

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PM ₁₀ 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, 陈璞琰, 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, 刘立忠, 刘煥武, 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SO ₄ ²⁻ 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N ₂ O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, 卫晓峰, 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吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 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)	

异养硝化细菌 *Acinetobacter junii* NP1 的同步脱氮除磷特性及动力学分析

杨垒^{1,2}, 陈宁^{1,2}, 任勇翔^{1,2*}, 崔坤^{1,2}, 汪旭晖^{1,2}, 肖倩^{1,2}, 郭淋凯^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学陕西省环境工程重点实验室, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

摘要: 针对传统生物脱氮除磷过程存在工艺流程复杂、抗冲击负荷能力差、基建与运行费用高等问题, 以具有高效脱氮除磷功能的异养硝化细菌 *Acinetobacter junii* NP1 为研究对象, 开展其同步脱氮除磷性能、影响因子及动力学分析。结果表明, 菌株 NP1 具有高效的异养硝化能力, 氨氮最大去除率达 99.12%, 反应过程只有少量的硝化中间产物积累, 并且能够耐受较高的氨氮负荷。菌株 NP1 同时具有良好的好氧反硝化特性, 能够利用亚硝酸盐和硝酸盐进行生长代谢, 最大去除率分别为 91.40% 和 95.10%。此外, 菌株 NP1 异养硝化过程还伴随着同步的聚磷作用, 适当的氮磷比有利于氮磷的同步去除, 当氮磷比为 5:1 时, 最大氨氮和磷酸盐去除率分别为 99.21% 和 88.35%。菌株 NP1 生长特性符合 Logistic 模型 ($R^2 > 0.99$), 氮素和磷酸盐降解过程则与修饰的 Compertz 模型相匹配 ($R^2 > 0.99$), 拟合所得氮和磷酸盐最大转化速率 R_m 为: 氨氮 > 硝氮 > 亚硝氮, 迟滞时间 t_0 为: 硝氮 > 亚硝氮 > 氨氮。通过基质降解动力学以及氮磷去除率分析, 最佳条件是碳源为琥珀酸钠、C/N = 10、 $T = 30^\circ\text{C}$ 以及 $r = 160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

关键词: 琼氏不动杆菌; 动力学; 异养硝化; 好氧反硝化; 同步脱氮除磷

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3713-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901208

Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Acinetobacter junii* NP1

YANG Lei^{1,2}, CHEN Ning^{1,2}, REN Yong-xiang^{1,2*}, CUI Shen^{1,2}, WANG Xu-hui^{1,2}, XIAO Qian^{1,2}, GUO Lin-kai^{1,2}

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

Abstract: Due to the problems of traditional biological nitrogen and phosphorus removal, including long process duration and high infrastructural and operational costs, the simultaneous nitrogen and phosphorus removal capabilities, influencing factors and kinetic characteristics were systematically studied using the heterotrophic nitrifier *Acinetobacter junii* NP1 which possesses efficient simultaneous nitrogen and phosphorus removal ability. The results showed that strain NP1 exhibited efficient heterotrophic nitrification ability with a maximum ammonia removal rate of 99.12%. Furthermore, only small amounts of nitrification intermediates were accumulated during the reaction process. Strain NP1 also adapted well to higher ammonia nitrogen loading. In addition, strain NP1 had efficient aerobic denitrification characteristics, and could utilize nitrite and nitrate for growth and metabolism, achieving a maximum removal rate of 91.40% and 95.10%, respectively. The heterotrophic nitrification process of strain NP1 was accompanied by simultaneous phosphorus accumulation, and the appropriate ratio of nitrogen to phosphorus was beneficial for the simultaneous removal of nitrogen and phosphorus. When the ratio of nitrogen to phosphorus was 5:1, the maximum ammonia nitrogen and phosphate removal rates reached 99.21% and 88.35%, respectively. The bacterial growth process of strain NP1 matched the Logistic model ($R^2 > 0.99$), and the nitrogen and phosphate degradation conformed to the Compertz model ($R^2 > 0.99$). The maximum conversion rates of nitrogen and phosphate (R_m) obtained by model fitting were in the order ammonia > nitrate > nitrite, and lag time (t_0) was in the order nitrate > nitrite > ammonia. According to the analysis of the degradation kinetics of the matrix and the removal rate of nitrogen and phosphorus, the optimal conditions were found to be sodium succinate, C/N = 10, $T = 30^\circ\text{C}$, and $r = 160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

Key words: *Acinetobacter junii* NP1; kinetic; heterotrophic nitrification; aerobic denitrification; simultaneous nitrogen and phosphorus removal

目前传统的生物脱氮除磷技术主要是基于好氧硝化-缺氧反硝化以及生物强化除磷理论, 污水处理厂主流的生物脱氮除磷工艺大多采用 A²O 工艺, 不过此工艺存在占地面积大、工艺流程复杂、运行费用高等缺点。近年来越来越多的异养硝化细菌被发现, 主要包括假单胞菌属 (*Pseudomonas*)^[1]、产碱

菌属 (*Alcaligenes*)^[2]、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)^[3] 和不

收稿日期: 2019-01-24; 修订日期: 2019-03-01

基金项目: 陕西省自然科学基金研究计划项目 (2018JQ5157); 陕西省教育厅重点科研计划项目 (17JS079); 西安建筑科技大学青年科技基金项目 (QN1715)

作者简介: 杨垒 (1988 ~), 男, 博士后, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: yangleixauat@126.com

* 通信作者, E-mail: ryx@xauat.edu.cn

动杆菌属(*Acinetobacter*)^[4]等. 有研究发现, 大部分异养硝化细菌能够同步进行有机物降解、硝化和反硝化作用, 在生活污水、工业废水、高氨氮养猪废水等有良好的处理效果^[5, 6]. 同时, 一些特殊的异养硝化细菌具有良好的极端环境适应能力和同步去除其它污染物的功能, 研究发现菌株 *Pseudomonas stutzeri* YG-24^[7] 和 *Bacillus cereus* GS-5^[8] 具有高效的异养硝化、好氧反硝化和聚磷能力, 能够同步去除实际生活污水中的碳、氮、磷污染物. 目前, 异养硝化细菌的研究主要集中在新型菌株的筛选和脱氮机理方面, 关于异养硝化细菌的同步脱氮除磷过程还处于初步研究阶段, 对于脱氮除磷特性、影响因素及动力学特性等方面的认识还不全面. 因此, 加强兼具同步脱氮除磷功能异养硝化细菌的筛选及其脱氮除磷特性的研究, 对丰富生物脱氮除磷理论和指导工程实践具有重要意义.

本文以异养硝化细菌 *Acinetobacter junii* NP1 为研究对象, 开展其生理生化特性、脱氮除磷性能和影响因素分析, 并通过 Logistic 和 Compertz 模型分别模拟 NP1 的菌体生长特性与脱氮特性.

1 材料与方法

1.1 培养基

异养硝化培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): 琥珀酸钠 5.62, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.47, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.15, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0.

亚硝酸盐培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): 琥珀酸钠 5.62, NaNO_2 0.49, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.15, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0.

硝酸盐培养基 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): 琥珀酸钠 5.62, KNO_3 0.72, $\text{K}_2\text{HPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 0.015, 维氏盐溶液 50 mL, pH = 7.0.

维氏盐溶液 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$): $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2.5, NaCl 2.5, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.05, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.05.

1.2 菌株的分离与鉴定

取养猪废水处理厂活性污泥, 在异养硝化固体培养基进行稀释涂布和多次划线分离, 挑选不同类型单菌落进行异养硝化和聚磷能力测试^[9]. 将筛选出的具有较高异养硝化和聚磷能力的菌株用甘油冷冻法保存.

对纯化后的菌株通过高分辨冷场发射扫描电镜, 观察菌体特征和细胞个体形态, 进行形态学观察; 菌株的生理生化特性依据文献[10]的方法分析; 分子生物学鉴定采用上海生工生物技术有限公司的细菌基因组提取试剂盒提取 DNA, 将提取菌株的 DNA 进行 PCR 扩增, 反应引物为正向引物 27F:

5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCTAG-3' 和反向引物 1492R; 5'-GGTTACCTT GTTACGACTT-3'. 采用琼脂糖凝胶电泳分离检测 PCR 产物, 产物的测序由上海生工生物技术有限公司完成. 所得同源性最高的序列与 GenBank 中已登录的 16S rRNA 序列进行核苷酸同源性比较, 然后应用 MEGA 5.0 软件构建该菌株系统发育树.

1.3 菌株 NP1 的异养硝化与好氧反硝化特性分析

选取琥珀酸钠为碳源, 氮源分别采用氨氮、硝酸盐和亚硝酸盐, 初始浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 菌液接种量为 1%, 在 C/N 为 10、温度为 30°C 、转速为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ (溶解氧浓度约为 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下培养 48 h, 定时测定其 D_{600} 、氮素及磷酸盐浓度.

1.4 环境因子对菌株 NP1 异养硝化过程同步脱氮除磷性能的影响

分别研究碳源、温度、转速、C/N 对氨氮和硝酸盐去除效果的影响. 碳源包括蔗糖、柠檬酸钠、乙酸钠和琥珀酸钠; 温度分别为 10°C 、 20°C 、 30°C 和 37°C ; 摇床转速分别为 80、120、160 和 $200 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$; C/N 分别为 2、5、10 和 15. 固定单一影响因素变化, 其余反应条件不变, 分别为氨氮浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、C/N = 10、温度 30°C 以及转速 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$. 将处于对数生长期的菌液以 1% 接种量接种到 100 mL 不同高压灭菌培养基中, 分别装于 250 mL 锥形瓶中, 摇床培养 48 h, 定时取样测定其 D_{600} 、氨氮及磷酸盐浓度.

1.5 生长及氨氮降解动力学分析

采用 Logistic 模型^[5, 11]拟合菌株 NP1 异养硝化-好氧反硝化过程菌株生长特性. 采用修饰过的 Compertz 模型^[5, 12]对菌株 NP1 的异养硝化-好氧反硝化氮素和磷酸盐降解过程进行拟合.

1.6 分析方法

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、 NO_3^--N 、TN 和 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度均采用标准方法测定^[13]; 菌体生长吸光度 (D_{600}) 采用吸光度法测定; 动力学拟合采用软件 Origin 9.1.

2 结果与讨论

2.1 菌株的鉴定

菌株 NP1 菌落表面光滑、呈乳白色、直径约 2 mm、不透明. 革兰氏染色为阴性, 菌株呈杆状, 无鞭毛, 大小为 $0.4 \mu\text{m} \times (1.0 \sim 1.5) \mu\text{m}$. 扫描电镜照片如图 1 所示.

经过 16S rRNA 测序比对, 初步确定分离菌株 NP1 为不动杆菌属 (*Acinetobacter*). 将菌株 NP1 与同源性较高的不动杆菌和其他异养硝化细菌进行系统发育分析 (图 2), NP1 与 *Acinetobacter junii*

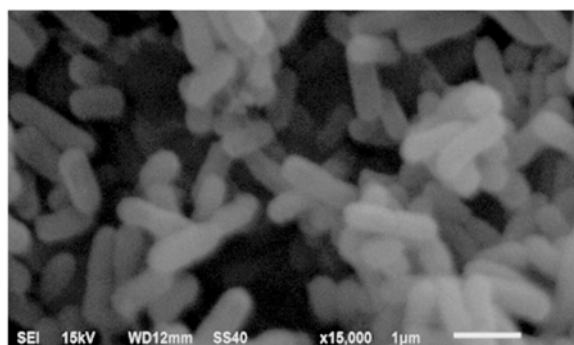


图1 菌株 NP1 扫描电镜照片

Fig. 1 Scanning electron micrograph of strain NP1

strain WS14 的相似性为 100%，进一步表明菌株 NP1 为 *Acinetobacter junii*。

2.2 菌株 NP1 异养硝化-好氧反硝化特性

2.2.1 异养硝化特性

如图 3(a) 所示, 菌株 NP1 经过 6 h 的停滞期后, 开始迅速生长, 24 h 后达到稳定, 最大 D_{600} 为 1.224, 生长过程中最大比生长速率为 0.34 h^{-1} 和最大氨氮降解速率为 $7.73 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 与菌株 *Acinetobacter* sp. T1 (0.101 h^{-1})^[14]、*Bacillus* strains (0.43 h^{-1})^[15] 相当。采用 Logistic 模型模拟菌株 NP1 异养硝化过程的生长特性, 拟合结果 R^2 大于 0.99, 说明该模型适应于菌株 NP1 的生长规律。图 3(b) 表示菌株 NP1 的氨氮降解过程和中间产物变化情况, 氨氮在 24 h 内快速降解, 反应过程氨氮最大去除率为 99.12%, 总氮降解趋势与氨氮几乎一致, 最大去除率为 98.73%。反应过程中生成微量的硝化中间产物(亚硝氮和硝氮), 但均快速降解。与此同时, 菌株生长过程中的内源氮的含量逐渐增大, 根据氮平衡分析, 内源氮含量约占去除总氮的 53%。反应 30 h 后氨氮浓度逐渐增加, 表明此时菌群进入内源呼吸期, 之前用于细胞合成的氮源又再

次分解为氨氮回到水中。由图 3(c) 可见, 采用修正过的 Compertz 模型对菌株 NP1 异养硝化过程的氨氮降解情况进行模拟, 拟合所得 R^2 大于 0.99, 表明菌株 NP1 的氨氮降解特性通过该模型能得到充分表征。

不同起始氨氮浓度的降解情况从图 3(d) 可知, 氨氮起始浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 在 24 h 内基本完全降解, 氨氮最终去除率为 99.83%, 由于氮源不足, 生长受到一定限制, 最大 D_{600} 只有 0.723。起始浓度为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菌体生长显著提高, D_{600} 最大为 1.812, 48 h 后氨氮降解至 $1.23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮最终去除率为 99.31%。起始浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菌体生长良好, 最大 D_{600} 为 1.917 和 1.864, 培养 48 h 后氨氮分别降至 $206.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $436.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮最终去除率分别为 58.42% 和 53.14%。故氨氮起始浓度较低时, 菌株长势良好, 氨氮基本完全降解, 但随着起始浓度的增加, 菌株则需要更长的适应时间。通过表 1 可知, 随着起始浓度的增高 ($50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), t_0 从 4.13 h 上升到 8.60 h, R_m 由 $6.40 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 增加至 $12.86 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 说明在上述起始浓度范围内, 随着氨氮浓度的升高, 菌株 NP1 适应期延长, 但氨氮降解速率明显提高。起始浓度提高至 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, R_m 显著提高, 这与宋宇杰^[16] 和 Joo^[17] 等的研究发现 *Acinetobacter* sp. Y1 和 *Alcaligenes faecalis* sp. No.4 在高氨氮浓度下仍具有良好的异养硝化特性的结论一致。以上结果表明菌株 NP1 在高氨氮负荷下仍具有较高的异养硝化能力, 能够适应较宽范围的氨氮负荷, 具有处理高浓度氨氮废水的潜能。

2.2.2 好氧反硝化特性

由图 4 可见, 菌株 NP1 能够利用亚硝酸盐和硝

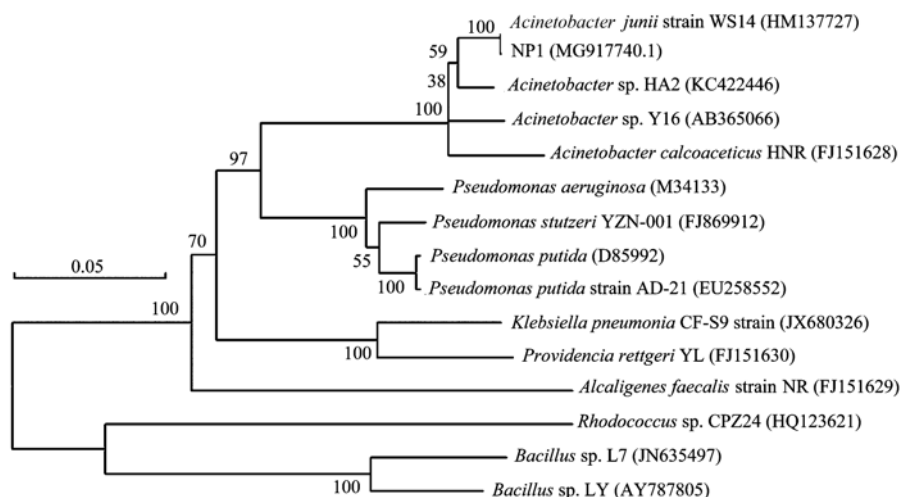


图2 菌株 NP1 的系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree of strain NP1

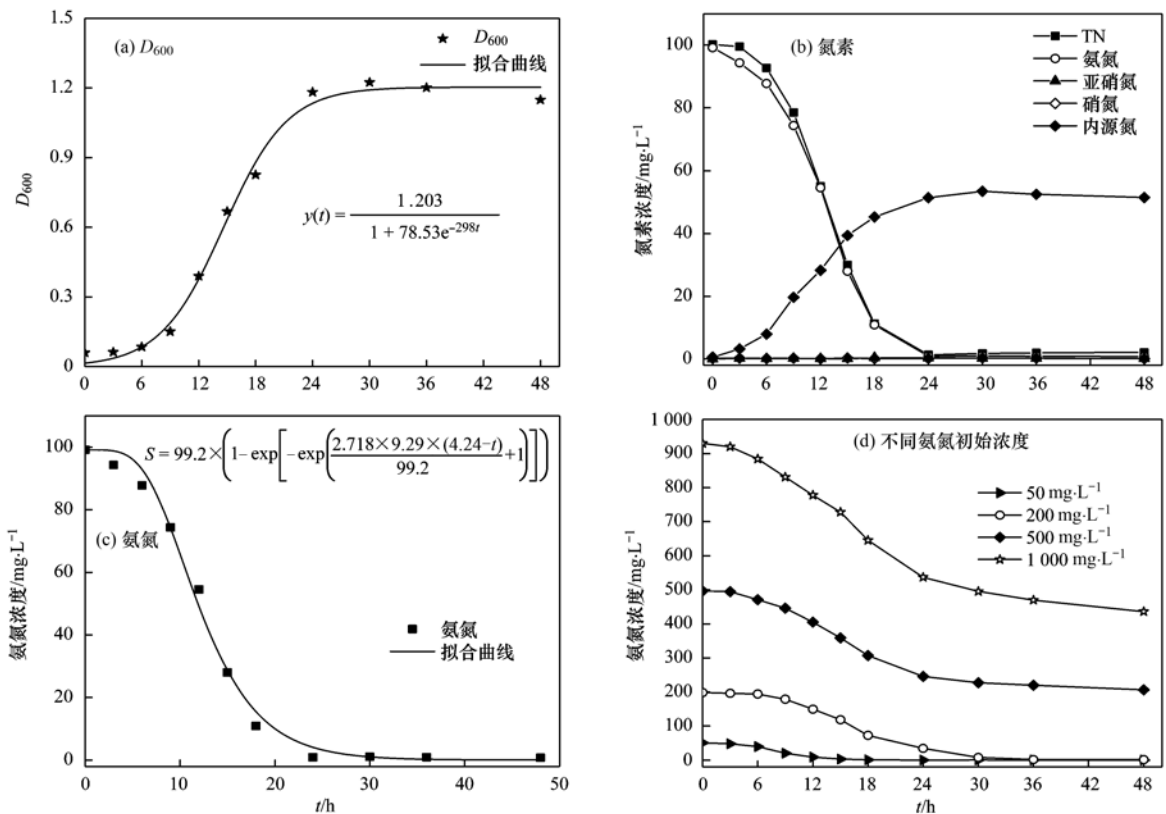


图3 菌株 NP1 以氨氮为唯一氮源时的异养硝化特性

Fig. 3 Heterotrophic nitrification characteristics of strain NP1 with ammonia nitrogen as the sole nitrogen source

表 1 菌株 NP1 在不同初始氨氮浓度下的氨氮降解动力学参数与最终去除率

Table 1 Kinetic parameters and final removal efficiencies of ammonium by strain NP1 under different initial ammonium concentrations

起始浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$R_m / \text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$	t_0 / h	R^2	氨氮最终去除率/%	D_{600} 最大值
50	6.40	4.13	1.00	99.83	0.723
100	9.29	4.24	1.00	99.12	1.224
200	12.86	8.60	1.00	99.31	1.812
500	15.78	5.71	1.00	58.42	1.917
1 000	22.29	5.21	1.00	53.14	1.864

酸盐作为单一氮源进行生长代谢,菌株生长良好, D_{600} 均在 24 h 左右取得最大值 1.167 和 1.107,这与菌株 *Enterobacter cloacae* HW-15^[18] 和 *Pseudomonas* LHJ-1^[19] 等一致.如图 4(a)所示,亚硝酸盐为唯一氮源时,最大降解速率为 $7.53 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$,总氮和亚硝氮最终去除率分别为 88.31% 和 91.40%,内源氮占去除总氮的 47.74%,反应过程几乎无中间产物生成.这与菌株 *Bacillus strain* N31^[20] 和 *Acinetobacter* sp. YY-5^[21] 好氧反硝化过程没有明显的硝氮和亚硝氮积累的结论一致.当硝酸盐为唯一氮源时,硝氮和总氮最终去除率分别为 95.10% 和 86.24%,内源氮占去除总氮的 46.12%,最大降解速率为 $7.87 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$.硝氮降解过程中,9 h 后存在亚硝氮累积现象,最大累积量为 $8.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,表明菌株在以硝酸盐进行好氧反硝化过程中,亚硝氮转化不

及时造成明显积累,这与菌株 YL^[22] 的好氧反硝化特性一致.

如表 2 所示,Compertz 模型可以较好地拟合菌株 NP1 异养硝化-好氧反硝化过程中氮素的降解情况,拟合所得氮素最大降解速率 R_m 为:氨氮 > 硝氮 > 亚硝氮,迟滞时间 t_0 为:硝氮 > 亚硝氮 > 氨氮.以氨氮为氮源时,氮素的去除率最高,降解速率最大,停滞时间最短,其原因可能是反应过程中的氨氧化酶活性高于好氧反硝化酶活性,以及高浓度的硝酸盐和亚硝酸盐更容易抑制菌株活性^[9].

2.3 同步脱氮除磷特性

菌株 NP1 在不同氮源下的氮和磷降解过程如图 5 所示,随着菌株 NP1 的生长,氮素和磷酸盐在培养过程中同步降解.当氨氮作为氮源时,磷酸盐的最大去除率高于其他两种氮源,即:氨氮 (88.30%) > 硝氮 (79.70%) > 亚硝氮 (72.80%),这与 *Enterobacter cloacae* HW-15^[18] 等菌在不同氮源

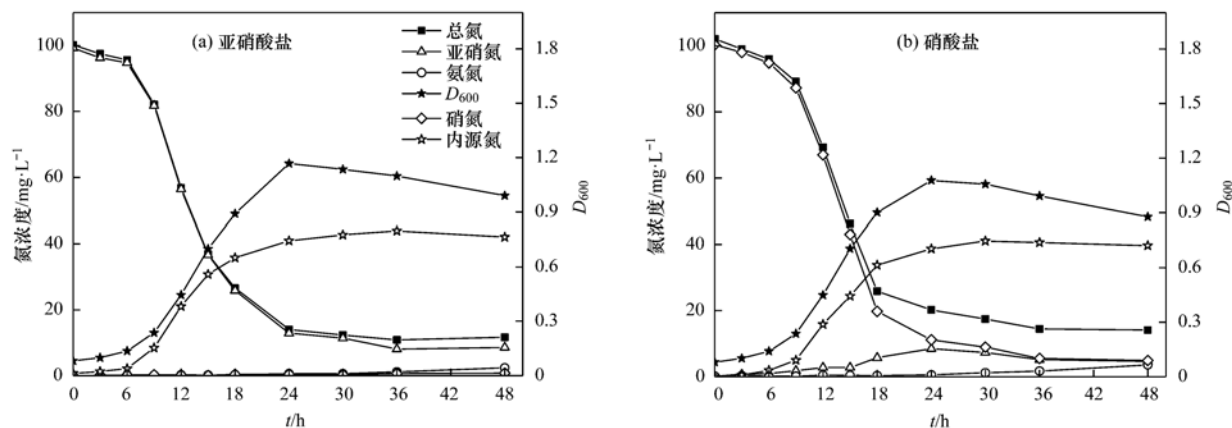


图4 以亚硝酸盐和硝酸盐为唯一氮源时菌株 NP1 的好氧反硝化性能

Fig. 4 Capabilities of aerobic denitrification by strain NP1 when nitrite and nitrate were used as sole N-source

表2 菌株 NP1 在不同氮源条件下氮磷的动力学参数与最终去除率

Table 2 Kinetic parameters and final removal rates of nitrogen and phosphorus by strain NP1 with different nitrogen sources

氮源	$R_m/\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$		t_0/h		R^2		最终去除率/%	
	氮素	磷酸盐	氮素	磷酸盐	氮素	磷酸盐	氮素	磷酸盐
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	6.51	0.41	5.81	5.60	0.98	0.99	91.40	72.80
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	7.84	0.48	7.67	8.90	0.99	0.98	95.10	79.70
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	9.29	1.28	4.24	4.59	0.99	0.99	99.12	88.30

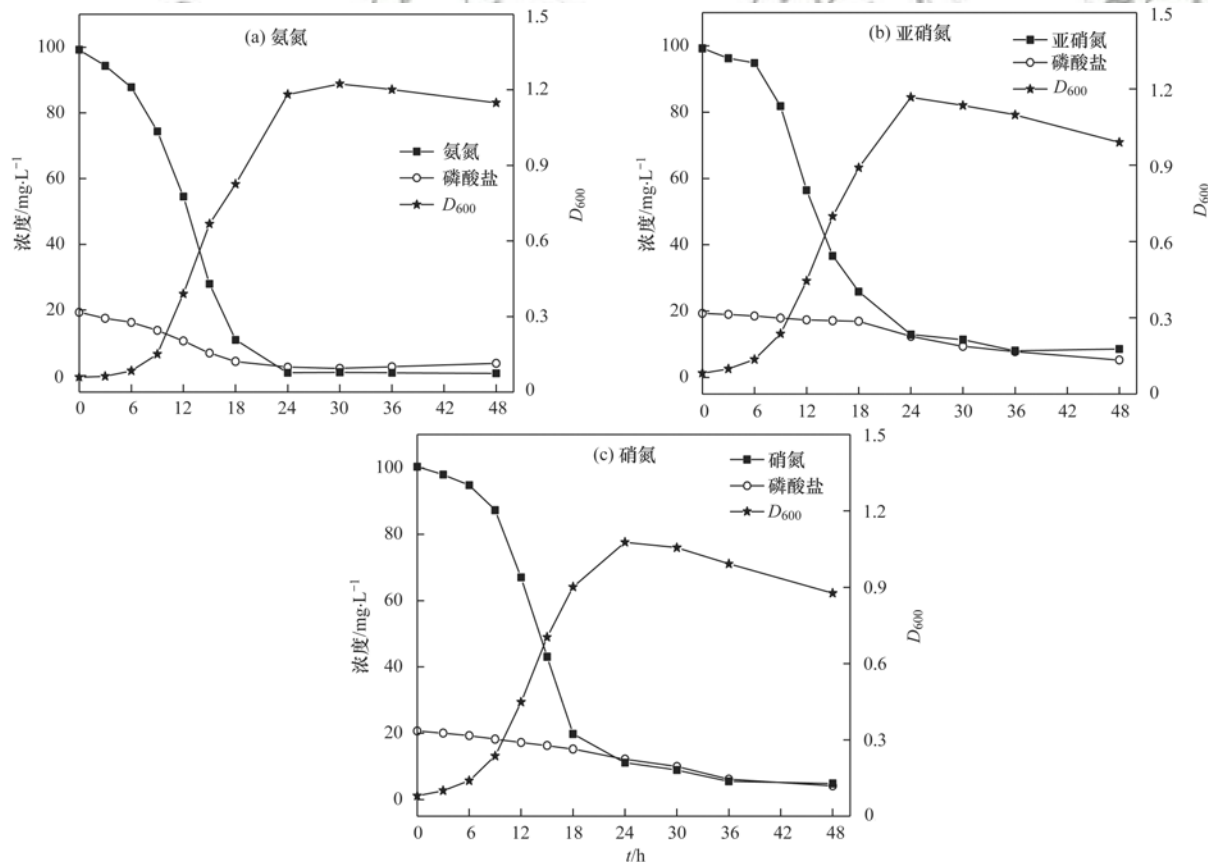


图5 菌株 NP1 分别以氨氮、亚硝氮、硝氮作为单一氮源时的同步脱氮除磷特性

Fig. 5 Simultaneous nitrogen and phosphorus removal by strain NP1 when ammonia, nitrite, and nitrate were used as the sole nitrogen source

下磷酸盐的去除规律相同. 由拟合结果可知, 氮源为氨氮时磷酸盐降解速率 R_m 为 $1.28 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, 停滞时间 t_0 为 4.59 h , 而硝氮和亚硝氮氮源中的 R_m 分别为 $0.48 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $0.41 \text{ mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{h})^{-1}$, t_0 分别为 8.90 h 和 5.60 h , 此结果与氮素降解动力学一致, 表明异养硝化过程更利于磷酸盐的同步去除.

氮源是菌株 NP1 生长代谢的重要因素, 缺乏氮

源会限制菌体生长繁殖, 同时也会降低对磷的摄入. 如图 6(a) 所示, 当氮源浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 菌株 NP1 几乎没有生长, 磷的去除率只有 7.3%. 随着氮源浓度的增加, 菌株 NP1 的生长量明显增加, 最大 D_{600} 值为 1.141, 氮磷的去除率也显著增长. 当氮源浓度为 $50 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 氨氮基本完全降解, 同时磷酸盐的去除率持续增加, 分别为 45.89%、88.35% 和 90.02%. 但是, 当氮源浓度增加到 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 磷酸盐的去除率没有变化, 而氨氮的去除率下降到 58.63%, 这可能因为磷酸盐

的含量不足所致. 同时, 磷源也是细菌生长元素之一, 由图 6(b) 可以看出, 在无磷环境中, 菌株 NP1 生长缓慢, 最大 D_{600} 值为 0.131. 随着磷浓度的增加, 菌株 NP1 在 48 h 内的生长量明显增加, 在 $10 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时最大 D_{600} 值分别为 1.144、1.141、1.157、1.815, 并且氨氮的去除率明显提高. 但当磷浓度为 50 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 磷酸盐的去除率只有 44.65% 和 21.72%. 因此, 适当的氮磷比有利于氮磷的同步去除, 当氮磷比为 5:1 时, 最大氨氮和磷酸盐去除率分比为 99.21% 和 88.35%.

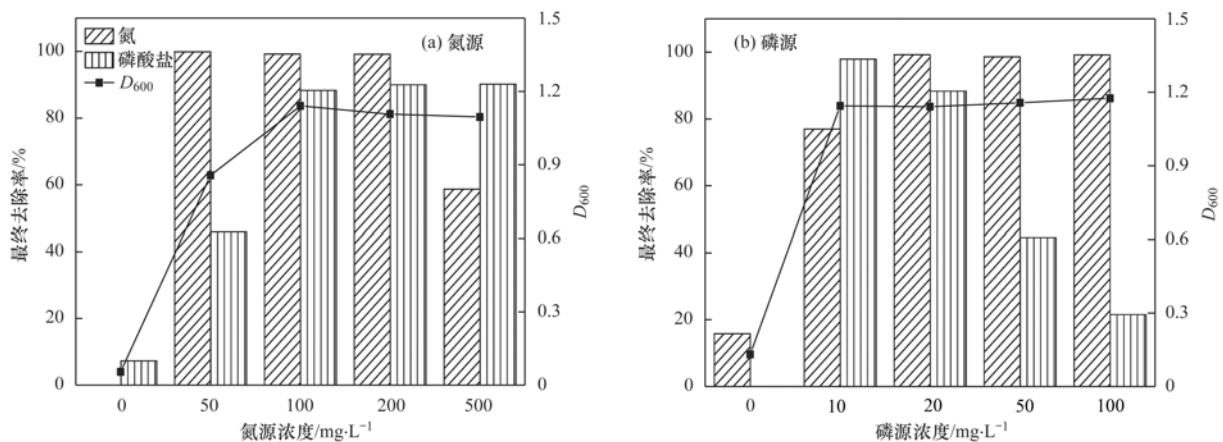


图6 菌株 NP1 同步脱氮除磷过程中氮磷相互影响特性

Fig. 6 Interaction characteristics of nitrogen and phosphorus during simultaneous nitrogen and phosphorus removal by strain NP1

2.4 环境因子对菌株 NP1 脱氮除磷特性及氨氮降解动力学分析

2.4.1 碳源

如图 7(a) 所示, 当碳源为蔗糖时, 菌株 NP1 生长缓慢, D_{600} 最高值仅为 0.166, 氮磷降解效果较差, 反应完成后氮和磷酸盐去除率仅为 28.06% 和 24.26%; 当碳源是柠檬酸钠、乙酸钠和琥珀酸钠时, 菌株 NP1 生长良好, D_{600} 最高值分别为 1.144、1.356 和 1.224, 氨氮基本完全去除, 磷酸盐去除率分别达到 87.68%、83.26% 和 88.35%. 这说明菌株 NP1 对有机酸的利用率高于大分子糖类^[23]. 就氨氮降解情况而言, 根据拟合结果(表 3), 碳源为蔗糖时, 氨氮最大转化速率 R_m 为 $0.31 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 这与 Yang 等^[23]发现 *Bacillus subtilis* A1 能够利用葡萄糖进行生长代谢结论不同. 碳源为有机酸时, 琥珀酸钠的 R_m 为 $9.29 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, t_0 为 4.24 h, 与柠檬酸钠和乙酸钠相比, 是最理想的异养硝化碳源. 这与菌株 *Pseudomonas* sp. N6^[24] 和 *Diaphorobacter* sp. PD-7^[25] 更容易利用小分子碳源一致.

2.4.2 温度

由图 7(b) 所见, 温度为 10°C 时, 菌株 NP1 几乎不生长, 经过 48 h 反应后, 氮磷的去除率仍较低, 氨氮和磷酸盐最终去除率只有 18.37% 和

15.20%. 根据氨氮降解动力学分析, $R_m = 0.68 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, $t_0 = 8.33 \text{ h}$, 菌株 NP1 需要更长的时间以适应低温环境. 随着温度升高, 菌体生长量和氮磷去除率增加, 当温度为 30°C 时, 菌株生长和氮磷去除达到最大, $D_{600} = 1.224$, 氨氮和磷酸盐去除率分别为 99.24% 和 88.35%. 在 37°C 时, 氨氮和磷酸盐浓度去除率降低, 但 R_m 取得最大值 $20.09 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 这可能因为随着温度升高, 生长初期促进菌株生长代谢, 后期导致生物活性物质变性, 细胞功能下降甚至死亡, 从而导致最终去除率降低^[22, 26]. 由表(3)可知, 随着温度的升高, R_m 明显增加, t_0 随着温度升高而降低, 说明在一定范围内, 温度越高越有利于接种菌株初期生长. 菌株 NP1 的最佳反应温度为 30°C , 这与大多数异养硝化菌的最佳温度($30 \sim 37^\circ\text{C}$) 相同^[22].

2.4.3 转速

摇床转速与培养基中 DO 密切相关, 转速越大, DO 浓度越高. 随着转速的增加, 菌体的生长与氮磷去除均有所提高. 在 4 种转速条件下, 除 $80 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以外, 氨氮和磷酸盐的最终去除率都在 99% 和 80% 以上. 低转速下氮和磷的不完全去除可能是因为转速太低, DO 不足所致. 就氨氮降解情况而言, 如表 3 所示, R_m 随着转速的升高显著增

加, 高转速条件有利于氨氮的快速转化, 此结果可能与高转速时较快的基质转移速率相关^[27, 28]. 综上所述, 转速为 160 r·min⁻¹ 最为经济.

2.4.4 C/N

在低 C/N 条件, 菌株生长缓慢, 氨氮和磷酸盐去除效果差. 在 C/N = 2 时, 最大 D_{600} 为 0.41, 氨氮和磷酸盐去除率均低于 40%, 这主要是由于碳源不足抑制菌体的生长代谢和基质降解^[29, 30]. 当 C/N 为 10 和 15 时, 菌株 NP1 生长良好, 氮磷的去除性

能明显提高, 最大 D_{600} 为 1.191 和 1.201, 氨氮和磷酸盐的最终去除率分别为 99.17%、88.38% 和 99.09%、86.30%. 由氨氮拟合结果可见(表 3), R_m 随着 C/N 的提高而增加, 当 C/N 为 10 和 15 时, R_m 分别为 9.29 和 12.61 mg·(L·h)⁻¹, t_0 分别为 4.24 和 8.20 h. 相比较, C/N = 15 时的氨氮最大转化速率比 C/N = 10 时略有增加, 但停滞时间也有所延长, 氨氮最终去除率无明显变化. 因此, 确定最佳的 C/N 为 10.

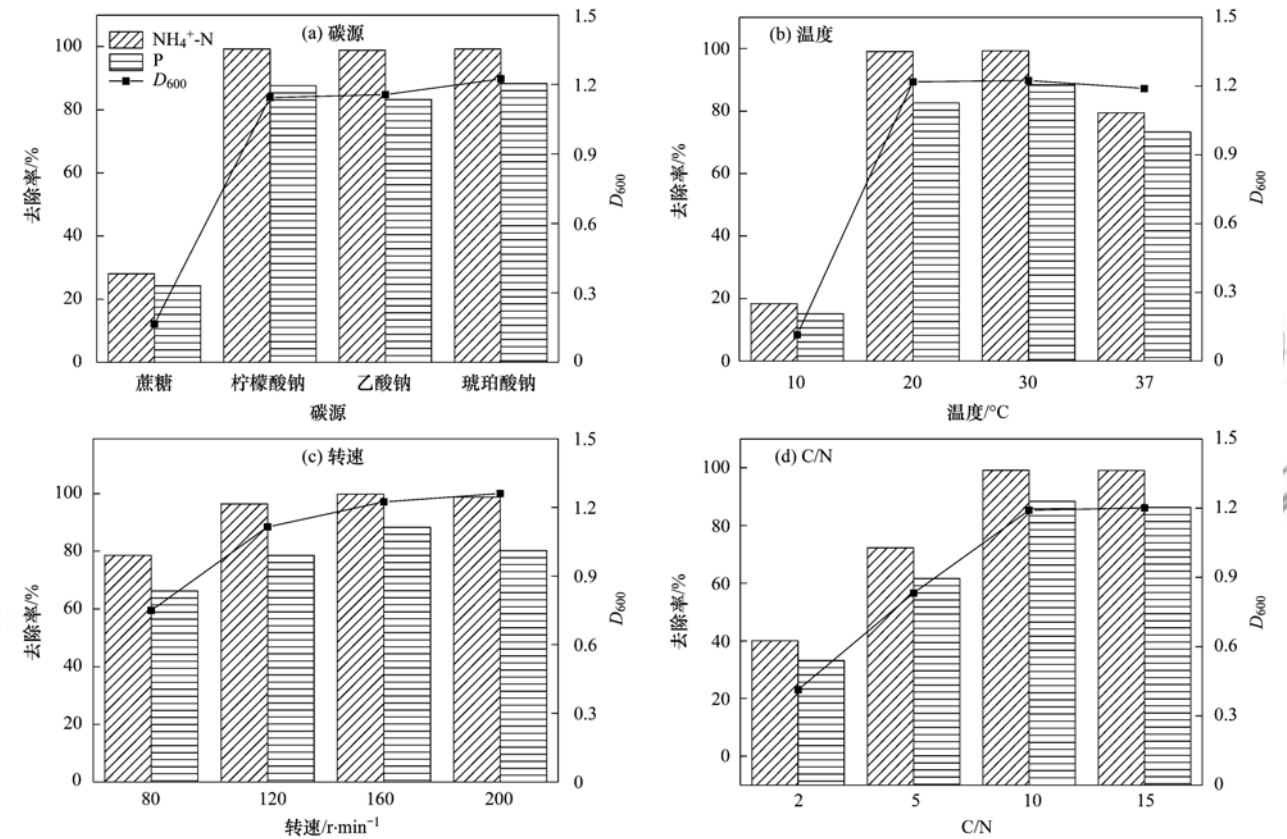


图 7 环境因子对菌株 NP1 生长及同步脱氮除磷特性影响

Fig. 7 Effect of environmental factors on growth and simultaneous nitrogen and phosphorus removal by strain NP1

表 3 菌株 NP1 在不同环境条件下的氨氮降解动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of ammonium degradation by strain NP1 under different environmental conditions				
环境因子	指标/数值	R_m /mg·(L·h) ⁻¹	t_0 /h	R^2
碳源	蔗糖	0.31	16.20	0.98
	柠檬酸钠	5.25	16.75	0.98
	乙酸钠	8.25	8.39	0.99
	琥珀酸钠	9.29	4.24	0.99
C/N	2	4.88	8.64	0.99
	5	7.10	8.10	0.99
	10	9.29	4.24	0.99
	15	12.61	8.20	1.00
温度/℃	10	0.68	8.33	0.99
	20	7.51	7.58	0.99
	30	9.29	4.24	1.00
	37	20.09	2.62	0.94
转速/r·min ⁻¹	80	2.72	3.37	0.99
	120	5.93	5.95	0.99
	160	9.29	4.24	1.00
	200	10.92	6.58	0.99

3 结论

(1) 菌株 NP1 具有高效的异养硝化能力, 氨氮最大去除率达 99.12%, 反应过程只有少量的硝化中间产物累积, 并且能够耐受较高的氨氮负荷. 同时, 菌株 NP1 具有良好的好氧反硝化特性, 能够利用亚硝酸盐和硝酸盐进行生长代谢, 最大去除率分别为 91.40% 和 95.10%.

(2) 菌株 NP1 异养硝化过程还伴随着同步的聚磷作用, 适当的氮磷比有利于氮磷的同步去除, 当氮磷比为 5:1 时, 最大氨氮和磷酸盐去除率分别为 99.21% 和 88.35%.

(3) 菌株 NP1 生长特性符合 Logistic 模型 ($R^2 > 0.99$), 氮磷降解过程则与修饰的 Compertz 模型相匹配 ($R^2 > 0.99$), 拟合所得氮和磷酸盐最大转化速率 R_m 为: 氨氮 > 硝氮 > 亚硝氮, 迟滞时间 t_0 为: 硝氮 > 亚硝氮 > 氨氮.

(4) 菌株 NP1 同步脱氮除磷最适宜的条件为碳源是琥珀酸钠、C/N = 10、 $T = 30^\circ\text{C}$ 以及 r 为 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.

参考文献:

- [1] Guo Y, Wang Y Y, Zhang Z J, *et al.* Physiological and transcriptomic insights into the cold adaptation mechanism of a novel heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying-like bacterium *Pseudomonas indoloxydans* YY-1 [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, **134**: 16-24.
- [2] Liu Y X, Wang Y, Li Y, *et al.* Nitrogen removal characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* C16 [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2015, **23**(5): 827-834.
- [3] Huang F, Pan L Q, Lv N, *et al.* Characterization of novel *Bacillus* strain N31 from mariculture water capable of halophilic heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, **124**(5): 564-571.
- [4] 王秀杰, 王维奇, 李军, 等. 异养硝化菌 *Acinetobacter* sp. 的分离鉴定及其脱氮特性 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4241-4250.
- [5] 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 等. 异养硝化细菌 *Pseudomonas putida* YH 的脱氮特性及降解动力学 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1892-1899.
- [6] Wang X H, Yang L, Ren Y X, *et al.* Nitrogen removal by heterotrophic nitrifying bacterium *Pseudomonas putida* YH and its kinetic characteristics [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1892-1899.
- [7] Su J F, Shi J X, Huang T L, *et al.* Kinetic analysis of simultaneous nitrification and biomineralization of novel *Acinetobacter* sp. CN86 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, **109**(1): 87-94.
- [8] Li C N, Yang J S, Wang X, *et al.* Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a phosphate accumulating bacterium *Pseudomonas stutzeri* YG-24 [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **182**: 18-25.
- [9] Rout P R, Bhunia P, Dash R R. Simultaneous removal of nitrogen and phosphorous from domestic wastewater using *Bacillus cereus* GS-5 strain exhibiting heterotrophic nitrification, aerobic denitrification and denitrifying phosphorous removal [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **244**: 484-495.
- [10] Yang L, Ren Y X, Zhao S Q, *et al.* Isolation and characterization of three heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria from a sequencing batch reactor [J]. *Annals of Microbiology*, 2016, **66**(2): 737-747.
- [11] Buchanan R E, Gibbons N E. 伯杰细菌鉴定手册 [M]. 中国科学院微生物研究所《伯杰细菌鉴定手册》翻译组, 译. (第八版). 北京: 科学出版社, 1984.
- [12] 王光利, 李新风, 张辉, 等. CTN-4 降解百菌清的条件优化及动力学模型的研究 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(11): 1999-2005.
- [13] Wang G L, Li X F, Zhang H, *et al.* Optimization of CTN-4 to chlorothalonil-degrading conditions and a kinetics model [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(11): 1999-2005.
- [14] Chen J, Zhao B, An Q, *et al.* Kinetic characteristics and modelling of growth and substrate removal by *Alcaligenes faecalis* strain NR [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2016, **39**(4): 593-601.
- [15] 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. 254-279.
- [16] Chen S H, He S Y, Wu C J, *et al.* Characteristics of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium *Acinetobacter* sp. T1 and its application for pig farm wastewater treatment [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2019, **127**(2): 201-205.
- [17] Kim J K, Park K J, Cho K S, *et al.* Aerobic nitrification-denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains [J]. *Bioresource Technology*, 2005, **96**(17): 1897-1906.
- [18] 宋宇杰, 李屹, 刘玉香, 等. 碳源和氮源对异养硝化好氧反硝化菌株 Y1 脱氮性能的影响 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(9): 2491-2497.
- [19] Song Y J, Li Y, Liu Y X, *et al.* Effect of carbon and nitrogen sources on nitrogen removal by a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain Y1 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(9): 2491-2497.
- [20] Joo H S, Hirai M, Shoda M. Nitrification and denitrification in high-strength ammonium by *Alcaligenes faecalis* [J]. *Biotechnology Letters*, 2005, **27**(1): 773-778.
- [21] Wan W J, He D L, Xue Z J. Removal of nitrogen and phosphorus by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a denitrifying phosphorus-accumulating bacterium *Enterobacter cloacae* HW-15 [J]. *Ecological Engineering*, 2017, **99**: 199-208.
- [22] 张婷月, 丁钰, 黄民生. 异养硝化-好氧反硝化细菌的筛选及其脱氮性能研究 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, (6): 22-31, 87.
- [23] Zhang T Y, Ding Y, Huang M S. Screening of heterotrophic nitrification-aerobic denitrifying bacteria and its nitrogen removal characteristics [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2018, (6): 22-31, 87.
- [24] He T X, Li Z L, Sun Q, *et al.* Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Pseudomonas tolaasii* Y-11 without nitrite accumulation during nitrogen conversion [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **200**: 493-499.
- [25] 金敏, 王景峰, 孔庆鑫, 等. 好氧异养硝化菌 *Acinetobacter*

- sp. YY-5 的分离鉴定及脱氮机理[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15**(5): 692-697.
- Jin M, Wang J F, Kong Q X, *et al.* Isolation and denitrification mechanism of an aerobic heterotrophic bacterium *Acinetobacter* sp. YY-5 [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, **15**(5): 692-697.
- [22] 梁贤, 任勇翔, 杨垒, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1749-1756.
- Liang X, Ren Y X, Yang L, *et al.* Characteristics of nitrogen removal by a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium YL[J]. Environmental Science, 2015, **36**(5): 1749-1756.
- [23] Yang X P, Wang S M, Zhang D W, *et al.* Isolation and nitrogen removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Bacillus subtilis* A1 [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(2): 854-862.
- [24] 姜磊, 徐成斌, 马溪平, 等. 1 株好氧反硝化菌的分离鉴定和反硝化特性研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 12-15.
- Jiang L, Xu C B, Ma X P, *et al.* Identification and denitrification characteristics of an aerobic denitrifier [J]. Environmental Science and Technology, 2013, **36**(3): 12-15.
- [25] Ge Q L, Yue X P, Wang G Y. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at high initial phenol concentration by isolated bacterium *Diaphorobacter* sp. PD-7 [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, **23**(5): 835-841.
- [26] 杨秀玲, 杨宗政, 庞金钊, 等. 具有硝化作用的异养菌脱除氨氮的性能研究[J]. 天津科技大学学报, 2005, **20**(1): 24-26, 48.
- Yang X L, Yang Z Z, Pang J Z, *et al.* Study on removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ using nitrification and heterotrophic bacteria [J]. Journal of Tianjin University of Science and Technology, 2005, **20**(1): 24-26, 48.
- [27] Jin R F, Liu T Q, Liu G F, *et al.* Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the marine origin bacterium *Pseudomonas* sp. ADN-42 [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, **175**(4): 2000-2011.
- [28] 颜薇芝, 张汉强, 余从田, 等. 1 株异养硝化好氧反硝化不动杆菌的分离及脱氮性能[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(7): 4419-4428.
- Yan W Z, Zhang H Q, Yu C T, *et al.* Isolation of *Acinetobacter* sp. YN3 and its heterotrophic nitrification-aerobic denitrification characters [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(7): 4419-4428.
- [29] Chen Q, Ni J R. Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, **113**(5): 619-623.
- [30] 陈青云, 江林峰, 陈建奇, 等. 高效异养硝化细菌 *Alcaligenes faecalis* Ni3-1 的分离及其脱氮特性研究[J]. 环境工程, 2015, **33**(5): 48-53.
- Chen Q Y, Jiang L F, Chen J Q, *et al.* Isolation and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal characteristics of a high-efficient heterotrophic nitrifying bacterium *Alcaligenes faecalis* Ni3-1 [J]. Environmental Engineering, 2015, **33**(5): 48-53.

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> NP1	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)