacteria	[18]
Nsm156	TATTAGCACATCTTTTCGAT	<i>Nitrosomonas</i> spp.	[18]
Nsv443	CCGTGACCGTTTCGTTCCG	<i>Nitrospira</i> spp.	[18]
Ntspa662	GGAATTCCGCGCTCCTCT	Genus <i>Nitrospira</i>	[7]
Nit3	CCTGTGCTCCATGCTCCG	Genus <i>Nitrobacter</i>	[19]

1.6 温度对 *Nitrospira* 活性的影响

温度对 *Nitrospira* 活性的影响是指在不同温度

条件下富含 *Nitrospira* 的活性污泥的最大亚硝酸盐氧化速率的变化情况。在实验过程中需取一定量的

反应器中的活性污泥,经淘洗稀释后,测定在不同温度下污泥的最大亚硝酸盐氧化速率,并通过 Arrhenius 方程拟合得出温度修正系数 τ_N . 在测定过程中, pH 控制在 7.3~7.7, DO 维持在 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,初始基质浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.7 基质半饱和常数 K_s 及氧半饱和常数 K_o 的测定

基质半饱和常数是测定不同初始浓度下亚硝酸盐的氧化速率,并根据 Monod 方程模拟得出:

$$r = r_{\max} \frac{S}{K_s + S}$$

式中, K_s 为基质半饱和常数 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 在 NUR 测定的过程中,反应器中的活性污泥需经多次淘洗去除残留基质,稀释后在 pH 为 7.3~7.7, 温度 (20 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$, DO 为 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下测定不同初始浓度下污泥的最大亚硝酸盐氧化速率.

氧半饱和常数是测定不同溶解氧浓度下亚硝酸盐的氧化速率并根据 Monod 方程模拟得出. 其测定方法与基质半饱和常数的测定方法相似,实验过程中控制 pH 在 7.3~7.7 之间,基质初始浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度 (20 ± 0.5) $^{\circ}\text{C}$. 亚硝酸盐氧化速率与溶解氧之间的关系用 Monod 方程表示如下:

$$r = r_{\max} \frac{S}{K_o + S}$$

式中, K_o 为氧半饱和常数 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

2 结果与分析

2.1 进水方式

本实验采用 feed-Batch 的进水方式以期控制反应器中混合液亚硝酸盐浓度处于较低水平. 图 1 为一个典型周期内 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、pH 及 DO 的变化情况. 从中可知,自进水开始,反应器内混合液 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度始终维持在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 当进水结束后, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 被进一步氧化,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度降至 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以

下. 在整个反应周期内,由于反应体系中存在的 HCO_3^- 对 pH 的变化具有一定的缓冲作用,反应器内的 pH 基本没有变化. 与此同时, DO 随着反应的进行先有所降低,然后在进水结束后逐渐升高,但总体变化幅度相对较小. 由该周期内的 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、pH 和 DO 的变化情况可以看出,采用 feed-Batch 的进水方式有效地将反应器混合液亚硝酸盐浓度控制在较低水平,为 *Nitrospira* 的富集培养提供了有利的环境.

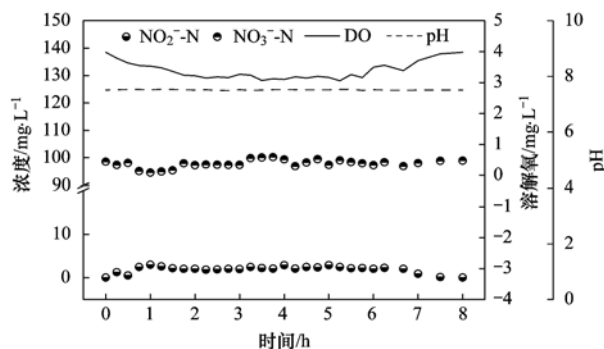


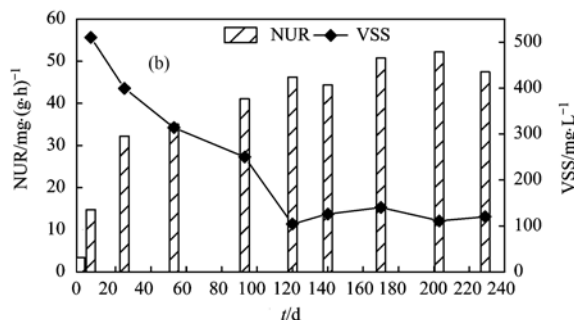
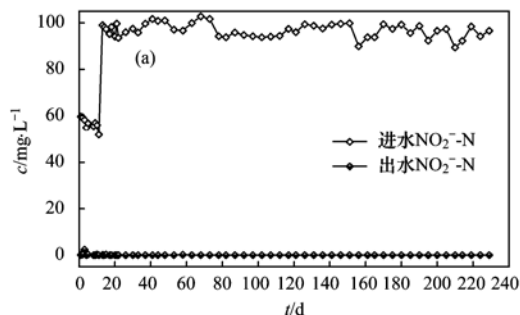
图 1 典型周期内 $\text{NO}_x\text{-N}$ 、pH 及 DO 的变化情况

Fig. 1 Variations of NO_x concentration, pH, and DO in a typical cycle

2.2 反应器运行情况

反应器连续运行 229 d, 其运行效果如由图 2 (a) 所示. 在反应器运行初期,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 随后 NOB 逐渐适应培养环境,在第 4 d 时出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 降低到 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下并逐渐趋于平稳,相应的去除率也增高至 100% 左右.

图 2 (b) 所示的为反应器中硝化菌的活性及污泥浓度变化情况. 从中可知,在接种污泥中,硝化菌活性较低,氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率 (以 N/VSS 计,下同) 分别为 $2.37 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $3.42 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 随着富集培养的进行, AOB 被逐渐淘汰,到第 25 d 时, AUR 已降低至 $0.22 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,而 NOB 在反应器中的富集程度逐渐



(a) 富集过程中进出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度变化情况; (b) 富集过程中比亚硝酸盐氧化速率以及活性污泥生物量变化情况

图 2 富集过程中进出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度、比亚硝酸盐氧化速率以及活性污泥生物量变化情况

Fig. 2 Variations of influent/effluent $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentration, specific nitrite-oxidizing rate and VSS during the experimental period

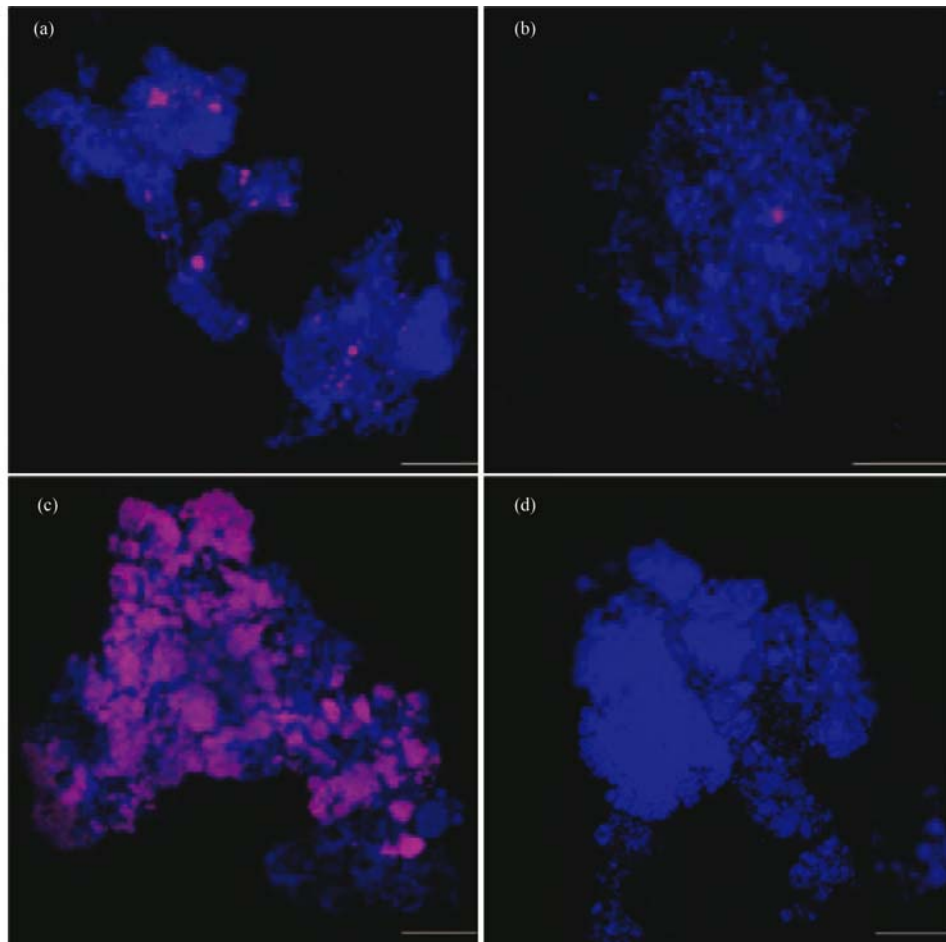
升高,其亚硝酸盐氧化速率持续增大并在第 120 d 时达到最大 $46.22 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$,此时氨氧化速率已降至 0 左右.在接下来的 120 d 内,系统中亚硝酸盐氧化速率稍有波动,但一直维持在 $48.72 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右.在富集培养过程中,活性污泥生物量(以 VSS 计)持续下降,并于 120 d 后稳定在 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.反应器内较低的污泥浓度取决于进水中低的基质浓度及 *Nitrospira* 低的细胞产率.

2.3 富集前后种群结构的变化

反应器不同培养阶段微生物的种群结构可以通过荧光原位杂交技术进行测定.由杂交结果可知,在接种的活性污泥中,硝化菌所占份额较低,为总微生物量的 5% 左右,其中 AOB 占 $(1.8 \pm 0.1)\%$,

NOB 占 $(3.2 \pm 2.3)\%$.通过对硝化菌中几个常见种属所占的份额进行测定,结果表明 *Nitrosomonas* 占总细菌的 $(1.5 \pm 0.1)\%$, *Nitrosospira* 占 $(0.3 \pm 0.3)\%$;而 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 分别占总细菌的 $(2.9 \pm 0.1)\%$ 和 $(0.2 \pm 0.3)\%$ [图 3(a) 和 3(b)]. *Nitrosomonas* 和 *Nitrospira* 分别为 AOB 和 NOB 的优势种属.

随着富集培养的进行,AOB 的数量逐渐减少,至 60 d 时,活性污泥中已基本没有 AOB 的荧光信号,这说明 AOB 已被从反应器中全部淘汰.与此同时,目标微生物 *Nitrospira* 的份额逐步提高,并在 120 d 后达到总细菌的 $(74.3 \pm 1.8)\%$ [图 3(c)] 成为优势种群,而此时活性污泥中已检测不到 *Nitrobacter* 的荧光信号 [图 3(d)].



(a) 和 (c) 均包含总菌 (EUBmix, 蓝色) 和 *Nitrospira* (Ntspa662, 红色), 分别为接种污泥 (a) 和培养 120 d 后活性污泥 (c) FISH 合成图; (b) 和 (d) 均包含总菌 (EUBmix, 蓝色) 和 *Nitrobacter* (Nit3, 红色), 分别为接种污泥 (b) 和培养 120 d 后活性污泥 (d) FISH 合成图. 图中标尺为 $25 \mu\text{m}$

图 3 接种污泥及培养 120 d 后系统中活性污泥 FISH 分析

Fig. 3 FISH analysis of inoculum and activated sludge after 120 d for the cultivation

2.4 温度对亚硝酸盐氧化速率的影响

图 4 为亚硝酸盐氧化速率,即 *Nitrospira* 的活性

随温度的变化情况.从中可知,当温度为 35°C 左右时 *Nitrospira* 的活性达到最大值.当温度变化范围

在 15 ~ 35℃ 时, *Nitrospira* 的活性随着温度的上升而不断增大, 当温度高于 35℃ 时, *Nitrospira* 的活性开始下降, 并在 40℃ 时降至最大活性的一半. 较高的温度会使得细胞内的蛋白质变性, 导致细胞功能障碍, 从而微生物活性大大降低^[20]. *Nitrospira* 的最适生长温度为 30 ~ 35℃, 与 Blackburn 等^[10]报道的结果基本一致. 然而在实际的污水处理厂中, 生物池中水温通常为 15 ~ 25℃^[21], 此时 *Nitrospira* 并未处于最适生长温度内, 其活性相对较低, 因此容易造成亚硝酸盐氮积累的现象, 且这种现象在冬季更易发生. 此外通过 Arrhenius 方程对 *Nitrospira* 在 15 ~ 35℃ 范围内的亚硝酸盐氧化活性进行拟合, 得出 *Nitrospira* 亚硝酸盐氧化速率的温度影响因子 K_T 为 $0.045^{\circ}\text{C}^{-1}$, 温度修正系数 τ_N 为 1.046.

2.5 *Nitrospira* 的基质半饱和常数 K_S 及氧半饱和常数 K_O

图 5(a)所示的是在不同基质浓度下 *Nitrospira* 的亚硝酸盐氧化速率, 可以看出, 当基质浓度在 0 ~ 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NUR 随基质浓度的增加而增大. 当基质浓度高于 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NUR 逐渐趋于平稳, 不

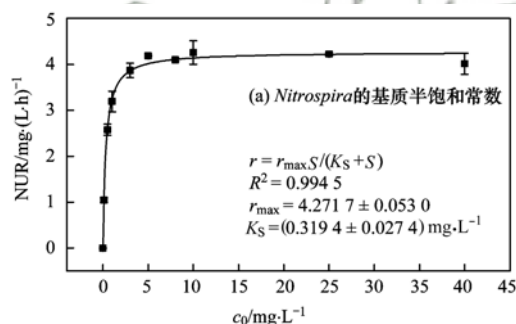


图 5 *Nitrospira* 的基质半饱和常数及氧半饱和常数

Fig. 5 Nitrite half-saturation constant and oxygen half-saturation constant for *Nitrospira*

3 讨论

在亚硝酸盐氧化菌的富集培养过程中, 基质浓度是影响 *Nitrospira* 富集的关键因素^[22]. 然而由于 *Nitrospira* 的基质半饱和常数与 *Nitrobacter* 的基质半饱和常数相差不大, 在大多数的环境中 *Nitrospira* 和 *Nitrobacter* 会适应不同的生境而出现共存的现象, 因此对 *Nitrospira* 的单独富集相对比较困难^[10,11]. 本试验通过采用 feed-batch 的进水方式, 在严格控制反应器中混合液亚硝酸盐浓度始终不高于 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下, 最终从污水处理系统中得到以 *Nitrospira* 为主的活性污泥, 之后对 20℃ 下 *Nitrospira* 动力学参数的进一步研究也将有助于理解 *Nitrospira* 在污水处理系统中存在的条件以及对

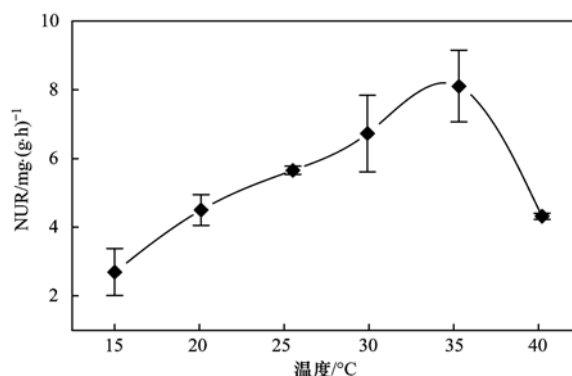
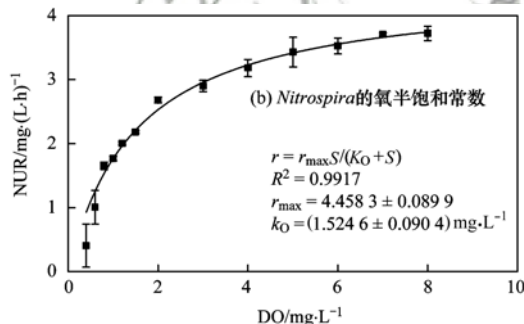


图 4 温度对亚硝酸盐氧化速率的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the NUR

再随基质浓度的增大发生变化. 通过 Monod 方程对基质浓度及 NOB 的活性进行拟合, 得出基质半饱和常数 K_S 为 $(0.32 \pm 0.03) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $R^2 = 0.99$, 处于 Blackburn 等^[10]报道的 *Nitrospira* 的基质半饱和常数范围内. 图 5(b) 是在不同溶解氧条件下 *Nitrospira* 的亚硝酸盐氧化速率, 经 Monod 方程拟合得出氧半饱和常数 K_O 为 $(1.52 \pm 0.09) \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; $R^2 = 0.99$.



硝化反应发挥的作用.

在 *Nitrospira* 的富集培养过程中, 由于以仅含有亚硝酸盐的基质及反应器内较低的亚硝酸盐浓度作为选择压, 因此 16S rRNA 荧光原位杂交结果显示, 原始活性污泥中的 AOB 被彻底除去, 而 NOB 的大部分种属被淘汰, 只剩下唯一的硝化螺菌属 *Nitrospira*, 占活性污泥总微生物量的 75% 左右. 除此之外, 培养体系中残留的其他微生物多为异养菌, 占活性污泥总微生物的 25% 左右. 这一现象的发生是由于实验中选择的污泥停留时间 (10 d) 远远高于 *Nitrospira* 的世代周期^[23], 因此, 反应器死亡的微生物不断增加, 死亡微生物的增加及细胞自溶释放出胞内聚合物 (EPS) 可以为异养菌的生长提供基质^[24], 使得异养菌与 *Nitrospira* 同时存在于反

应体系中.

此外,活性污泥的硝化性能本质上是由污水处理系统中硝化菌的动力学参数决定的,因此在污水处理厂模拟与硝化系统设计时,硝化菌的动力学参数是影响其运行的重要因素^[25].然而,由于硝化菌的动力学参数易受到培养条件,污泥性质以及废水特性等诸多因素的影响^[26],其测定值在不同研究中通常会有较大的不同.文献[10,27,28]中报道的 *Nitrospira* 的基质半饱和常数 K_s 通常在 $0.1 \sim 1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,而氧半饱和常数 K_o 则在 $0.13 \sim 1.69 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,通过比较不同文献中 *Nitrospira* 的动力学参数发现,造成差异的主要原因在于测定时反应体系中是否存在基质或氧气的传质阻力.系统中基质及氧气的传质阻力通常包括以下 3 个方面:活性污泥絮体外部的传质阻力;从向污泥絮体表面传质的阻力和絮体内部的传质阻力;以及絮体内部向细胞体传质的阻力^[29],而这些阻力又与系统中溶解氧或基质浓度以及污泥絮体的特性(如絮体密度及絮体粒径)密切相关,他们通过影响絮体内基质和氧气的可利用量从而进一步影响絮体内部的反应速率^[29].在本实验中,由于污泥经过长时间的富集培养且污泥龄控制在 10 d 左右,反应器中污泥絮体相对较大,絮体粒径约 $70 \sim 80 \mu\text{m}$,因此在传质阻力的影响下,所得的 K_s 和 K_o 均高于 Manser^[28] 的研究结果.同时 Blackburne 等^[10] 的研究也进一步证实了当絮体粒径较大时,其基质半饱和常数也会相对较高.然而在实际的污水处理厂中,污泥龄通常为 $15 \sim 22 \text{ d}$ ^[8],此时微生物分泌较多的 EPS,过多的 EPS 在空间位阻效应的影响下阻碍细胞之间的进一步接触,不利于大絮体的形成^[24],同时 *Nitrospira* 形成的菌胶团也相对较小^[8],其 K_s 和 K_o 值也会相应有所减少.

综上所述,实验采用与实际污水处理厂相近的运行方式从污水处理系统中富集 *Nitrospira*, 所得结果更适于反映实际污水处理系统中 *Nitrospira* 的动力学特征,可以为污水厂的设计与运行提供一定的参考.考虑到本研究仅采用荧光原位杂交技术对 *Nitrospira* 的属层面进行分析,并未涉及到种层面,因此在今后的研究中,进行特定引物的全通量测序尤为必要,以便进一步地明确 *Nitrospira* 的分类归属.

4 结论

(1) 采用 feed-batch 的进水方式,在严格控制

反应器中混合液亚硝酸盐浓度始终不高于 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下,可以成功富集以 *Nitrospira* 为主的活性污泥.经 FISH 分析显示 *Nitrospira* 占活性污泥总微生物量的 $(74.3 \pm 1.8) \%$.

(2) 在富集培养过程中,由于 SRT 相对较长,系统中出现 *Nitrospira* 与异养菌并存的现象,且异养菌份额达 25% 左右.

(3) *Nitrospira* 的最适生长温度为 $30 \sim 35^\circ\text{C}$. 其亚硝酸盐氧化速率在 $15 \sim 35^\circ\text{C}$ 之间的温度影响因子 K_T 为 0.045°C^{-1} , 温度修正系数 τ_N 为 1.046.

(4) *Nitrospira* 的基质半饱和常数为 $(0.32 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氧半饱和常数为 $(1.52 \pm 0.09) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

致谢:感谢西北水资源与环境生态教育部重点实验室对本研究的支持.感谢徐天凯、李佳琦、陈国燕、常蝶在实验方面提供的帮助.

参考文献:

- [1] Stackebrandt E, Goebel B M. Taxonomic note: a place for DNA-DNA reassociation and 16S rRNA sequence analysis in the present species definition in bacteriology [J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1994, 44(4): 846-849.
- [2] Tchobanoglous G, Burton F L. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse (3rd ed.) [M]. New York: McGraw-Hill, 1991. 365-366.
- [3] Bartosch S, Wolgast I, Spieck E, et al. Identification of nitrite-oxidizing bacteria with monoclonal antibodies recognizing the nitrite oxidoreductase [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(9): 4126-4133.
- [4] 方明亮. 低温条件下硝化污泥的驯化及其固定化 [D]. 太原: 太原理工大学, 2013. 2-3.
Fang M L. Research on cultivation and immobilization of nitrifying activated sludge in low temperature [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. 2-3.
- [5] 许洲. 特大型污水处理厂沿程氮分布规律研究 [J]. 中国给水排水, 2015, 31(21): 77-80.
Xu Z. Study on regularity of nitrogen distribution along treatment process in a super-sized wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(21): 77-80.
- [6] Kim D J, Kim S H. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics [J]. Water Research, 2006, 40(5): 887-894.
- [7] Daims H, Nielsen J L, Nielsen P H, et al. In situ characterization of *Nitrospira*-like nitrite-oxidizing bacteria active in wastewater treatment plants [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2001, 67(11): 5273-5284.
- [8] Yao Q, Peng D C. Nitrite oxidizing bacteria (NOB) dominating in nitrifying community in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants [J]. AMB Express, 2017, 7(1): 1-11.
- [9] Henze M, Harremoës P, Cour J J L, et al. Wastewater treatment: biological and chemical processes [M]. Berlin New

- York: Springer, 2002: 747-752.
- [10] Blackburne R, Vadivelu V M, Yuan Z G, *et al.* Kinetic characterisation of an enriched *Nitrospira* culture with comparison to *Nitrobacter* [J]. *Water Research*, 2007, **41** (14): 3033-3042.
- [11] Fujitani H, Aoi Y, Tsuneda S. Selective enrichment of two different types of *Nitrospira*-like nitrite-oxidizing bacteria from a wastewater treatment plant [J]. *Microbes and Environments*, 2013, **28**(2): 236-243.
- [12] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 等. 游离氨和游离亚硝酸对亚硝态氮氧化菌活性的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- Zhang Y K, Wang S Y, Dong Y J, *et al.* Effect of FA and FNA on activity of nitrite-oxidising bacteria[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(5): 1242-1247.
- [13] 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. 105-271.
- [14] 王建龙, 吴立波, 齐星, 等. 用氧吸收速率(OUR)表征活性污泥硝化活性的研究[J]. *环境科学学报*, 1999, **19**(3): 225-229.
- Wang J L, Wu L B, Qi X, *et al.* Characterization of nitrification activity of activated sludge by oxygen uptake rate (OUR) [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, **19**(3): 225-229.
- [15] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, **172**(2): 762-770.
- [16] Li B K, Irvin S, Baker K. The variation of nitrifying bacterial population sizes in a sequencing batch reactor (SBR) treating low, mid, high concentrated synthetic wastewater[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, **6**(6): 651-663.
- [17] Daims H, Brühl A, Amann R, *et al.* The domain-specific probe EUB 338 is insufficient for the detection of all *bacteria*: development and evaluation of a more comprehensive probe set [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1999, **22**(3): 434-444.
- [18] Mobarry B K, Wagner M, Urbain V, *et al.* Phylogenetic probes for analyzing abundance and spatial organization of nitrifying bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(2): 2156-2162.
- [19] Wagner M, Rath G, Koops H P, *et al.* *In situ* analysis of nitrifying bacteria in sewage treatment plants[J]. *Water Science and Technology*, 1996, **34**(1-2): 237-244.
- [20] 张巍, 赵军, 郎咸明, 等. 硝化细菌在不同温度下对氮素的去除效能研究[J]. *环境科学与管理*, 2010, **35**(6): 83-86.
- Zhang W, Zhao J, Lang X M, *et al.* Study on the removal of nitrogen from wastewater using nitrobacteria at different temperature [J]. *Environmental Science and Management*, 2010, **35**(6): 83-86.
- [21] 杨淑萍. 污水处理厂运行温度对污水处理效果的影响[J]. *现代农业科技*, 2012, (10): 274-275, 280.
- Yang S P. Influence of operation temperature on sewage treatment effect in sewage treatment plant [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2012, (10): 274-275, 280.
- [22] Tangkitjaisut W, Limpiyakorn T, Powtongsook S, *et al.* Differences in nitrite-oxidizing communities and kinetics in a brackish environment after enrichment at low and high nitrite concentrations[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **42**: 41-49.
- [23] 朱亚文. 复合式动态膜生物反应器强化脱氮的性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2011. 28-31.
- Zhu Y W. Performance of enhanced nitrogen removal in hybrid dynamic membrane bioreactor [D]. Nanjing: Southeast University, 2011. 28-31.
- [24] 朱哲, 李涛, 王东升, 等. 不同泥龄下活性污泥絮体性状的研究[J]. *环境化学*, 2009, **28**(1): 10-15.
- Zhu Z, Li T, Wang D S, *et al.* Effect of solids retention time on flocculation characteristics[J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **28**(1): 10-15.
- [25] 卢欢亮, 胡志荣, 叶向东, 等. 硝化菌最大比增长速率常数的实测与应用[J]. *给水排水*, 2015, **41**(2): 44-47.
- Lu H L, Hu Z R, Ye X D, *et al.* Measurement and application of maximum specific growth rate constant of nitrifier[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, **41**(2): 44-47.
- [26] 刘芳, 陈季华, 顾国维. ASM-CN 模型中主要动力学参数的测定研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2005, **31**(3): 20-25.
- Liu F, Chen J H, Gu G W. Study on measurement of kinetic parameters in ASM-CN model [J]. *Journal of Donghua University*, 2005, **31**(3): 20-25.
- [27] 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.
- [28] Manser R. Population dynamics and kinetics of nitrifying bacteria in membrane and conventional activated sludge plants [D]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2005. 54-58.
- [29] Wilén B M, Gapes D, Keller J. Determination of external and internal mass transfer limitation in nitrifying microbial aggregates [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2004, **86**(4): 445-457.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui, <i>et al.</i> (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si, <i>et al.</i> (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong, <i>et al.</i> (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi, <i>et al.</i> (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)