

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源	林秋菊, 徐娇, 李梅, 王伟, 史国良, 冯银厂 (2505)
南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析	杨笑影, 曹芳, 林煜棋, 章炎麟 (2519)
西安市PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化特征	黄含含, 王羽琴, 李升苹, 陈庆彩 (2528)
新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响	刘会斌, 迪丽努尔·塔力甫, 王新明, 张潇潇, 王威, 阿布力克木·阿不力孜, 买里克扎提·买合木提, 刘伟 (2536)
长秋季生物物质燃烧对PM _{2.5} 中WSOC吸光性的影响	孟德友, 曹芳, 翟晓瑶, 张世春, 章炎麟 (2547)
2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源	王倩 (2555)
南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟 (2565)
郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析	任义君, 马双良, 王思维, 于世杰, 李一丹, 张瑞芹, 尹沙沙 (2577)
上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献	韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 何迪, 王焱, 马志强 (2586)
北京市餐饮业大气污染物排放特征	孙成一, 白画画, 陈雪, 翟翼飞, 高启天, 何万清, 聂磊, 石爱军, 李国傲 (2596)
北京市农业机械排放因子与排放清单	王凯, 樊守彬, 亓浩云 (2602)
北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化	李贝贝, 黄玉虎, 毕晓辉, 刘李阳, 秦建平 (2609)
基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析	张颖蕾, 崔希民 (2617)
环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟	张毅, 马艳飞, 宋帅, 吕永龙, 张盛, 吴强 (2625)
岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析	周石磊, 孙悦, 苑世超, 彭瑞哲, 刘世崇, 岳奇丞, 张航, 王周强, 李再兴, 罗晓 (2635)
“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析	李悦昭, 陈海洋, 孙文超 (2646)
伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价	姜时欣, 翟付杰, 张超, 王蒙蒙, 单保庆 (2653)
典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析	赵然, 韩志伟, 申春华, 张水, 涂汉, 郭永丽 (2664)
沉积物参与氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响	陈洁, 许海, 詹旭, 许笛, 朱广伟, 朱梦圆, 李鹏飞, 康丽娟 (2671)
丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素	李胜男, 陈豪宇, 彭华, 李芸君, 朱坚, 简燕, 纪雄辉 (2679)
胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用	王振方, 韩子玉, 王梦雪, 马逸驰, 王婷, 王丽卿, 张玮 (2688)
不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较	桑雨璇, 杨珈乐, 熊怡, 尹文博, 汪华, 王和云 (2698)
过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用	张帅, 李大鹏, 丁玉琴, 徐楚天, 许鑫澎, 孙培荣, 赵哲豪, 黄勇 (2706)
基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例	王亚楠, 祝伟, 祁新华, 范水生 (2714)
不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (2727)
高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5	李立, 吴丽颖, 董正玉, 王霖, 张倩, 洪俊明 (2736)
Fe-cyclam/H ₂ O ₂ 体系催化降解罗丹明B机制	余雨清, 陈翔宇, 蔡荣华, 黄歆珏, 陈曼 (2746)
微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO ₂ -NTs为光阳极	卢忆, 周海珊, 彭瑞建, 叶杰旭, 陈建孟, 宋爽, 张士汉 (2754)
缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性	陈凡雨, 徐仲, 尤宏, 柳锋, 李之鹏, 陈其伟, 韩红卫 (2762)
HRT对改良式A ² /O-BAF反硝化除磷脱氮的影响	赵凯亮, 刘安迪, 南彦斌, 梁利民, 王云霞, 陈永志 (2771)
重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化	孙琪, 赵白航, 范飒, 周邦磊, 李玉璋 (2779)
异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去除及重金属和盐度的影响	王萌萌, 曹刚, 张迪, 冯乃亮, 潘涌璋 (2787)
火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替	薛嘉俊, 张绍青, 张立秋, 李淑更, 姚海楠, 耿忠轩, 李鸿, 刘晓玲 (2796)
游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响	沈琛, 张树军, 彭永臻 (2805)
死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰	苏宇傲, 刘宏波, 毛秋燕, 张慧旻, 张衍, 刘和 (2812)
中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价	陈文轩, 李茜, 王珍, 孙兆军 (2822)
土壤环境质量预警体系构建与应用	李笑诺, 丁寿康, 陈卫平, 王夏晖, 吕斯丹, 刘睿 (2834)
不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系	毛霞丽, 邱志腾, 张爽, 沈倩, 章明奎 (2842)
长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征	宁玉菲, 魏亮, 魏晓梦, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 吴金水 (2852)
生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响	黄洋, 郭晓, 胡学玉 (2861)
基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价	肖冰, 薛培英, 韦亮, 刘成程, 高培培, 樊利敏, 杜佳燕, 刘文菊 (2869)
重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素	胡青青, 沈强, 陈飞, 尹炳, 邹宏光, 庄红娟, 张世文 (2878)
新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果	陈兆进, 李英军, 邵洋, 林立安, 徐鸽, 陈彦, 田伟, 姚伦广, 韩辉 (2889)
三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征	李丽娟, 李昌晓, 陈春桦, 杨治华, 陈雪梅 (2898)
滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布	张宇, 左剑恶, 王丝可, Alisa Salimova, 李爱军, 李玲玲 (2908)
模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响	王愉琬, 马安周, 种国双, 谢飞, 周汉昌, 刘国华, 庄国强 (2918)
水肥气耦合对温室番茄土壤N ₂ O排放及番茄产量的影响	商子惠, 蔡焕杰, 陈慧, 孙亚楠, 李亮, 朱艳, 王晓云 (2924)
矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用	尚誉, 杨丰隆, 宁夏, 董铁茹, 桑楠 (2936)
海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价	汪慧娟, 旷泽行, 周贤, 覃晓青, 黄洪辉 (2942)
春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析	贺玉晓, 李珂, 任玉芬, 王思琪, 方文颖 (2951)
热解温度和时间对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估	蔡朝卉, 楚沉静, 郑浩, 罗先香, 李锋民 (2963)
长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)	蒋自然, 金环环, 王成金, 叶士琳, 黄艳豪 (2972)
《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697, 2713, 2811)	

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响

沈琛¹, 张树军², 彭永臻^{1*}

(1. 北京工业大学城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 2. 北京城市排水集团有限责任公司科技研发中心, 北京 100022)

摘要: 为考察羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌 (NOB) 活性的影响, 分别以富含硝化杆菌 (*Nitrobacter*) 和富含硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的污泥作为研究对象, 基于批次试验, 分别考察了相同 pH、不同羟胺浓度梯度和相同羟胺浓度、不同 pH 梯度条件下, 羟胺对两种 NOB 的抑制效果。结果表明在相同 pH 条件下, *Nitrobacter* 的活性随羟胺浓度的升高而降低; 在相同羟胺浓度 ($\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下, 羟胺在较高 pH 环境 ($\text{pH} \geq 7.5$) 中产生更多的游离羟胺 (FHA), 会对 *Nitrobacter* 产生更好的抑制效果, 低 pH 环境 ($\text{pH} \leq 7$) 中离子态羟胺的存在可能会促进 *Nitrobacter* 的活性。羟胺对 *Nitrospira* 的抑制效果有限, 当 $\text{pH} = 7.5$, 羟胺浓度 $= 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Nitrospira* 的相对活性为 82%。分别采用 NOB 生长速率动力学模型和非底物抑制线性方程描述 FHA 对 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 活性的影响, 其可决系数 R^2 分别为 0.90 和 0.94, FHA 可能是抑制 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 活性的主要原因。

关键词: 硝化杆菌; 硝化螺菌; 相对活性; 羟胺; 游离羟胺

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2805-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911110

Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria

SHEN Chen¹, ZHANG Shu-jun², PENG Yong-zhen^{1*}

(1. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Research and Development Center of Beijing Drainage Group Corporation, Beijing 100022, China)

Abstract: The sludge from enrichment of *Nitrobacter* and *Nitrospira* was used as a research object and batch tests were performed. The inhibitory effects of hydroxylamine on *Nitrobacter* and *Nitrospira* under the same pH and different hydroxylamine concentration gradients, the same hydroxylamine concentration, and different pH gradients were investigated. The results showed that under the same pH condition, the activity of *Nitrobacter* decreased with increasing hydroxylamine concentration. Under the same hydroxylamine concentration ($\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) at a higher pH environment ($\text{pH} \geq 7.5$), hydroxylamine produced more free hydroxylamine (FHA) and the inhibitory effect on *Nitrobacter* was improved. At a low pH environment ($\text{pH} \leq 7$), ionic hydroxylamine promoted the activity of *Nitrobacter*. The inhibitory effect of hydroxylamine on *Nitrospira* was limited. When $\text{pH} = 7.5$ and hydroxylamine concentration was $45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the relative activity of *Nitrospira* was 82%. The NOB growth rate kinetics model and the non-substrate inhibition linear equation were used to describe the effect of FHA on *Nitrobacter* and *Nitrospira* activity. The coefficient of determination R^2 was 0.90 and 0.94, respectively. FHA may be the main reason for inhibiting the activity of *Nitrobacter* and *Nitrospira*.

Key words: *Nitrobacter*; *Nitrospira*; relative activity; hydroxylamine; free hydroxylamine

对于城市污水的处理,我国多采用传统的硝化反硝化工艺来去除水中的氮元素。但是,由于城市污水碳氮比不高,碳源有限,所以往往需要额外添加碳源来完成反硝化反应,确保出水氮素达标排放,这增加了处理成本^[1]。因此,开发更为经济高效的生物脱氮工艺具有重要意义。

近年来,国内外学者提出的短程硝化-厌氧氨氧化新型生物脱氮工艺受到广泛关注。该工艺主要分为两个阶段,第一个阶段是在好氧条件下,利用硝态氮氧化菌(AOB)将部分 NH_4^+ 氧化为 NO_2^- , 并且抑制亚硝态氮氧化菌的活性,使其无法将 NO_2^- 氧化为 NO_3^- , 实现短程硝化;第二个阶段是在缺氧条件下利用厌氧氨氧化菌使水中的 NH_4^+ 和 NO_2^- 发生反应生

成 N_2 , 完成脱氮^[2~5]。该工艺具有节省曝气能耗、无需投加外碳源、污泥产量少等优点^[6,7]。

其中,实现短程硝化的关键是抑制 NOB, 使得 AOB 成为硝化菌群的优势菌种^[8,9]。目前已知的 NOB 主要是由 4 类菌属构成^[10]: 硝化杆菌属 (*Nitrobacter*), 硝化球菌属 (*Nitrococcus*), 硝化刺菌属 (*Nitrospira*) 和硝化螺菌属 (*Nitrospira*)。有研究表明, *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 是污水处理系统中最为

收稿日期: 2019-11-13; 修订日期: 2020-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0401103); 北京市科技计划项目(D171100001017001, Z181100005518003); 北京市教委资助项目

作者简介: 沈琛(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水脱氮理论与技术, E-mail: teamodou@sina.com

* 通信作者, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

常见NOB 菌属^[11]. 已知抑制 NOB 的策略有很多, 比如控制 pH^[12]、低氧曝气^[13]、间歇曝气^[14]、缩短污泥龄^[15]、升高温度^[16]和投加抑制剂(如游离氨^[17~19]、游离亚硝酸^[20~22]、羟胺^[23]等). 其中羟胺作为硝化过程和厌氧氨氧化 2 个过程的中间产物, 既可以有效抑制 NOB, 又不会造成二次污染, 还可以提高 ANAMMOX 的活性, 是一种高效的实现短程硝化的方法^[23~26]. 目前, 现有的研究多集中于羟胺对于整个活性污泥系统的影响, 而污水处理厂污泥中 NOB 占细菌总数比例一般低于 5%, 采用此类污泥研究 NOB 的性质容易影响试验结果的可靠性和稳定性, 采用 NOB 富集程度较高的污泥能够获得更加准确的试验结论. 研究羟胺对此类污泥活性的影响还鲜见报道.

本文分别以人工富集的 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira*

为优势菌种的 NOB 菌群作为研究对象, 采用批次试验研究了相同 pH、不同羟胺浓度梯度和相同羟胺浓度、不同 pH 梯度条件下, 羟胺对于 NOB 活性的抑制效果并进行了分析, 旨在为短程硝化技术的工程应用提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 污泥来源

本试验所用污泥取自两个稳定运行的 SBR1 和 SBR2 反应器, 通过长期对 NOB 的富集培养, SBR1 污泥中 NOB 占总菌含量的 42.42%, 其中 *Nitrobacter* 相对丰度为 42.23%, *Nitrospira* 相对丰度为 0.19%; SBR2 污泥中 NOB 占总菌含量的 17.17%, 其中 *Nitrobacter* 相对丰度为 0.3%, *Nitrospira* 相对丰度为 16.87%. 两个 SBR 反应器的运行条件见表 1.

表 1 SRB1 和 SBR2 的运行条件

Table 1 Operating conditions of SRB1 and SBR2						
项目	排水比/%	pH	DO/mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	MLSS/mg·L ⁻¹	温度/℃
SBR1	25	7.5~8.0	3.0~3.5	600	5 000	25
SBR2	25	7.5~8.0	0~0.5	50	1 000	25

两个 SBR 反应器的基础培养液(g·L⁻¹): NaHCO₃ 0.4, K₂HPO₄ 1 和 KH₂PO₄ 1; 微量元素溶液(g·L⁻¹): EDTA·2Na 1.592, FeClO₃·6H₂O 1.25, ZnSO₄·7H₂O 0.55, CoCl₂·6H₂O 0.40, MgSO₄·7H₂O 44.4, MnCl₂·4H₂O 1.275, CuSO₄·5H₂O 0.40, CaCl₂·2H₂O 1.375 和 Na₂MoO₄·2H₂O 0.05.

1.2 羟胺对 NOB 活性影响的批次试验

批次试验分别以两个 SBR 反应器内的活性污泥为研究对象, 使温度恒定为 25℃, 通过设定不同 pH 梯度、羟胺浓度梯度, 分别考察 pH 和羟胺浓度对 *Nitrobacter* 及 *Nitrospira* 活性的影响. 批次试验的具体方案见表 2 和表 3. 每次试验的具体操作步骤为: ①洗泥. 取 SBR1 污泥 100 mL 或 SBR2 污泥 500 mL, 使用蒸馏水将试验用泥清洗 3 次, 然后用蒸馏水定容到 600 mL; ②矫正仪器. 活性污泥呼吸仪进行仪器零点与高点校正: 零点校正采用 Na₂SO₃, 高点校正饱和溶解氧, WTW 采用两点法进行矫正; ③恢复活性. 加 1 mL 微量元素, 3.5 mL 基础培养

液, 2 g·L⁻¹亚硝酸盐 200 μL, 反应 1 h, 期间不断进行曝气, 使溶解氧达到饱和; ④检测. 向每个检测瓶中加入 20 mL 混合均匀的活性污泥, 根据试验方案加入底物并且调节 pH, 立即测量, 待反应进行 5 min 后停止测量, 截取一段直线计算斜率, 得到活性污泥耗氧速率; ⑤测量污泥浓度. 将上述 100 mL 活性污泥用直径为 12.5 cm 的定量滤纸过滤后放在 105℃ 的烘箱中烘干到重量恒定, 称出重量换算成单位容积混合液内所含有的活性污泥固体物总重量即为

表 2 相同羟胺浓度、不同 pH 对两种 NOB 活性影响的试验条件¹⁾

Table 2 Test conditions for the effects of the same hydroxylamine concentration and different pH on the activity of <i>Nitrobacter</i> and <i>Nitrospira</i>			
菌种	试验	羟胺/mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N/mg·L ⁻¹
<i>Nitrobacter</i>	空白组 1	0	0
	空白组 2	5	0
<i>Nitrospira</i>	对照组	0	20
	试验组	5	20

1) 分别在 pH 为 6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5 和 9.0 条件下进行

表 3 相同 pH、不同羟胺浓度对两种 NOB 活性影响的试验条件¹⁾

Table 3 Test conditions for the effects of the same pH and different hydroxylamine concentrations on the activity of <i>Nitrobacter</i> and <i>Nitrospira</i>											
菌种	pH	羟胺/mg·L ⁻¹									
		对照组	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Nitrobacter</i>	6.5	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
	7.5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
<i>Nitrospira</i>	7.5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45

1) 初始亚硝酸盐浓度为 20 mg·L⁻¹, 1~9 为试验组

MLSS. ⑥计算比耗氧速率(以 O_2/SS 计). 计算如公式(1)所示.

$$SOUR [mg \cdot (g \cdot h)^{-1}] = \frac{SOUR_t - SOUR_0}{MLSS} \quad (1)$$

式中, $SOUR_t$ 为试验组/对照组耗氧呼吸速率值; $SOUR_0$ 为空白值.

1.3 检测及分析方法

批次试验均采用 Strathtox 活性污泥呼吸仪来检测 NOB 耗氧速率的变化, 并以此来表征 NOB 的细胞活性. 混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 采用国家标准方法测定, pH 值通过 WTW-Multi3420 检测.

1.4 NOB 生长动力学模型

NOB 生长速率动力学模型用来模拟 DO、FA 和 FNA 对硝化细菌生长速率的影响, 动力学模型如公式(2)所示:

$$\mu_{NOB} = \mu_{max} \times \frac{[DO]}{K_{S,DO} + [DO]} \times \frac{[FNA]}{K_{S,FNA} + [FNA] + \frac{[FNA]^2}{K_{I,FNA}}} \times \frac{K_{I,FA}}{K_{I,FA} + [FA]} \quad (2)$$

式中, μ 为 NOB 的比生长速率 (d^{-1}); μ_{max} 为最大比生长速率 (d^{-1}); $[DO]$ 为溶解氧的浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); $K_{S,DO}$ 为氧半饱和常数 ($mg \cdot L^{-1}$); $[FNA]$ 为游离亚硝酸的浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); $K_{S,FNA}$ 为底物半饱和常数 ($mg \cdot L^{-1}$); $K_{I,FNA}$ 为 FNA 对 NOB 的底物抑制常数 ($mg \cdot L^{-1}$); $[FA]$ 为游离氨的浓度 ($mg \cdot L^{-1}$); $K_{I,FA}$ 为 FA 对 NOB 的非底物抑制常数 ($mg \cdot L^{-1}$). 本试验中氧半饱和常数 $K_{S,DO}$ 取 $1.75 mg \cdot L^{-1}$, 底物半饱和常数 $K_{S,FNA}$ 取 $0.008 mg \cdot L^{-1}$, FNA 抑制常数 $K_{I,FNA}$ 取 $0.45 mg \cdot L^{-1}$, 且由于溶解氧浓度基本饱和, 达到 $8 mg \cdot L^{-1}$, 亚硝酸盐浓度 ($20 mg \cdot L^{-1}$) 较低且恒定, FNA 的值远小于 $K_{I,FNA}$, 所以公式(2)可以简化为:

$$\mu_{NOB} = \mu_{max} \times \frac{K_{I,FA}}{K_{I,FA} + [FA]} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 羟胺对硝化杆菌 (*Nitrobacter*) 活性的影响

2.1.1 溶液 pH 的影响

将试验组的比耗氧速率与对照组的比耗氧速率相除, 采用百分数来表征 NOB 的相对活性. 图 1 显示了 *Nitrobacter* 相对活性随溶液 pH 的变化情况. 从中可以看出, 羟胺浓度一定时 ($HA = 5 mg \cdot L^{-1}$), *Nitrobacter* 的相对活性大致随着 pH 的升高而降低. 当 $pH \leq 7.0$ 时, 相对活性 $> 100\%$, 试验组耗氧速率大于对照组耗氧速率, 即 $5 mg \cdot L^{-1}$ 的羟胺浓度对 *Nitrobacter* 的活性有促进作用; 当 $pH \geq 7.5$ 时, 相对活性 $< 100\%$,

对照组耗氧速率大于试验组耗氧速率, 即 $5 mg \cdot L^{-1}$ 的羟胺浓度会抑制 *Nitrobacter* 的活性. 李佳等^[23]在 pH 为 7.5 的条件下, 通过向采用 PNA 工艺的 SBR 反应器中投加 $4.5 mg \cdot L^{-1}$ 的羟胺成功实现了对 NOB 的抑制和淘洗, 恢复了短程硝化. Li 等^[27]则在 pH = 7.4 的条件下, 通过向全程硝化 SBR 反应器中投加 $5 mg \cdot L^{-1}$ 羟胺使亚硝酸盐积累率达到 90% 以上, 快速实现了短程硝化反应. 陈佼等^[28]发现相同羟胺浓度下, 较高的 pH 环境能够获得更高的亚硝酸盐积累率, 当 pH 为 8.1 ~ 8.4 时, 亚硝酸盐积累率最高. 以上结果支持了较高 pH 条件下, 羟胺对于 NOB 有更好的抑制效果的结论. 本试验中较低 pH 条件下 ($pH \leq 7.0$) 投加羟胺 ($HA = 5 mg \cdot L^{-1}$) 对 *Nitrobacter* 活性产生促进的现象, 还鲜见报道. 由于空白组 1 和空白组 2 的比耗氧速率相近, 所以在没有亚硝态氮存在的条件下, *Nitrobacter* 不会直接利用羟胺. Wang 等^[29]认为羟胺在水溶液中存在两种形态, 即游离羟胺 (FHA) 和离子态羟胺 (NH_3OH^+), 并且 pH 会影响两种形态的羟胺在水溶液中的浓度. 羟胺在水溶液中存在如下平衡关系:



可以看出, 当 pH 值升高时, 平衡向左移动, 水中游离羟胺的量增多; pH 值降低时, 平衡向右移动, 水中离子态羟胺的量增多. Yang 等^[30]指出游离羟胺具有穿透 NOB 细胞膜的能力, 对亚硝酸盐氧化还原酶的活性产生抑制作用, 从而抑制 NOB 的硝化活性. 所以推测羟胺对 *Nitrobacter* 活性的影响可能和水中离子态羟胺和游离羟胺的浓度有关. 游离羟胺会对 *Nitrobacter* 造成抑制, 离子态羟胺和亚硝酸盐同时存在时则会促进 *Nitrobacter* 的活性. 但是目前还缺乏相应的研究, 需要进一步地证明和分析.

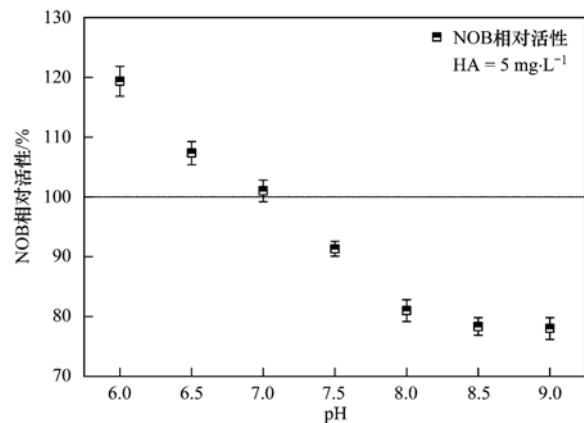


图 1 pH 对 *Nitrobacter* 相对活性的影响

Fig. 1 Effect of pH on the relative activity of *Nitrobacter*

2.1.2 羟胺浓度的影响

为了进一步探究羟胺对 *Nitrobacter* 活性的影响, 进行了第二组试验, 即使溶液 pH 保持恒定, 改

变羟胺的浓度,观察 *Nitrobacter* 相对活性的变化. 图 2(a) 是 $\text{pH} = 6$ 时 *Nitrobacter* 相对活性随羟胺浓度变化的关系,从中可以看出 *Nitrobacter* 的相对活性随着羟胺的投加量增多而降低,并且相对活性均大于 100%,均表现为促进作用. 图 2(b) 显示了 $\text{pH} = 7.5$ 时 NOB 相对活性和羟胺浓度之间的关系,可以看到 NOB 活性的变化趋势和 $\text{pH} = 6$ 条件下的变化趋势相似,同样和羟胺投加量呈负相关,但是 $\text{pH} = 7.5$ 时,羟胺对 *Nitrobacter* 活性的影响表现为抑制. 进一

步分析,当 $\text{pH} = 6$, $\text{HA} = 90 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Nitrobacter* 相对活性为 104%;当 $\text{pH} = 7.5$,羟胺浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,即表现出抑制作用, *Nitrobacter* 相对活性为 95%;羟胺浓度达到 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Nitrobacter* 相对活性降低到 63%. 由此可见,当溶液 pH 一定时,羟胺浓度虽然在一定程度上与 *Nitrobacter* 的活性呈负相关关系,但是其并不是影响 *Nitrobacter* 活性的主要因素和唯一因素,溶液 pH 会显著影响羟胺对 *Nitrobacter* 活性抑制作用的大小.

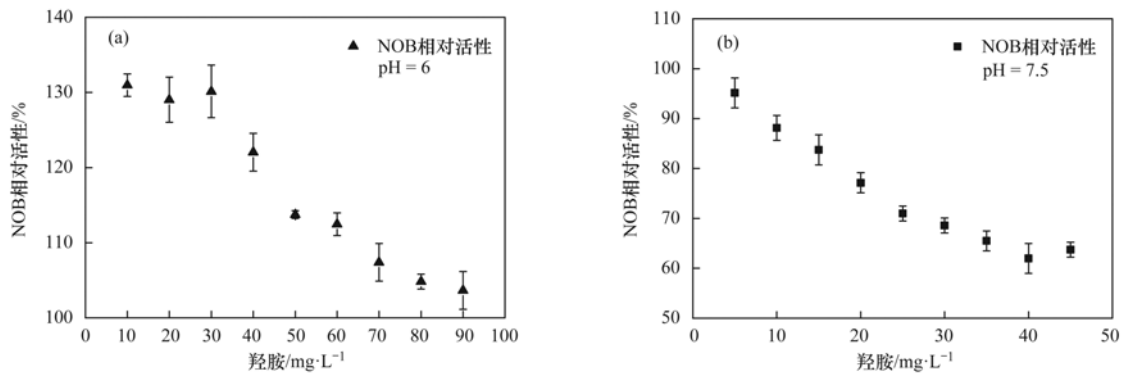


图 2 $\text{pH} = 6$ 和 $\text{pH} = 7.5$ 条件下羟胺浓度对 *Nitrobacter* 相对活性的影响

Fig. 2 Effect of hydroxylamine concentration on the relative activity of *Nitrobacter* under $\text{pH} = 6$ and $\text{pH} = 7.5$

2.2 羟胺对硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的影响

图 3 显示了相同羟胺浓度下 ($\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), *Nitrospira* 相对活性随 pH 值的变化情况. 可以看出随着 pH 的升高, *Nitrospira* 的相对活性并没有发生太大变化,基本保持在 90% 以上,这表明在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 羟胺条件下,改变溶液 pH 对 *Nitrospira* 活性的影响较小. 图 4 为溶液 $\text{pH} = 7.5$ 条件下羟胺浓度和 *Nitrospira* 相对活性的关系,从中可知,随着羟胺浓度的增加, *Nitrospira* 活性呈逐渐下降趋势,但是降幅较小,当 $\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Nitrospira* 相对的活性为 96%,当 $\text{HA} = 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Nitrospira* 的相对活性为 82%,这表明在一定羟胺浓度范围内 ($5 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),羟胺对 *Nitrospira* 的抑制效果并不显著. Harper 等^[31]通过向两个 FBBR 反应器中分别投加 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 羟胺发现, *amoA* 和 *nrxA* 的丰度没有太大变化,这可能是因为 *Nitrospira* 是系统中主要的 NOB 菌种. 而 Li 等^[27]通过长期向稳定运行的全程硝化 SBR 反应器中投加羟胺,发现活性污泥中 *Nitrospira* 的相对丰度下降明显,这可能是由于所用富含 NOB 的污泥在生长环境、污泥浓度、功能菌丰度等方面存在差异造成的. 此外,有研究者认为 *Nitrospira* 在活性污泥系统中为 K-策略者^[32-34],具有较强的对不良环境的抵御能力,可能造成羟胺在短时间内 ($t < 5 \text{ min}$) 对 *Nitrospira* 的抑制作用不大.

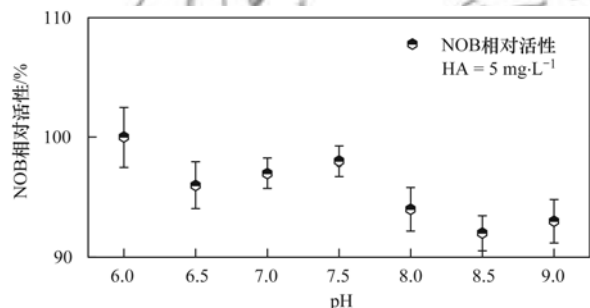


图 3 pH 对 *Nitrospira* 相对活性的影响

Fig. 3 Effect of pH on the relative activity of *Nitrospira*

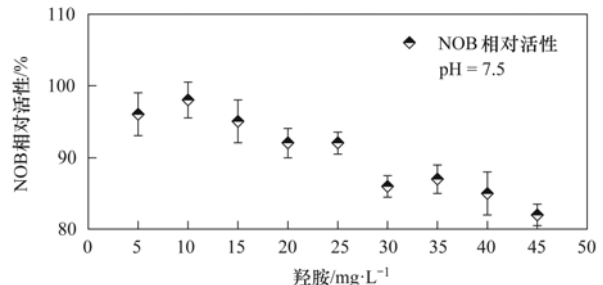


图 4 $\text{pH} = 7.5$ 条件下羟胺浓度对 *Nitrospira* 相对活性的影响

Fig. 4 Effect of hydroxylamine concentration on the relative activity of *Nitrospira* under $\text{pH} = 7.5$

2.3 羟胺对 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 活性影响的动力学分析

Noophan 等^[35]提出一种羟胺电离计算式,公式如下:

$$\text{FHA} = \frac{\text{Total Hydroxylamine}}{1 + 10^8 [\text{H}^+]} \quad (4)$$

式中, FHA 为游离羟胺的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Total Hydroxylamine 为总羟胺浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); $[\text{H}^+]$ 为水中氢离子浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 可见游离羟胺浓度和溶液 pH 的大小成正比关系, 总羟胺恒定条件下, 当 pH 降低时, 水中离子态羟胺增多, 游离羟胺减少; 当 pH 升高时, 水中游离羟胺增多, 离子态羟胺减少。

根据本试验结果, 推测羟胺对 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 活性的影响可能与水中游离羟胺的浓度密切相关。将 pH 值和羟胺浓度代入公式(4)得出每个反应条件下水中游离羟胺的浓度, pH、羟胺浓度和 FHA 的三维散点图如图 5 所示。由于羟胺是亚硝化过程的中间产物^[25], 所以用 FHA 来代替公式(3)中的 FA, 采用 NOB 生长动力学模型(3)对 *Nitrobacter* 活性和 FHA 浓度进行拟合; Park 等^[36]认为 FA 不是 NOB 的基质底物, 可以采用线性分析进行拟合, 故对 *Nitrospira* 活性和 FHA 浓度直接线性拟合。拟合结果如图 6 所示。两条拟合曲线的可决系数 R^2 分别为 0.90 和 0.94。可以得出, 曲线拟合程度较好, 所以水中 FHA 的浓度与 *Nitrobacter* 和

Nitrospira 的活性有直接联系, FHA 可能是造成 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 被抑制的主要因素。

3 结论

(1) 溶液 pH 会显著影响羟胺对 *Nitrobacter* 抑制作用的大小, 当羟胺浓度一定时 ($\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 随着 pH 的升高, *Nitrobacter* 相对活性逐渐下降, 高 pH 条件 (≥ 7.5) 有利于提高羟胺对 *Nitrobacter* 活性的抑制效果, 低 pH 条件 (≤ 7) 不利于实现羟胺对 *Nitrobacter* 活性的抑制; 羟胺浓度的大小可能不是造成 *Nitrobacter* 被抑制的主要原因。

(2) 羟胺浓度一定时 ($\text{HA} = 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 溶液 pH 不会显著影响羟胺对 *Nitrospira* 抑制作用的大小, 且羟胺在一定浓度范围内 (HA 为 $5 \sim 45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对 *Nitrospira* 抑制作用不明显, 抑制效果随羟胺浓度的增加变化较小。

(3) 分别基于 NOB 生长动力学模型和非底物线性方程对 FHA 作为 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 抑制剂进行拟合分析发现, 游离羟胺与 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 的相对活性具有良好的相关性, FHA 可能是造成 *Nitrobacter* 和 *Nitrospira* 被抑制的主要因素。

参考文献:

- [1] Gong L X, Huo M X, Yang Q, et al. Performance of heterotrophic partial denitrification under feast-famine condition of electron donor: a case study using acetate as external carbon source[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **133**: 263-269.
- [2] 杨延栋, 黄京, 韩晓宇, 等. 一体式厌氧氨氧化工艺处理高氨氮污泥消化液的启动[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 1082-1087.
- [3] Yang Y D, Huang J, Han X Y, et al. Start-up of one-stage partial nitrification/anammox process treating ammonium-rich reject water[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 1082-1087.
- [4] Mulder A. The quest for sustainable nitrogen removal technologies[J]. *Water Science and Technology*, 2003, **48**(1): 67-75.
- [5] Gu S B, Wang S Y, Yang Q, et al. Start up partial nitrification at low temperature with a real-time control strategy based on blower frequency and pH[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **112**: 34-41.
- [6] Qiao S, Tian T, Duan X M, et al. Novel single-stage autotrophic nitrogen removal via co-immobilizing partial nitrifying and anammox biomass[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **230**: 19-26.
- [7] Kartal B, Kuenen J G, Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. *Science*, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [8] Wang Z B, Zhang S J, Zhang L, et al. Restoration of real sewage partial nitrification-anammox process from nitrate accumulation using free nitrous acid treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **251**: 341-349.
- [9] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, et al. Full-scale partial

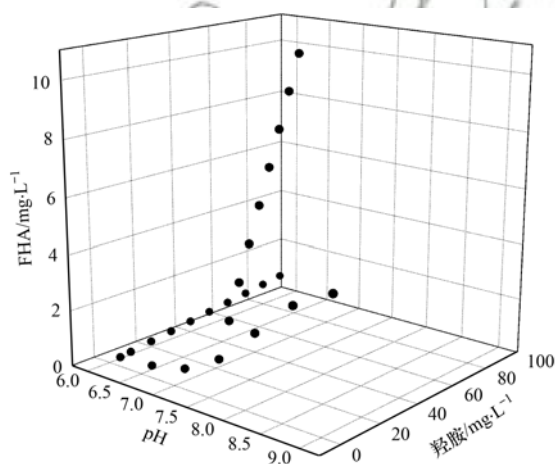


图 5 pH、羟胺浓度和 FHA 的三维散点图

Fig. 5 Three-dimensional scatter plot of pH, hydroxylamine concentration, and FHA

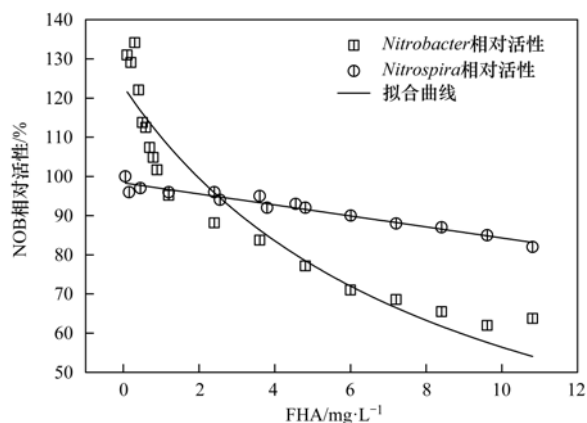


图 6 游离羟胺对 NOB 相对活性的影响

Fig. 6 Effect of free hydroxylamine on the relative activity of NOB

- nitritation/anammox experiences-an application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [9] Wett B, Omari A, Podmirseg S M, *et al.* Going for mainstream deammonification from bench to full scale for maximized resource efficiency[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **68**(2): 283-289.
- [10] 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.
- [11] Peng Y Z, Zhu G B. Biological nitrogen removal with nitrification and denitrification via nitrite pathway[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **73**(1): 15-26.
- [12] 彭永臻, 李璐凯, 李夕耀, 等. 不同 pH 值及碱性物质对短程硝化的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2017, **43**(10): 1554-1562.
- Peng Y Z, Li L K, Li X Y, *et al.* Influence of pH and alkaline substances on shortcut nitrification [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2017, **43**(10): 1554-1562.
- [13] Blackburne R, Yuan Z G, Keller J. Partial nitrification to nitrite using low dissolved oxygen concentration as the main selection factor[J]. *Biodegradation*, 2008, **19**(2): 303-312.
- [14] 刘宏, 南彦斌, 李慧, 等. 间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 865-871.
- Liu H, Nan Y B, Li H, *et al.* Effect of aeration rate on shortcut nitrification recovery in intermittent aeration mode [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 865-871.
- [15] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [16] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water[J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [17] 于德爽, 殷金兰, 王晓霞, 等. 控制 DO 及 FA 条件下短程硝化过程系统稳定性研究[J]. *环境工程学报*, 2011, **5**(12): 2677-2680.
- Yu D S, Yin J L, Wang X X, *et al.* Study on stability of shortcut nitrification by controlling DO and FA [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2011, **5**(12): 2677-2680.
- [18] 张亮, 张树军, 彭永臻. 污水处理中游离氨对硝化作用抑制影响研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2012, **44**(2): 75-79.
- Zhang L, Zhang S J, Peng Y Z. Review of study on the effects of free ammonia inhibitions on nitrifying bacteria in wastewater treatment[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2012, **44**(2): 75-79.
- [19] 吴莉娜, 彭永臻, 王淑莹, 等. 游离氨对城市生活垃圾渗滤液短程硝化的影响[J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3428-3432.
- Wu L N, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of free ammonia on the short-cut nitrification of the municipal landfill leachate[J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(12): 3428-3432.
- [20] 傅金祥, 汪洋, 杨勇. FA 与 FNA 对 A/O 工艺短程硝化处理垃圾渗滤液的影响[J]. *工业水处理*, 2012, **32**(5): 48-51.
- Fu J X, Wang Y, Yang Y. Effect of FA and FNA on the short-cut nitrification of landfill leachate in an A/O system [J]. *Industrial Water Treatment*, 2012, **32**(5): 48-51.
- [21] 刘壮, 彭永臻, 吴莉娜, 等. FA 与 FNA 对两级 UASB-A/O 处理垃圾渗滤液短程硝化的影响[J]. *化工学报*, 2010, **61**(1): 172-179.
- Liu M, Peng Y Z, Wu L N, *et al.* Effect of FA and FNA on short-cut nitrification of landfill leachate in two-stage UASB-A/O system[J]. *CIESC Journal*, 2010, **61**(1): 172-179.
- [22] 韩晓宇, 张树军, 甘一萍, 等. 以 FA 与 FNA 为控制因子的短程硝化启动与维持[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 809-814.
- Han X Y, Zhang S J, Gan Y P, *et al.* Start up and maintain of nitritation by the inhibition of FA and FNA [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(3): 809-814.
- [23] 李佳, 李夕耀, 张琼, 等. 投加羟胺原位恢复城市污水短程硝化-厌氧氨氧化工艺[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2789-2795.
- Li J, Li X Y, Zhang Q, *et al.* In-situ restoring domestic wastewater Partial Nitritation/Anammox (PN/A) process by addition of hydroxylamine [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2789-2795.
- [24] Xu G J, Xu X C, Yang F L, *et al.* Partial nitrification adjusted by hydroxylamine in aerobic granules under high DO and ambient temperature and subsequent anammox for low C/N wastewater treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **213**: 338-345.
- [25] Kindaichi T, Okabe S, Satoh H, *et al.* Effects of hydroxylamine on microbial community structure and function of autotrophic nitrifying biofilms determined by in situ hybridization and the use of microelectrodes[J]. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(11-12): 61-68.
- [26] Tian Z Y, Zhang J, Song Y H. Several key factors influencing nitrogen removal performance of anammox process in a bio-filter at ambient temperature[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **73**(9): 5019-5026.
- [27] Li J, Zhang Q, Li X Y, *et al.* Rapid start-up and stable maintenance of domestic wastewater nitritation through short-term hydroxylamine addition [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **278**: 468-472.
- [28] 陈佼, 张建强, 文海燕, 等. 羟胺抑制协同 pH 调控对人工快渗系统短程硝化的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, **36**(10): 3728-3735.
- Chen J, Zhang J Q, Wen H Y, *et al.* The effect of hydroxylamine inhibition and pH control on achieving shortcut nitrification in constructed rapid infiltration system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(10): 3728-3735.
- [29] Wang Y Y, Wang Y W, Wei Y S, *et al.* In-situ restoring nitrogen removal for the combined partial nitritation-anammox process deteriorated by nitrate build-up [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2015, **98**: 127-136.
- [30] Yang L, Alleman J E. Investigation of batchwise nitrite build-up by an enriched nitrification culture [J]. *Water Science & Technology*, 1992, **26**(5-6): 997-1005.
- [31] Harper W F Jr, Terada A, Poly F, *et al.* The effect of hydroxylamine on the activity and aggregate structure of autotrophic nitrifying bioreactor cultures[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **102**(3): 714-724.
- [32] Schramm A, de Beer D, van den Heuvel J C, *et al.* Microscale distribution of populations and activities of *Nitrosospira* and *Nitrospira* spp. along a macroscale gradient in a nitrifying bioreactor: quantification by In situ hybridization and the use of microensors [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(8): 3690-3696.
- [33] Wagner M, Loy A, Nogueira R, *et al.* Microbial community composition and function in wastewater treatment plants [J].

- Antonie van Leeuwenhoek, 2002, **81**(1-4): 665-680.
- [34] 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.
- [35] Noophan P, Figueroa L A, Munakata-Marr J. Nitrite oxidation inhibition by hydroxylamine: experimental and model evaluation [J]. Water Science & Technology, 2004, **50**(6): 295-304.
- [36] Park S, Bae W. Modeling kinetics of ammonium oxidation and nitrite oxidation under simultaneous inhibition by free ammonia and free nitrous acid [J]. Process Biochemistry, 2009, **44**(6): 631-640.

《环境科学》连续 8 次荣获 “中国最具国际影响力学术期刊”称号

2019 年 10 月 28 日,中国学术期刊(光盘版)电子杂志社(CNKI)等机构发布“2019 中国最具国际影响力学术期刊”评选结果.《环境科学》荣获“2019 中国最具国际影响力学术期刊”称号,是唯一入选的环境科学与资源科学类中文期刊,也是自首次评选以来连续 8 次获此殊荣.评选以期刊国际影响力指数进行排序,遴选出排名前 5% (Top5%) 的期刊获评“中国最具国际影响力学术期刊”.

环境科学

CONTENTS

Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505)
Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China	YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519)
Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an	HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528)
Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area	LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536)
Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun	MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547)
Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019	WANG Qian (2555)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn	CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565)
Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou	REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577)
Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586)
Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing	SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596)
Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation	WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602)
Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing	LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609)
Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061	ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617)
Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model	ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir	ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635)
Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System	LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area	JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Chang, <i>et al.</i> (2653)
Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin	ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664)
Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu	CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671)
Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting	LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679)
Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp.	WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688)
Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels	SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698)
Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment	ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706)
Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed	WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714)
Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727)
Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate	LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736)
Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B	YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746)
Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode	LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754)
Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR	CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762)
Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF	ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771)
Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics	SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779)
Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity	WANG Meng-meng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787)
Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter	XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796)
Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria	SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805)
Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge	SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China	CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822)
Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality	LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834)
Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials	MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842)
Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management	NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852)
Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops	HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861)
Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale	XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869)
Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors	HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878)
Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xinxiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.)	CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889)
Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898)
Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake	ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908)
Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield	WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918)
Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato	SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924)
Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>)	SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936)
Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province	WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942)
Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring	HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951)
Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk	CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963)
Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016)	JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972)