

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 刘俊, 楚碧武, 贺泓 (2505)

太原冬季 PM_{2.5} 影响霾污染的关键尺度谱特征 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航 (2512)

盘锦市冬季 PM_{2.5} 水溶性离子特征及来源分析 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟 (2521)

广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏 (2528)

热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋非烯的排放特征 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干 (2538)

天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬勇 (2548)

亚热带农田和林地大气氨湿沉降与混合沉降比较 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇 (2557)

京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强 (2566)

北京北运河河流生态系统健康评价 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨 (2576)

长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 董磊, 汤显强, 林莉, 邴超, 黎睿, 吴敏 (2588)

福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴 (2600)

三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇 (2607)

三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年 (2615)

基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅 (2624)

天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧贇 (2632)

重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘焯, 雷佳琪 (2641)

岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源: 以金佛山碧潭河为例 刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九程, 王正雄, 段世辉 (2651)

托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲柱, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟 (2661)

五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江 (2673)

西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素: 以紫坪铺水库为例 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典 (2680)

四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑志明, 朱津永 (2688)

营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金胞藻生长和竞争影响的原位实验 王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿 (2698)

植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 刘森, 陈开宁 (2706)

江汉平原水稻灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪霞 (2715)

冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送 (2724)

臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳 (2732)

中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷 (2740)

海藻酸钙/聚 N-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇 (2748)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森 (2756)

硝化细菌的培养及包埋固定化中试 杨宏, 胡银龙 (2763)

不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志 (2770)

高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛 (2778)

污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东 (2786)

丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安 (2794)

同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖恒弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷 (2802)

四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源 (2810)

长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新 (2819)

菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷 (2827)

¹³C 脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔 (2837)

西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军 (2845)

江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 吕建树, 何华春 (2853)

黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 于元赫, 吕建树, 王亚梦 (2865)

典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价: 以临安市为例 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林子也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军 (2875)

西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 王金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金 (2884)

典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋 (2893)

生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏 (2904)

厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽 (2911)

矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波 (2919)

硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强 (2927)

吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞 (2936)

喷施锌肥对油菜镉生物可给性的影响 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶 (2944)

贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉 (2953)

废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊 (2963)

县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 孙秀峰, 施开放, 吴健平 (2971)

颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉 (2982)

防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华 (2991)

《环境科学》征订启事 (2527) 《环境科学》征稿简则 (2723) 信息 (2826, 2852, 2910)

玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性

龙北生¹, 刘迅雷¹, 刘红波¹, 杨靖新², 袁树森¹

(1. 长春工程学院水利与环境工程学院, 长春 130012; 2. 吉林省中泰环境工程有限责任公司, 长春 130031)

摘要: 采用 SBR 反应器, 以玉米淀粉企业废水处理站厌氧段出水 (C/N 0.93 ~ 1.53) 为对象, 研究了利用高温、高 pH 和低 DO 等抑制因素, 快速启动短程硝化的方法; 针对启动的短程硝化系统, 进一步研究了取消高 pH 及高温抑制因素后系统短程硝化的稳定性及其控制策略. 结果表明, 控制温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 为 7.8 ~ 8.2、正常硝化段 DO 为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时结合 pH 和 DO 参数对硝化过程的在线控制, 可以经过 17 个周期的驯化培养, 快速启动短程硝化 (NO_2^- -N 积累率超过 80%); 对于已启动的短程硝化系统, 取消对高 pH 及高温的限制, 在碱度充足、温度为 $23 \sim 24^\circ\text{C}$ 和正常硝化段 DO 为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的条件下, 并结合对硝化过程的在线控制, 最终可以获得 NO_2^- -N 积累率超过 98% 的短程硝化长期稳定运行. 先采用高温、高 pH 和低 DO 等抑制因素快速启动短程硝化, 然后再取消对系统高 pH 及高温限制的控制策略, 对于具备较高氨氮浓度和较高温度的现场玉米淀粉废水实现长期稳定的短程硝化具有现实意义.

关键词: 玉米淀粉废水; 短程硝化; 氨氮; 温度; pH; DO; NO_2^- -N 积累率

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)06-2756-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710135

Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater

LONG Bei-sheng¹, LIU Xun-lei¹, LIU Hong-bo¹, YANG Jing-xin², YUAN Shu-sen¹

(1. School of Water Conservancy and Environment Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China; 2. Jilin Zorotech Environmental Engineering Company Limited, Changchun 130031, China)

Abstract: A rapid startup shortcut nitrification method is researched with suppression factors, such as high temperature, high pH, low DO, etc., in a SBR reactor, with anaerobic effluent (C/N 0.93-1.53) from a certain corn starch company wastewater treatment station. Targeting the already started up shortcut nitrification system, the stability and control strategy are studied further after cancelling the high pH and high temperature limiting factors. Results show that shortcut nitrification (NO_2^- -N accumulation rate above 80%) can be quick-started after 17 cycles of domestication and culture when the controlling temperature is $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$, the pH is 7.8-8.2, and the DO of the regular nitrification section is $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, combined with on-line control of the pH and DO parameters in the nitrification process. When the limits of high pH and high temperature are cancelled for the already started-up shortcut nitrification system, long-term stable operation can be obtained for a shortcut nitrification of NO_2^- -N accumulation rate above 98% under the conditions of sufficient alkalinity, temperature $23 \sim 24^\circ\text{C}$, and DO $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ in the regular nitrification section, combined with the on-line control of nitrification process. The control strategies can be summarized as: first, the shortcut nitrification is rapidly started up under high temperature, high pH, and relatively low DO suppression factors, and then the high pH and high temperature limitation factors are eliminated. The control strategies have good practical significance for realizing the long-term stable shortcut nitrification for corn starch wastewater with relatively high ammonia nitrogen concentration and relatively high temperature.

Key words: corn starch wastewater; shortcut nitrification; ammonia nitrogen; temperature; pH; DO; NO_2^- -N accumulation rate

玉米淀粉废水具有碳、氮、磷和固体悬浮物等污染物浓度高、无毒且生化性很好的特点, 目前共识的做法是采用以“厌氧 + 好氧”为主体的生物处理技术, 并结合物理和化学处理的组合技术实现处理目标^[1]. 在该处理技术中, “厌氧工艺段”的出水基本属于高氨氮、低 C/N 的水, 因此基于传统生物脱氮原理运行的“好氧工艺段”普遍存在氧化氨氮的能耗高、碱耗高(因缺少反硝化对碱度的补充作用, 高浓度氨氮的氧化过程需向水中补充大量的碱)的问题, 而且随着行业标准(GB 25461-2010)的实施, 出水 TN 严重超标的问题更显得尤为突出.

厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 是目前已知的最经济

和简洁的生物脱氮途径, 其对于处理高氨废水, 特别是低 C/N 废水, 具有重大的潜在实用价值^[2-4]. 参与 ANAMMOX 的反应基质是 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N, 两者质量比的理论值为 1:1.32^[5], 然而实际生活污水和工业废水中的氮素, 主要以氨氮的形式存在, 硝态氮的含量几乎为零. 因此, 实现 ANAMMOX 的前提是能够为 ANAMMOX 过程提供足量的亚硝酸盐.

收稿日期: 2017-10-19; 修订日期: 2017-11-25

基金项目: 长春市重大科技攻关计划项目(14KG091); 吉林省重点科技攻关项目(20160204006SF); 吉林省省级产业创新专项资金项目(2016c093); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放课题项目(zd131203)

作者简介: 龙北生(1959~), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为污水生物处理理论与技术, E-mail: 345914799@qq.com

另一方面与传统的生物脱氮工艺相比较, 将氨氧化至亚硝酸盐阶段直接进行反硝化的短程硝化反硝化工艺, 也能够获得很好的节能降耗效果, 它可减少 25% 的供氧量和 40% 的反硝化碳源, 还能够大幅度提高反硝化速率和减少污泥产量等^[6-8]。可见, 如何获得长期稳定的短程硝化是实现上述脱氮新技术在实际中应用的关键。

近些年来, 许多学者对于如何通过系统运行条件的控制来实现短程硝化进行了大量的研究, 结果表明, 高 pH 值^[9-11]、高游离氨 (FA) 浓度^[12-14]、高温^[9-11, 15] 和低溶解氧 (DO)^[7, 9] 等能抑制亚硝酸盐氧化菌 (NOB) 增殖或活性, 从而使氨氧化菌 (AOB) 在系统中占据优势而实现短程硝化。玉米淀粉废水同时具有高氨氮和高温的特点, 而氨氮与 FA 浓度具有正相关性, 因此对于玉米淀粉废水实现短程硝化非常有利。但实践表明, 若不加以驯化及控制其短程硝化也很难实现。本文采用 SBR 反应器, 以某大型玉米淀粉企业废水处理站厌氧段出水为研究对象, 利用高温、高 pH 和低 DO 等多重抑制因素, 快速启动短程硝化, 然后在此基础上, 进一步研究在逐渐取消高 pH、高温抑制因素后, 系统短程硝化的稳定性及其控制策略, 以期为玉米淀粉废水处理新工艺的研发提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验装置

SBR 反应器由有机玻璃制成, 上部为圆柱形, 高 55 cm, 内径 19 cm, 底部为圆台形, 总有效容积为 12 L。反应器以小型黏砂头作为微孔曝气头, 采用小型充氧泵曝气充氧; 反应器侧壁上设有排水口, 底部设有排泥放空管; 反应器中设有搅拌装置, 根据需要在非曝气条件下, 启动搅拌装置进行缺氧反硝化反应; 在反应器中可以根据需要投放 pH 和 DO 传感器, 在线监测反应过程中 pH 和 DO 的变化; 在 DO 传感器上同时设有温度传感器, 可通过 DO 仪反应系统内的温度; 反应器中还同时设有温控装置, 可以根据需要调节反应器温度。

1.2 试验用水及接种污泥

试验用水取自某大型玉米淀粉企业废水处理站厌氧段出水, 其水质为 COD 250 ~ 550 mg·L⁻¹, NH₄⁺-N 270 ~ 360 mg·L⁻¹, NO_x⁻-N < 0.5 mg·L⁻¹, PO₄³⁻-P 50 ~ 70 mg·L⁻¹, pH 7.1 ~ 7.4。

试验用污泥取自长春市某城市污水处理厂曝气池。

1.3 运行方式及检测方法

为了使反硝化过程产生的碱度能够有效地补充到硝化段和充分利用进水中的有机物为反硝化服务, SBR 反应器按照一次进水曝气硝化→二次进水投加碳源搅拌反硝化→曝气硝化→投加碳源搅拌反硝化→短时曝气吹脱→沉淀/排水的方式周期式运行。采用瞬时进水, 根据进水的 NH₄⁺-N 浓度, 在第一次进水后一次性投加适量 NaHCO₃ 溶液调整碱度, 保证硝化过程碱度充足; 一周期两次的进水量相同, 即进水氮负荷相同, 只因稀释作用, 第二次进水和第二次硝化结束时混合液的氮浓度相对第一次要低一些; 采用 pH 和 DO 参数的变化控制硝化与反硝化过程, 反硝化碳源充足, 因此在系统运行稳定阶段, 每次硝化和反硝化结束时, 系统中相应的 NH₄⁺-N 和 NO_x⁻-N 浓度都很低 (< 2 mg·L⁻¹); 系统的总充水比约为 0.6, 每天运行 1 周期。在本实验中, 不论是在短程硝化快速启动阶段, 还是在后面的稳定性试验阶段, SBR 反应器均按照上述方式周期式运行。

检测方法: NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法; COD 采用快速消解法; 污泥浓度采用重量法。文中的各种水质参数, 均为经过滤或经高速离心去除固体成分后的检测结果。

本试验结果表明, 一周期中两次硝化过程的亚硝酸盐氮积累率基本一致, 本文仅以第一次进水后曝气硝化过程的试验数据为例, 讨论短程硝化的快速启动及其稳定性问题。

2 结果与讨论

2.1 短程硝化快速启动

将取来的污泥, 先加入自来水闷曝 24 h, 然后按照上述运行方式, 控制反应器充满时系统内的污泥浓度为 8 000 ~ 10 000 mg·L⁻¹, 采用高温、高 pH 和低 DO 等多重抑制因素, 启动短程硝化驯化过程。具体运行条件为, 投加 NaOH 溶液控制 pH 为 7.8 ~ 8.2, 控制反应温度为 (30 ± 1) °C、正常硝化段的 DO 为 0.7 ~ 1.0 mg·L⁻¹, 进水 NH₄⁺-N 浓度根据需要调整, 在硝化后期以 pH 参数由下降转为上升, 同时结合 DO 参数的快速上升控制结束曝气进程。图 1 是驯化过程中连续 17 个周期的试验结果。

在前两个周期, 将淀粉废水稀释使进混液的 NH₄⁺-N 浓度为 36 mg·L⁻¹ 左右, 由图 1 可见, 取来

的接种污泥具有良好的硝化性,但曝气结束时混合液的 NO_2^- -N浓度几乎为 $0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,说明接种的污泥为全程硝化污泥。

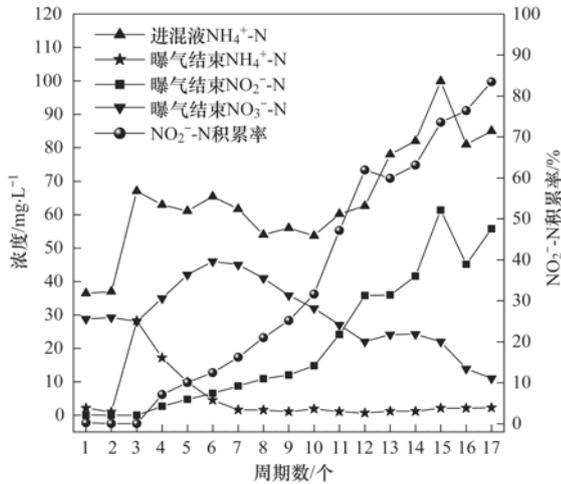


图1 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N
及 NO_2^- -N积累率随驯化周期的变化过程

Fig. 1 Change in NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N,
and NO_2^- -N accumulation rates with the domestication cycle

调整废水的稀释比,将进混液的 NH_4^+ -N浓度增至 $54 \sim 67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均 $61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),继续运行了10个周期(3~12周期,图1)。在新的进水条件下,硝化菌的活性受到了影响,在前几个周期,曝气结束时仍有剩余的 NH_4^+ -N未被氧化。随着硝化菌对环境的逐渐适应,经过3、4个周期运行后,曝气结束时混合液的 NH_4^+ -N浓度很快降低至 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下并趋于稳定。从图1可见,进水 NH_4^+ -N浓度增加后,曝气结束时 NO_2^- -N的积累率持续上升,运行到驯化的第12周期时,混合液 NO_2^- -N浓度达到 $36 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,积累率已接近62%。从第13周期开始,进水改为不经稀释的原水(进混液 NH_4^+ -N浓度为 $78 \sim 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),图1中给出了5个周期(13~17周期)的试验数据。可见,提高 NH_4^+ -N浓度后的头一个周期,即驯化的第13周期, NO_2^- -N的积累率略有降低(由62%降至60%),这可能是AOB的活性受到了高 NH_4^+ -N的冲击影响,从第14周期开始 NO_2^- -N的积累率恢复呈快速上升趋势,直到驯化的第17周期, NO_2^- -N的积累率上升至83.4%,并且此时 NO_2^- -N的积累率仍处在快速上升阶段(图1)。

结果表明,控制SBR硝化过程具有较高的温度($30\text{C} \pm 1\text{C}$)、较高的pH(7.8~8.2)和较低的DO(正常硝化段为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),同时结合pH

和DO参数对硝化过程的在线控制,对于本试验中的淀粉废水,可以经过17个周期的驯化培养,快速启动短程硝化(NO_2^- -N积累率超过80%)。

2.2 pH对短程硝化稳定性的影响

将上述培养的短程硝化污泥一分为二,分别投加在两个相同的1号和2号SBR反应器内。在运行过程中,两反应器进水水质相同,1号系统在曝气过程中,仍投加NaOH溶液维持系统pH在7.8以上,2号系统不控制pH。由于生物硝化的产酸特性,2号系统在曝气过程中pH可降至7.0左右。两反应器的其他运行条件与驯化阶段相同,只是由于稀释作用,两反应器充满时系统的污泥浓度均降至 $4\ 000 \sim 5\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

取自企业的生产废水水质具有波动性,本试验阶段进混液 NH_4^+ -N的平均浓度为 $91 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (略高于上一阶段),13个周期的试验结果见图2。从中可见,降低污泥浓度后,两个反应器同样都能够获得良好的硝化效果,但pH的变化,对 NO_2^- -N的积累率有一定影响。控制pH的1号系统,曝气结束时继续延续了 NO_2^- -N积累率持续上升的趋势,并在第7周期积累率达到95%以上,之后积累率在缓慢上升过程中渐近稳定,曝气结束时相应的 NO_3^- -N浓度也在缓慢下降过程中趋于 $2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。取消对pH限制的2号系统,第1周期 NO_2^- -N的积累率由83.4%降至74.6%,曝气结束时 NO_3^- -N浓度超过 $17 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在之后的6个周期中 NO_2^- -N积累率具有波动性,从第7周期开始 NO_2^- -N的积累率恢复上升趋势,最后运行到第13周期,积累率上升至94%,曝气结束时 NO_3^- -N浓度降至 $5.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见,在曝气过程中取消对系统pH的限制,对于已

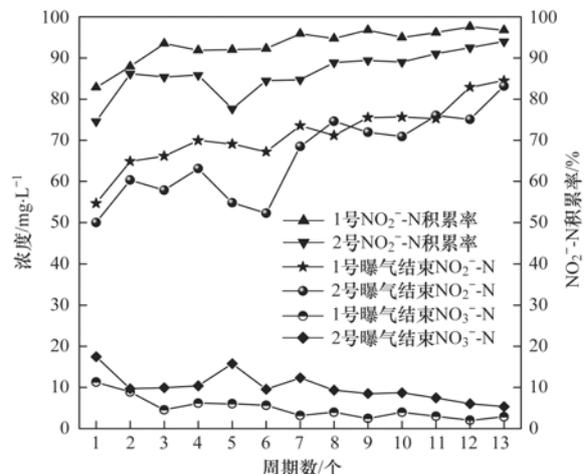


图2 pH对短程硝化稳定性的影响

Fig. 2 Effect of pH on shortcut nitrification stability

经启动短程硝化的玉米淀粉废水 SBR 处理系统, 维持较高的温度和较低的 DO, 并结合对硝化过程的在线控制, 同样可获得稳定的短程硝化效果。

2.3 温度对短程硝化稳定性的影响

维持 1 号系统温度 (30 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 不变, 将 2 号系统温度从 (30 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 降至 $23 \sim 24^{\circ}\text{C}$. 两系统进水水质相同, 曝气过程中均不控制 pH, 其他运行条件与驯化阶段相同, 进混液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度为 $98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在该条件下运行 13 个周期的试验结果见图 3.

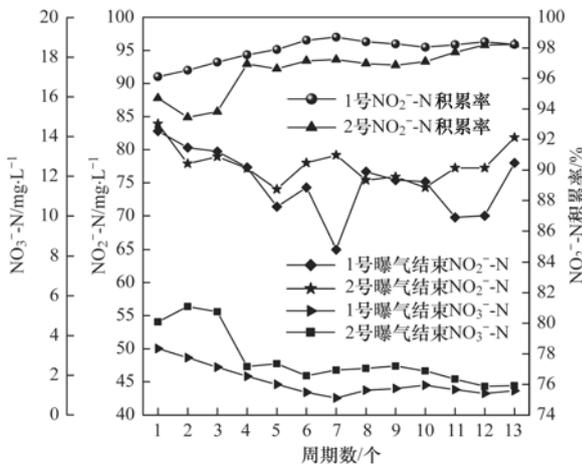


图3 温度对短程硝化稳定性的影响

Fig. 3 Effect of the temperature on shortcut nitrification stability

从图 3 可见, 1 号系统 NO_2^- -N 的积累率继续延续了上一阶段的上升趋势, 其积累率最终稳定在 98% 左右; 同时取消高 pH 及高温限制的 2 号系统, 经过 3 个周期的适应后, 从第 4 周期开始, 曝气结束时 NO_2^- -N 的积累率仍然由 94% 逐渐上升至 98% 后趋于稳定, NO_3^- -N 也相应地由 $5.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐降低到 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后趋于稳定. 可见, 对于已经实现短程硝化的玉米淀粉废水 SBR 处理系统, 在曝气过程中, 同时取消高 pH 及高温的限制, 在常温和较低 DO 的条件下, 结合对硝化过程的在线控制, 仍然可以获得短程硝化的稳定运行。

2.4 氨氮浓度对短程硝化稳定性的影响

前两个试验阶段, 进混液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的平均浓度为 $91 \sim 98 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 FA 浓度具有正相关性, 较高 FA 浓度有利于 AOB 的富集. 本阶段进一步探查较低的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度对短程硝化稳定性的影响。

在试验过程中, 保证进水碱度充足, 两系统均不控制 pH, 控制温度均为 $23 \sim 24^{\circ}\text{C}$, 1 号系统进混液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度降为 $35 \sim 65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (前 8 周期 $55 \sim 65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 后 5 周期 $35 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 2 号系统仍然

进原水, 进混液 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度为 $95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其他运行条件与驯化阶段相同。

试验结果见图 4, 在本阶段 13 个试验周期中, 降低进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的 1 号系统与正常进原水的 2 号系统, 曝气结束时 NO_3^- -N 浓度都很低 ($< 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), NO_2^- -N 的积累率基本一致, 都能稳定在 98% 左右. 这表明, 至少在试验的 13 个周期中, 短程硝化的特性并不存在有向全程硝化转变的迹象. 由于降低进水的氨氮浓度对高氨氮的玉米淀粉废水短程硝化研究意义不大, 因此关于低氨氮对短程硝化稳定性的影响没有作长期运行观察。

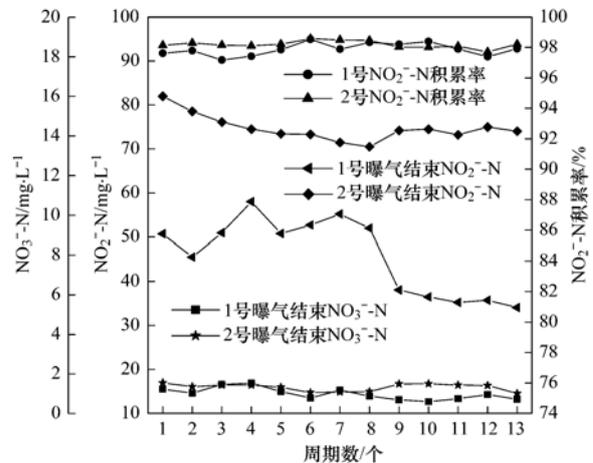


图4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 对短程硝化稳定性的影响

Fig. 4 Effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ on shortcut nitrification stability

2.5 短程硝化的长期稳定运行与分析

不计驯化阶段的运行周期数, 后面 3 个阶段 1 号和 2 号系统都运行了 39 个周期, 其中在温度为 $23 \sim 24^{\circ}\text{C}$ 和不限曝气过程 pH 的条件下, 1 号系统连续运行了 13 个周期, 2 号系统连续运行了 26 个周期. 在这 39 个周期中, 两系统都获得了短程硝化的稳定运行, 并且 NO_2^- -N 的积累率总体上都能够逐渐提高至 98% 左右后趋于稳定. 为了进一步考证在常温 ($23 \sim 24^{\circ}\text{C}$) 和不限 pH 的条件下, 短程硝化的长期稳定性, 对于 2 号系统, 采用自动控制装置, 以原水为进水, 仍然按照分两次进水的运行方式周期式自动运行, 控制正常硝化段 DO 为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 每天运行 1 周期, 一共运行了 40 个周期, 试验结果见图 5.

根据图 5 并结合前两个阶段 2 号系统, 在常温及不限 pH 条件下运行的 26 个周期的试验结果可知, 2 号系统在相同运行条件下获得了连续 66 个周期的短程硝化稳定运行, 并且最终 NO_2^- -N 的积累率可稳定在 98% 以上. 可见, 对于已经实现短程硝

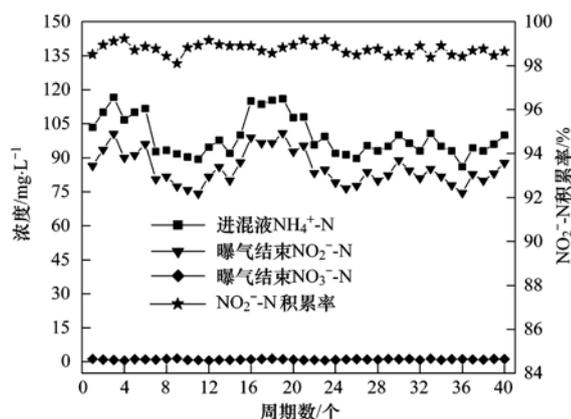


图5 2号系统短程硝化长期稳定运行试验结果

Fig. 5 Experimental results of long term stable operation of shortcut nitrification in the No. 2 system

化的玉米淀粉废水 SBR 处理系统, 在碱度充足、温度为 23 ~ 24℃、正常硝化段 DO 为 0.7 ~ 1.0 mg·L⁻¹ 的条件下, 结合对硝化过程的在线控制, 可以获得短程硝化的长期稳定运行. 分析其原因, 首先是在驯化阶段采用多重抑制因素, 有效地抑制了 NOB 活性, 使 AOB 快速成为系统中的优势菌, 这是保证后续短程硝化稳定运行的前提; 其次, 在后续分阶段的试验过程中, 虽然逐渐取消了有利于短程硝化的 pH 和温度限制因素, 但在曝气过程中, 适宜的环境条件及实施的在线控制策略, 仍然可以巩固 AOB 优势菌的地位. 现分析如下.

2.5.1 曝气过程中较高的 pH 环境

目前, 适合于硝化菌(AOB 和 NOB)生长的最佳 pH 尚无定论, 一般认为适宜 AOB 生长的 pH 为 7.0 ~ 8.5, 适宜 NOB 生长的 pH 为 6.0 ~ 7.5. Balmelle 等认为^[16], 适合于 AOB 生长的最佳 pH 为 8.5 左右; 徐冬梅等^[17]的试验表明, 短程硝化要求的 pH 最好控制在 7.4 ~ 8.3 之间; 郭海娟等认为^[18], 在进水氨氮浓度为 200 mg·L⁻¹ 的条件下, pH > 6.8 时也不会影响 NO₂⁻-N 积累的稳定性.

本试验在短程硝化运行稳定阶段, 在常温和取消对 pH 限制的条件下, pH 和 NH₄⁺-N 随曝气时间变化的典型周期见图 6. 从中可见, 在 176 min 的曝气过程中, pH 的变化范围是 7.1 ~ 8.0. 按照上述观点, 这一 pH 范围均适宜 AOB 生长.

2.5.2 曝气过程中较高的 FA 浓度

由 $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ 可知, 进水中的 NH₄⁺-N 浓度与 pH 耦合可直接影响系统中的 FA 浓度. FA 对 NOB 和 AOB 均会产生抑制作用, 但对 NOB 的抑制作用更为明显^[19]. 目前, 关于 FA 对 NOB 和 AOB 的抑制浓度尚无定论, Anthonisen 等

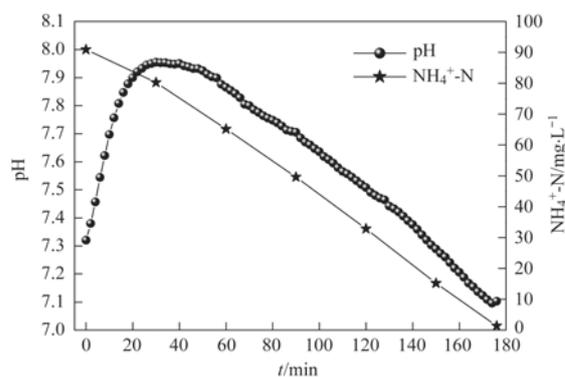


图6 在常温和不控制 pH 条件下 pH 和 NH₄⁺-N 随曝气时间的典型变化过程

Fig. 6 Typical change in pH and NH₄⁺-N with aeration time under the conditions of room temperature and no pH control

为^[20], FA 对 NOB 的抑制浓度为 0.1 ~ 1.0 mg·L⁻¹, 对 AOB 的抑制浓度为 10 ~ 150 mg·L⁻¹; 徐冬梅等^[17]的试验结果为, 当 FA 达到 0.6 mg·L⁻¹ 时几乎可以完全抑制 NOB 的生长, 刘牡等^[21]也得到了类似的试验结果. 在本试验条件下, 以图 6 为例(反应温度为 24℃、进混液 NH₄⁺-N 浓度为 91 mg·L⁻¹、pH 的变化范围为 7.1 ~ 8.0), 由 FA 的计算公式^[20]得, 在 176 min 的曝气过程中, FA ≥ 0.6 mg·L⁻¹ 的历时约为 124 min, 0.6 mg·L⁻¹ > FA ≥ 0.1 mg·L⁻¹ 的历时为 36 min. 这表明, 在曝气过程中, 对 NOB 完全抑制的时间占 70.5%, 对 NOB 有抑制作用的时间占 20.5%, 两者合计达 91%.

2.5.3 硝化过程较低的 DO 浓度

AOB 和 NOB 均为专性好氧菌, AOB 的氧饱和常数为 0.2 ~ 0.4 mg·L⁻¹, 而 NOB 的氧饱和常数为 1.2 ~ 1.5 mg·L⁻¹, AOB 相对 NOB 具有更强的对氧的亲合力, 因此可以通过控制 DO 在较低的水平来抑制 NOB 生长, 实现亚硝酸盐的积累. Ruiz 等^[7]的研究认为, 实现亚硝酸盐积累的 DO 为 0.7 ~ 1.4 mg·L⁻¹, 最佳 DO 为 0.7 mg·L⁻¹; Tokutomi^[22]的研究发现, 硝化菌群在 DO 为 1 mg·L⁻¹ 的条件下, AOB 的比增长速率是 NOB 的 2.6 倍. 本试验在曝气的正常硝化段, DO 控制在 0.7 ~ 1.0 mg·L⁻¹, 有利于亚硝酸盐的积累.

在曝气过程中, 上述 pH 和 FA 两个因素, 虽然都存在有适合 NOB 生长的条件, 但对于已经实现短程硝化的系统, 占有绝对优势的 AOB 会强烈地争夺 DO 来氧化氨氮, 再结合较低 DO 浓度的控制策略, 使占劣势的 NOB 因得不到足够的 DO 而在一周期有限的曝气时间内被逐渐淘汰. 因此, 曝气过程中较高的 pH 环境、较高的进水氨氮浓度和较低

DO 浓度的控制策略是短程硝化长期稳定运行的有利条件。

2.5.4 在线控制策略

尽管硝化过程是一个序列反应, 先由 AOB 把氨氧化成亚硝酸盐, 再由 NOB 把亚硝酸盐氧化成硝酸盐, 而且氨和亚硝酸盐分别为 AOB 和 NOB 的唯一能源^[23]。但在 AOB 和 NOB 均为优势菌的全程硝化污泥中, 对硝化过程实施在线控制却很难获得亚硝酸盐积累^[24]。这是由于 AOB 的酶系统十分复杂, 氨被氧化成亚硝酸盐要经历 3 个步骤(NH_3 或 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NOH} \rightarrow \text{NO}_2^-$) 6 个电子变化, 而亚硝酸盐被氧化成硝酸盐只需经历 1 个步骤($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$) 2 个电子变化, 相对简单^[25]; 另一方面, 由于 AOB 和 NOB 两种菌适应的生长环境十分接近, 在常规的曝气过程中很难获得 AOB 的单独优势生长。因此在全程硝化污泥中曝气时, 氨被 AOB 氧化为亚硝酸盐的同时, 又会被 NOB 迅速氧化为硝酸盐, 即硝化的两个反应过程在时间上虽然有先后, 但在空间上却同时进行。然而, 在以 AOB 为优势菌的短程硝化污泥中, 实施对硝化过程的在线控制, 则可以在 AOB 将氨完全氧化为亚硝酸盐的同时, 实时停止曝气进程, 从而可有效地抑制在继续曝气过程中 NOB 的增殖, 进而可避免亚硝酸盐被继续氧化为硝酸盐。因此, 本试验中采用 pH 和 DO 参数在线控制硝化过程的策略, 是对已实现短程硝化的系统长期稳定运行的保证。

3 结论

(1) 控制系统温度为 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、pH 为 7.8 ~ 8.2、正常硝化段 DO 为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 再结合 pH 和 DO 参数对硝化过程实施在线控制, 可以经过 17 个周期的驯化培养, 快速启动短程硝化 (NO_2^- -N 积累率超过 80%)。

(2) 对于已启动短程硝化的玉米淀粉废水 SBR 处理系统, 逐渐取消对系统高温及高 pH 的限制, 在碱度充足、常温 ($23 \sim 24^\circ\text{C}$) 和较低 DO (正常硝化段为 $0.7 \sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, 结合对硝化过程的在线控制, 最终可以获得 NO_2^- -N 积累率超过 98% 的短程硝化长期稳定运行。

(3) 先采用高温、高 pH 和低 DO, 并结合对硝化过程在线控制快速启动短程硝化, 然后再逐渐取消对系统高 pH 及高温限制的控制策略, 对于具备较高氨氮浓度和较高温度的现场玉米淀粉废水实现长期稳定的短程硝化具有现实意义。

参考文献:

- [1] HJ 2043-2014, 淀粉废水治理工程技术规范[S].
- [2] 张正哲, 姬玉欣, 陈辉, 等. 厌氧氨氧化工艺的应用现状和问题[J]. 生物工程学报, 2014, **30**(12): 1804-1816.
Zhang Z Z, Ji Y X, Chen H, *et al.* Application and obstacles of ANAMMOX process [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2014, **30**(12): 1804-1816.
- [3] 丁爽, 唐崇俭, 郑平, 等. 厌氧氨氧化工艺脱氮机理和抑制因素的研究进展[J]. 化工进展, 2010, **29**(9): 1754-1759.
Ding S, Tang C J, Zheng P, *et al.* Progress in anaerobic ammonia oxidation biological nitrogen removal mechanism and inhibitory factors [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, **29**(9): 1754-1759.
- [4] van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al.* Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4149-4163.
- [5] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1998, **50**(5): 589-596.
- [6] 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.
- [7] Ruiz G, Jelson D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. Water Research, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [8] Komaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(19): 7245-7253.
- [9] 张婷, 吴鹏, 沈耀良, 等. CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3399-3405.
Zhang T, Wu P, Shen Y L, *et al.* Fast Start-up of shortcut nitrification in a CSTR and an MBR [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3399-3405.
- [10] 孙迎雪, 徐栋, 田媛, 等. 短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3501-3506.
Sun Y X, Xu D, Tian Y, *et al.* Mechanism of nitrogen removal by partial nitrification-denitrification biological filter [J]. Environmental Science, 2012, **33**(10): 3501-3506.
- [11] Zhang C S, Zhang S Q, Zhang L Q, *et al.* Effects of constant pH and unsteady pH at different free ammonia concentrations on shortcut nitrification for landfill leachate treatment [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(8): 3707-3713.
- [12] 张树军, 孟凡能, 吕鑑, 等. 高浓度氨氮消化污泥脱水液半短程硝化试验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1437-1441.
Zhang S J, Meng F N, Lü J, *et al.* Half-nitrosification of dewatering liquid of digested sludge with high ammonia [J]. Environmental Science, 2009, **30**(5): 1437-1441.
- [13] Park S J, 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.
- [14] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on

- the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. *Water Research*, 2007, **41**(4): 826-834.
- [15] Gabarró J, Ganigué R, Gich F, *et al.* Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **126**: 283-289.
- [16] Balmelle B, Nguyen K M, Capdeville B, *et al.* Study of factors controlling nitrite build-up in biological processes for water nitrification[J]. *Water Science & Technology*, 1992, **26**(5-6): 1017-1025.
- [17] 徐冬梅, 聂梅生, 金承基. 亚硝酸型硝化试验研究[J]. *给水排水*, 1999, **25**(7): 37-39.
Xu D M, Nie M S, Jin C J. Experiment and research on the nitrous nitrification [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 1999, **25**(7): 37-39.
- [18] 郭海娟, 马放, 沈耀良. DO 和 pH 值在短程硝化中的作用[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7**(1): 37-40, 63.
Guo H J, Ma F, Shen Y L. Effects of DO and pH on nitrosification[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, **7**(1): 37-40, 63.
- [19] 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.
- [20] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal (Water Pollution Control Federation)*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [21] 刘牡, 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] Tokutomi T. Operation of a nitrite-type airlift reactor at low DO concentration[J]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(5-6): 81-88.
- [23] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [24] 龙北生. 两级 SBR 除磷脱氮工艺技术及其运行控制参数研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
Long B S. Study on technique of two-stage SBR process for phosphorus and nitrogen removal and its operational controlling parameters[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [25] 郑兴灿, 李亚新. 污水除磷脱氮技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.



CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing	LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of PM _{2.5} Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan	YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, <i>et al.</i> (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Panjin	ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, <i>et al.</i> (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City	GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, <i>et al.</i> (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning	JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, <i>et al.</i> (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin	CAI Zi-ying, HAN Su-jin, ZHANG Min, <i>et al.</i> (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China	ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region	LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, <i>et al.</i> (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China	GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, <i>et al.</i> (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China	DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, <i>et al.</i> (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province	ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, <i>et al.</i> (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China	FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m	PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, <i>et al.</i> (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research	ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, <i>et al.</i> (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season; A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain	LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, <i>et al.</i> (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin	LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO ₂ and CH ₄ Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir	PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, <i>et al.</i> (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area	ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, <i>et al.</i> (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir	ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, <i>et al.</i> (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium <i>Chrysochloris ovalisporum</i> ; An In-situ Experiment	WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, <i>et al.</i> (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios	LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jiangnan Plain	HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China	CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, <i>et al.</i> (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling	DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR)	YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(<i>N</i> -isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network	ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, <i>et al.</i> (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater	LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization	YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies	AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, <i>et al.</i> (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion	ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere	LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, <i>et al.</i> (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria	GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, <i>et al.</i> (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate	MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, <i>et al.</i> (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain	YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, <i>et al.</i> (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, <i>et al.</i> (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ¹³ C Pulse-labeling	SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, <i>et al.</i> (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China	YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, <i>et al.</i> (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast	LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River	YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation	ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, <i>et al.</i> (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China	ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, <i>et al.</i> (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical <i>Carya cathayensis</i> Production Area	ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands	HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, <i>et al.</i> (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils	WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil	LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province	LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-hai, <i>et al.</i> (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi	WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, <i>et al.</i> (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province	XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, <i>et al.</i> (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires	FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO ₂ Emissions in Chongqing; An Empirical Analysis at the County Level	SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles	YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, <i>et al.</i> (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments	ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, <i>et al.</i> (2991)