

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.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓿(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

不同 COD 浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征

马艳红¹, 赵智超¹, 安芳娇¹, 黄利², 师晓娟¹, 慕浩¹, 陈永志^{1*}

(1. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州铁道设计院有限公司, 兰州 730000)

摘要: 采用厌氧序批式反应器(ASBR)处理 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N浓度分别为 $(25.00 \pm 0.40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(33.00 \pm 0.60) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的模拟废水, 在温度为 30°C 时, 投加乙酸钠控制 COD 浓度分别为 5.00 、 15.00 、 30.00 和 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 研究对厌氧氨氧化启动的影响. 结果表明: ①4种 COD 浓度下分别经过74、94、106和129 d均能成功启动厌氧氨氧化. COD浓度为 $15.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $30.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器脱氮性能较好, 稳定运行后, 平均出水 NH_4^+ -N浓度分别为 $1.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 NO_2^- -N浓度低于 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 TN 浓度分别为 2.37 、 $2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; ②启动过程中反硝化对脱氮的平均贡献率逐渐降低至 4.78% 、 9.59% 、 10.21% 和 36.50% , 厌氧氨氧化对脱氮的平均贡献率逐渐上升至 95.22% 、 90.41% 、 89.79% 和 63.50% ; ③厌氧氨氧化活性分别在第44、76、86和114 d时超过反硝化活性, 最后分别达到 0.700 、 0.690 、 0.670 和 $0.510 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 反硝化活性分别为 0.110 、 0.130 、 0.240 和 $0.410 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 该研究结果可为厌氧氨氧化技术在实际工程中的应用提供参考.

关键词: 厌氧序批式反应器(ASBR); 化学需氧量(COD); 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 启动; 脱氮性能; 贡献率

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2019)05-2317-09 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201808047

Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations

MA Yan-hong¹, ZHAO Zhi-chao¹, AN Fang-jiao¹, HUANG Li², SHI Xiao-juan¹, MU Hao¹, CHEN Yong-zhi^{1*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Railway Design Institute Company Limited, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An anaerobic sequencing batch reactor (ASBR) was used to treat low-substrate simulated wastewater with NH_4^+ -N and NO_2^- -N concentrations of $(25.00 \pm 0.40) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $(33.00 \pm 0.60) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The COD concentrations were controlled at 5.00 , 15.00 , 30.00 , and $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ by adding sodium acetate, and its effects on start-up of anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX) were investigated under the temperature of 30°C . The results showed that ① The start-up of ANAMMOX could be achieved successfully after 74, 94, 106, and 129 days. The nitrogen removal efficiency was optimum when the COD concentration was between 15.00 and $30.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. In the steady phase, the average effluent concentrations of NH_4^+ -N were 1.98 and $1.89 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the average effluent concentrations of NO_2^- -N were below $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the average effluent concentrations of TN were 2.37 and $2.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. ② The average contribution of heterotrophic denitrification to nitrogen removal decreased to 4.78% , 9.59% , 10.21% , and 36.50% , respectively, during start-up process. The average contribution of ANAMMOX to nitrogen removal gradually increased to 95.22% , 90.41% , 89.79% , and 63.50% , respectively. ③ The activities of ANAMMOX exceeded denitrification activities at 44, 76, 86, and 114 days, respectively, which finally reached 0.700 , 0.690 , 0.670 , and $0.510 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, and the denitrification activities were 0.110 , 0.130 , 0.240 and $0.410 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. Thus, the research results have provided references for the application of ANAMMOX to engineering.

Key words: Anaerobic sequencing batch reactor (ASBR); chemical oxygen demand (COD); anaerobic ammonia oxidation (ANAMMOX); start-up; nitrogen removal efficiency; contribution rate

厌氧氨氧化(ANAMMOX)工艺是指以 NO_2^- -N为电子受体, 以 NH_4^+ -N为电子供体直接反应生成氮气^[1]. 该工艺具有能耗低、产泥量少、无需外加碳源等优点^[2]. 然而 ANAMMOX 菌生长缓慢, 倍增时间长($10 \sim 12 \text{ d}$)^[3], 且对外界环境因素变化极为敏感, 导致厌氧氨氧化反应器启动缓慢. 因此, 研究厌氧氨氧化反应器的启动对该工艺实际应用具有重要意义.

和传统硝化/反硝化工艺相比, 采用厌氧氨氧化工艺处理生活污水具有很大优势, 是最有前景的污水脱氮工艺^[4]. 由于生活污水中 NO_2^- -N浓度很

低, 因此需要先通过半亚硝化工艺为厌氧氨氧化工艺提供合适的进水. 张艳辉等^[5]通过调节缺氧/好氧比在连续流反应器中实现了稳定的半亚硝化; 周元正等^[6]通过改良 SBR 使出水 NH_4^+ -N和 NO_2^- -N的

收稿日期: 2018-08-06; 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51668033); 甘肃省高等学校特色专业-环境工程项目(101004); 兰州交通大学大学生创新实验项目(2018110); 甘肃省自然科学基金项目(18JR3RA126); 兰州交通大学青年科学研究基金项目(2015014)

作者简介: 马艳红(1982~), 女, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为水污染控制理论与技术, E-mail: 1606944231@qq.com

* 通信作者, E-mail: 476411589@qq.com

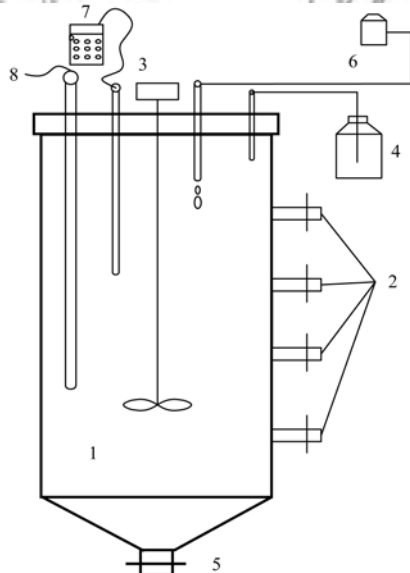
比值约为 1:1; Jiang 等^[7]通过实时控制在生物滤池中也实现了半亚硝化. 然而, 生活污水经半亚硝化工艺后出水基质浓度较低, 而且存在有机物^[8], 低基质下厌氧氨氧化菌难以富集^[9], 有机物对厌氧氨氧化菌有抑制^[10,11], 在含有有机物的低基质条件下启动厌氧氨氧化反应器鲜见报道.

因此, 本实验采用 ASBR 反应器, 采用人工配水模拟生活污水半亚硝化出水, 以 COD 表征有机物, 研究了 4 种不同 COD 浓度下低基质厌氧氨氧化的启动过程, 以期为厌氧氨氧化工艺处理实际生活污水提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置

本实验采用 4 个 ASBR 反应器, 编号分别为 R₅、R₁₅、R₃₀ 和 R₅₀ (表示投加的 COD 浓度分别为 5.00、15.00、30.00 和 50.00 mg·L⁻¹, COD 为乙酸钠). 反应器采用圆柱形有机玻璃制成, 直径 14 cm, 高 45 cm, 有效容积 5 L, 在反应器壁的垂直方向设置取样口, 底部设有排泥口, 上部设有通气口, 反应产生的气体经水封瓶后排出, 反应器外侧用黑色塑料布覆盖, 以防止光对厌氧氨氧化菌活性的影响, 实验装置如图 1.



1. ASBR 反应器; 2. 排水口; 3. 搅拌器; 4. 水封瓶; 5. 排泥口; 6. 缓冲液; 7. pH 探测仪; 8. 温控仪

图 1 ASBR 反应装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of ASBR reactor

1.2 实验用水与接种污泥

本实验采用模拟废水, 其组成如下: NH₄Cl 和 NaNO₂ 分别为 (25 ± 0.40) mg·L⁻¹ 和 (33 ± 0.60) mg·L⁻¹, 微量元素参照文献^[12], KH₂PO₄ 为 2.00 mg·L⁻¹, KHCO₃ 为 110.00 mg·L⁻¹, MgSO₄·7H₂O

为 20.00 mg·L⁻¹, CaCl₂·2H₂O 为 20.00 mg·L⁻¹; 微量元素 I 和微量元素 II 各 1.50 mg·L⁻¹. 微量元素浓缩液 I 组成 (mg·L⁻¹): EDTA 5.00, FeSO₄ 5 000.00; 微量元素浓缩液 II 组分 (mg·L⁻¹): EDTA 5 000.00, CoCl₂·6H₂O 240.00, ZnSO₄·7H₂O 430.00, MnCl₂·4H₂O 990.00, CuSO₄·5H₂O 250.00, NiCl₂·6H₂O 190.00, NaMoO₄·2H₂O 220.00, H₃BO₄ 14.00, NaSeO₄·10H₂O 210.00.

接种污泥取自兰州市某污水厂厌氧消化污泥, 污泥具有良好的活性, 其 MLSS 为 8.50 g·L⁻¹, VSS 为 6.63 g·L⁻¹.

1.3 检测方法

水样经过 0.45 μm 滤纸过滤后测定, 采用国家标准方法^[13]. 表 1 为化学分析项目、方法及仪器.

表 1 化学分析项目、方法及仪器

Table 1 Chemical analysis substances, methods, and instruments		
分析项目	测试方法	仪器
NH ₄ ⁺ -N	纳氏试剂分光光度法	UV-1200 紫外可见光分度计
NO ₂ ⁻ -N	N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法	UV-1200 紫外可见光分度计
NO ₃ ⁻ -N	麝香草酚分光光度法	UV-1200 紫外可见光分度计
COD	快速密闭催化消解法	5B-(1F) 型 COD 快速测定仪
pH	pH 计	Multi3430-WTW
温度	温控仪	STC-200

1.4 实验方案

温度恒定为 30℃, 进水通过 NaHCO₃ 控制 pH 为 7.20 ± 0.20. ASBR 反应器采用间歇运行, 进水 5 min, 沉淀 30 min, 排水 5 min, 排水比为 80%. 反应器的运行分为 5 个阶段(表 2).

1.5 计算方法

1.5.1 脱氮贡献率、总氮容积负荷(TNLR)及总氮去除负荷(TNRR)

厌氧氨氧化对脱氮的贡献率 A 及反硝化对脱氮的贡献率 D 的计算, 参考文献^[14]的公式; TNLR 及 TNRR 的计算参考文献^[15]的公式:

A = \frac{1.32 (NH_4^+-N)_{rem}}{(NO_2^--N)_{rem} - \Delta NO_3^--N + 0.26 (NH_4^+-N)_{rem}}

D = 1 - A

TNLR = \frac{c_{inf} \times 24}{HRT}

TNRR = \frac{(c_{inf} - c_{eff}) \times 24}{HRT}

式中, (NH₄⁺-N)_{rem}、(NO₂⁻-N)_{rem} 分别为 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 去除量 (mg·L⁻¹), ΔNO₃⁻-N 为 NO₃⁻-N 变化量

表 2 ASBR 反应器的运行工况
Table 2 Operating conditions of ASBR reactors

运行阶段	时间/d				HRT/h
	R ₅	R ₁₅	R ₃₀	R ₅₀	
I	1 ~ 20	1 ~ 27	1 ~ 32	1 ~ 38	24
II	21 ~ 39	28 ~ 53	33 ~ 61	39 ~ 76	24
III	40 ~ 49	54 ~ 69	62 ~ 78	77 ~ 98	12
	50 ~ 56	70 ~ 78	79 ~ 87	99 ~ 112	8
IV	57 ~ 75	79 ~ 94	88 ~ 106	113 ~ 129	8
V	76 ~ 93	95 ~ 113	107 ~ 127	130 ~ 150	4

($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_{inf} 表示进水 TN 浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), c_{eff} 表示出水 TN 浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), HRT 表示水力停留时间(h).

1.5.2 厌氧氨氧化活性和反硝化活性

(1) 用 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除速率 $R_{\text{氨氮}}$ 表示厌氧氨氧化活性:

$$R_{\text{氨氮}} = \frac{(\text{NH}_4^+\text{-N})_{\text{rem}}}{\text{MLSS} \times \text{HRT}}$$

(2) 反硝化活性用反硝化速率 $R_{\text{反硝化}}$ 表示:

$$R_{\text{反硝化}} = \frac{\Delta(\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{反}} + \Delta(\text{NO}_3^-\text{-N})_{\text{反}}}{\text{MLSS} \times \text{HRT}}$$

$\Delta(\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{反}} = (\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{rem}} - 1.32(\text{NH}_4^+\text{-N})_{\text{rem}}$
 $\Delta(\text{NO}_3^-\text{-N})_{\text{反}} = 0.26(\text{NH}_4^+\text{-N})_{\text{rem}} - c_{\text{eff}}(\text{NO}_3^-\text{-N})$
式中, MLSS 为反应器内污泥浓度($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$), $\Delta(\text{NO}_2^-\text{-N})_{\text{反}}$ 和 $\Delta(\text{NO}_3^-\text{-N})_{\text{反}}$ 分别为反硝化去除的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); $c_{\text{eff}}(\text{NO}_3^-\text{-N})$ 为出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),其它参数见 1.5.1 节.

2 结果与讨论

2.1 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中氮素变化特性

图 2 分别表示 R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 以及 TN 的变化规律. 第 I 阶段为菌体自溶期, 由于菌体死亡、自溶^[16], 导致出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度不降反升. 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均接近 $0.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这是因为反应器内存在较强的异养反硝化作用^[17], 该阶段末期的出水 TN 浓度均大于 $23.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 第 II 阶段为活性停滞期, 4 个反应器存在着少量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除, R_5 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度有所增加, 导致 TN 去除率降低, 而 R_{15} 、 R_{30} 、 R_{50} 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度仍接近 $0.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 去除率略微增加. 第 III 阶段为活性提高期, R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别在第 57、80、90 和 113d 时降低为 1.10 、 3.21 、 1.94 和 $6.79\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率提高至 96.03% 、 87.24% 、 92.21% 和 73.02% , 表明厌氧氨氧化作用不断增强^[18]; R_5 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度不断下降至

$0.77\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率升高至 97.76% ; R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除保持稳定. 该阶段 4 个反应器出水 TN 浓度分别持续降低至 6.05 、 3.97 、 2.46 和 $7.33\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, TN 去除率分别为 89.73% 、 93.22% 、 95.82% 和 87.43% . 第 IV 阶段为稳定运行期, 反应器对氮素的去除趋于稳定^[19]. R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 平均出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 0.92 、 1.98 、 1.89 和 $6.43\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达到 96.15% 、 92.08% 、 92.48% 和 74.59% ; 平均出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均低于 $0.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率均大于 95.00% ; 平均出水 TN 浓度分别为 5.14 、 2.37 、 2.28 和 $7.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别达到 91.20% 、 95.91% 、 96.09% 和 87.85% . 第 V 阶段, HRT 减少至 4h , R_5 、 R_{15} 和 R_{30} 出水氮素浓度先升高后降低, 稳定后平均出水 TN 浓度分别为 6.17 、 4.75 和 $3.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, R_{50} 对氮素的去除效果明显变差, 平均出水 TN 浓度为 $14.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 表明 4h 不是 R_{50} 的最佳的 HRT.

4 个反应器均成功启动了厌氧氨氧化, 耗时分别为 74 、 94 、 106 和 129 d . 与 COD 浓度为 $5.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 相比, COD 浓度为 $15.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 虽然启动时间延长, 但稳定运行后 TN 去除率较高, 这可能是因为反应器内发生了反硝化与厌氧氨氧化的协同脱氮作用; 当 COD 浓度为 $30.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反应器稳定运行后脱氮性能无明显增加; 当 COD 浓度为 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不但启动时间较长, 而且稳定运行后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较低. 有研究表明当采用不含 COD 的配水启动厌氧氨氧化时^[20], 在活性停滞期 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除率显著下降, 与 COD 浓度为 $5.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时一致. COD 为 15.00 、 30.00 和 $50.00\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度未出现显著降低, 这是由于较高的碳源浓度使 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 可通过反硝化作用去除.

启动过程中污泥形状变化反映了优势菌群的变化, 可作为厌氧氨氧化启动的参考. 初始阶段污泥为厌氧消化污泥, 呈棕黑色. 在菌体自溶阶段, 污泥颜色变为黄色. 在活性停滞阶段, 污泥由淡黄色

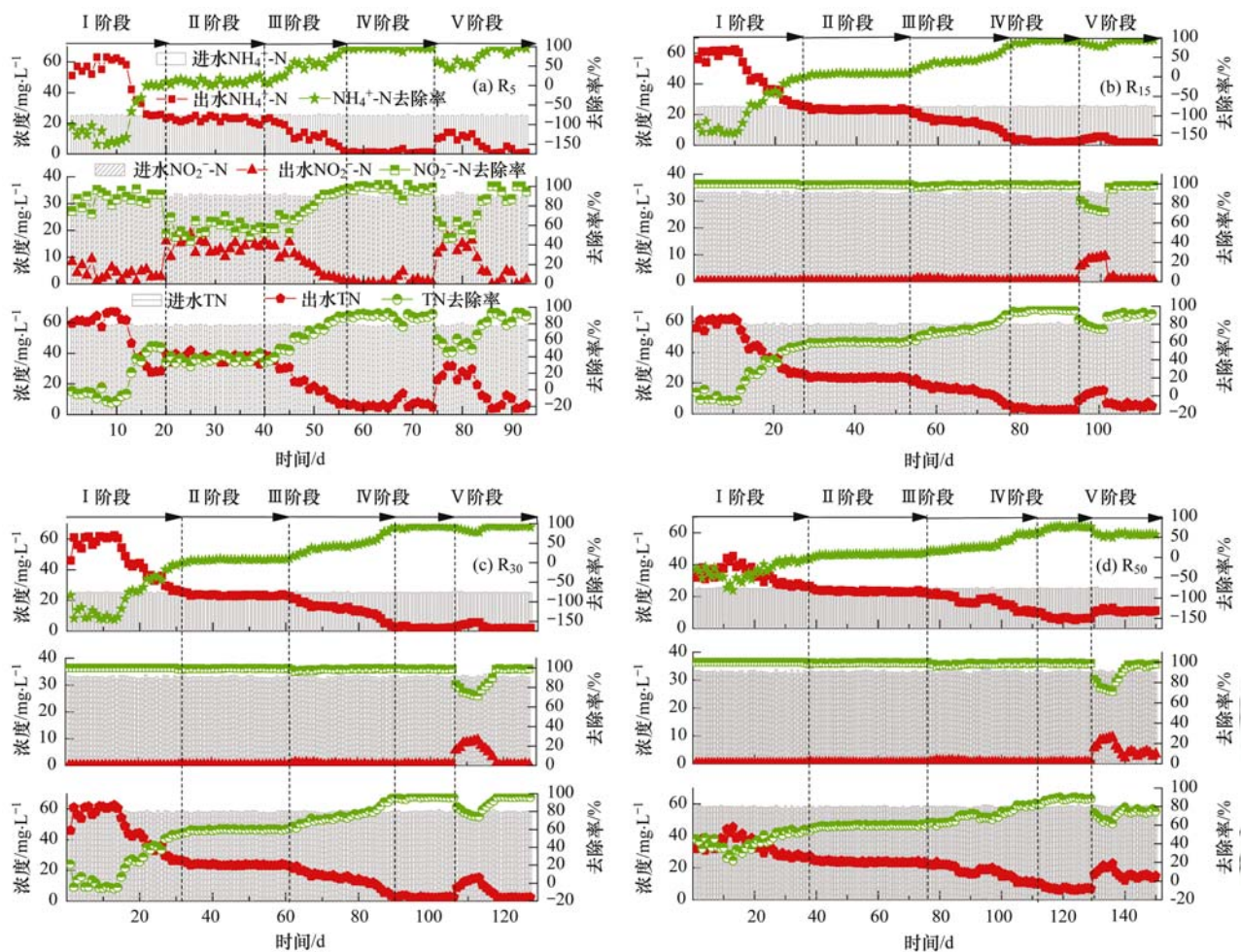


图2 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 TN 的变化

Fig. 2 Variations of NH_4^+-N , NO_2^--N , and TN during ANAMMOX start-up process under different COD concentrations

变为红棕色,随着厌氧氨氧化活性不断提高,污泥又变为浅红褐色.在稳定运行阶段,反应器内的污泥呈现明显的红褐色,这是厌氧氨氧化菌所含大量细胞色素 C 所致^[21].

2.2 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中 TNLR、TNRR 及 pH 的变化特征

图3分别为 R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 启动过程中 TNLR、TNRR 及 pH 的变化特征.当 HRT 从 24 h $\rightarrow$ 12 h $\rightarrow$ 8 h $\rightarrow$ 4 h 时,4 个反应器的 TNLR 相应从 $58.30 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1} \rightarrow 116.70 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1} \rightarrow 176.80 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1} \rightarrow 353.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$.随着厌氧氨氧化活性不断增强, TNRR 均呈升高趋势,在稳定运行期,4 个反应器的平均 TNRR 分别为 164.22、170.40、172.30 和 $154.40 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$.苗蕾等^[22]的研究发现当 ASBR 进水 COD 小于 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,不仅不会抑制厌氧氨氧化菌,还能提高 TNRR;当进水 COD 浓度进一步提高至 $150.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后, TNRR 从 $1100.00 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 迅速降至 $190.00 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;王凡等^[23]以乙酸钠作为碳源,当 TOC 小于 $40.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TNRR 达到最大值 340.00

$\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$,厌氧氨氧化反应得到强化, TOC 大于 $160.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应器内 pH 大幅升高,厌氧氨氧化反应被抑制.上述研究均针对稳定运行的厌氧氨氧化反应,本实验在厌氧氨氧化启动过程中添加 COD,当 COD 浓度从 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高至 $30.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TNRR 的增加速度降低,但稳定运行后 TNRR 较高,这是因为反硝化协同还原厌氧氨氧化反应的副产物硝酸盐氮.当 COD 浓度继续升高至 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TNRR 不仅增加缓慢,而且较低.当 TNLR 为 $353.20 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 时, R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 的 TNRR 均出现较大波动,这是由于负荷提升后厌氧氨氧化菌出现短暂不适应,最后 R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 的 TNRR 比较接近 TNLR,而 R_{50} 的 TNRR 与 TNLR 相差较大.

4 个反应器出水 pH 值均高于进水 pH 值,且逐渐增大,在稳定运行期时为 $8.22 \sim 8.44$.理论上,发生厌氧氨氧化反应时,每氧化 $1.00 \text{ mol NH}_4^+-\text{N}$ 需要消耗 0.13 mol H^+ ,当厌氧氨氧化反应成为主导反应的过程中,出水 pH 值将升高^[24].反应器出水 pH 在第 V 阶段均出现明显下降,这是因为厌氧氨

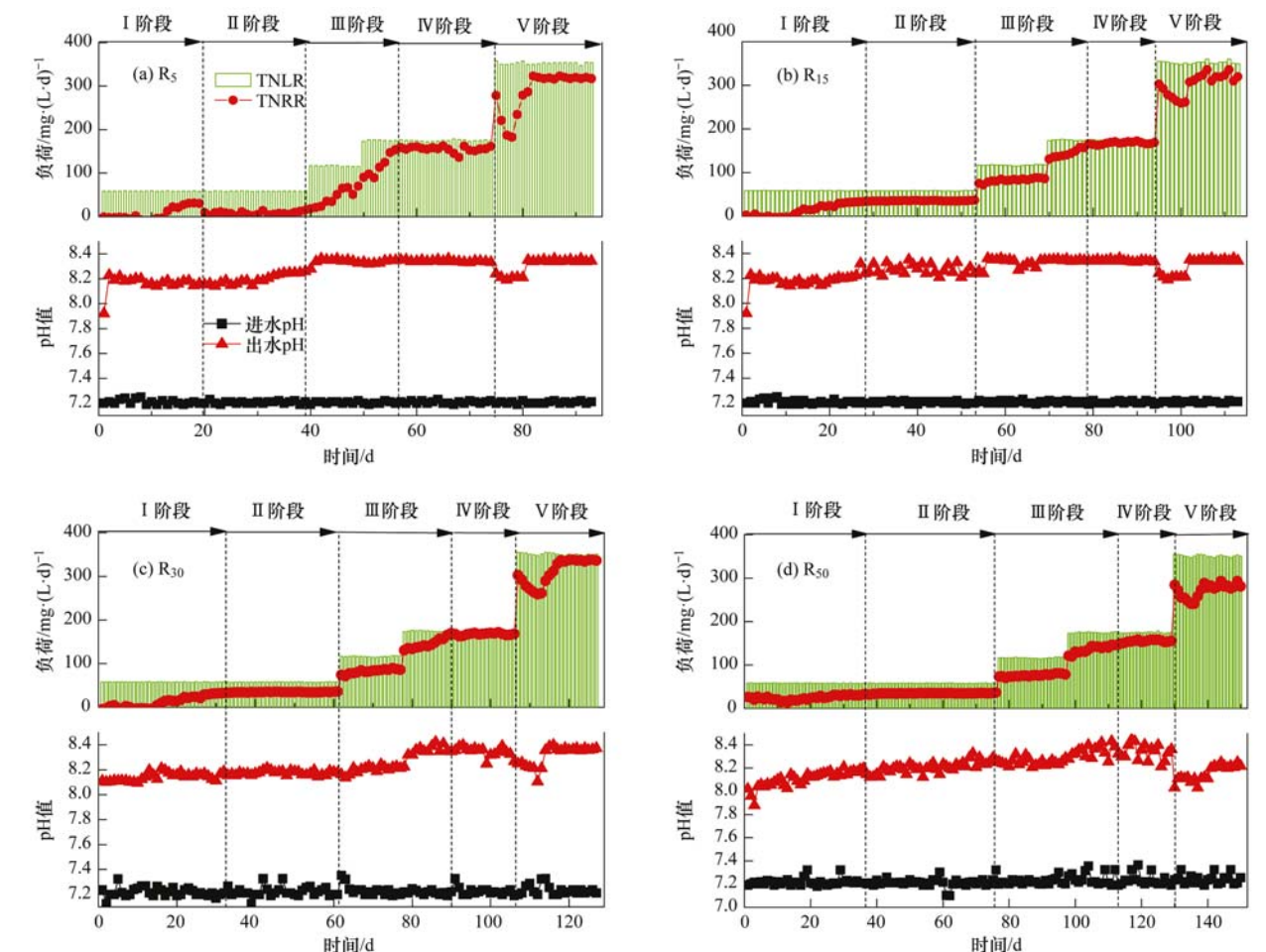


图3 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中 TNLR、TNRR 及 pH 的变化

Fig. 3 Variations of TNLR, TNRR, and pH during ANAMMOX start-up process under different COD concentrations

氧化出现短期恶化。

2.3 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中化学计量比变化特征

图4 分别为 R₅、R₁₅、R₃₀和 R₅₀启动过程中化学

计量比 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的变化特征。在第 I 阶段的菌体自溶期和第 II 阶段的活性停滞期，由于厌氧氨氧化菌活性较低， $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 变化无规律。进入第 III 阶段的活性提高期后，4 个反应器的

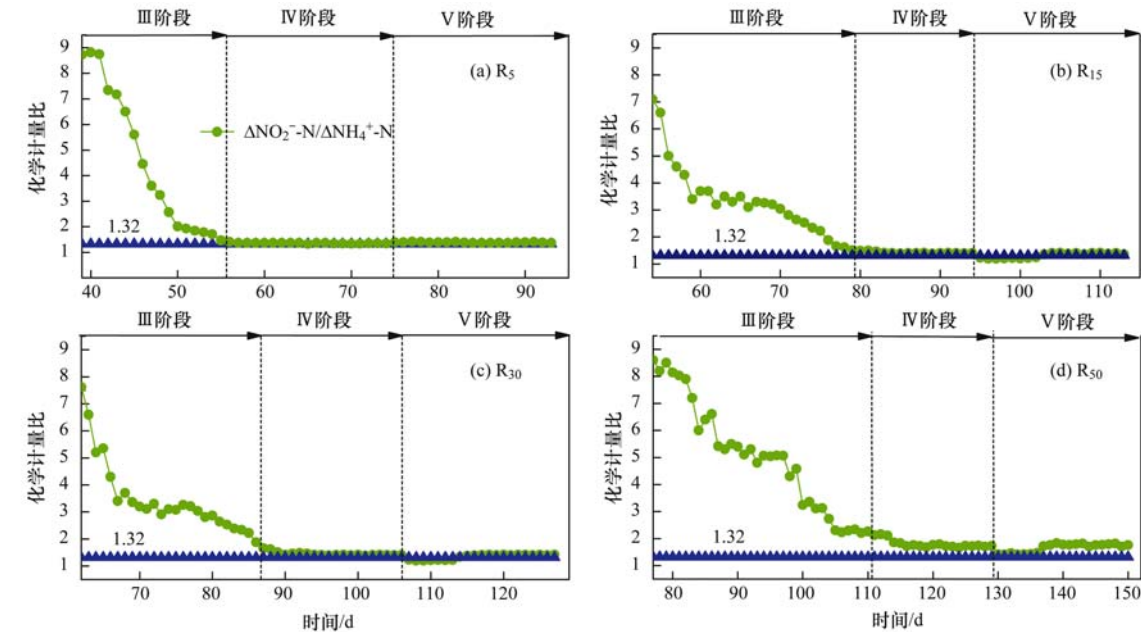


图4 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中化学计量比的变化

Fig. 4 Variations of stoichiometric ratio during ANAMMOX start-up process under different COD concentrations

$\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 均呈现降低趋势, 分别在第 56、78、87 和 112 d 时降至 1.33、1.49、1.42 和 2.26; 进入第Ⅳ阶段后, R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 的 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 分别为 1.31 ~ 1.36、1.41 ~ 1.46、1.37 ~ 1.48 和 1.69 ~ 1.88. 厌氧氨氧化反应的显著特征就是 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 以一定比例进行反应, $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 逐渐偏向理论值反映出厌氧氨氧化活性的逐渐增强. COD 浓度为 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 厌氧氨氧化稳定运行后 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N} / \Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和理论值偏差较大, 这是由于一部分 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 通过异养反硝化作用去除^[25].

2.4 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中 COD 以及脱氮贡献率变化特征

图 5 分别表示 R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 启动过程中 COD 以及厌氧氨氧化和反硝化脱氮贡献率变化特征. 4 个反应器进水 COD 浓度分别为 5.00 、 15.00 、 30.00 和 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. R_5 的出水 COD 浓度比较稳定, 平均值为 $0.28 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率为 94.40%; R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 平均出水 COD 浓度分别在

1 ~ 77、1 ~ 80 和 1 ~ 74 d 接近 $0.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 然后逐渐增加至 5.10、16.06 和 $20.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均去除率变为 66.67%、46.47% 和 58.88%; 反应器运行初期, 异养菌占优势, 消耗 COD 较多; 当厌氧氨氧化菌逐渐成为优势菌种后, 对 COD 的需求降低, 导致出水 COD 浓度增大.

启动过程中反硝化对脱氮的贡献率呈现下降趋势, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率呈现上升趋势. R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 中反硝化对脱氮的平均贡献率最后降低至 4.78%、9.59%、10.21% 和 36.50%, 厌氧氨氧化对脱氮的平均贡献率最后分别达到 95.22%、90.41%、89.79% 和 63.50%. 启动初期, 反硝化菌迅速适应环境, 利用有机物消耗 $\text{NO}_2^- \text{-N}$, 因此反硝化作用对脱氮的贡献率较高; 随着厌氧氨氧化活性的增强, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 主要通过厌氧氨氧化作用去除, 导致反硝化对脱氮的贡献率降低, 厌氧氨氧化对脱氮的贡献率上升^[26]. 反应器稳定运行后, COD 浓度越高, 反硝化对脱氮的贡献率越高, 但厌氧氨氧化作用仍占据主导.

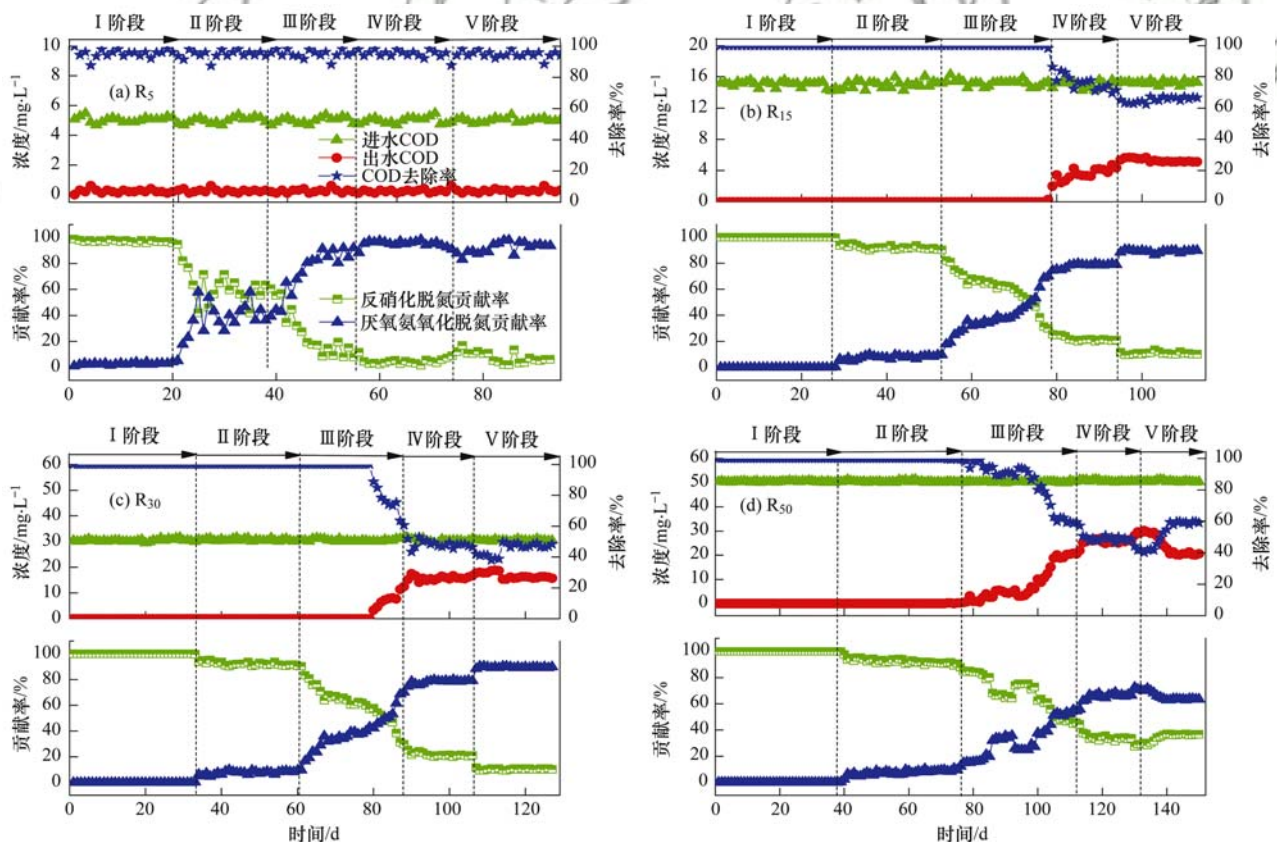


图 5 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中 COD 和贡献率变化

Fig. 5 Variations of COD and contribution rate during the ANAMMOX start-up process under different COD concentrations

2.5 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中厌氧氨氧化活性和反硝化活性变化特征

图 6 分别表示 R_5 、 R_{15} 、 R_{30} 和 R_{50} 启动过程中厌氧氨氧化活性和反硝化活性变化特征. 启动过程中

反硝化活性有较大波动, 4 种 COD 浓度下系统内平均反硝化活性分别为 0.066、0.165、0.174 和 $0.210 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$; 厌氧氨氧化活性分别在第 44、76、86 和 114 d 时高于反硝化活性, 表明厌氧氨

氧化菌占据优势地位. COD 浓度越高, 越有利于反硝化菌保持较高的活性, 厌氧氨氧化活性的增长越缓慢, 导致启动时间的延迟. 这是因为厌氧氨氧化菌和反硝化菌均以 NO_2^- -N 作为基质, 并且都适合在缺氧条件下生长, 两者同时利用底物进行代谢生长, 但是反硝化菌为异养型细菌, 其细胞产率高于厌氧氨氧化菌^[27], 存在 COD 使得反硝化菌与厌氧氨氧化菌争夺 NO_2^- -N, 影响厌氧氨氧化启动, 并且 COD 浓度越高, 影响越大. 不同

COD 浓度下, 厌氧氨氧化活性最后分别达到 0.700 、 0.690 、 0.670 和 $0.510 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 反硝化活性分别为 0.110 、 0.130 、 0.240 和 $0.410 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. 在 COD 存在时厌氧氨氧化活性仍能不断增加, 并超过反硝化活性, 分析认为: ①接种污泥中反硝化菌可能较少; ②本实验中采用的 COD 浓度不能造成对厌氧氨氧化菌的完全抑制, 厌氧氨氧化菌能逐渐适应有机物的存在, 并利用基质进行厌氧氨氧化反应.

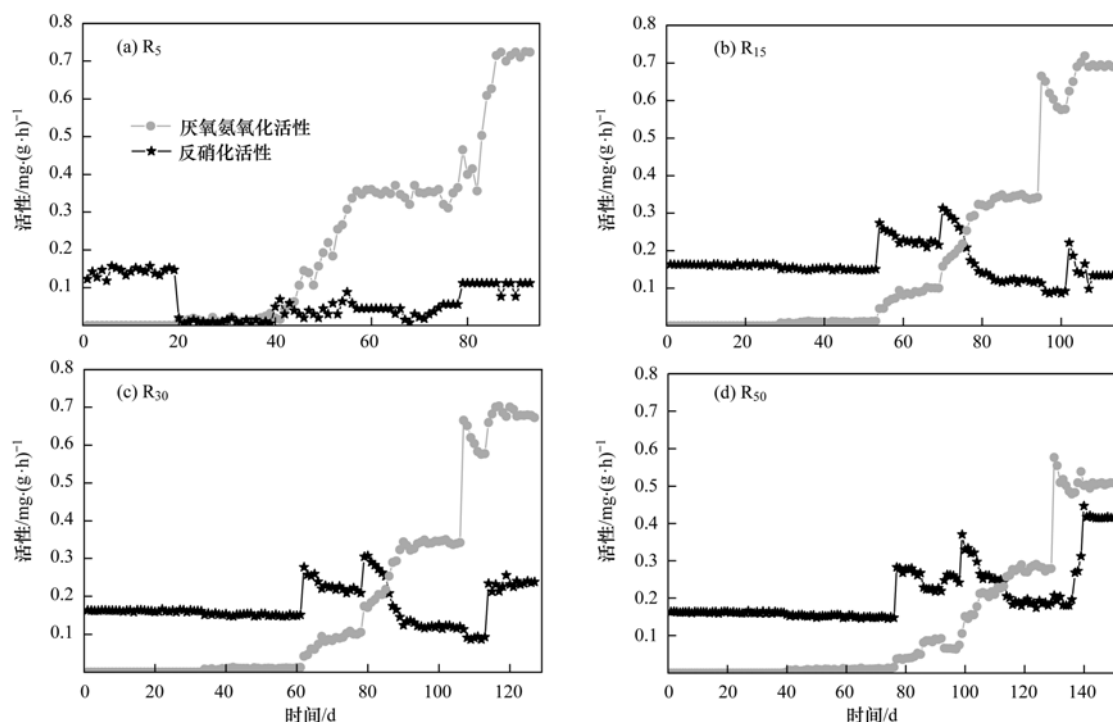


图6 不同 COD 浓度下厌氧氨氧化启动过程中厌氧氨氧化活性和反硝化活性变化

Fig. 6 Variations of ANAMMOX activities and denitrification activities during the ANAMMOX start-up process under different COD concentrations

3 结论

(1) 采用 ASBR 反应器处理低基质模拟废水, 在温度为 30°C 时, 控制 COD 浓度分别为 5.00 、 15.00 、 30.00 和 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 经过 74、94、106 和 129 d 后均能启动厌氧氨氧化. 和 COD 为 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 相比, COD 浓度为 $15.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 启动时间虽然延长, 但稳定运行后脱氮性能提高, 平均出水 NH_4^+ -N、TN 浓度分别为 1.98 、 $2.37 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均出水 NO_2^- -N 浓度低于 $0.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; COD 浓度为 $30.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器稳定运行后脱氮性能无明显增加, COD 浓度为 $50.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应器稳定运行后脱氮性能较低. 因此, 厌氧氨氧化启动过程中较佳 COD 浓度为 $5.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $15.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 4 种 COD 浓度下, 厌氧氨氧化启动过程中反硝化对脱氮的平均贡献率逐渐降低至 4.78% 、 9.59% 、 10.21% 和 36.50% , 厌氧氨氧化对脱氮的

平均贡献率逐步上升至 95.22% 、 90.41% 、 89.79% 和 63.50% ; 反应器稳定运行后, COD 浓度越高, 反硝化对脱氮的贡献率越高, 但厌氧氨氧化作用仍占据主导.

(3) 4 种 COD 浓度下, 厌氧氨氧化启动过程中系统内平均反硝化活性分别为 0.066 、 0.165 、 0.174 和 $0.210 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$, 厌氧氨氧化活性分别在第 44、76、86 和 114 d 时超过反硝化活性, 最后分别达到 0.700 、 0.690 、 0.670 和 $0.510 \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$. COD 浓度越高, 越利于反硝化菌保持较高活性, 厌氧氨氧化活性的增长越缓慢, 导致启动时间延迟.

参考文献:

- [1] 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 等. 不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2770-2777.
An F J, Peng Y Z, Dong Z L, et al. Performance of the removal of nitrogen during anaerobic ammonia oxidation using different operational strategies [J]. Environmental Science, 2018, 39

- (6): 2770-2777.
- [2] 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 等. 基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响[J]. 环境科学, 2018, **39**(11): 5058-5064.
- An F J, Huang J M, Huang L, *et al.* Effect of substrate ratio on removal of nitrogen and carbon using anaerobic ammonium oxidation and denitrification[J]. Environmental Science, 2018, **39**(11): 5058-5064.
- [3] Dapena-Mora A, Campos J L, Mosquera-Corral A, *et al.* Stability of the ANAMMOX process in a gas-lift reactor and a SBR[J]. Journal of Biotechnology, 2004, **110**(2): 159-170.
- [4] Feng Y, Zhao Y P, Guo Y Z, *et al.* Microbial transcript and metabolome analysis uncover discrepant metabolic pathways in autotrophic and mixotrophic anammox consortia [J]. Water Research, 2018, **128**: 402-411.
- [5] 张艳辉, 李冬, 梁瑜海, 等. 缺氧/好氧比对连续流半亚硝化稳定性的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(6): 1724-1731.
- Zhang Y F, Li D, Liang Y H, *et al.* Influence of anoxic/aerobic ratio on stability of partial nitrification in a continuous flow process [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(6): 1724-1731.
- [6] 周元正, 李冬, 苏东霞, 等. 改良 SBR 工艺实现生活污水除磷与半亚硝化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1351-1358.
- Zhou Y Z, Li D, Su D X, *et al.* Partial nitrification and phosphorus removal in improved SBR process treating domestic wastewater[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(5): 1351-1358.
- [7] Jiang H C, Liu G H, Ma Y M, *et al.* A pilot-scale study on start-up and stable operation of mainstream partial nitrification-anammox biofilter process based on online pH-DO linkage control [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **350**: 1035-1042.
- [8] Vela J D, Stadler L B, Martin K J, *et al.* Prospects for biological nitrogen removal from anaerobic effluents during mainstream wastewater treatment[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2015, **2**(9): 234-244.
- [9] Cao Y S, Van Loosdrecht M C M, Daigger G T. Mainstream partial nitrification-anammox in municipal wastewater treatment: status, bottlenecks, and further studies [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2017, **101**(4): 1365-1383.
- [10] Han M, De Clippeleir H, Al-Omari A, *et al.* Impact of carbon to nitrogen ratio and aeration regime on mainstream deammonification[J]. Water Science & Technology, 2016, **74**(2): 375-384.
- [11] Godwin J, Miller M W, Klaus S, *et al.* Impact of limited organic carbon addition on nitrogen removal in a mainstream polishing anammox moving bed biofilm reactor[A]. In: Proceedings of the Water Environment Federation [C]. Chicago: Water Environment Federation, 2015.
- [12] 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.
- [13] APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 21st ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2005.
- [14] 魏思佳, 于德爽, 李津, 等. 厌氧氨氧化与反硝化耦合脱氮除碳研究 I: COD/NH₄⁺-N 对耦合反应的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(3): 759-767.
- Wei S J, Yu D S, Li J, *et al.* Simultaneous carbon and nitrogen removal by anaerobic ammonium oxidation and denitrification I: effect of COD/NH₄⁺-N on coupled reaction [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(3): 759-767.
- [15] 周同, 于德爽, 李津, 等. 温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2044-2051.
- Zhou T, Yu D S, Li J, *et al.* Effect of temperature on nitrogen removal performance of marine anaerobic ammonium oxidizing bacteria[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2044-2051.
- [16] 赖玮毅, 周伟丽, 何圣兵. 生物活性炭厌氧氨氧化反应器启动过程研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3171-3179.
- Lai W Y, Zhou W L, He S B. Study on the start-up of anaerobic ammonium oxidation process in biological activated carbon reactor [J]. Environmental Science, 2013, **34**(8): 3171-3179.
- [17] Tang C J, Zheng P, Mahmood Q, *et al.* Start-up and inhibition analysis of the anammox process seeded with anaerobic granular sludge[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2009, **36**(8): 1093-1100.
- [18] 姚芳, 刘波, 王德朋, 等. 不同接种污泥的厌氧氨氧化反应器启动特性及菌群结构演替规律分析[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(7): 2543-2551.
- Yao F, Liu B, Wang D P, *et al.* Start-up of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge and analysis of microbial community structure shift [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(7): 2543-2551.
- [19] 闫刚, 李田, 徐乐中, 等. 基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(10): 4324-4331.
- Lü G, Li T, Xu L Z, *et al.* Quick start-up performance of combined ANAMMOX reactor based on different inoculated sludge types[J]. Environmental Science, 2017, **38**(10): 4324-4331.
- [20] 张海芹, 王翻翻, 李月寒, 等. 不同接种污泥 ABR 厌氧氨氧化的启动特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 2216-2221.
- Zhang H Q, Wang F F, Li Y H, *et al.* Start-up performance of ANAMMOX enrichment with different inoculated sludge in anaerobic baffled reactor[J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 2216-2221.
- [21] 盖书慧, 张宁, 张雁秋. 新型脱氮工艺-厌氧氨氧化 (ANAMMOX) [J]. 环境科学与管理, 2009, **34**(4): 98-101, 105.
- Gai S H, Zhang N, Zhang Y Q. New ways for nitrogen removal-anaerobic ammonium oxidation[J]. Environmental Science and Management, 2009, **34**(4): 98-101, 105.
- [22] 苗蕾, 王凯, 王淑莹, 等. 垃圾渗滤液中有有机物对其厌氧氨氧化的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, **44**(5): 999-1004.
- Miao L, Wang K, Wang S Y, *et al.* Effect of organics on anammox process for treatment of landfill leachate[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, **44**(5): 999-1004.
- [23] 王凡, 刘凯, 林兴, 等. 不同 TOC/NH₄⁺-N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3415-3421.
- Wang F, Liu K, Lin X, *et al.* Effect of different TOC to NH₄⁺-N ratios on nitrogen removal efficiency in the ANAMMOX process [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3415-3421.
- [24] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, **34**(5): 1-4.
- Zhou S Q. Stoichiometric analysis of combined reaction of anaerobic ammonia oxidation with denitrification[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition),

- 2006, **34**(5): 1-4.
- [25] 安芳娇, 彭永臻, 张永辉, 等. 基质比对厌氧氨氧化脱氮性能的影响[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1010-1015.
An F J, Peng Y Z, Zhang Y H, *et al.* Effect of substrate ratio on the performance of nitrogen removal through anaerobic ammonia oxidation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1010-1015.
- [26] 陈国燕, 彭党聪, 李惠娟, 等. 厌氧氨氧化耦合部分反硝化处理低浓度氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2018, **12**(7): 1888-1895.
Chen G Y, Peng D C, Li H J, *et al.* Treating low-nitrogenous wastewater by coupling anammox with partial denitrification[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, **12**(7): 1888-1895.
- [27] 杨京月, 郑照明, 李军, 等. 厌氧氨氧化耦合反硝化底物竞争抑制特性[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(8): 2947-2953.
Yang J Y, Zheng Z M, Li J, *et al.* The inhibitive characteristics by substrate competition of the anammox coupling denitrification process[J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 2947-2953.

环境科学

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1 534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs)in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qi, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-can, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)