

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, 刘峰, 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)

C/N 和污泥浓度对以 pH 值调控的亚硝化系统影响

张敏¹, 韦佳敏¹, 黄慧敏¹, 姜滢¹, 郭萌蕾¹, 陈重军^{1,2,3,*}, 沈耀良^{1,2,3}

(1. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: pH 是亚硝化系统实现并稳定的重要调控手段, 为研究不同 C/N(0、1、2、3、4)及污泥浓度(污泥量:配水量为1:6、1:3、1:1)下亚硝化系统的 pH 变化规律及在不同 pH 变化下对污染物去除转化过程的影响, 以乙酸钠为碳源, 采用锥形瓶接种成熟的亚硝化污泥进行了批次试验. 结果表明, 相同污泥浓度下, C/N 越大, pH 增量越大, 反硝化效率越高; 相同 C/N 下, 污泥浓度越大, pH 增量越小, 反硝化效率越高. 反应系统对碳氮的去除转化与 pH 变化存在较大的相关性, 且反硝化与亚硝化反应具有先后顺序. 整个系统运行期间, pH 上升过程的比 COD 去除速率是 pH 下降时的 7~16 倍, pH 下降过程的比氨氧化速率(SAOR)是上升过程的 1~20 倍, 当 pH < 6.1, 系统失去氨氧化能力. 本试验过程中, C/N 为 4 时该系统碳氮去除效率较其他工况最佳, 3 个污泥浓度下分别耗时 480、350、300 min 完成氨的转化及 80% 的 COD 去除. 不同工况下, 亚硝化反应在系统内的占比维持在 50% 以上, 且 NO_3^- -N 浓度一直低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 表明该系统以亚硝化作用为主导.

关键词: 亚硝化; 反硝化; pH 值; 过程控制; 碳氮转化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)02-0845-08 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201807130

Effect of C/N and Sludge Concentration on the pH-Regulated Nitrosation System

ZHANG Min¹, WEI Jia-min¹, HUANG Hui-min¹, JIANG Ying¹, GUO Meng-lei¹, CHEN Chong-jun^{1,2,3,*}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China)

Abstract: pH is one of the most important means of control for the realization and stability of the nitrosation system. To study the change rule of pH values of the nitrosation system and the influence of pollution removal and transformation at different pH under the conditions of different C/N (0, 1, 2, 3, 4) and sludge concentrations (sludge amount: water content was 1:6, 1:3, 1:1), batch tests were conducted with tapered bottles using sodium acetate as the carbon source and inoculated with mature nitrosation sludge. The results showed that the higher the C/N, the higher the pH increment and the denitrification efficiency at the same sludge concentration. At the same C/N, a higher sludge concentration corresponded to a smaller pH increment but a higher denitrification efficiency. The removal and transformation of carbon and nitrogen was highly correlated with pH changes in the reaction system, and the denitrification and nitrosation reactions were in sequence. Throughout the operational period of the system, as pH increased, the specific organic matter removal rate was 7-16 times as much as when pH decreased. However, as pH decreased, the specific ammonia oxidation rate (SAOR) was 1-20 times that of when pH increased. When pH was less than 6.1, the system lost its ability to oxidize ammonia-nitrogen. The highest removal efficiency of carbon and nitrogen in the system was achieved when C/N was 4. Ammonia transformation 80% COD removal at the three sludge concentrations took 480, 350, and 300 min, respectively. Under different conditions, the proportion of nitrosation in the system remained above 50% and the concentration of NO_3^- -N remained below $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which indicated that the system was dominated by nitrosation.

Key words: nitrosation; denitrification; pH value; process control; conversion of carbon and nitrogen

实时控制作为实现和稳定亚硝化反应的一种有效手段, 具有灵活、稳定、准确等优点, 目前, 实时控制通常分为两种, 一种是将底物浓度, 如 COD、 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 的在线检测作为过程控制分析, 另一种是以间接参数, 如 pH、DO、ORP 等数值变化作为参考对反应进行调控^[1-3]. 现阶段, 为了简化及开发新型实时控制策略, 大多数研究者选用 pH 值作为亚硝化系统的控制参数, pH 是影响微生物组成、反应器内生物多样性的主要因素^[4-6], 其变化过程和特征点可较好地指示反应进程^[7]. pH 在最高点指示反硝化结束、最低点指示氨氧化

结束(“氨谷点”)^[8], 通过这些特征点及时调整 pH 值, 并将 pH 值作为运行参数, 有利于缩短反应周期时长, 提高处理量的同时节能减耗^[9]. 然而, pH 值不仅受进水水质变化、温度的影响, 还会随生物量的变化而变化^[10], 这就造成以 pH 值为过程控制参数的调控策略存在不可预见性和效果的不稳定

收稿日期: 2018-07-17; 修订日期: 2018-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508366, 51578353); 江苏省厌氧生物技术重点实验室开放基金项目(JKLAB201701)

作者简介: 张敏(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与理论, E-mail: 15289893686@163.com

* 通信作者, E-mail: chongjunchen@163.com

性. 另外, C/N 是生物脱氮过程的重要影响因素之一, 在亚硝化系统中表现为异养菌与自养菌竞争基质和 DO, 可直接影响两者的生长速率^[11], 导致反应系统污染物去除效果的改变. 目前, 基于不同 C/N 和污泥浓度条件下, 针对以 pH 值作为单一控制因素的亚硝化系统影响特性的研究较少. 因此, 了解 C/N 和污泥浓度对 pH 变化的干扰程度和对亚硝化系统的碳氮去除转化影响进行分析, 有利于该类系统(序批式)运行参数的确定和调控策略的设计.

本研究旨在探究 pH 的变化规律及 pH 环境改变后亚硝化系统对污染物降解的微观差异, 将系统进水 C/N 和污泥负荷两个重要的设计参数作为本研究的可控因素, 考察不同 C/N 和污泥浓度条件下, 亚硝化系统中 pH 值的动态变化, 并对不同条件下氨氧化菌(AOB)、亚硝酸型氧化菌(NO_B)、异养菌(HB)的活性以及碳氮去除转化规律进行分析, 以期亚硝化系统在实际应用中的运行调控设计提供理论基础和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 进水水质和污泥

接种污泥取自有效容积为 6.2 L 的亚硝化 SBR 反应器, 反应器内污泥浓度为 4 000 mg·L⁻¹, C/N 为 1.3, 进水氨氮负荷(以 N/MLSS 计)为 0.056 mg·(mg·d)⁻¹, 利用 pH 在反应过程中指示的特征点(氨谷点)设置“停曝点”实现亚硝化, 且通过维持泥量的方法使氨谷点对应的 pH 值稳定在 7.73 ± 0.03, 在环境温度(7 ~ 35℃)下稳定 200d, 亚硝积累率达 85% 以上. 污泥取出后先曝气, 后用去离子水反复冲洗, 沉淀后待用. 进水采用人工配水, 如表 1 所示.

表 1 进水水质
Table 1 Characteristics of synthetic wastewater
used in this experiment

进水指标	浓度/mg·L ⁻¹	人工配药
NH ₄ ⁺ -N	150	NH ₄ Cl
NO ₂ ⁻ -N	0	—
NO ₃ ⁻ -N	0 ~ 2	—
COD	0 ~ 600	CH ₃ COONa
pH	7.8 ~ 7.9	NaHCO ₃

1.2 装置与运行方式

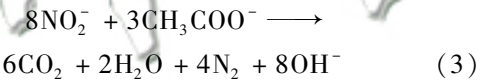
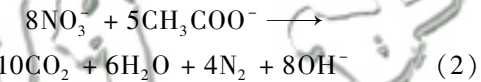
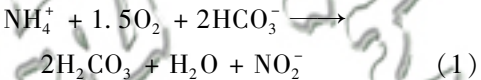
本试验采用容积为 250 mL 的锥形瓶, 装入泥水混合液 200 mL, 放置在摇床内进行, 转速设为 170 r·min⁻¹, 使 DO 在 0.5 mg·L⁻¹ 左右, 温度为 30℃, 固定进水 NH₄⁺-N 浓度为 150 mg·L⁻¹, 设置 3 个不同污泥浓度, 分别为 1 800、2 500、3 280 mg·L⁻¹ (污泥量: 配水量为 1:6、1:3、1:1), 每个污

泥浓度下设置 5 个有机物浓度, 分别为 0、150、300、450、600 mg·L⁻¹ (C/N 为 0、1、2、3、4). 反应过程中梯度时间检测混合液的 COD、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 浓度及 pH 值, 计算各工况下功能微生物对污染物的去除速率.

1.3 分析项目与方法

COD: 快速消解-分光光度法; NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N: 紫外分光光度法; MLSS: 重量法测定^[12]. 温度、pH 值: METTLER 便携式 pH 计; DO 浓度: HACH 便携式溶氧仪.

在存有有机物的亚硝化系统中, 随着 NH₄⁺-N 的转化, 异养菌可利用碳源为电子供体, 将 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 还原成 N₂^[13], 为分析系统中的去除途径, 将 NH₄⁺-N 去除量看作是氨氧化反应生成的 NO₂⁻-N 与 NO₃⁻-N 之和, 而 NO₂⁻-N 与 NO₃⁻-N 减少的量用于进行反硝化, 反硝化程度以氮损呈现(此处忽略细胞合成消耗的量).



为分析不同工况下反应周期内各污染物的降解情况, 周期内梯度时间取样, 检测三氮浓度和 COD 浓度, 直至氨氧化反应结束, 计算过程中的 pH 增量(ΔpH)、比氨氧化速率[SAOR, 以 N/MLSS 计, mg·(mg·d)⁻¹]和比 COD 去除速率[以 N/MLSS 计, mg·(mg·d)⁻¹].

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{max}} - \text{pH}_0 \quad (1)$$

$$\text{SAOR} = \frac{[\text{NH}_4^+-\text{N}]_t - [\text{NH}_4^+-\text{N}]_0}{\text{MLSS} \times t} \quad (2)$$

$$\text{比 COD 去除速率} = \frac{[\text{COD}]_t - [\text{COD}]_0}{\text{MLSS} \times t} \quad (3)$$

式中, pH_{max} 为反应过程中检测到的最大 pH 值; pH₀ 为进水 pH 值; t 为时间, d; [NH₄⁺-N]₀ 和 [COD]₀ 为氨氮和 COD 初始浓度, mg·L⁻¹; [NH₄⁺-N]_t 和 [COD]_t 为反应 t 时间后氨氮和 COD 浓度, mg·L⁻¹; MLSS 为污泥浓度, mg·L⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 不同 C/N 在不同污泥浓度下 pH 变化规律

图 1 分别为污泥量: 配水量在 1:6、1:3、1:1 时不同 C/N 比(0、1、2、3、4)下反应过程中 pH 变化

曲线. 从中可见, 系统存在有机物时, pH 曲线会呈现先向上凸起, 这是由于系统先进行除碳反应, 异养微生物对有机底物的分解代谢和合成代谢形成的 CO_2 通过摇晃而逸出, 使 pH 值不断上升^[14]. 但不同 C/N、污泥浓度下, pH 曲线至最高点、最低点的时间和值都不同(定义去除过程中剩余 NH_4^+-N 浓度最低时的 pH 值为最低 pH). 3 个污泥浓度下, ΔpH 同样随着进水 COD 浓度的增加而增大, 分别在污泥量: 配水量为 1:6 时, ΔpH 由 0 升至 0.66; 1:3 时, ΔpH 由 0 升至 0.75; 1:1 时, ΔpH 由 0 升至 0.73. 随着 C/N 的增加, 反硝化在去除系统中有机物的过程中产生 CO_2 的量增加, 影响了溶液的酸碱平衡, 从而改变系统的 pH 值, ΔpH 也就越高. 相同 C/N 下, ΔpH 随着污泥浓度的增加而减少, 表明生物量也是影响 pH 变化程度的因素之一. 当 C/N 为 0 时, 系统无需除碳, pH 值便随着硝化反应产生的 H^+ 而逐渐降低, 且 pH 值下降速率最快, 随着 C/N 比的增加, 下降速率变缓, 说明硝化过程占主导的同时, 反硝化反应仍在进行, 为系统维持一定的碱度^[15].

由表 2 可看出 pH 增量越大, 出现 pH 最高点的时间越长, 相同 C/N 时, 出现 pH 最高点的时间随着污泥浓度的增加而减少, 但在相同的 COD 去除量下缩短了反硝化的时间. 另外, 相同污泥浓度下, 反硝化效率(以 COD 计)随着 C/N 增加分别由 1.67 增至 1.8 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$; 1.6 增至 1.67 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$; 1.75 增至 1.8 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{min})^{-1}$, 这与尹龙^[16]研究不同 C/N 对 SBR 短程生物脱氮性能影响时得出反硝化效率随 C/N 的增加而增加的结论相一致.

2.2 不同 C/N、不同污泥浓度对碳氮去除转化的影响

图 2~4 分别为 COD、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 在不同污泥浓度(污泥量: 配水量为 1:6、1:3、1:1)下不同 C/N(0、1、2、3、4)时质量浓度随时间的变化情况, 划分 pH 值从开始到上升至顶点为第 I 阶段, pH 值下降至最低点为第 II 阶段. 由图 1 的 pH 变化和图 2~4 的碳氮浓度变化结合可看出, 不同条件下, 污染物去除转化速率与 pH 变化呈较大的相关性, 各工况不同阶段的污染物去除转化速率如表 3 所示, 大量的 COD 在第 I 阶段去除, 比 COD 去除速率是第 II 阶段的 7~16 倍, 当 pH 开始下降后, 比 COD 去除速率下降, SAOR 增大, 是第 I 阶段的 1~20 倍, NO_2^--N 浓度开始逐渐积累, 而 NO_3^--N 一直维持在 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 表明该系统中亚硝化反应占主导.

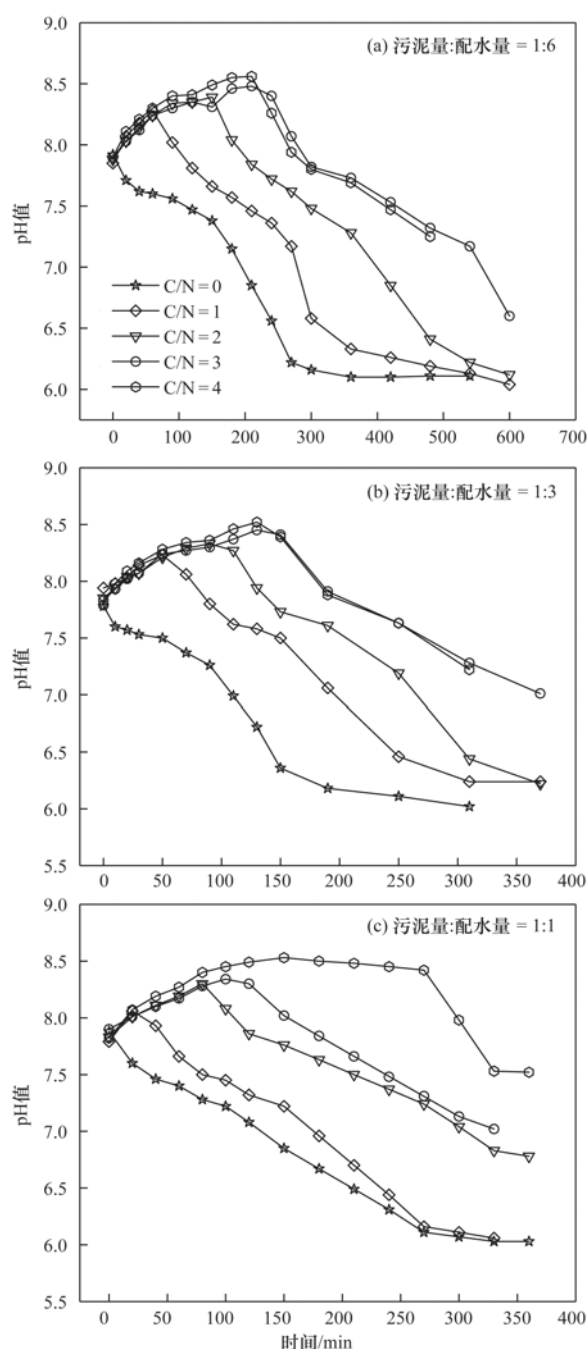


图 1 亚硝化系统中不同污泥浓度下不同 C/N 的 pH 变化情况

Fig. 1 The pH profiles of different C/N under different sludge concentrations in a partial nitrification system

由表 2 和表 3, 随着 C/N 的梯度增加, 污泥量: 配水量为 1:6 时, pH 值最高点由 7.92 升至 8.58, 第 II 阶段的 SAOR (以 N/MLSS 计) 由 0.098 7 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 升至 0.257 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$; 1:3 时, pH 值最高点由 7.78 升至 8.54, 第 II 阶段的 SAOR (以 N/MLSS 计) 由 0.109 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 升至 0.203 6 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$; 1:1 时, pH 值最高点由 7.88 升至 8.53, 第 II 阶段的 SAOR (以 N/MLSS 计) 由 0.087 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$ 升至 0.272 $\text{mg}\cdot(\text{mg}\cdot\text{d})^{-1}$. 不同污泥浓度下, C/N 增加造成过高的 pH 值环境, 未使 AOB 受到抑制, 反而促进了 SAOR 的增大. 另

表 2 不同 C/N 在不同污泥浓度下的 pH 变化规律
Table 2 The pH profiles of different C/N under different sludge concentrations

污泥量: 配水量	C/N	进水 pH	pH 最高点	pH 最低点	ΔpH	出现 pH 最高点的 时间/min	pH 拐点时 ΔCOD /mg·L ⁻¹
1:6	0	7.92	7.92	6.1	0	0	0
	1	7.85	8.28	6.19	0.43	60	100
	2	7.88	8.39	6.1	0.51	150	200
	3	7.9	8.48	6.24	0.58	210	285
	4	7.9	8.58	7.28	0.66	210	380
1:3	0	7.78	7.78	6.02	0	0	0
	1	7.94	8.23	6.24	0.29	50	80
	2	7.85	8.33	6.2	0.48	90	160
	3	7.83	8.45	6.5	0.62	130	252
	4	7.79	8.54	7.22	0.75	240	400
1:1	0	7.88	7.88	6.03	0	0	0
	1	7.79	8.06	6.06	0.27	20	35
	2	7.83	8.3	6.78	0.47	90	168
	3	7.9	8.34	7.02	0.44	110	358
	4	7.82	8.53	7.52	0.73	270	488

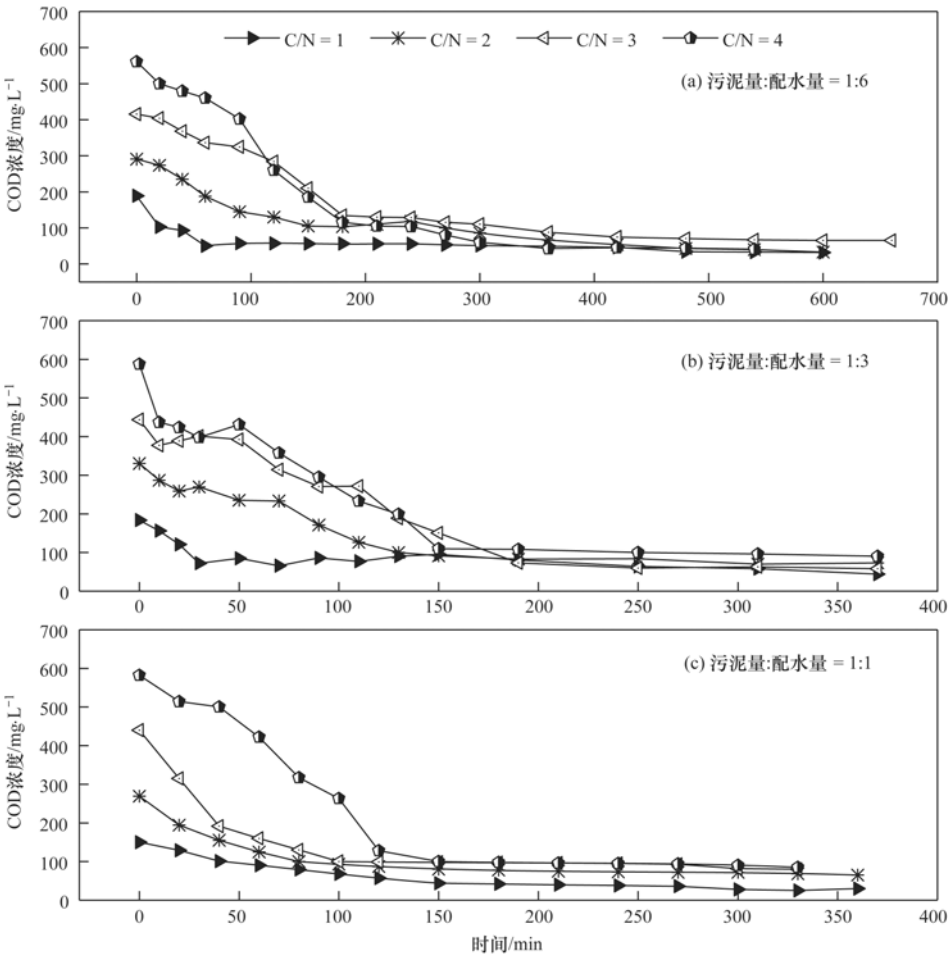


图 2 亚硝化系统中不同污泥浓度下不同 C/N 的有机物去除情况
Fig. 2 Removal of organic matter with different C/N at different sludge concentrations in a partial nitrification system

外,如图 3 和图 4,当 C/N=0 时,系统主要进行亚硝化反应,NO₂⁻-N 浓度随 NH₄⁺-N 浓度的降低而逐渐升高,但随着 pH 值的下降, NH₄⁺-N 转化速率减慢,在 pH 值低于 6.1 时, NH₄⁺-N 浓度不再继续降低,系统失去了氨氧化能力.同时, C/N=1(污泥量:配水量为 1:6、1:1)、C/N=2(污泥量:配水量为 1:6)在 pH<6.1 的剩余 NH₄⁺-N 浓度分别为 50、23、32 mg·L⁻¹,这是由于 pH 过低,使微生物体内的酶活

性降低,进而影响细胞内的生物化学过程,甚至直接破坏微生物细胞^[17~19],该现象表明 C/N 造成的酸碱环境(pH 值)是影响亚硝化系统碳氮去除转化的关键因素.污泥浓度越高,而进水 NH_4^+ -N 浓度不变,因此相同的单位污泥处理量下进水氨氮负荷降低,造成最低 pH 条件下剩余的 NH_4^+ -N 浓度降

低^[20].Ding 等^[21]的研究表明,随着活性污泥系统中 C/N 的升高,系统的硝化效率降低,而反硝化效率提高,Fontenot 等^[22]的研究发现当系统 C/N 为 10:1 时,有机物和氮去除率达到最大值,处理效果最好.本研究中 C/N 为 4 时,系统碳氮去除效果较其他工况最佳;污泥量:配水量为 1:6、1:

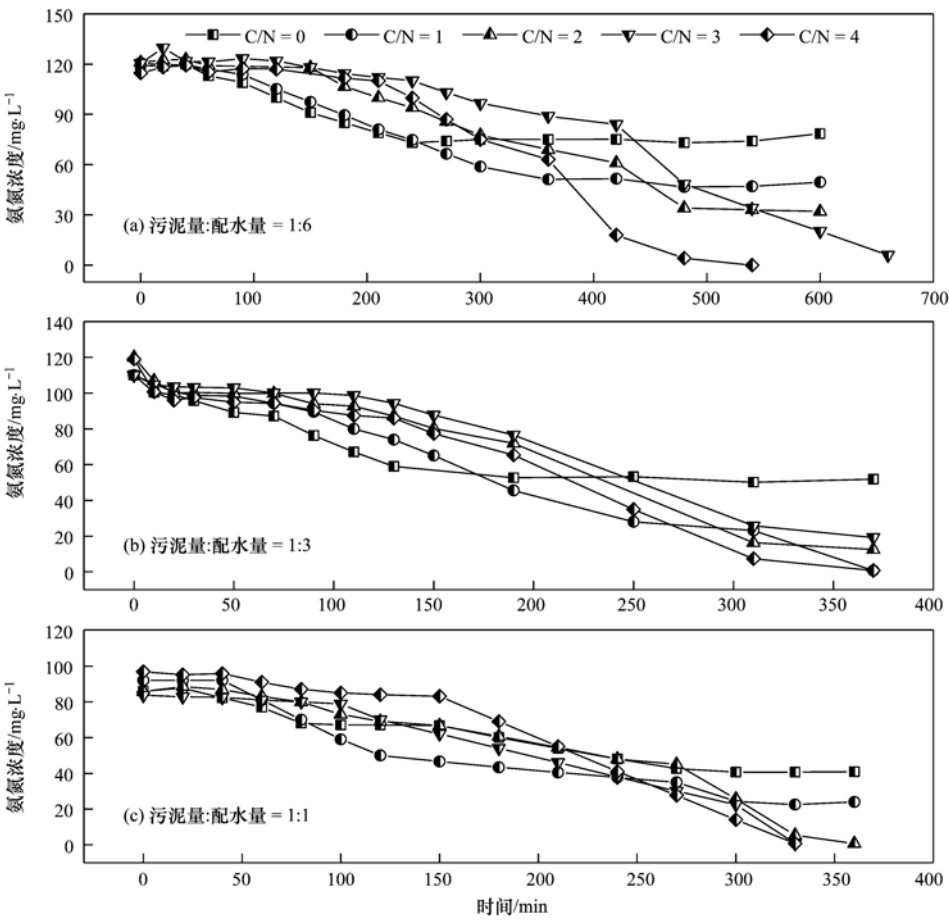


图3 亚硝化系统中不同污泥浓度下不同 C/N 的氨氮去除情况

Fig. 3 Ammonia nitrogen removal of different C/N under different sludge concentrations in a partial nitrification system

表 3 不同 C/N 在不同污泥浓度下的比去除速率/ $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$

Table 3 Specific removal rate of different C/N under different sludge concentration/ $\text{mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$

污泥量	C/N	I 段		II 段	
		比 COD 去除速率	SAOR	比 COD 去除速率	SAOR
1:6	0	/	/	/	0.055
	1	1.323	0.005 9	0.08	0.098 7
	2	1.015	0.091 66	0.136 9	0.138 7
	3	1.086	0.030 4	0.153 9	0.188 7
	4	1.486	0.015 2	0.143 6	0.257
1:3	0	/	/	/	0.084
	1	1.130	0.005 3	0.121	0.109
	2	1.024	0.076 8	0.2	0.169 1
	3	1.133	0.048 9	0.306 6	0.179 6
	4	1.724 4	0.088 9	0.2 491	0.203 6
1:1	0	/	/	/	0.054 8
	1	1.097	0.044	0.094	0.087
	2	0.868 3	0.029	0.041	0.128 5
	3	1.357	0.019 6	0.039 9	0.156
	4	0.793 6	0.095	0.065 8	0.272

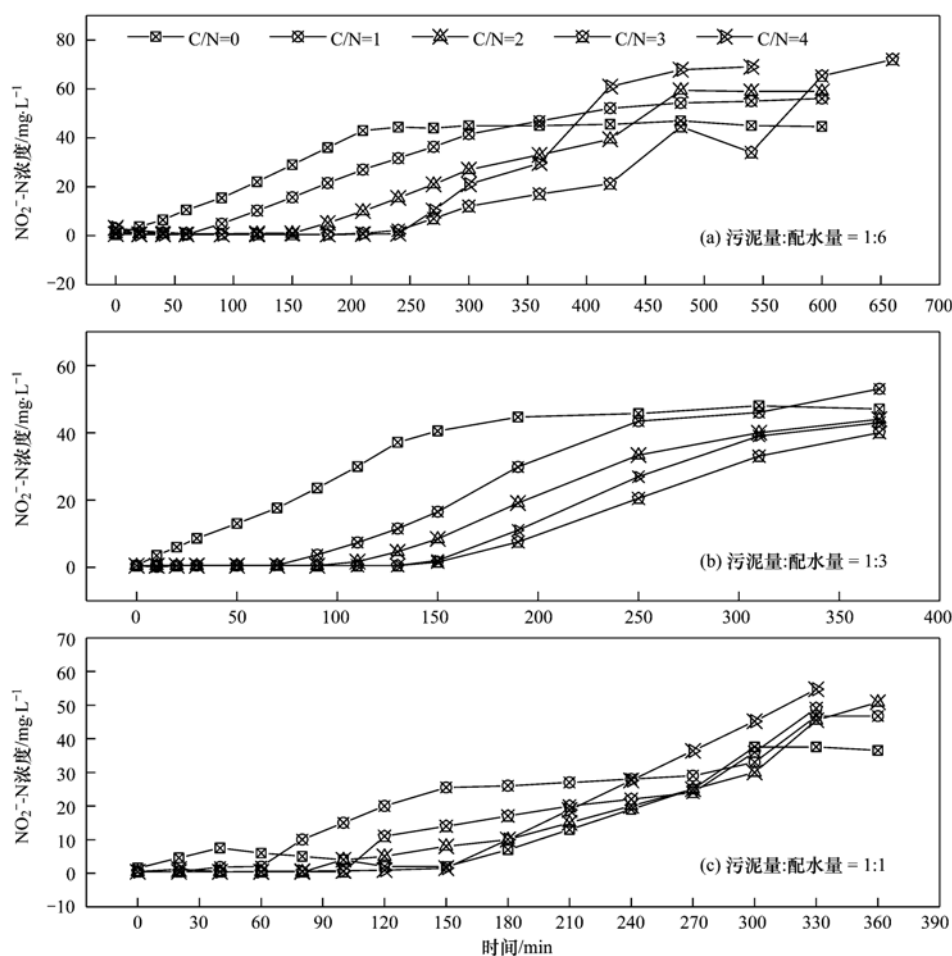


图4 亚硝化系统中不同污泥浓度下不同 C/N 的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 积累情况

Fig. 4 Nitrite accumulation of different C/N under different sludge concentrations in a partial nitrification system

3、1:1时, 分别在 480、350、330 min 完成 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的完全转化, NAR 分别为 98.5%、97.7%、96.4%, COD 去除率分别为 79%、79%、85%。使亚硝化系统达到最优去除转化效果的 C/N 不同可能是因为: ①微生物对碳源的选择利用性, 微生物利用的碳源由自身具有的代谢过程相匹配^[23,24], 由于运行方式、水质的差异, 系统内微生物种类不同, 对碳源的利用存在差异便会导致不同的动力学特征, 是造成不同结果的主要原因; ②功能微生物的数量, 在同时具有亚硝化、反硝化的系统中, 功能微生物的占比是影响各类污染物去除速率的主要因素。

2.3 不同 C/N、不同污泥浓度下功能反应变化分析

存在碳源的亚硝化系统中, 亚硝化和反硝化反应是系统内发生氮和碳转化的功能反应。为分析不同 C/N 和污泥浓度下功能反应占比的变化, 根据方程式(1)~(3)进行物料衡算, 发现系统的 COD 去除量大于脱氮过程所需的有机碳源量, 推测除了反硝化消耗的有机碳源外, 溶解氧的存在消耗了部分有机物, 而部分有机物用作细胞合成代谢的主要

物质^[25,26]。本研究将氮损占总氮去除量的比例作为反硝化的占比, 剩余的总氮去除占比属于亚硝化反应, 考察亚硝化和反硝化在不同条件下占比的变化情况。

由图 5 可知, 随着 C/N 的增加, 功能反应的占比发生变化, 且在不同污泥浓度下, 相同 C/N 的功能反应占比也存在一定差异。C/N 为 1、2、3、4 时, 污泥量:配水量为 1:6, 亚硝化反应占比分别为 87.5%、75%、65%、58%; 1:3 时, 亚硝化反应占比分别为 80%、69%、63%、57.7%; 1:1 时, 亚硝化反应占比分别为 75%、62%、62%、57%, 整个过程亚硝化反应占主导, 对系统耦合脱氮的贡献率维持在 50% 以上, 其中 C/N 对功能反应占比的影响大于污泥浓度对其的影响, 说明 C/N 的改变是功能反应占比发生变化的关键因素。

根据上述对试验结果的分析, 可为以 pH 值为调控手段的亚硝化系统(序批式)提供以下几点参考: ①进水碳源的存在可引起 pH 值的升高而为亚硝化系统提供碱度, 在维持亚硝化的同时, 有利于加快碳氮的去除转化速率; ②在自养菌与异养菌共

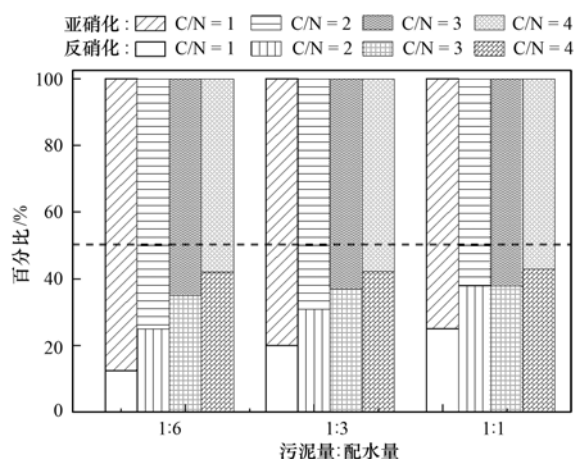


图5 亚硝化系统中不同污泥浓度下不同 C/N 的功能反应占比变化

Fig. 5 Functional response ratios of different C/N under different sludge concentrations in a partial nitrification system

存的体系下,控制污泥量是使亚硝化反应维持稳定的关键因素;③pH 实时控制中,常利用 pH 变化曲线的一阶或二阶微分信号 $[dpH/dt, d^2pH/dt^2]$,但该方法较为复杂,自动控制设定繁琐,且干扰因素较多,若仅将氨谷点前的 pH 值设为“停曝点”,利用末端 pH 指示的剩余 FA 和固定污泥量的方法维持稳定,不但使控制手段具有简易性和准确性,还具备一定的抗干扰能力。

3 结论

(1)在相等起始氨氮浓度和 pH 值条件下,不同 C/N 和污泥浓度会影响 pH 的变化。相同污泥浓度时, C/N 越高, pH 增量越大,反硝化效率越高,最低 pH 值越高;相同 C/N 时,污泥浓度越大, pH 增量越小,反硝化效率越高,最低 pH 值越高。

(2)各工况下,系统中污染物的去除转化与 pH 变化规律具有较大相关性。其中, pH 上升期的比 COD 去除速率是下降期的 7~16 倍,而 pH 下降期的 SAOR 是上升期的 1~20 倍。由 C/N 增加引起的较高 pH 环境下,3 个污泥浓度下的 SAOR(以 N/MLSS 计)分别由 $0.055 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $0.257 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$, $0.084 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $0.2036 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$, $0.0548 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$ 增至 $0.272 \text{ mg} \cdot (\text{mg} \cdot \text{d})^{-1}$,但当 $pH < 6.1$ 时,氨氧化能力丧失,说明 pH 值是影响亚硝化效能的关键因素。

(3)有机物存在时,耦合系统存在厌氧除碳、亚硝化和反硝化反应,反硝化作用均呈增大趋势,但亚硝化作用仍占主导地位,占比维持在 50% 以上。本试验过程中, C/N=4 时该系统脱氮除碳效能较其他工况最佳,3 个污泥浓度下的亚硝化反应和反硝化反应的占比平均为 57.6% 和 42.4%。

参考文献:

- [1] Lee P H, Cotter S F, Reyes Prieri S C, *et al.* pH-gradient real-time aeration control for nitrification community selection in a non-porous hollow fiber membrane biofilm reactor (MBfR) with dilute wastewater[J]. *Chemosphere*, 2013, **90**(8): 2320-2325.
- [2] 杨庆, 杨玉兵, 李健敏, 等. 短程硝化耦合厌氧氨氧化工艺处理低 C/N 比生活污水[J]. *化工学报*, 2018, **69**(8): 3635-3642.
- [3] Yang Q, Yang Y B, Li J M, *et al.* Partial nitrification coupled anaerobic ammonia oxidation process to treat low C/N domestic sewage[J]. *CIESC Journal*, 2018, **69**(8): 3635-3642.
- [4] 高大文, 王淑莹, 彭永臻, 等. 温度变化对 DO 和 ORP 作为过程控制参数的影响[J]. *环境科学*, 2003, **24**(1): 63-69.
- [5] Gao D W, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Temperature effects on DO and ORP in the wastewater treatment [J]. *Environmental Science*, 2003, **24**(1): 63-69.
- [6] Wang C, Liu S T, Xu X C, *et al.* Role of cyclic diguanylate in affecting microbial community shifts at different pH during the operation of simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification process [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **637-638**: 155-162.
- [7] Yuan Y, Wang S Y, Liu Y, *et al.* Long-term effect of pH on short-chain fatty acids accumulation and microbial community in sludge fermentation systems[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **197**: 56-63.
- [8] 李鹏章, 王淑莹, 彭永臻, 等. COD/N 与 pH 值对短程硝化反硝化过程中 N_2O 产生的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(8): 2003-2009.
- [9] Li P Z, Wang S Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of COD/N ratios and pH on N_2O production during nitrite denitrification process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(8): 2003-2009.
- [10] 张敏, 汪瑶琪, 姜滢, 等. 匹配厌氧氨氧化型亚硝化的调控过程研究进展[J]. *水处理技术*, 2018, **44**(5): 7-12.
- [11] Zhang M, Wang Y Q, Jiang Y, *et al.* The regulation process of nitrosation reaction of matching anaerobic ammonia oxidation process: a review [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, **44**(5): 7-12.
- [12] 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 等. 玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2756-2762.
- [13] Long B S, Liu X L, Liu H B, *et al.* Shortcut nitrification rapid start and stability of corn starch wastewater [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2756-2762.
- [14] 王淑莹, 顾升波, 杨庆, 等. SBR 工艺实时控制策略研究进展[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(6): 1121-1130.
- [15] Wang S Y, Gu S B, Yang Q, *et al.* Research progress on real-time control strategies for sequencing batch reactors [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(6): 1121-1130.
- [16] 郑照明, 李军, 杨京月, 等. 不同 C/N 比和碳源种类条件下的 SNAD 生物膜脱氮性能[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(4): 1331-1338.
- [17] Zheng Z M, Li J, Yang J Y, *et al.* The nitrogen removal performance of the SNAD biofilm with different C/N ratios and carbon sources [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(4): 1331-1338.
- [18] 袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 等. C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1416-1420.
- [19] Yuan Y, Huang Y, Deng H P, *et al.* Effect of C/N ratio on nitrite accumulation during denitrification process [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(4): 1416-1420.
- [20] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater (19th ed.) [M]. Baltimore, MD: American Public

- Health Association, 1995.
- [13] She Z L, Zhao L T, Zhang X L, *et al.* Partial nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor treating high-salinity wastewater[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **288**: 207-215.
- [14] 高景峰, 彭永臻, 王淑莹. SBR 法反硝化模糊控制参数 pH 和 ORP 的变化规律[J]. *环境科学*, 2002, **23**(1): 39-44.
Gao J F, Peng Y Z, Wang S Y. Characters of fuzzy control parameters pH and ORP of denitrification in SBR process[J]. *Environmental Science*, 2002, **23**(1): 39-44.
- [15] 刘牡, 史彦伟, 刘甜甜, 等. 碳氮比对晚期垃圾渗滤液自养脱氮的影响[J]. *环境化学*, 2017, **36**(9): 2033-2040.
Liu M, Shi Y W, Liu T T, *et al.* Effects of C/N on the autotrophic nitrogen removal from mature landfill leachate[J]. *Environmental Chemistry*, 2017, **36**(9): 2033-2040.
- [16] 尹龙. 碳源及 C/N 对 SBR 短程生物脱氮性能的影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
Yin L. Effects of different carbon sources and C/N on short-range denitrification [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [17] 张宁博, 李祥, 黄勇. pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5208-5214.
Zhang N B, Li X, Huang Y. Effect of pH value on autotrophic denitrification process of zero valent iron substrate [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5208-5214.
- [18] Fumasoli A, Bürgmann H, Weissbrodt D G, *et al.* Growth of *Nitrosococcus*-related ammonia oxidizing bacteria coincides with extremely low pH values in wastewater with high ammonia content [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6857-6866.
- [19] 陈重军, 冯宇, 汪瑶琪, 等. 厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(2): 346-352.
Chen C J, Feng Y, Wang Y Q, *et al.* Research progress in influence factor of anammox reaction [J]. *Ecology and Environment*, 2016, **25**(2): 346-352.
- [20] 谭冲, 刘颖杰, 王薇, 等. 碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
Tan C, Liu Y J, Wang W, *et al.* Effect of carbon/nitrogen ratio on short-cut nitrification and denitrification of polyurethane biofilm reactor [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3807-3813.
- [21] Ding S Z, Bao P, Wang B, *et al.* Long-term stable simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) process treating real domestic sewage using suspended activated sludge [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **339**: 180-188.
- [22] Fontenot Q, Bonvillain C, Kilgen M, *et al.* Effects of temperature, salinity, and carbon: nitrogen ratio on sequencing batch reactor treating shrimp aquaculture wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98**(9): 1700-1703.
- [23] 吴昌永, 彭永臻, 万春黎, 等. 碳源对 EBPR 代谢过程及微生物特性的影响[J]. *环境科学*, 2009, **30**(7): 1990-1994.
Wu C Y, Peng Y Z, Wan C L, *et al.* Influence of carbon source on EBPR metabolism and microorganism communities [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(7): 1990-1994.
- [24] Wu Y F, Shen X L, Yuan Q P, *et al.* Metabolic engineering strategies for co-utilization of carbon sources in microbes [J]. *Bioengineering*, 2016, **3**(1): 10.
- [25] Zhang X Y, Zheng S K, Zhang H Y, *et al.* Autotrophic and heterotrophic nitrification-anoxic denitrification dominated the anoxic/oxic sewage treatment process during optimization for higher loading rate and energy savings [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **263**: 84-93.
- [26] Hosseini D, Sartaj M, Delatolla R. Simultaneous anaerobic oxidation/partial nitrification-denitrification for cost-effective and efficient removal of organic carbon and nitrogen from highly polluted streams [J]. *Environmental Technology*, 2018, doi: 10.1080/09593330.2018.1438522.

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)