

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.2
第40卷 第2期

目次

冬季山谷风和海陆风对京津冀地区大气污染分布的影响	李青春, 李炬, 郑祚芳, 王耀庭, 于淼 (513)
珠三角地区利用 PM _{2.5} 反演气溶胶数浓度谱方法	李菲, 谭浩波, 邓雪娇, 邹宇, 刘礼, 蔡明甫, 张芷言, 周声圳 (525)
广州冬季气溶胶中水溶性有机物和类腐殖质的吸光性和荧光光谱特性	范行军, 余旭芳, 操涛, 王艳, 肖新, 谢越, 李飞跃, 宋建中, 彭平安 (532)
扬州市 PM _{2.5} 中重金属来源及潜在健康风险评估	董世豪, 谢扬, 皇甫延琦, 史旭荣, 易睿, 史国良, 冯银厂 (540)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类的污染特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 衣雅男, 魏本杰, 伏梦璇 (548)
博斯腾湖流域大气多环芳烃污染特征、干沉降通量及来源	宋世杰, 黄韬, 赵留元, 毛潇萱, 穆熙, 高宏, 马建民 (558)
某集约化肉鸡饲养场 PM _{2.5} 中抗生素抗性基因的分布特征	刘菲, 许霞, 屠博文, 汪楚乔, 江晓栋, 王利平, 薛银刚 (567)
水汽源地和局地蒸发对大气降水氢氧稳定同位素组分的影响	胡勇博, 肖薇, 钱雨妃, 刘强, 谢成玉, 张秀芳, 张文庆, 温学发, 刘寿东, 李旭辉 (573)
滇池大气沉降氮磷形态特征及其入湖负荷贡献	任加国, 贾海斌, 焦立新, 王一茹, 杨苏文, 武倩倩, 高秋生, 崔志丹, 郝子峰 (582)
基于地统计学分析的太湖颗粒态和溶解态氮、磷营养盐时空分布特征及来源分析	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 高光, 邵克强 (590)
湖泊蓝藻水华对连通河道水质的影响	余茂蕾, 洪国喜, 许海, 朱广伟, 朱梦圆, 权秋梅 (603)
异龙湖沉积物重金属人为污染与潜在生态风险	李小林, 刘恩峰, 于真真, 张恩楼, 王荣, 沈吉 (614)
珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素	杜佳, 王永红, 黄清辉, 戴琦, 杨远东 (625)
北运河粪源微生物分布特征及健康风险评价	陈磊, 李蕾芳, 邱晓沙, 张普, 戴莹, 肖月晨, 沈珍瑶 (633)
氧化还原循环过程中沉积物磷的形态及迁移转化规律	郝文超, 王从锋, 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 赵萍, 丹勇, 胡子龙 (640)
磁性赭铁改性膨润土添加对河道底泥磷迁移与形态转化的影响	王艳, 林建伟, 詹艳慧, 张宏华, 张志斌, 何思琪, 赵钰颖, 吴小龙, 俞阳 (649)
钙预处理对磁性赭铁改性膨润土吸附水中磷酸盐的影响	赵钰颖, 林建伟, 张宏华, 张志斌, 詹艳慧, 姜博汇, 何思琪, 俞阳, 吴小龙, 王艳, 陈璐, 李十盛 (658)
NH ₄ ⁺ 对镁改性生物炭除磷效果的影响	郭蒙蒙, 王鹏飞, 侯泽英, 曹晶, 储昭升, 杨永哲 (669)
3 种吸附剂对污水磷污染去除性能与机制比较	吴露, 刘锋, 龙睿, 罗沛, 肖润林, 陈向, 吴金水 (677)
硝酸纤维素膜光降解水中对硝基苯酚的机制	代志峰, 赵同谦, 阴永光, 余加平, 武俐, 邵超, 孙静阳, 罗玉俊 (685)
ZnTiO ₂ -TiO ₂ 复合光催化剂的制备及光催化降解有机污染物机制分析	张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (693)
高指数晶面 TiO ₂ 对铬的吸附及光催化去除	钟德健, 张建峰, 李尧, 谢晓丹 (701)
Fe ⁰ /海藻酸钙微球还原-Fenton 氧化协同降解酸性红 B	张环, 李爽爽, 魏俊富, 傅敏, 李雪曦, 丁琦, 白蓉 (708)
不同滤料滤池启动期对铁锰离子的去除机制	蔡言安, 毕学军, 张嘉凝, 何静, 董杨, 王海港 (717)
SGO 改性复合纳滤膜的制备及分盐性能	张彦君, 张少峰, 赵长伟, 王军 (724)
一体式铝盐絮体-超滤膜净水效能与机制	薛文静, 李文江, 刘娟, 马百文 (730)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺处理高盐废水及膜污染分析	王凯伦, 刘芳, 关羽琪, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马燕林, 栾桂荣, 郭瑾 (738)
多环芳烃及其衍生物在 SBR/MBBR 工艺中的分布与去除	刘淑惠, 周伟君, 周建仁, 赵婧, 王喆 (747)
微气泡曝气生物膜反应器处理低 C/N 比废水脱氮过程	刘春, 王聪聪, 陈晓轩, 张静, 张瑞娜, 张磊 (754)
从枝菌根强化型生态浮床处理煤化工模拟含盐废水	窦文清, 何皓, 宋文萍, 王曙光, 戴东伟 (761)
夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法	宋天伟, 盛晓琳, 王家德, 刘锐, 陈吕军 (768)
硝化包埋菌颗粒氨吸附性能及动力学特性	于德爽, 吕廷廷, 陈光辉, 王晓霞, 唐鹏, 黄硕, 刘诚诚, 杜世明 (774)
乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性	毕春雪, 于德爽, 杜世明, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 巩秀珍, 都叶奇 (783)
DPR-SNED 系统处理低 C/N 城市污水与硝酸盐废水的运行特性	杜世明, 于德爽, 毕春雪, 王晓霞, 陈光辉, 袁梦飞, 甄建国, 张帆, 吕廷廷 (791)
间歇曝气连续流反应器同步硝化反硝化除磷	赵智超, 黄剑明, 李健, 张为堂, 张力航, 吴雪晴, 陈永志 (799)
ABR-MBR 反硝化除磷工艺的启动及稳定运行	韦佳敏, 蒋志云, 程诚, 朱琳, 刘文如, 沈耀良 (808)
进水 C/N 对 SNEDPR 系统脱氮除磷的影响	都叶奇, 于德爽, 甄建国, 王晓霞, 陈光辉, 唐鹏, 王钧, 毕春雪, 巩秀珍, 黄硕, 刘诚诚 (816)
ABR 除碳-CANON 耦合工艺除碳脱氮特性	李田, 印雯, 王昕竹, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (823)
不同曝气密度对 CANON 工艺启动的影响	李冬, 高雪健, 张杰, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (829)
调控温度和沉降时间实现 ANAMMOX 颗粒快速启动及其稳定运行	李海玲, 李冬, 张杰, 刘博, 李帅 (837)
C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响	张敏, 韦佳敏, 黄慧敏, 姜滢, 郭萌蕾, 陈重军, 沈耀良 (845)
基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性	王杨, 朱斌, 童俊, 白晓慧 (853)
黄山土壤细菌群落和酶活性海拔分布特征	姚兰, 胡立煌, 张焕朝, 方炎明, 王良梅 (859)
基于高通量测序分析的生物修复石油污染土壤菌群结构变化	祁燕云, 吴蔓莉, 祝长成, 叶茜琼, 徐会宁 (869)
硝化作用对盐碱湿地 N ₂ O 排放的影响及其环境因子分析	杨曲, 高伟峰, 刘凤琴, 王文锋, 马建华, 徐卓, 梁红, 高大文 (876)
长期定位施用牛粪对夏玉米-冬小麦体系农田 N ₂ O 和 NO 排放的影响	聂皇华, 张家升, 和周明, 安梅, 杨学云, 顾江新 (885)
地膜覆盖和施氮对菜地 N ₂ O 排放的影响	倪雪, 郝庆菊, 陈世杰, 李晓茜, 石孝均, 江长胜 (893)
双季稻品种根际特征与甲烷排放差异及其关系	肖志祥, 傅志强, 徐华勤, 苏姗, 郭昱, 张浪, 唐剑武 (904)
多年施用生物炭对河南烤烟种植区土壤呼吸的影响	李亚森, 丁松爽, 殷全玉, 李佳轶, 周迪, 刘国顺 (915)
桂林毛村不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异特征	丁梦凯, 胡晓农, 曹建华, 吴夏, 黄芬, 王奇岗, 闵佳 (924)
工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析	李峰, 刘思源, 李艳, 史舟 (934)
膨润土对不同类型农田土壤重金属形态及生物有效性的影响	林海, 靳晓娜, 董颖博, 罗明科, 赵一鸣 (945)
缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征	陈仕奇, 吕盛, 高明, 黄容 (953)
复杂地形条件下根系对土壤有机碳的贡献	张彦军, 郭胜利 (961)
不同水平外源碳在稻田土壤中转化与分配的微生物响应特征	王季斐, 童瑶瑶, 祝贞科, 陈珊, 邓扬悟, 葛体达, 吴金水 (970)
宝鸡市植被叶子重金属分布规律及生态风险评价	张俊辉, 林青, 姜珊, 刘滨, 李东兴, 王彦虎 (978)
生物炭对污泥堆肥及其利用过程重金属有效态的影响	周楫, 余亚伟, 蒋越, 杨雨滢, 张成 (987)
污泥停留时间对餐厨垃圾与剩余污泥中温厌氧混合发酵系统的影响	袁宏林, 马静, 邢保山, 温俊伟, 韩宇乐, 李倩, 王晓昌 (994)
热碱-分步酶水解-厌氧消化工艺处理秸秆畜禽粪混合物料及其甲烷高值化条件	卞爱琴, 远野, 张璐璐, 付强, 陈天明, 何磊, 丁成, 王爱杰 (1003)

夏季高温下污水处理厂生物处理系统的硝化性能及强化方法

宋天伟^{1,2}, 盛晓琳¹, 王家德², 刘锐^{1*}, 陈吕军^{1,3*}

(1. 浙江清华长三角研究院生态环境研究所, 浙江省水质科学与技术重点实验室, 嘉兴 314006; 2. 浙江工业大学环境学院, 杭州 310014; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 本文模拟夏季高温, 考察了温度(30~45℃)和氨氮容积负荷对污水处理厂好氧池活性污泥硝化功能及微生物群落的影响, 同时探讨中温富集硝化污泥高温驯化前后用于强化受高温冲击的生物处理系统的硝化效果。结果表明, 在30~40℃水温下好氧池活性污泥的氨氮去除效果保持在90%以上, 硝化菌含量也逐步升高至4.55%; 当水温升至45℃时氨氮去除率和硝化菌含量均分别降至40%和1.97%。为快速恢复受夏季高温冲击的生物系统, 将中温富集硝化污泥在40℃下驯化61 d后, 获得硝化活性为(60±5) mg·(L·h)⁻¹的硝化污泥, 考察中温富集硝化污泥驯化前后对受高温冲击的生物处理系统的强化效果, 发现驯化后的中温富集硝化污泥只需投加5% (体积分数) 即可提高10%的氨氮去除率, 而未驯化的则需要投加10% (体积分数)。上述结果表明, 中温富集硝化污泥经驯化后能更好地用于强化受高温冲击的生物处理系统的硝化功能。

关键词: 硝化污泥; 氨氮去除; 驯化; 高温; 生物强化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0768-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201802047

Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer

SONG Tian-wei^{1,2}, SHENG Xiao-lin¹, WANG Jia-de², LIU Rui^{1*}, CHEN Lü-jun^{1,3*}

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Water Science and Technology, Department of Environment in Yangtze Delta Region Institute of Tsinghua University, Jiaxing 314006, China; 2. College of Environment, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The influence of temperature (30–45℃) and ammonia-nitrogen volume load on the nitrification function and microbial community of activated sludge in an aerobic tank of a sewage treatment plant were investigated under simulated high-temperature stress in the summer. Meanwhile, the bioaugmentation effectiveness of the middle-temperature-enriched nitrifying sludge (with or without acclimation) was evaluated in two biological treatment systems under high-temperature shock. The results showed that the ammonium-nitrogen (NH₄⁺-N) removal efficiency and the nitrifying bacteria content of the aerobic activated sludge at 30–40℃ were above 90% and up to 4.55% and decreased to 40% and 1.97% at 45℃, respectively. To quickly recover the nitrification function of the biological system under high-temperature shock in the summer, the middle-temperature-enriched nitrifying sludge was acclimated at 40℃ for 61 d and achieved (60±5) mg·(L·h)⁻¹ nitrification activity. Then, its bioaugmentation efficiency was compared with that of the middle-temperature-enriched nitrifying sludge. In the bioaugmentation test, 10% of NH₄⁺-N was removed in the reactor inoculated with 5% (volume fraction) of the acclimated nitrifying sludge, while the reactor needed inoculate with 10% (volume fraction) of the middle-temperature-enriched sludge to achieve the same removal efficiency. The results suggested that middle-temperature-enriched nitrifying sludge, after acclimating at 40℃, has a better enhancement effect under a high-temperature shocking load.

Key words: nitrifying activated sludge; ammonium nitrogen removal; acclimation; high temperature; bioaugmentation

硝化菌适宜的生长温度范围为15~35℃, 当水温高于35℃时, 污水生物处理系统的硝化效果开始变差^[1]。例如, Shore等^[2]的研究发现, 水温30℃时氨氮去除率高达95%, 而水温超过42℃后, 氨氮去除率降至35%。在中国南方地区, 夏季高温常会使污水生物处理系统的硝化功能降低^[3]。针对夏季高温的污水生物处理的硝化强化技术有广泛而迫切的需求。

Shore等^[2]通过投加一定量的30℃驯化硝化污泥, 能快速恢复受42℃冲击下的生物系统的硝化效果, 氨氮去除率从35%提升至60%, 且强化效果可维持较长时间, 因此中温硝化污泥能够恢复高温下

崩溃的硝化系统。但其他研究者提出, 中温环境下培养的硝化菌经高温驯化后, 其对夏季高温冲击后的污水生物处理系统的硝化强化效果更好。例如, Lopezvazquez等^[4]选取水温为34℃的油厂活性污泥作为接种泥, 在35~55℃之间培养获得耐45℃的高温硝化菌, 相比于在34℃富集的硝化菌, 所获得的耐45℃高温硝化菌对40℃下崩溃的生物处理系

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-09-01

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07206-004)

作者简介: 宋天伟(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染防治, E-mail: 243865281@qq.com

* 通信作者, E-mail: 1393612924@qq.com; chenlj@tsinghua.edu.cn

统硝化强化效果更显著. Courtens 等^[5]从 35℃ 的堆肥设备中筛选出的硝化菌, 经高温培养, 获得耐 50℃ 的硝化污泥, 将其投加受 42℃ 冲击的生物处理系统中, 其硝化强化效果持续到试验结束, 而投加 35℃ 富集的硝化污泥的仅维持了 2 d.

为探究城市污水处理厂夏季受高温冲击后的活性污泥的硝化性能及恢复方法, 本文以江苏省宜兴市新建污水处理厂为例, 研究了曝气池活性污泥在 30 ~ 45℃ 之间的硝化效果及微生物群落变化, 同时对比中温富集硝化污泥高温驯化前后对受高温冲击的生物处理系统的硝化强化效果, 探究污水处理厂应对夏季高温的硝化强化方法, 以期工程应用提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 好氧池活性污泥的温度影响试验

1.1.1 试验装置及运行条件

为考察温度对宜兴市新建污水处理厂好氧池活性污泥的硝化活性的影响, 采用序批式反应器(图 1), 共运行 50 d, 按水温将试验分为五阶段: 第一阶段(1 ~ 15 d), 水温 30℃; 第二阶段(16 ~ 22 d), 水温 35℃; 第三阶段(23 ~ 29 d), 水温 40℃; 第四阶段(30 ~ 33 d), 水温 45℃; 由于反应器内硝化效率大幅降低, 为防止不可逆性硝化功能崩溃, 第五阶段(34 ~ 50 d)重新把反应器内水温降低至 40℃.

序批式反应器有效容积 2 L, 水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)为 24 h. 运行模式: 每天运行 4 个周期, 每个周期 6 h, 其中进水 20 min、曝气 260 min、沉降 60 min、出水 20 min. 装置通过水浴加热, 使水温维持在设定温度.

接种污泥取自宜兴市新建污水处理厂的好氧池, 该污泥的混合液悬浮固体浓度(mixed liquor suspended solid, MLSS)、混合液挥发性悬浮固体浓度(mixed liquor volatile suspended solid, MLVSS)和

硝化活性分别为 $3.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $2.2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(3.5 \pm 0.5) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 接种后初始污泥浓度(MLSS)为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右.

1.1.2 试验用水

进水组成参照课题组前期研究^[6], 含硫酸铵、碳酸氢钠、磷酸盐缓冲溶液. 其中, 硫酸铵提供氮源, 进水氨氮浓度为 $50 \sim 150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 碳酸氢钠提供碱度, 氨氮和碳酸氢钠质量比为 9:1; 磷酸盐缓冲溶液(磷酸氢二钾和磷酸二氢钾) $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 用于提供磷源并调节 pH.

混合液 pH 保持在 7.0 ~ 7.5, DO 保持在 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 试验期间除采样外不排泥. 进水氨氮浓度 1 ~ 4 d 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [氨氮容积负荷 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$], 5 ~ 19 d 提高至 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [氨氮容积负荷 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$], 20 d 后提高至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [氨氮容积负荷 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$].

1.2 中温富集硝化污泥的高温驯化试验

高温驯化试验共运行 94 d, 主要是考察在温度较高条件下硝化污泥的硝化活性变化. 驯化装置同图 1, 有效容积扩大至 10 L; 进水成分与 1.1 节相同, 但为了提高硝化污泥的氨氮去除能力, 大幅提高进水氨氮浓度至 $750 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 并且投加有机碳源提供 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ COD, 以减缓污泥絮体在高温下的解体.

接种污泥取自前期试验的中温硝化污泥^[7], 该污泥的 MLSS、MLVSS 和硝化活性分别为 $12.05 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $7.48 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(62.5 \pm 5) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 经过稀释, 初始接种 MLSS 为 $4.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 反应器内 pH 在 7.0 ~ 8.0, DO 在 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全程除采样外不排泥. 反应器内水温变化分 5 个阶段逐步提高: 第一阶段(1 ~ 15 d), 水温 30℃; 第二阶段(16 ~ 22 d), 水温 35℃; 第三阶段(23 ~ 29 d), 水温 40℃; 第四阶段(30 ~ 41 d), 水温 45℃; 第五阶段(42 ~ 94 d), 水温为 40℃. 由于硝化系统未见好转, 第 52 d 投加 10% (体积分数) 的原接种泥进行恢复.

1.3 模拟夏季温度冲击下的硝化强化试验

为考察经 40℃ 驯化前后的中温富集硝化污泥强化受高温冲击生物处理系统的效果差异, 平行运行 A、B 两个反应器. 试验装置、运行模式、试验用水同 1.1 节, 接种污泥为宜兴市新建污水处理厂的好氧池活性污泥, 初始 MLSS 为 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 反应器共运行 40 d, 混合液 pH 保持在 7.0 ~ 7.5, 水温为 40℃, DO 保持在 $2 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 全程除采样外不排泥.

在 40℃ 水温下, 首先通过阶梯式提高进水氨氮

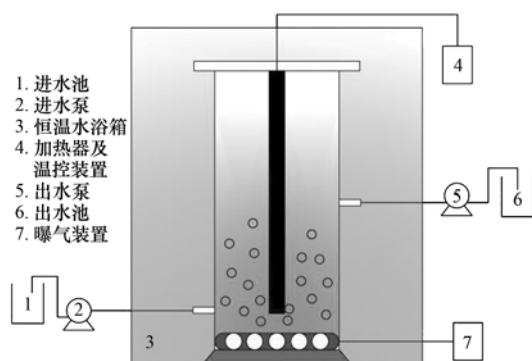


图 1 试验用序批式反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of sequencing batch reactor

浓度, 给生物处理系统制造高氨氮冲击. 1~15 d, 进水氨氮浓度为 $30 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 第 16 d 起提高进水氨氮至 $(550 \pm 10) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 反应器 A 使用 1.2 节 40°C 驯化硝化污泥进行强化, 硝化活性 $(60 \pm 5) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, MLSS 为 $(3 \pm 0.5) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$; 反应器 B 使用本课题组同期研究中的中温富集硝化污泥^[7], 硝化活性和 MLSS 都与反应器 A 类似, 分别为 $(62.5 \pm 5) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 、 $(3.5 \pm 0.6) \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. 在运行的第 24 d、30 d 和 35 d 分别投加为 1% (体积分数)、5% (体积分数) 和 10% (体积分数) 的驯化前后的中温硝化污泥.

1.4 分析测定项目

氨氮 (P_{276})、亚硝态氮 (P_{268})、硝态氮 (P_{258}), MLSS (P_{105})、MLVSS (P_{106}) 的测定参照标准方法^[8]. 温度、pH 的测定采用日本东亚电波株式会社的便携式 pH 计 (DKK-TOA HM-30P); DO 测定使用日本东亚电波株式会社的便携式溶解氧仪 (DKK-TOA HM-31P).

微生物生物相委托生工生物工程 (上海) 股份有限公司进行宏基因组测序, 分别于第 19 d (35°C)、23 d (40°C)、32 d (45°C) 平行采集 3 个 1 mL 的 1.1 节活性污泥, 保存于 -70°C ^[9], 用于测序分析. 每个样本读取指定的条码, 然后通过 0.20.4 版本的 PRINSEQ (<http://prinseq.sourceforge.net>) 进行质量分析控制; 使用 1.2.3 版本的 FLASH (<http://sourceforge.net/projects/flashpage>) 读取合并后的原始 DNA 片段; 利用 UCHIME 4.1 版本 (http://www.drive5.com/uchime/uchime_download.html) 开展链式反应, 获得的序列根据核糖体数据库进行校准, 依据伯杰分类系统项目分类^[10].

2 结果与讨论

2.1 好氧池活性污泥硝化效率受温度的影响

温度对宜兴市新建污水处理厂好氧池活性污泥的氨氮去除率的时间变化如图 2 所示. 1~15 d, 在 30°C 和进水氨氮浓度为 $50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 氨氮去除率稳定达到 99%. 16~22 d, 水温升高至 35°C , 进水氨氮提高至 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮去除率达到 100%. 23~29 d, 继续升高温度至 40°C , 反应器的氨氮去除率下降至 90% 左右. 30~33 d 继续把水温升高至 45°C , 氨氮去除率降低至 40%. 上述反应器氨氮去除率随温度的变化现象, 与 Grunditz 等^[11]研究发现的反应器在 40°C 下能够稳定运行但 45°C 硝化效率严重下降的试验结果一致. 此外, Bae^[12]也得出了类似的结论. 第 34 d 将水温降至 40°C , 运

行 5 d 后, 反应器的氨氮去除率并未恢复, 反而继续下降. Sudarno 等^[13]发现硝化系统在 50°C 下被破坏, 通过降温至 22°C 难以恢复硝化功能, 重新接种污泥反应器才能重新运行. 因此, 第 38 d, 重新向反应器中投加了 10% (体积分数) 的原接种泥, 9 d 后氨氮去除率恢复到 90% 以上, 说明投泥进行强化是一种快速恢复受高温冲击生化系统硝化功能的可行方法. 上述结果表明, 来源于中温环境的活性污泥在 40°C 以上的环境中硝化性能将受影响. 这与很多研究者的观点相一致, 很多研究表明硝化菌的酶系统在 40°C 以上环境中会受到破坏, 从而导致硝化功能下降^[13], 因此难以自行修复^[1]. 进一步的研究发现, 可能是参与硝化过程的氨单加氧酶 (ammonia monooxygenase, AMO) 被破坏, 利用粗酶提取法, 得到 40°C 时氨单加氧酶的活性低于 30°C ^[14].

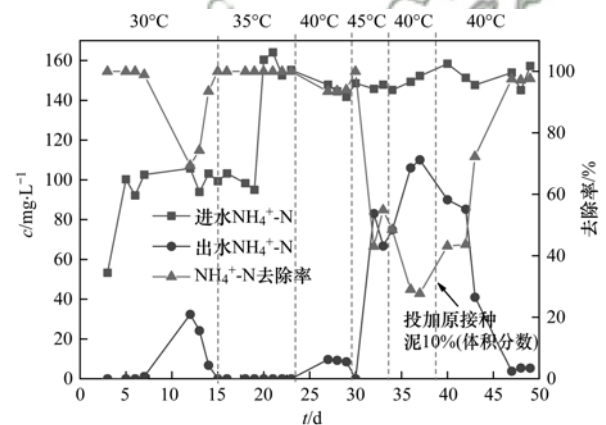


图 2 好氧池活性污泥在不同温度下的氨氮去除率

Fig. 2 Ammonia-nitrogen removal rate of activated sludge collected from aerobic tank at different temperatures

MLSS 和 MLVSS 随运行时间的延长而降低, 如图 3 所示. 运行 34 d 后, MLSS 从 $4 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步下降至 $2.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 可能有两方面原因: 一方面, 接种污泥中含有异养菌, 而进水基质未添加有机碳源, 导致异养菌没有足够的营养物质进行生长; 另一方面, 试验温度最高为 45°C , 有研究表明, 40°C 以上会导致污泥絮体不易成团, 导致微生物游离^[15], 部分微生物随出水流失^[16]. 第 38 d 重新投加了 10% (体积分数) 接种污泥, MLSS 也出现相似的下降情况, 最终 MLSS 为 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 但 MLSS 的降低并未影响氨氮去除率, 推测 MLSS 降低的主要原因为异养菌数量的减少.

2.2 不同温度下活性污泥微生物相分析

在不同温度下, 2.1 节的好氧池活性污泥中丰度前 10 的属水平的微生物群落结构分布如图 4 所示. 微生物的群落组成在中温和高温条件下有所不同, 这与文献^[17]中报道相一致. 不同温度下的活性污泥的优势菌属均为假单胞菌属

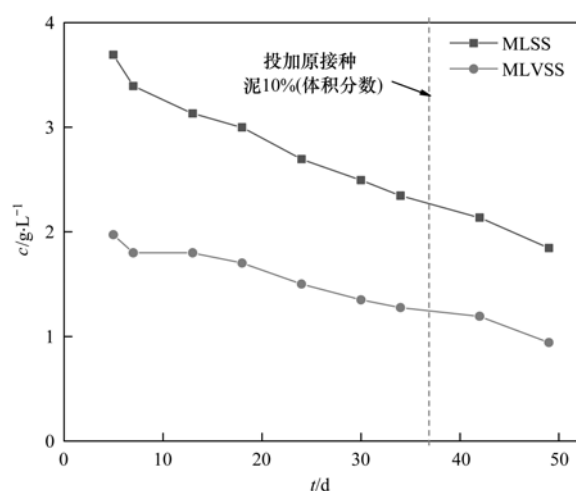


图3 好氧池活性污泥的浓度变化

Fig. 3 Profiles of MLSS and MLVSS of activated sludge collected from aerobic tank

(*Pseudomonadales*) 和伯克氏菌属 (*Burkholderiales*), 但其含量差异大. *Burkholderiales* 的含量随温度而升高, 35℃、40℃ 和 45℃ 时, 其含量分别为 9%、16% 和 36%. *Burkholderiales* 是一种好氧菌^[18], 具有较强耐镉性, 其适应的生长温度也较高, 有些研究者就分别在 50℃^[19] 和 65℃^[20] 进行此类菌的富集培养. *Pseudomonadales* 生长迅速且能分解脂肪和蛋白质^[21], 其含量在 40℃ 时降低至 28%, 但在 45℃ 下部分细菌解体后的产物可能作为 *Pseudomonadales* 生长的营养物质^[22], 使其含量又升高至 37%.

活性污泥中硝化菌以亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonadales*) 为主, 其在反应器中的含量随温

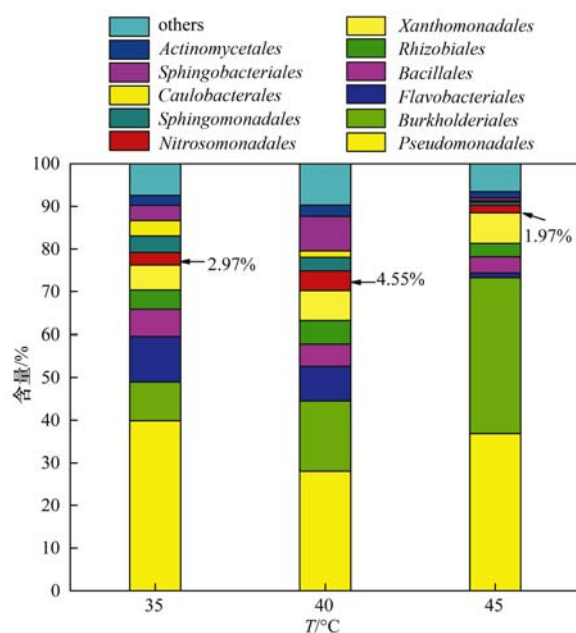


图4 不同温度群落结构分布

Fig. 4 Microbial community of activated sludge collected from aerobic tank at different temperatures

度呈先上升后下降的趋势, 在 35℃ 占微生物总量的 2.97%, 40℃ 时达到最高值 4.55%, 45℃ 下降至 1.97%, 说明 40℃ 以下硝化菌是能够生长的, 当温度为 45℃ 时硝化菌生长被抑制, 甚至部分解体后流失. 陈青青^[23] 分别在 20℃ 和 25℃ 下测定了硝化污泥中的硝化菌含量, 发现 20℃ 的硝化菌含量略高于 25℃ 的. 周玲玲等^[24] 在 30℃ 和 15℃ 下研究温度对硝化作用的影响, 发现 30℃ 硝化菌含量是 15℃ 的 2~3 倍. 这些研究结果均表明温度会影响硝化菌的含量, 但其受温度影响的变化规律还需进一步研究.

上述结果表明, 好氧池活性污泥以假单胞菌属 (*Pseudomonadales*) 和伯克氏菌属 (*Burkholderiales*) 为主; 当温度大于 40℃ 时, *Burkholderiales* 增加, 亚硝化单胞菌属 (*Nitrosomonadales*) 含量下降, 温度过高不适合硝化菌生长.

2.3 中温富集硝化污泥的高温驯化效果

中温富集硝化污泥在 40℃ 下氨氮去除效果如图 5 所示. 试验共运行 94 d, 提高进水氨氮浓度至 750 mg·L⁻¹, 运行初期, 出水氨氮浓度较高, 运行 18 d 后出水氨氮浓度稳定低于 0.5 mg·L⁻¹. 23 d 水温升至 40℃, 运行 7 d 后, 出水氨氮浓度再次升高至 131 mg·L⁻¹; 30 d 进一步提高水温 45℃, 出水氨氮浓度迅速升高至 400 mg·L⁻¹, 氨氮去除效率骤降至 45%. 氨氮去除率随温度变化的趋势与 2.1 节相同. 42 d 采用与 2.1 节相同的方法恢复其硝化功能, 重新把水温降低至 40℃, 运行 10 d 后, 氨氮去除效率仍为 20%~30%, 表明降低温度未取得恢复效果. 因此, 52 d 向反应器内重新接种 10% (体积分数) 的硝化污泥, 硝化功能逐渐恢复, 67 d 时, 出水氨氮浓度可稳定于 20 mg·L⁻¹ 以下, 氨氮去除率达到 95% 以上. 运行至第 94 d, 获得了硝化活性为

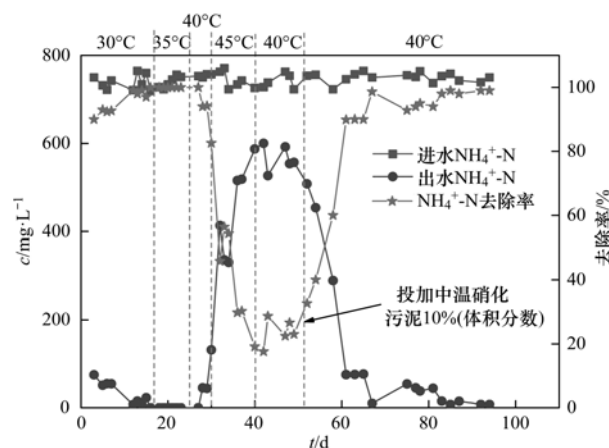


图5 40℃驯化硝化污泥的硝化效率变化

Fig. 5 Nitration efficiency of domesticated nitrification sludge at 40℃

(60 ± 5) $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 、MLSS 为 (3.5 ± 0.5) $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 40°C 驯化硝化污泥, 驯化后的硝化污泥达到了未经驯化的硝化污泥的硝化活性, 且该硝化污泥高于于濛雨等^[25] 在 40°C 下富集得到的硝化活性为 $50 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 的硝化污泥, 是普通污水处理厂的 10 ~ 15 倍。

硝化污泥高温驯化试验的 MLSS 与 MLVSS 的变化如图 6 所示。经过 94 d 富集, MLSS 与 MLVSS 都呈下降的趋势, 与 2.1 试验变化一致, 但由于驯化的过程中加入了有机碳源, 额外提供了 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 COD, 使得富集试验中 MLSS 与 MLVSS 的下降慢于 2.1 节, 说明 COD 是影响 MLSS 的主要原因之一。

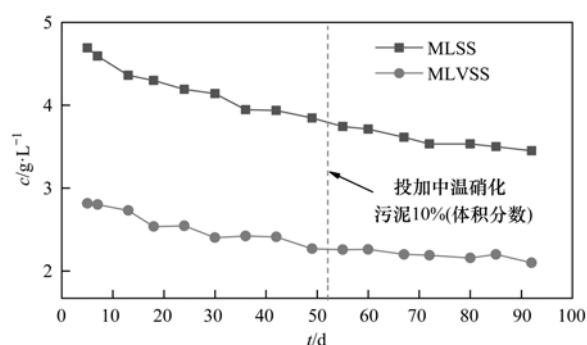


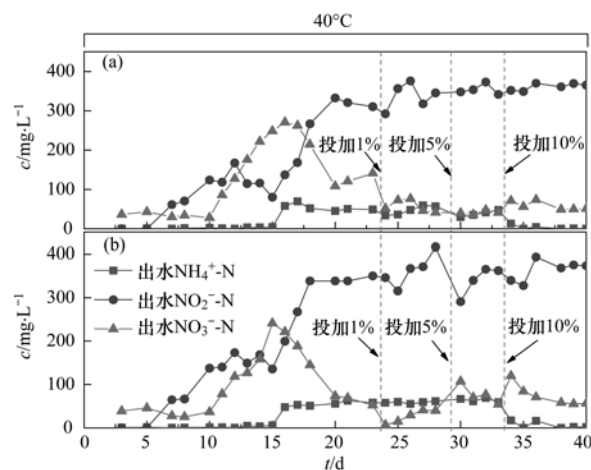
图 6 40°C 驯化硝化污泥的浓度变化

Fig. 6 Profiles of MLSS and MLVSS of domesticated nitrification sludge at 40°C

2.4 模拟夏季温度冲击下的硝化强化试验

高温驯化前后的硝化污泥对在 40°C 下受高氨氮冲击的生物处理系统的硝化强化效果, 如图 7 所示。1 ~ 15 d, 进水氨氮浓度为 $30 \sim 400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 活性污泥对氨氮的去除率保持在 98% 以上。第 16 d 起提高进水氨氮至 (550 ± 10) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器 A 和 B 的出水氨氮浓度均升高至 (50 ± 5) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。第 24、30 和 35 d 分别向反应器 A 和反应器 B 同时投加 1% (体积分数)、5% (体积分数) 和 10% (体积分数的硝化污泥, 反应器 A 经投加 1% (体积分数) 和 5% (体积分数的驯化后的中温硝化污泥后, 出水氨氮浓度下降了 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但 2 d 后出水氨氮浓度重新上升至 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而反应器 B 的出水氨氮浓度几乎未降低。继续投加 10% (体积分数的硝化污泥后, 反应器 A 出水氨氮浓度 1 d 后降至 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮去除率上升至 99%; 反应器 B 的氨氮去除率也于 4 d 后达到了 99%。上述结果表明, 无论是投加中温富集硝化污泥, 还是投加 40°C 驯化硝化污泥, 只要剂量足够, 对于高温冲击下的硝化强化都是有效果的, 但在相同的投加量下, 驯化后的硝化污泥的效果更明显。上述结果与于莉芳

等^[26] 得到的试验结果一致, 研究发现 30°C 富集的硝化污泥投加到水温为 20°C 的反应器时, 能够实现生物处理系统的完全恢复, 而 20°C 富集的硝化污泥的强化效果只维持了 3 d。



(a) 反应器 A, 投加驯化后中温硝化污泥;

(b) 反应器 B, 投加未经驯化的中温硝化污泥

图 7 硝化强化试验

Fig. 7 Effectiveness of bioaugmentation

3 结论

(1) 夏季水温低于 40°C 时, 氨氮容积负荷的波动不会影响宜兴新建污水处理厂好氧池活性污泥的硝化功能, 但当水温高于 40°C 时, 其硝化功能、污泥浓度和硝化菌含量均逐步降低, 并在 45°C 时硝化功能基本崩溃, 采取降温并重新投加活性污泥是恢复其硝化功能的有效措施。

(2) 中温富集硝化污泥在 40°C 下驯化 61 d 后, 可达到与驯化前中温富集硝化污泥的硝化活性, 且其比未经驯化的中温富集硝化污泥能更快地恢复受冲击污水处理系统的硝化功能, 但投加量大于 10% (体积分数) 时, 驯化后的硝化污泥的优势逐渐减弱。

参考文献:

- [1] Jones R D, Hood M A. Effects of temperature, pH, salinity, and inorganic nitrogen on the rate of ammonium oxidation by nitrifiers isolated from wetland environments [J]. Microbial Ecology, 1980, 6(4): 339-347.
- [2] Shore J L, McCoy W S, Gunsch C K, et al. Application of a moving bed biofilm reactor for tertiary ammonia treatment in high temperature industrial wastewater [J]. Bioresource Technology, 2012, 112(5): 51-60.
- [3] 解宇峰, 李文静, 李维新, 等. 江苏省城市污水处理厂尾水时空排放特征研究 [J]. 环境工程, 2014, 32(8): 33-37.
Xie Y F, Li W J, Li W X, et al. Temporal and spatial characteristics of tail water from wastewater treatment plants in Jiangsu Province [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(8): 33-37.
- [4] Lopez-Vazquez C M, Kubare M, Saroj D P, et al. Thermophilic biological nitrogen removal in industrial wastewater treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2014, 98(2): 945-

- 956.
- [5] Courtens E N, Spieck E, Vilchez-Vargas R, *et al.* A robust nitrifying community in a bioreactor at 50°C opens up the path for thermophilic nitrogen removal[J]. The ISME Journal, 2016, **10** (9): 2293-2303.
- [6] Sheng X L, Liu R, Chen L J, *et al.* Enrichment and application of nitrifying activated sludge in membrane bioreactors[J]. Water Science & Technology, 2017, **76**(11): 2888-2894.
- [7] 盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 等. 硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究[J]. 环境科学, 2018, **39** (4): 1697-1703.
- Sheng X L, Cui C C, Wang J D, *et al.* Pilot-scale experiment on enrichment of nitrifying activated sludge and its application in enhancing a wastewater biological treatment system against ammonia shocking loads[J]. Environmental Science, 2018, **39** (4): 1697-1703.
- [8] 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.
- [9] Sheng X L, Liu R, Song X Y, *et al.* Comparative study on microbial community in intermittently aerated sequencing batch reactors (SBR) and a traditional SBR treating digested piggery wastewater [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, **11**(3): 97-106.
- [10] Zhang J Y, Lv C, Tong J, *et al.* Optimization and microbial community analysis of anaerobic co-digestion of food waste and sewage sludge based on microwave pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2016, **200**(2): 253-261.
- [11] Grunditz C, Dalhammar G. Development of nitrification inhibition assays using pure cultures of *nitrosomonas* and *nitrobacter*[J]. Water Research, 2001, **35**(2): 433-440.
- [12] Bae W, Baek S, Chung J, *et al.* Optimal operational factors for nitrite accumulation in batch reactors[J]. Biodegradation, 2001, **12**(5): 359-366.
- [13] Sudarmo U, Winter J, Gallert C. Effect of varying salinity, temperature, ammonia and nitrous acid concentrations on nitrification of saline wastewater in fixed-bed reactors [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(10): 5665-5673.
- [14] 陈岭. 氨单加氧酶基因(*amoA*)在氨氧化细菌种群分析和定量检测中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- Chen L. Application study of *amoA* gene in population and quantitative analysis for ammonia-oxidizing bacteria [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003.
- [15] 吴静, 赵鹏娟, 田磊, 等. 高温污泥厌氧消化器的启动[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 520-523.
- Wu J, Zhao P J, Tian L, *et al.* Start-up of a thermophilic anaerobic sludge digester[J]. Environmental Science, 2011, **32** (2): 520-523.
- [16] Liao B Q, Lin H J, Langevin S P, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on sludge properties and their role in biofloculation and settling[J]. Water Research, 2011, **45**(2): 509-520.
- [17] 王腾旭, 马星宇, 王萌萌, 等. 中高温污泥厌氧消化系统中微生物群落比较[J]. 微生物学通报, 2016, **43** (1): 26-35.
- Wang T X, Ma X Y, Wang M M, *et al.* A comparative study of microbial community compositions in thermophilic and mesophilic sludge anaerobic digestion systems [J]. Microbiology China, 2016, **43**(1): 26-35.
- [18] 程吟文, 谷成刚, 刘总堂, 等. PBDEs 好氧微生物降解动力学过程及热力学机制研究[J]. 土壤, 2017, **49** (1): 104-110.
- Cheng Y W, Gu C G, Liu Z T, *et al.* Research on aerobic biodegradation kinetics process and thermodynamic mechanism of PBDEs[J]. Soils, 2017, **49**(1): 104-110.
- [19] 贺胜英, 陈爱军, 杜华明, 等. 脂肪酶产生菌 NJY-1-7 的选育及发酵条件的研究[J]. 中国酿造, 2011, **30**(1): 66-70.
- He S Y, Chen A J, Du H M, *et al.* Screening and fermentation conditions of lipase-producing strain NJY-I-7 [J]. China Brewing, 2011, **30**(1): 66-70.
- [20] 闫丽娟, 谢振荣, 赵春雷, 等. 耐高温酸性脂肪酶菌株 NJY-1-3 的选育及发酵条件的研究[J]. 食品科技, 2010, **35**(3): 11-15.
- Yan L J, Xie Z R, Zhao C L, *et al.* A research on screening and fermentation conditions of thermostable Lipase strain NJY-I-3 [J]. Food Science and Technology, 2010, **35**(3): 11-15.
- [21] 杨海君, 谭周进, 肖启明, 等. 假单胞菌的生物防治作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, **12**(3): 158-161.
- Yang H J, Tan Z J, Xiao Q M, *et al.* Biocontrol functions of pseudomonad[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2004, **12** (3): 158-161.
- [22] 雍佳君, 成小英. 蠡河底泥中反硝化复合菌群富集及菌群结构研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2232-2238.
- Yong J J, Cheng X Y. Enrichment and characterization of a denitrifying bacteria consortium from Lihe river's sediment[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2232-2238.
- [23] 陈青青. 温度对污泥水单独处理及富集硝化菌效果的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.
- Chen Q Q. Effects of temperature on separate treatment and nitrifiers accumulation with reject water [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2009.
- [24] 周玲玲, 张永吉, 宋正国, 等. pH 和温度对氯胺消毒给水管网硝化作用的影响[J]. 环境科学, 2011, **32** (6): 1627-1631.
- Zhou L L, Zhang Y J, Song Z G, *et al.* Effect of pH and temperature on nitrification in a bench-scale drinking water distribution system during chloramination [J]. Environmental Science, 2011, **32**(6): 1627-1631.
- [25] 于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 等. 包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2925-2930.
- Yu M Y, Liu Y, Tian Y B, *et al.* Efficient and stable operation of shortcut nitrification by entrapping ammonia oxidizing bacteria [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2925-2930.
- [26] 于莉芳, 王圣伟, 郭天赐, 等. 污泥水富集硝化菌和强化城市污水低污泥龄硝化[J]. 环境科学, 2008, **29** (2): 332-337.
- Yu L F, Wang S W, Guo T C, *et al.* Nitrifiers accumulation with reject water and bio-augmentation for nitrification of sewage at short SRT[J]. Environmental Science, 2008, **29**(2): 332-337.

CONTENTS

Influence of Mountain Valley Breeze and Sea Land Breeze in Winter on Distribution of Air Pollutants in Beijing-Tianjin-Hebei Region	LI Qing-chun, LI Ju, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i> (513)
A Method of Aerosol Particle Number Size Distribution Inversed by PM _{2.5} Mass Concentration in PRD	LI Fei, TAN Hao-bo, DENG Xue-jiao, <i>et al.</i> (525)
Light Absorption and Fluorescence Characteristics of Atmospheric Water-soluble Organic Compounds and Humic-like Substances During the Winter Season in Guangzhou	FAN Xing-jun, YU Xu-fang, CAO Tao, <i>et al.</i> (532)
Source Apportionment and Health Risk Quantification of Heavy Metals in PM _{2.5} in Yangzhou, China	DONG Shi-hao, XIE Yang, HUANGFU Yan-qi, <i>et al.</i> (540)
Pollution Characteristics and Source Analysis of <i>n</i> -alkanes and Saccharides in PM _{2.5} During the Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (548)
Pollution Characteristics, Dry Deposition Fluxes, and Sources for Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Bosten Lake Watershed	SONG Shi-jie, HUANG Tao, ZHAO Liu-yuan, <i>et al.</i> (558)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in PM _{2.5} of a Concentrated Broiler Feeding Operation	LIU Fei, XU Xia, TU Bo-wen, <i>et al.</i> (567)
Effects of Water Vapor Source and Local Evaporation on the Stable Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation	HU Yong-bo, XIAO Wei, QIAN Yu-fei, <i>et al.</i> (573)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Formation in Atmospheric Deposition in Dianchi Lake and Their Contributions to Lake Loading ...	REN Jia-guo, JIA Hai-bin, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (582)
Temporal-spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in Lake Taihu Based on Geostatistical Analysis	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (590)
Effects of Cyanobacterial Blooms in Eutrophic Lakes on Water Quality of Connected Rivers	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, XU Hai, <i>et al.</i> (603)
Contamination and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of Yilong Lake, Southwest China	LI Xiao-lin, LIU En-feng, YU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (614)
Temporal and Spatial Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particulate Matter in Pearl River Estuary and Its Influencing Factors	DU Jia, WANG Yong-hong, HUANG Qing-hui, <i>et al.</i> (625)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Microorganism Pollutions in the Beiyun River	CHEN Lei, LI Lei-fang, ZHI Xiao-sha, <i>et al.</i> (633)
Speciation and Transformation of Phosphorus in Sediments During the Redox Cycle	HAO Wen-chao, WANG Cong-feng, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (640)
Effect of Magnetic Zirconium/Iron-Modified Bentonite Addition on Phosphorus Mobilization and Species Transformation in River Sediments	WANG Yan, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (649)
Influence of Calcium Ion Pre-treatment on Phosphate Adsorption onto Magnetic Zirconium/Iron-modified Bentonite	ZHAO Yu-ying, LIN Jian-wei, ZHANG Hong-hua, <i>et al.</i> (658)
Effect of Nitrogen on Magnesium Modified Biochar Adsorption to Phosphorus	ZHI Meng-meng, WANG Peng-fei, HOU Ze-ying, <i>et al.</i> (669)
Removal Performance and Mechanism for Treating Phosphorus in Agricultural Wastewater by Three Adsorbents	WU Lu, LIU Feng, LONG Rui, <i>et al.</i> (677)
Photolysis Mechanism of <i>p</i> -Nitrophenol by Nitrocellulose Membrane in Aqueous Solution	DAI Zhi-feng, ZHAO Tong-qian, YIN Yong-guang, <i>et al.</i> (685)
Preparation of ZnTiO ₃ /TiO ₂ Photocatalyst and Its Mechanism on Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants	ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (693)
Adsorption and Photocatalytic Removal of Chromium on High-index TiO ₂ Facet	ZHONG De-jian, ZHANG Jian-feng, LI Yao, <i>et al.</i> (701)
Reduction Cooperated Fenton Oxidation of Zero-valent Iron (ZVI) Immobilized in Alginate Microsphere for Degradation of Acid Red B	ZHANG Huan, LI Shuang-shuang, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (708)
Mechanism of Removing Iron and Manganese from Drinking Water Using Manganese Ore Sand and Quartz Sand as Filtering Material	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i> (717)
Preparation of Sulfonated Graphene Oxide Modified Composite Nanofiltration Membrane and Application in Salts Separation	ZHANG Yan-jun, ZHANG Shao-feng, ZHAO Chang-wei, <i>et al.</i> (724)
Purification Efficiency and Mechanism of Integrated Al Salt Flocculation-ultrafiltration Membrane Process	XUE Wen-jing, LI Wen-jiang, LIU Juan, <i>et al.</i> (730)
Threshold Flux and Membrane Fouling Analysis of the Hybrid Pre-ozonation and CNTs Membrane Modification Process	WANG Kai-lun, LIU Fang, GUAN Yu-qi, <i>et al.</i> (738)
Distribution and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in SBR/MBBR Process	LIU Shu-hui, TIAN Wei-jun, ZHOU Jian-ren, <i>et al.</i> (747)
Biological Nitrogen Removal Process in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor Treating Low C/N Wastewater	LIU Chun, WANG Cong-cong, CHEN Xiao-xuan, <i>et al.</i> (754)
Treatment of Simulated Saline Wastewater from the Coal Chemical Industry Using Ecological Floating Beds Enhanced with Arbuscular Mycorrhiza	DOU Wen-qing, HE Hao, SONG Wen-ping, <i>et al.</i> (761)
Nitrification and Bioaugmentation of Biological Treatment System of Sewage Treatment Plant at High Temperature in Summer	SONG Tian-wei, SHENG Xiao-lin, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (768)
Characteristics of Ammonia Adsorption and Kinetics by Nitrifying Sludge Immobilized Pellets	YU De-shuang, LÜ Ting-ting, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (774)
Nitrite Accumulation Characteristics of Partial Denitrification in Different Sludge Sources Using Sodium Acetate as Carbon Source	BI Chun-xue, YU De-shuang, DU Shi-ming, <i>et al.</i> (783)
Operating Characteristics of a DPR-SNED System Treating Low C/N Municipal Wastewater and Nitrate-containing Sewage	DU Shi-ming, YU De-shuang, BI Chun-xue, <i>et al.</i> (791)
Simultaneous Nitrification and Denitrifying Phosphorus Removal in Continuous Flow Reactor with Intermittent Aeration	ZHAO Zhi-chao, HUANG Jian-ming, LI Jian, <i>et al.</i> (799)
Start-up and Stable Operation of ABR-MBR Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, JIANG Zhi-yun, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (808)
Effect of Influent C/N Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of SNEDPR Systems	DU Ye-qi, YU De-shuang, ZHEN Jian-yuan, <i>et al.</i> (816)
Carbon and Nitrogen Removal Characteristics of ABR Decarbonization-CANON Coupling Process	LI Tian, YIN Wen, WANG Xin-zhu, <i>et al.</i> (823)
Effect of Aeration Density on Start-up of CANON Process	LI Dong, GAO Xue-jian, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (829)
Adjusting Temperature and Settling Time to Achieve ANAMMOX Particles Rapid Start-up and Stable Operation	LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (837)
Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrification System	ZHANG Min, WEI Jia-min, HUANG Hui-min, <i>et al.</i> (845)
Growth Features of Water Supply Pipeline Biofilms Based on Active Microorganisms	WANG Yang, ZHU Bin, TONG Jun, <i>et al.</i> (853)
Elevational Distribution Characteristics of Soil Bacterial Community and Enzyme Activities in Mount Huangshan	YAO Lan, HU Li-huang, ZHANG Huan-chao, <i>et al.</i> (859)
Microbial Community Structure Shift during Bioremediation of Petroleum Contaminated Soil Using High Throughput Sequencing	QI Yan-yun, WU Man-li, ZHU Chang-cheng, <i>et al.</i> (869)
Effect of Nitrification on N ₂ O Emissions and Their Environmental Factors in Saline-alkali Wetlands	YANG Qu, GAO Wei-feng, LIU Feng-qin, <i>et al.</i> (876)
Effect of Long-term Dairy Manure Amendment on N ₂ O and NO Emissions from Summer Maize-Winter Wheat Cropping Systems	NIE Huang-hua, ZHANG Jia-sheng, HE Zhou-ming, <i>et al.</i> (885)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, HAO Qing-ju, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (893)
Differences and Relationship Between Rhizosphere Characteristics and Methane Emissions of Double-cropping Rice Variety	XIAO Zhi-xiang, FU Zhi-qiang, XU Hua-qin, <i>et al.</i> (904)
Effect of Long-Term Biochar Application on Soil Respiration in Flue-Cured Tobacco Planting Fields in Henan Province	LI Ya-sen, DING Song-shuang, YIN Quan-yu, <i>et al.</i> (915)
Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Patterns in Maocun Village, Guilin	DING Meng-kai, HU Xiao-nong, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (924)
Spatiotemporal Variability and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in a Industrially Developed City	LI Feng, LIU Si-yuan, LI Yan, <i>et al.</i> (934)
Effects of Bentonite on Chemical Forms and Bioavailability of Heavy Metals in Different Types of Farmland Soils	LIN Hai, JIN Xiao-na, DONG Ying-bo, <i>et al.</i> (945)
Characteristics of Soil Organic Carbon and Mineralization with Different Stands in Jinyun Mountain	CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, <i>et al.</i> (953)
Contribution of Root Biomass to Soil Organic Carbon Under Complex Landforms Conditions	ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (961)
Transformation and Distribution of Soil Organic Carbon and the Microbial Characteristics in Response to Different Exogenous Carbon Input Levels in Paddy Soil	WANG Ji-fei, TONG Yao-yao, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (970)
Analysis of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Assessment on Vegetation Leaves in Baoji City	ZHANG Jun-hui, LIN Qing, JIANG Shan, <i>et al.</i> (978)
Effect of Biochar on Available Heavy Metals During Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHOU Ji, YU Ya-wei, JIANG Yue, <i>et al.</i> (987)
Influence of Sludge Retention Time on the Performance and Stability of Mesophilic Anaerobic Co-digestion of Food Waste with Waste Activated Sludge	YUAN Hong-lin, MA Jing, XING Bao-shan, <i>et al.</i> (994)
Performance of Treating Straw and Animal Manure Mixture by an Integrated Process of Thermo-alkali-bi-enzyme Hydrolysis-anaerobic Digestion and Conditions of High Methane Yield	BIAN Ai-qin, YUAN Ye, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1003)