

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.3  
第40卷 第3期

目次

|                                                                                             |                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| 2014~2017北京市气象条件和人为排放变化对空气质量改善的贡献评估                                                         | 尹晓梅, 李梓铭, 熊亚军, 乔林, 邱雨露, 孙兆彬, 寇星霞 (1011)               |
| 利用多元线性回归方法评估气象条件和控制措施对 APEC 期间北京空气质量的影响                                                     | 李颖若, 汪君霞, 韩婷婷, 王焱, 何迪, 权维俊, 马志强 (1024)                |
| 京津冀郊区站点秋冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 来源解析                                                         | 王彤, 华阳, 许庆成, 王书肖 (1035)                               |
| 四川省典型工业行业 PM <sub>2.5</sub> 成分谱分析                                                           | 冯小琼, 陈军辉, 熊文朋, 梅林德, 徐雪梅, 尹寒梅, 范武波, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (1043)  |
| 典型物流城市 2016 年冬季 2 次污染过程 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源解析                                         | 赵雪艳, 杨文, 王静, 刘盈盈, 白雯宇, 徐艳萍, 王歆华, 白志鹏 (1052)           |
| 沈阳市采暖期与非采暖期空气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征及来源分析                                                   | 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 赵雪艳, 余浩, 张辉, 陈莉, 王歆华 (1062)             |
| 新乡冬季 PM <sub>2.5</sub> 中金属元素与水溶性离子年际变化及其来源解析                                                | 闫广轩, 雷豪杰, 张靖雯, 唐明双, 张佳羽, 曹治国, 李云蓓, 王跃思, 樊静, 李虎 (1071) |
| 烟台市环境受体 PM <sub>2.5</sub> 四季污染特征与来源解析                                                       | 刘童, 王晓军, 陈倩, 温杰, 黄渤, 朱红霞, 田瑛泽, 冯银厂 (1082)             |
| 常州市冬季 PM <sub>2.5</sub> 中类腐殖质昼夜特征分析                                                         | 顾远, 李清, 黄爱倩, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲 (1091)                     |
| 西北某电子垃圾拆解厂室内外重金属污染特征及暴露风险                                                                   | 曹红梅, 赵留元, 穆熙, 李尧捷, 毛潇萱, 黄韬, 马建民, 高宏 (1101)            |
| 京津冀一次污染过程的星地同步动态监测分析                                                                        | 邱昀, 李令军, 姜磊, 王新辉, 赵文慧, 张立坤, 鹿海峰 (1111)                |
| 中国城市 O <sub>3</sub> 浓度时空变化特征及驱动因素                                                           | 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 宋永永 (1120)                             |
| 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征                                                            | 张倩倩, 张兴赢 (1132)                                       |
| 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析                                                                            | 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 吴成志, 王刚, 陈必新, 李伟, 高翔, 叶荣民 (1143)       |
| 中国建筑涂料使用 VOCs 排放因子及排放清单的建立                                                                  | 高美平, 邵霞, 聂磊, 王海林, 安小桂 (1152)                          |
| 异戊二烯和甲苯二次有机硫踪物的臭氧非均相氧化                                                                      | 黄亚娟, 曹罡, 朱荣淑, 欧阳峰 (1163)                              |
| 兰州市农牧业源氨排放清单及其时空分布特征                                                                        | 栗世学, 郭文凯, 何昕, 朱玉凡, 陈强 (1172)                          |
| 成都降水稳定氢氧同位素特征及水汽来源分析                                                                        | 胡月, 刘国东, 孟玉川, 张文江, 夏成城 (1179)                         |
| 基于 TBL 模型的闽江口围垦养虾塘水-大气界面 CO <sub>2</sub> 扩散通量估算                                             | 张逸飞, 杨平, 赵光辉, 李玲, 谭立山, 全川 (1188)                      |
| 渤海和北黄海有色溶解有机物 (CDOM) 的分布特征和季节变化                                                             | 刘兆冰, 梁文健, 秦礼萍, 唐建辉 (1198)                             |
| 思林水库荧光溶解性有机质的特征、来源及其转化动力学                                                                   | 劳心宇, 原杰, 刘瑜, Khan M. G. Mostofa (1209)                |
| 厦门湾海滩微塑料污染特征                                                                                | 刘启明, 梁海涛, 锡桂莉, 胡欣, 葛健 (1217)                          |
| 高分辨率监测下的漓江省里断面生物地球化学特征分析                                                                    | 王奇岗, 肖琼, 赵海娟, 王健力, 郭永丽, 张清华 (1222)                    |
| 鲜水河断裂带拉沁盆地断面地下水化学特征及控制因素                                                                    | 何锦, 张幼宽, 赵雨晴, 韩双宝, 刘元晴, 张涛 (1236)                     |
| 成都市锦江表层水和沉积物中有机磷酸酯的污染特征                                                                     | 吴迪, 印红玲, 李世平, 王增武, 邓旭, 罗怡, 罗林 (1245)                  |
| 丹江口库区表层浮游细菌群落组成与 PICRUS1 功能预测分析                                                             | 张菲, 田伟, 孙峰, 陈彦, 丁传雨, 庞发虎, 姚伦广, 李玉英, 陈兆进 (1252)        |
| 蓝藻水华对太湖水柱反硝化作用的影响                                                                           | 刘志迎, 许海, 詹旭, 朱广伟, 秦伯强, 张运林 (1261)                     |
| 基于微生物生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价                                                                   | 苏瑶, 许育新, 安文浩, 王云龙, 何振超, 楼颖雯, 沈阿林 (1270)               |
| 生物炭添加对湿地植物菖蒲根系通气组织和根系泌氧的影响                                                                  | 黄磊, 梁根坤, 梁岩, 罗星, 陈玉成 (1280)                           |
| 城市不同材料屋面径流的污染负荷特性                                                                           | 何湖滨, 陈诚, 林育青, 严晗璐, 董建玮, 陈求稳 (1287)                    |
| BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> 复合光催化剂制备及其光催化降解污染物机制 | 张文海, 吉庆华, 兰华春, 李静 (1295)                              |
| 微米铁复合生物碳源对地下水中 1,2-二氯乙烷的高效去除                                                                | 吴乃瑾, 宋云, 魏文侠, 王海见, 孙仲平 (1302)                         |
| 鸟粪石天然沸石复合材料对水中铅离子的去除                                                                        | 邓曼君, 王学江, 成雪君, 景焕平, 赵建夫 (1310)                        |
| Ca/Mg 负载改性沼渣生物炭对水中磷的吸附特性                                                                    | 易蔓, 李婷婷, 李海红, 黄巧, 杨金娥, 陈玉成, 杨志敏 (1318)                |
| 两种生物炭的制备及其对水溶液中四环素去除的影响因素                                                                   | 程扬, 沈启斌, 刘子丹, 杨小莹, 张太平, 廖志钟 (1328)                    |
| 静止和水动力扰动状态下铅改性沸石添加对河道底泥磷迁移转化的影响                                                             | 俞阳, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 吴小龙, 王艳, 赵钰颖, 林莹, 刘鹏茜 (1337)       |
| 4 种磺胺类药物及乙酰化代谢物在污水处理厂的去除及机制                                                                 | 王大鹏, 张烟, 颜昌宙 (1347)                                   |
| 以膜分离为主的物化法对城市污水中污染因子的去除特性分析                                                                 | 徐婷, 李勇, 朱怡嘉, 薛梦娜, 汤同欢 (1353)                          |
| 进水氨氮浓度对生物除磷颗粒系统的影响                                                                          | 李冬, 曹美忠, 郭跃利, 梅宁, 李帅, 张杰 (1360)                       |
| 除磷亚硝化颗粒工艺启动及性能恢复                                                                            | 李海玲, 李冬, 张杰, 刘博 (1367)                                |
| CAST 工艺高温短程硝化的实现及其除磷性能                                                                      | 马娟, 杨蕊春, 俞小军, 周猛, 陈永志 (1375)                          |
| 不同曝气量 and 好氧时间下 SPNDPR 系统处理低 C/N 城市污水的脱氮除磷性能                                                | 袁梦飞, 于德爽, 巩秀珍, 王晓霞, 陈光辉, 杜世明, 甄建国 (1382)              |
| ABR 除碳-亚硝化耦合厌氧氨氧化处理城市污水                                                                     | 李田, 曹家炜, 谢凤莲, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (1390)                     |
| 室温低氨氮基质单级自养脱氮颗粒污泥启动效能与污泥特性                                                                  | 谢璐琳, 王建芳, 钱飞跃, 张泽宇, 沈耀良, 齐泽坤 (1396)                   |
| 不同种泥的厌氧氨氧化反应器的启动及动力学特征                                                                      | 任君怡, 陈林艺, 李慧春, 秦玉洁, 曹雁, 王桐屿, 周少奇 (1405)               |
| 降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征                                                                     | 付昆明, 廖敏华, 周厚田, 付巢, 姜娜, 仇付国, 曹秀芹 (1412)                |
| IEM-UF 同步分离反硝化系统脱氮特性及种群结构分析                                                                 | 刘子奇, 张岩, 马翔山, 张博康, 曹孟京, 曹昌明 (1419)                    |
| 温度对硝化杆菌 (Nitrobacter) 活性动力学影响                                                               | 于雪, 孙洪伟, 李维维, 祁国平, 马娟, 陈永志, 吕心涛 (1426)                |
| 零价铁和微波预处理组合强化污泥厌氧消化                                                                         | 牛雨彤, 刘吉宝, 马爽, 李亚明, 解立平, 魏源送, 孟晓山 (1431)               |
| 牛粪堆肥系统环境因子对抗性基因的影响                                                                          | 彭磊, 王科, 谷月, 王爱杰 (1439)                                |
| 环境因子对土壤微生物呼吸及其温度敏感性变化特征的影响                                                                  | 张彦军, 郭胜利 (1446)                                       |
| 三峡库区典型林分土壤呼吸及其组分对模拟酸雨响应                                                                     | 李一凡, 王玉杰, 王彬, 王云琦 (1457)                              |
| 三峡库区柑橘园施肥量对土壤氮淋失及残留量的影响                                                                     | 王甜, 黄志霖, 曾立雄, 肖文发, 宋文梅 (1468)                         |
| 长期施肥下水稻根际和非根际土壤微生物碳源利用特征                                                                    | 宁赵, 程爱武, 唐海明, 葛体达, 邓扬悟, 苏以荣, 陈香碧 (1475)               |
| 不同碳负荷梯度下稻田土壤有机碳矿化特征                                                                         | 童瑶瑶, 王季斐, 祝贞科, 邓扬悟, 陈珊, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1483)          |
| 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征                                                             | 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 张德楠, 孙英杰, 张中峰, 周龙武, 段春燕 (1491)         |
| 缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征                                                                     | 王富华, 吕盛, 黄容, 高明, 王子芳, 徐畅 (1504)                       |
| 大气污染对居民健康影响研究进展                                                                             | 秦耀辰, 谢志祥, 李阳 (1512)                                   |
| 《环境科学》征订启事 (1042)                                                                           | 《环境科学》征稿简则 (1162)                                     |
| 信息 (1208, 1235, 1286)                                                                       |                                                       |



## 降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征

付昆明, 廖敏辉, 周厚田, 付巢, 姜姍, 仇付国, 曹秀芹

(北京建筑大学环境与能源学院, 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

**摘要:** 本文以低温高氨氮废水为着眼点, 通过不断地调节运行工况, 探讨降温过程中全程自养脱氮(CANON)工艺的运行特征, 以探索出低温环境下进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较高时, CANON 工艺获得稳定短程硝化和良好脱氮效果的方法. 结果表明: ① 相较于直接将生物膜 CANON 反应器的温度条件由中温转变为低温( $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 19^\circ\text{C}$ ), 逐步降温驯化更有利于脱氮功能菌适应低温环境, 且每次降温的幅度应尽量减小, 同时还应配合运行工况的调节; ② 温度经 25 d 逐步降低至  $19^\circ\text{C}$  左右, 18 d 后又继续降至  $15^\circ\text{C}$  左右,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TN 去除率均能分别长期稳定在 90%、70% 以上, 甚至当温度下降至  $12^\circ\text{C}$  时, TN 去除率与去除负荷仍能分别达到 72.52%、 $0.78 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ; ③ 降温过程中驯化生物膜 CANON 污泥时, 应优先考虑短程硝化控制. 可通过维持一定的剩余 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度并严格控制 DO 浓度, 以抑制 NOB 的活性, 从而获得稳定的短程硝化效果.

**关键词:** 全程自养脱氮(CANON); 温度; 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 氨氧化细菌; 亚硝酸盐氧化细菌(NO<sub>2</sub>-oxidizing bacteria); 短程硝化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)03-1412-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201808184

## Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process

FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, FU Chao, JIANG Shan, QIU Fu-guo, CAO Xiu-qin

(Sino-Dutch R&D Centre for Future Wastewater Treatment, Key Laboratory of Urban Storm water System and Water Environment, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** The focus of this paper, was low temperature, high ammonia nitrogen wastewater. The operation characteristics of the biofilm CANON process during the temperature reduction process were determined, by continuously adjusting different operating conditions. The aim was to explore the methods needed for the CANON process to obtain stable shortcut nitrification and a good nitrogen removal effect, when the influent  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration is high and the temperature low. The results showed that, ① compared with the biofilm CANON reactor temperature changing from medium to low temperature directly ( $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 19^\circ\text{C}$ ), it was more conducive to adapt the nitrogen-removing bacteria to the low-temperature environment, while the temperature was gradually lowered. Moreover, the extent of each reduction should be minimized. Besides, the operating conditions should be adjusted to ensure the nitrogen removal effect. ② The temperature was gradually reduced to about  $19^\circ\text{C}$  after 25 d, and then decreased to about  $15^\circ\text{C}$  after another 18 d. The  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TN removal rates could be respectively stable at 90% and 70% over a long period of time. The TN removal rate and removal load could still reach 72.52% and  $0.78 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , respectively, even when the temperature dropped to  $12^\circ\text{C}$ . ③ When adapting biological CANON sludge during the temperature reduction process, shortcut nitrification should be given priority. A stable shortcut nitrification effect should be obtained by maintaining a certain concentration of residual  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , and by strictly controlling the DO concentration to restrain NOB activity.

**Key words:** completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); temperature; anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX); ammonia-oxidizing bacteria; nitrite oxidizing bacteria (NOB); shortcut nitrification

目前, CANON 工艺在处理污泥消化液等高氨氮废水方面具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>, 其温度主要采用中温条件<sup>[2, 3]</sup>. 此外, 在城市污水处理厂应用主流厌氧氨氧化工艺时, 运行温度仍采用中温条件<sup>[4]</sup>. 可见, 温度为中温条件时, CANON 工艺较容易实现稳定的短程硝化, 进而获得良好的脱氮效果. 因此, 在处理水温呈季节性变化较大的废水时, 例如污水厂主流工艺的污水<sup>[5]</sup>或垃圾渗滤液<sup>[6]</sup>, CANON 工艺将面临短程硝化效果不稳定的困境. 尤其是在处理污水厂主流工艺的污水时,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度一般较低, 水温在冬季时也较低 ( $5 \sim 20^\circ\text{C}$ ), CANON 工艺中 NOB 的生长代谢不仅

受游离氨(free ammonia, FA)的影响较小, 而且也不受温度的限制<sup>[7]</sup>.

温度影响细菌的具体方式表现为, 影响酶催化反应速率和基质扩散速率<sup>[8]</sup>. 对于 CANON 工艺中主要脱氮功能菌来说: 一方面, 温度达到  $25 \sim 35^\circ\text{C}$  时, 氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)的生长速率较亚硝酸盐氧化细菌

收稿日期: 2018-08-23; 修订日期: 2018-09-17

基金项目: 北京市教育委员会科技发展计划项目(SQKM201710016006); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项(X18214)

作者简介: 付昆明(1981~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向主要为污水自养脱氮技术、 $\text{N}_2\text{O}$  释放控制技术及农村污水治理技术, E-mail: fukunming@163.com

(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)高,且可实现 NOB 的“自然淘洗”<sup>[9]</sup>;另一方面,就 ANAMMOX 菌的最适温度范围而言,研究者普遍接受的是 30 ~ 35℃<sup>[10]</sup>.此外,不同研究者的试验结果均表明,ANAMMOX 菌受低温的影响较大<sup>[11]</sup>.例如,Laurenì 等<sup>[12]</sup>的研究发现,12.5℃时,ANAMMOX 菌的活性相比 29℃时下降了 90%;周同等<sup>[13]</sup>的研究表明,25 ~ 35℃时海洋厌氧氨氧化反应的活化能为 26 kJ·mol<sup>-1</sup>,而温度下降至 10 ~ 25℃时,海洋厌氧氨氧化反应的活化能升高了 50 kJ·mol<sup>-1</sup>.因此,低温环境下,AOB 氧化 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 产生的 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 可能不会被 ANAMMOX 菌及时消耗掉,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 出现积累,而这会对 CANON 工艺中短程硝化的稳定性构成威胁.

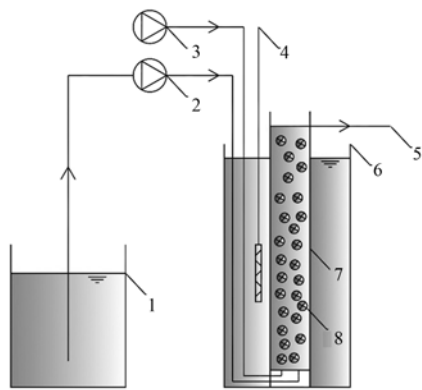
如果要将 CANON 工艺应用于处理低温废水,应探究长期低温环境下 CANON 反应器中短程硝化和脱氮性能的稳定性与高效性.本文以低温高氨氮废水为着眼点,以生物膜 CANON 污泥为接种污泥,通过不断地调节进水负荷、曝气量、温度等运行工况,探讨降温过程中生物膜 CANON 反应器的运行特征,以探索出低温环境下进水 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度较高时,CANON 反应器获得稳定短程硝化和良好脱氮效果的方法.

1 材料与方法

1.1 试验装置

本试验采用的反应器由有机玻璃制成,内径为 7 cm,高度为 1 m,有效容积为 3.5 L,如图 1 所示.反应器填料为内部有支撑的圆柱形改性聚乙烯填料,侧边沿不同径向伸展许多尾翅用于增加填料

的比表面积,直径约 10 mm,高度约 8 mm,密度约为 0.96 g·cm<sup>-3</sup><sup>[14]</sup>.反应器采用升流式进水方式,通过水浴控制反应器内部温度,控制反应器内 pH 为 7.80 ~ 8.12.反应器底部安装圆柱形曝气头,采用空气泵进行曝气并通过玻璃转子流量计控制流量.



1. 进水箱;2. 进水泵;3. 空气泵;4. 恒温加热棒;5. 出水口;  
6. 水箱;7. 生物膜 CANON 反应器;8. 生物膜 CANON 污泥

图 1 生物膜 CANON 反应器试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process diagram of the biofilm CANON reactor

1.2 接种污泥与试验用水

接种的生物膜 CANON 污泥来自于实验室已稳定运行的改性聚乙烯填料 CANON 反应器,该反应器的 TN 去除负荷最高可达 2.52 kg·(m<sup>3</sup>·d)<sup>-1</sup><sup>[14]</sup>.

本试验用水采用人工配制的无机进水,由自来水添加适量的 NH<sub>4</sub>Cl、NaHCO<sub>3</sub>、NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 和 1 mL·L<sup>-1</sup>微量元素浓缩液 I、1 mL·L<sup>-1</sup>微量元素浓缩液 II<sup>[15]</sup>组成,反应器无机进水水质如表 1 所示.

表 1 生物膜 CANON 反应器无机进水水质

Table 1 Inorganic water quality of the influent for the biofilm CANON reactor

| 项目 | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>/mg·L <sup>-1</sup> | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N<br>/mg·L <sup>-1</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>/mg·L <sup>-1</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P<br>/mg·L <sup>-1</sup> | DO<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 碱度      | pH          |
|----|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------|---------|-------------|
| 参数 | 200 ~ 500                                              | 0 ~ 10                                                 | 0 ~ 10                                                 | 10                                                      | 5 ~ 8                     | 约 1 500 | 7.80 ~ 8.12 |

1.3 分析项目及检测方法

各项氮素指标的监测方法参考文献[16]. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:纳氏试剂比色法;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N:紫外分光光度法;TN 按下式计算:TN = NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N + NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N + NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N;FA 浓度:参考文献[17]中的计算方法,具体见式(1);pH 值:Mettler Toledo Fivego F2 pH 计;DO:Multi 3620 IDS 溶解氧仪;温度:水银温度计.

$$\rho(\text{FA}) = \frac{17}{14} \times \frac{\rho(\text{NH}_4^+\text{-N}) \times 10^{\text{pH}}}{e^{\frac{6344}{273+t}} + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中, $c(\text{NH}_4^+\text{-N})$ 为污水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的浓度,mg·L<sup>-1</sup>;  $t$  为反应温度,℃.

2 结果与分析

本试验开始前,生物膜 CANON 反应器的温度始终保持在(30 ± 1)℃.试验可主要分为直接低温驯化(1 ~ 15 d)、逐步降温驯化(17 ~ 41 d)、长期低温运行(42 ~ 70 d)这 3 个阶段.首先,直接低温驯化时,将温度维持在约 19℃,反应器的脱氮效果因低温影响急剧恶化后,为恢复反应器内脱氮功能菌



的活性, 7~15 d 时温度恢复至中温条件[(30 ± 1)℃]. 其次, 为实现 ANAMMOX 菌最终适应低温环境的目的, 试验采用逐步降温的驯化方式, 温度首先经 11 d 由 26℃ 左右逐步下降至 20℃ 左右后, 在 27~41 d 期间微幅升高至 24℃ 左右. 逐步降温

的同时, 辅以适当工况的调节, 试验过程中主要的运行工况如图 2 所示. 最后, 温度再次下降至 19℃ 左右, 18 d 后温度又继续下降至 15℃ 左右, 探究低温时 CANON 反应器短程硝化和脱氮性能的稳定性与高效性.

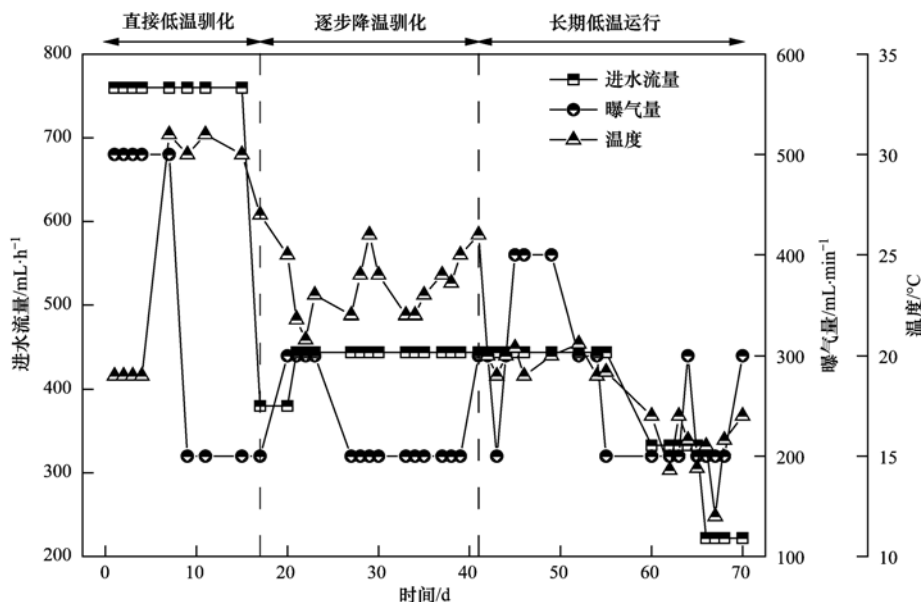


图2 降温过程中生物膜 CANON 反应器进水流量、曝气量与温度的变化

Fig. 2 Variation of the influent inflow, aeration rate and temperature in the biofilm CANON reactor during the temperature reduction process

## 2.1 直接低温驯化阶段

1~4 d, 温度维持在约 19℃, 平均进水负荷为  $2.11 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 降温过程中生物膜 CANON 反应器各氮素指标的变化, 如图 3 所示. 1~4 d,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TN 的最高去除率分别为 28.17%、4.52%, TN 去除负荷最高仅为  $0.14 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 这表明 AOB 和 ANAMMOX 菌均受到了严重的抑制.

此外, 1~4 d 时,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  出现积累现象, 最高达到  $59.81 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 这说明 AOB 受低温的冲击性影响较 ANAMMOX 菌小. 这与 Lotti 等<sup>[18]</sup> 的试验结果一致. 分析其原因可能是, ANAMMOX 菌对温度的敏感性较 AOB 强<sup>[19]</sup>. 刘文如等<sup>[20]</sup> 的研究也发现, 在温度由 20℃ 下降至 10℃ 时, ANAMMOX 污泥的活性下降至原来的 18%, 而短程硝化颗粒污泥的活性只下降至原来的 53%.

为恢复 CANON 反应器内脱氮功能菌的活性, 7~15 d 时温度恢复至试验开始前的水平[(30 ± 1)℃], 同时将 TN 平均进水负荷由  $2.11 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  调低至  $1.17 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 由图 3 可知, 恢复中温条件后,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TN 去除率分别稳定在 80%、60% 以上, TN 去除负荷逐渐稳定在  $1.00 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右, 这说明反应器的脱氮性能转好.  $\delta(\text{NO}_3^- \text{-N})/\delta(\text{TN})$  平均值为 0.116, 接近于

理论值 0.127<sup>[21]</sup>. 表明 CANON 反应器中短程硝化效果较为稳定. 可见, 1~4 d 时的低温冲击并未对反应器造成明显影响.

## 2.2 逐步降温驯化阶段

由 1~4 d 的试验结果可知, 如直接从低温开始驯化生物膜 CANON 污泥, 反应器的脱氮效果较差. 因此, 在 17~41 d 期间, 试验尝试采用逐步降温的驯化方式, 同时配合运行工况的调节, 以使反应器内的脱氮功能菌逐渐适应低温环境. 其中, 17~20 d 时温度下降至 26℃ 左右, 平均进水负荷为  $1.80 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ; 21~23 d 时温度继续下降至 20℃ 左右, 平均进水负荷为  $1.88 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ . 27~41 d, 降温的幅度减小, 温度升高至 24℃ 左右, 平均进水负荷下调至  $1.76 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ .

由图 3 可知, 在逐渐降温的过程中,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  和 TN 去除率均主要呈下降趋势, 23 d 时分别降低至 69.64%、17.02%. 此外,  $\text{NO}_2^- \text{-N}$  在逐渐降温的过程中迅速大量积累, 23 d 时达到最大值  $216.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 说明 ANAMMOX 菌的活性大幅下降, 无法高效地完成脱氮过程. 就  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  而言, 在逐渐降温的过程中,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  的变化呈先上升后下降的趋势, 21 d 时达到峰值  $35.38 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 23 d 时降低至  $9.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 另一方面,  $\delta(\text{NO}_3^- \text{-N})/\delta(\text{TN})$  在逐渐降温的过程中也主要呈下降趋势, 且均小于理论值

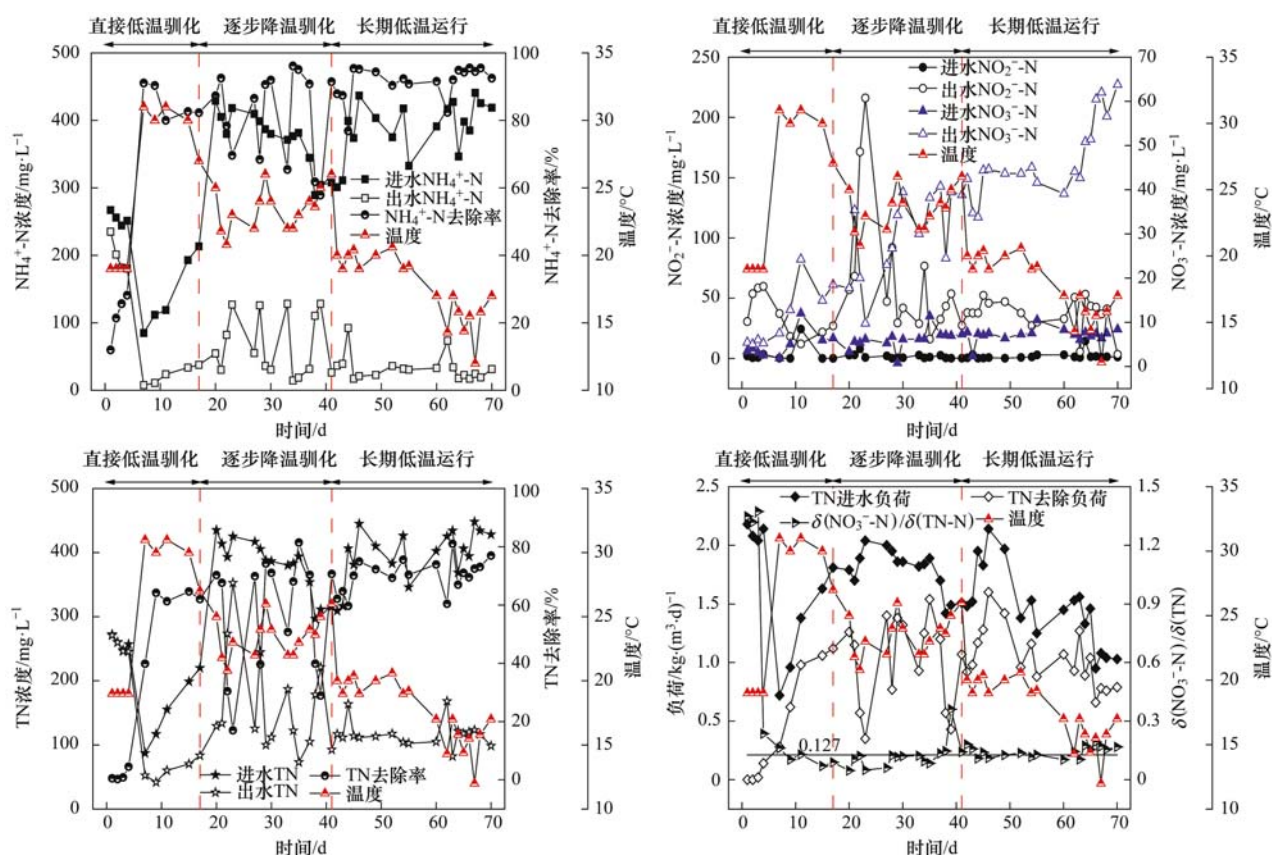


图3 降温过程中生物膜 CANON 反应器内各氮素指标的变化

Fig. 3 Variation of each nitrogen species index in the biofilm CANON reactor during the temperature reduction process

0.127. 可见, 反应器尽管存在脱氮效果不佳的问题, 但其短程硝化性能较稳定, ANAMMOX 菌仍然占据竞争 $\text{NO}_2^-$ -N的优势地位。

温度升高至 $24^\circ\text{C}$ 左右后,  $\text{NH}_4^+$ -N和TN去除率尽管稍有波动, 但总体趋势相较直接低温驯化时有了根本性的好转, 27~41 d期间 $\text{NH}_4^+$ -N和TN平均去除率分别为81.47%、60.46%。此外,  $\text{NO}_2^-$ -N积累量明显减小, 平均值为 $44.47 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由此也可看出, 温度升高后, ANAMMOX 菌的活性有所恢复。  $\text{NO}_3^-$ -N浓度在温度小幅升高后呈波动性变化趋势, 且相较之前有了较大的提升, 平均值为 $33.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。另一方面, 温度升高后,  $\delta(\text{NO}_3^- \text{-N})/\delta(\text{TN})$ 逐渐稳定在0.127以上。由此可见, 减小降温的幅度后, NOB的活性得到增强。

### 2.3 长期低温运行阶段

基于前两个阶段的试验结果, 在长期低温运行阶段, 温度首先在42~59 d期间再次下降至 $19^\circ\text{C}$ 左右, 平均进水负荷为 $1.67 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。60~70 d, 温度继续下降至 $15^\circ\text{C}$ 左右, 平均进水负荷下调至 $1.27 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。

如图3所示, 在长期低温运行阶段,  $\text{NH}_4^+$ -N和TN去除率分别逐渐稳定在90%、70%以上, 甚至当温度在67 d下降至 $12^\circ\text{C}$ 时, TN去除率与去除负

荷仍能分别达到72.52%、 $0.78 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。显然, 温度再次下降至低值时, ANAMMOX 菌仍能高效地完成脱氮过程, 这与直接低温驯化时有着明显的不同。有研究表明, 这种“不同”源于ANAMMOX 菌对低温环境已具备了一定的适应能力, 而非ANAMMOX 菌数量的增多所致。例如, Lauren等<sup>[12]</sup>的研究发现,  $12.5^\circ\text{C}$ 时, ANAMMOX 菌的最小世代时间较 $29^\circ\text{C}$ 时延长了61 d。Reino等<sup>[22]</sup>的试验结果表明, 在没有排泥的前提下, 温度由 $22^\circ\text{C}$ 经过420 d逐步下降最后稳定在 $11^\circ\text{C}$ 后, 厌氧氨氧化UASB反应器内ANAMMOX 菌种属的总相对丰度逐渐下降, 而在分别处理低浓度合成废水及投加 $\text{NO}_2^-$ -N后的实际市政污水时, 反应器均能取得较好的脱氮效果。

此外, 相较前两个阶段而言,  $\text{NO}_2^-$ -N积累量在长期低温运行阶段有所降低, 平均浓度为 $36.88 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。就 $\text{NO}_3^-$ -N而言, 长期低温运行阶段的 $\text{NO}_3^-$ -N浓度呈快速升高趋势, 最高达 $63.79 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。可见, 在长期低温运行阶段, 除CANON反应产生少量 $\text{NO}_3^-$ -N<sup>[23]</sup>外, 大部分 $\text{NO}_3^-$ -N是由NOB利用 $\text{NO}_2^-$ -N转化而来的。

另一方面, 42~55 d时 $\delta(\text{NO}_3^- \text{-N})/\delta(\text{TN})$ 的平均值为0.126, 非常接近于理论值0.127。而60~



70 d 时  $\delta(\text{NO}_3^- - \text{N})/\delta(\text{TN})$  处于较高水平, 平均值为 0.152. 这与 NOB 的活性在长期低温运行阶段逐渐增强相符. 说明 CANON 反应器中短程硝化有持续恶化的趋势.

### 3 讨论

对比分析直接低温驯化、逐步降温驯化、长期低温运行 3 个阶段的试验结果可知: 第一, 温度直接由  $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$  降低至  $19^\circ\text{C}$  时, 反应器内脱氮功能菌受到了严重的抑制,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  出现积累; 第二, 在逐步降温的过程中 ( $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 26^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 22^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ), 尽管  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  出现大量积累, 但 CANON 反应器的短程硝化性能较稳定; 第三, 将降温的幅度减小后 ( $24 \pm 2^\circ\text{C}$ ), 反应器的脱氮效果相较直接低温驯化时有了根本性的好转,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累量明显减小; 第四, 温度继续下降后 (约  $19^\circ\text{C} \rightarrow$  约  $15^\circ\text{C}$ ),  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累量进一步减小, 反应器取得了本次试验中最好的脱氮效果, 而短程硝化面临恶化的风险. 由此可见, 驯化生物膜 CANON 污泥的温度条件直接由中温转变为低温时, 不利于反应器在低温环境下取得较好的脱氮效果. 而通过逐步降温的驯化方式, 每次较大幅度地降温, 同时配合运行工况的调节, 可实现 ANAMMOX 菌逐渐适应低温环境的目的.

值得注意的是, ANAMMOX 菌的部分种属本身就具备在低温环境下生长的潜力. 有研究表明<sup>[24]</sup>, 北极海洋沉积污泥中, ANAMMOX 菌的最适温度低于  $15^\circ\text{C}$ , 甚至在  $-1.3^\circ\text{C}$  的温度条件下仍保持着一一定的活性. Hendrickx 等<sup>[24]</sup> 直接在  $10^\circ\text{C}$  环境下培养 ANAMMOX 污泥, 反应器内主要种属为 *Candidatus Brocadia fulgida*. 另外, 有研究者发现, 驯化的温度条件由中温转变为低温时, ANAMMOX 菌的主要种属发生了变化. 例如, De 等<sup>[25]</sup> 的研究表明, 进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度为  $25.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 持续维持温度为  $30^\circ\text{C}$  的 ANAMMOX 反应器内, 主要种属始终为 *Candidatus Brocadia*, 而温度经 293 d 由  $30^\circ\text{C}$  逐渐下降至  $10^\circ\text{C}$  的 ANAMMOX 反应器, 主要种属从 *Candidatus Brocadia* 转移至 *Candidatus Kuenenia*. Yang 等<sup>[26, 27]</sup> 的研究发现, 进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度为  $44.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右, 当 CANON 反应器的温度条件由  $(32 \pm 3)^\circ\text{C}$  转变为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 120 d 后, ANAMMOX 菌的含量由  $6.6 \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$  下降至  $3.2 \times 10^{11} \text{ copies} \cdot \text{L}^{-1}$ , 主要种属也从 *Candidatus Brocadia* 转移至 *Candidatus Kuenenia*. 由此可见, ANAMMOX 菌的部分种属对低温环境具有一定的倾向性, 但这仍需进一步的研究.

此外, 在整个驯化的过程中, 除 7 ~ 15 d 时温度恢复至中温条件 ( $30 \pm 1^\circ\text{C}$ ) 外, 低温条件下  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  的积累量随 ANAMMOX 菌活性的高低而波动变化. 文献也报道了类似情况. 例如, Persson 等<sup>[28]</sup> 的研究结果表明,  $16^\circ\text{C}$  和  $13^\circ\text{C}$  时, 移动床式生物膜 CANON 反应器的 TN 去除负荷分别为  $0.81 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  和  $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 而  $10^\circ\text{C}$  时 TN 去除负荷不稳定, 平均值仅为  $0.17 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累峰值为  $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 李祥等<sup>[29]</sup> 的试验结果表明, 温度降低至  $15^\circ\text{C}$  以下时, 厌氧氨氧化反应器的 TN 去除负荷最低降至  $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ , 并伴随  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  大量积累,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  积累峰值为  $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 宋成康等<sup>[30]</sup> 的研究发现, 温度为  $(26 \pm 7)^\circ\text{C}$  时, 厌氧氨氧化反应器的 TN 去除负荷稳定在  $0.40 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$  左右, 温度降低至  $15^\circ\text{C}$  时出现了  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  大量积累, 最高达到  $107.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 温度继续下降至  $10^\circ\text{C}$  时反应器面临崩溃的风险. 可见, 在 ANAMMOX 菌适应低温环境的过程中,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  易发生积累, 积累的高浓度  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  又将进一步抑制 ANAMMOX 菌的活性, 从而延长 ANAMMOX 菌适应低温环境的过程.

就  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  而言, 整个试验过程中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度总体上一直呈升高趋势, 尤其是在长期低温运行阶段,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的升高明显较前 2 个阶段要快. 其他研究者也发现了类似情况. 例如, Liu 等<sup>[31]</sup> 的研究发现, 相较  $30^\circ\text{C}$  条件下培养的 CANON 污泥而言,  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  条件下培养的 CANON 污泥中, NOB 两个主要种属的含量均有所升高. Gonzalez-Martinez 等<sup>[32]</sup> 也注意到  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  条件下培养 CANON 污泥时, NOB 的相对丰度会增大. Liu 等<sup>[33]</sup> 在长期处于  $(23 \pm 3)^\circ\text{C}$  的 CANON 反应器内检测到了 *Nitrobacter*, 而在长期处于  $(30 \pm 2)^\circ\text{C}$  的 CANON 反应器内并未发现. 可见, 低温环境有利于 CANON 反应器中 NOB 的生长代谢活动.

另一方面, 在逐步降温阶段和长期低温运行阶段中,  $\delta(\text{NO}_3^- - \text{N})/\delta(\text{TN})$  均出现了高于理论值 0.127 的情况, 表明 CANON 反应器中短程硝化有持续恶化的趋势. 由此可见, 降温过程中驯化生物膜 CANON 污泥时, 应优先考虑短程硝化控制.

降温过程中生物膜 CANON 反应器内 FA 浓度及 DO 的变化, 如图 4 所示. 可以看出, 在直接低温驯化时, 由于 AOB 受到了严重的抑制, 大量的  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  未得到去除, 从而形成了高浓度的 FA, 平均值为  $15.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在逐步降温驯化阶段, FA 浓度随 AOB 活性的增强而减小. 例如 21 d 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率达到 95.23%, FA 浓度仅为 0.23

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 而在 39 d 时,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率仅为 57.85%, FA 浓度高达  $9.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 在长期低温运行阶段,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率稳定在 90% 以上, FA 浓度处于较低水平, 平均值仅为  $0.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 就 FA 对 NOB 抑制的浓度范围而言, Anthonisen 等<sup>[17]</sup> 的结论最为经典, 其研究表明抑制 NOB 的 FA 浓度范围为  $0.1 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 因此, 引起降温过程中 NOB 活性逐渐增强的主要原因是, 脱氮功能菌逐渐适应低温环境后,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  被大量消耗, 加之低温影响, 致使 FA 浓度下降, NOB 受 FA 的抑制得到有效缓解. 由此可见, 低温环境下, CANON 反应器实现较好脱氮性能的同时, 应维持一定浓度的剩余  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , 以抑制 NOB 的活性.

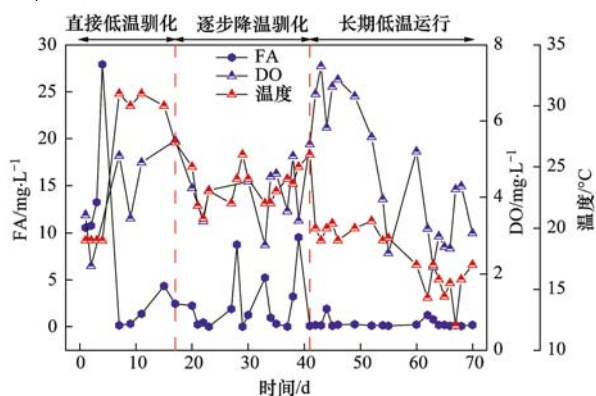


图4 降温过程中生物膜 CANON 反应器内 FA 浓度及 DO 的变化

Fig. 4 Variation of the FA concentrations and DO in the biofilm CANON reactor during the temperature reduction process

除 FA 外, NOB 活性的增强还与 DO 有关. 例如, 付昆明等<sup>[34]</sup> 在探讨主流厌氧氨氧化工艺的优化时发现,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度低于  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 如仍然维持  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度较高时的 DO 水平, 导致 NOB 活性得到增强的同时, 还将部分抑制生物膜内 ANAMMOX 菌的活性. 由图 4 可知, 整个试验过程中, DO 处于较高水平. 其中, 直接低温驯化和逐步降温驯化两个阶段的 DO 基本保持在  $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  以上, 长期低温运行阶段的 DO 稳定在  $3.00 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  左右. 而有研究表明<sup>[35]</sup>, AOB、NOB 氧的半饱和常数分别为  $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $1.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ . 因此, 低温环境下, 除维持一定浓度的剩余  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  外, 还应严格控制 DO 浓度以抑制 NOB 的活性.

#### 4 结论

(1) 驯化生物膜 CANON 污泥的温度条件直接由中温转变为低温 ( $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C} \rightarrow 19^\circ\text{C}$ ) 时, 不利于反应器在低温环境下取得较好的脱氮效果. 而通过逐步降温的驯化方式, 同时配合运行工况的调节,

可实现 CANON 反应器中脱氮功能菌逐渐适应低温环境的目的.

(2) 温度经 25 d 逐步降低至  $19^\circ\text{C}$  左右, 18 d 后又继续降至  $15^\circ\text{C}$  左右,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  和 TN 去除率均能分别长期稳定在 90%、70% 以上, 甚至当温度下降至  $12^\circ\text{C}$  时, TN 去除率与去除负荷仍能分别达到 72.52%、 $0.78 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ .

(3) 降温过程中驯化生物膜 CANON 污泥时, 应优先考虑短程硝化控制.

#### 参考文献:

- [1] Ahn Y H, Choi H C. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(9): 1945-1950.
- [2] 郝晓地, 程慧芹, 胡沅胜. 碳中和运行的国际先驱奥地利 strass 污水厂案例剖析 [J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(22): 1-5.  
Hao X D, Cheng H Q, Hu Y S. International pioneer of carbon-neutral operation of wastewater treatment: A case study at strass in Austria [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, **30**(22): 1-5.
- [3] 郝晓地, Van Loosdrecht M. 荷兰鹿特丹 DOKHAVEN 污水处理厂介绍 [J]. *给水排水*, 2003, **29**(10): 19-25.  
Hao X D, Van Loosdrecht M. DOKHAVEN wastewater treatment plant in rotterdam [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2003, **29**(10): 19-25.
- [4] Cao Y S, Hong K B, Zhou Y, 等. 新加坡最大回用水处理厂污水短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺 [J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(10): 1441-1454.  
Cao Y S, Hong K B, Zhou Y, *et al.* Mainstream partial nitritation/anammox nitrogen removal process in the largest water reclamation plant in Singapore [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(10): 1441-1454.
- [5] 陈珺, 王洪臣, Wett B. 城市污水处理工艺迈向主流厌氧氨氧化的挑战与展望 [J]. *给水排水*, 2015, **51**(10): 29-34.  
Chen J, Wang H C, Wett B. Challenge and aspect of municipal wastewater treatment going for mainstream deammonification [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, **51**(10): 29-34.
- [6] Wang Z, Peng Y Z, Lei M, *et al.* Continuous-flow combined process of nitritation and ANAMMOX for treatment of landfill leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **214**: 514-519.
- [7] 左早荣, 付昆明, 仇付国, 等. CANON 工艺的研究现状及面临困难分析 [J]. *水处理技术*, 2013, **39**(9): 15-19.  
Zuo Z R, Fu K M, Qiu F G, *et al.* Analysis of the research status and difficulties of CANON process [J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, **39**(9): 15-19.
- [8] Grady Jr C P R, Daigger G T, Lim H C. 废水生物处理 [M]. (第二版). 张锡辉, 刘勇弟, 译. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The sharon process: An innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Science and Technology*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [10] De Almeida Fernandes L, Pereira A D, Leal C D, *et al.* Effect of temperature on microbial diversity and nitrogen removal performance of an anammox reactor treating anaerobically pretreated municipal wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **258**: 208-219.



- [11] Tomaszewski M, Cema G, Ziemińska-Buczyńska A. Influence of temperature and pH on the anammox process: A review and meta-analysis[J]. *Chemosphere*, 2017, **182**: 203-214.
- [12] Lauren M, Weissbrodt D G, Szivák I, *et al.* Activity and growth of anammox biomass on aerobically pre-treated municipal wastewater[J]. *Water Research*, 2015, **80**: 325-336.
- [13] 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.
- [14] 付昆明, 周厚田, 苏雪莹, 等. 生物膜短程硝化系统的恢复及其转化为 CANON 工艺的过程[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1536-1543.  
Fu K M, Zhou H T, Su X Y, *et al.* Short-cut nitrification recovery and its transformation into CANON process in a biofilm reactor[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1536-1543.
- [15] Van De Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. *Microbiology*, 1996, **142**(8): 2187-2196.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-415.
- [17] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B, *et al.* Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. *Journal-Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(5): 835-852.
- [18] Loti T, Kleerebezem R, Van Loosdrecht M C M. Effect of temperature change on anammox activity[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2015, **112**(1): 98-103.
- [19] 张杰, 付昆明, 曹相生, 等. 序批式生物膜 CANON 工艺的运行与温度的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(8): 850-855.  
Zhang J, Fu K M, Cao X S, *et al.* Performance of CANON process in a sequencing batch biofilm reactor and influence of temperature[J]. *China Environmental Science*, 2009, **29**(8): 850-855.
- [20] 刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 等. 主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效脱氮过程[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5580-5586.  
Liu W R, Yang D H, Shen Y L, *et al.* High-rate nitrogen removal in a two-stage partial nitrification-ANAMMOX process at mainstream conditions[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5580-5586.
- [21] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(10): 3507-3512.  
Fu K M, Zhang J, Cao X S, *et al.* Performance stability of CANON reactor and temperature impact[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(10): 3507-3512.
- [22] Reino C, Suárez-Ojeda M E, Pérez J, *et al.* Stable long-term operation of an upflow anammox sludge bed reactor at mainstream conditions[J]. *Water Research*, 2017, **128**: 331-340.
- [23] Slikers A O, Derwort N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor[J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [24] Hendrickx T L, Kampman C, Zeeman G, *et al.* High specific activity for anammox bacteria enriched from activated sludge at 10°C[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **163**: 214-221.
- [25] De Cocker P, Bessiere Y, Hernandez-Raquet G, *et al.* Enrichment and adaptation yield high anammox conversion rates under low temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2017, **250**: 505-512.
- [26] Yang Y D, Zhang L, Cheng J, *et al.* Microbial community evolution in partial nitrification/anammox process: From sidestream to mainstream[J]. *Bioresource Technology*, 2018, **251**: 327-333.
- [27] Yang Y D, Zhang L, Han X Y, *et al.* Determine the operational boundary of a pilot-scale single-stage partial nitrification/anammox system with granular sludge[J]. *Water Science & Technology*, 2016, **73**(9): 2085-2092.
- [28] Persson F, Sultana R, Suarez M, *et al.* Structure and composition of biofilm communities in a moving bed biofilm reactor for nitrification-anammox at low temperatures[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **154**: 267-273.
- [29] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1288-1292.  
Li X, Huang Y, Zheng Y H, *et al.* Effect of temperature on stability of nitrogen removal in the ANAMMOX reactor[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1288-1292.
- [30] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2006-2013.  
Song C K, Wang Y Y, Han H C, *et al.* Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- [31] Liu T, Li D, Zhang J, *et al.* Effect of temperature on functional bacterial abundance and community structure in CANON process[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 306-313.
- [32] Gonzalez-Martinez A, Rodriguez-Sanchez A, Garcia-Ruiz M J, *et al.* Performance and bacterial community dynamics of a CANON bioreactor acclimated from high to low operational temperatures[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **287**: 557-567.
- [33] Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Distribution and genetic diversity of functional microorganisms in different CANON reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 574-580.
- [34] 付昆明, 付巢, 李慧, 等. 主流厌氧氨氧化工艺的运行优化及其微生物的群落变迁[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5596-5604.  
Fu K M, Fu C, Li H, *et al.* Optimization of mainstream anaerobic ammonia oxidation process and its changes of microbial community[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5596-5604.
- [35] Wiesmann U. Biological nitrogen removal from wastewater[J]. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 1994, **51**: 114-154.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                          |                                                              |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------|
| Contribution Assessment of Meteorology Conditions and Emission Change for Air Quality Improvement in Beijing During 2014-2017 .....                                                      | YIN Xiao-mei, LI Zi-ming, XIONG Ya-jun, <i>et al.</i>        | (1011) |
| Using Multiple Linear Regression Method to Evaluate the Impact of Meteorological Conditions and Control Measures on Air Quality in Beijing During APEC 2014 .....                        | LI Ying-ruo, WANG Jun-xia, HAN Ting-ting, <i>et al.</i>      | (1024) |
| Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Suburban Area of Beijing-Tianjin-Hebei Region in Autumn and Winter .....                                                                    | WANG Tong, HUA Yang, XU Qing-cheng, <i>et al.</i>            | (1035) |
| Fine Particulate Matter Source Profile of Typical Industries in Sichuan Province .....                                                                                                   | FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, XIONG Wen-peng, <i>et al.</i> | (1043) |
| Source Apportionment and Pollution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> During the Two Heavy Pollution Episodes in the Winter of 2016 in a Typical Logistics City .....                  | ZHAO Xue-yan, YANG Wen, WANG Jing, <i>et al.</i>             | (1052) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Heating and Non-heating Periods in Shenyang .....                                                             | ZHANG Xian, TIAN Sha-sha, LIU Ying-ying, <i>et al.</i>       | (1062) |
| Interannual Variation of Metal Elements and Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> During Wintertime in Xinxiang and Their Source Apportionment .....                                   | YAN Guang-xuan, LEI Hao-jie, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i>   | (1071) |
| Pollution Characteristics and Source Apportionment of Ambient PM <sub>2.5</sub> During Four Seasons in Yantai City .....                                                                 | LIU Tong, WANG Xiao-jun, CHEN Qian, <i>et al.</i>            | (1082) |
| Day-night Characteristics of Humic-like Substances in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Changzhou .....                                                                                 | GU Yuan, LI Qing, HUANG Wen-qian, <i>et al.</i>              | (1091) |
| Pollution Characteristics and Occupational Exposure Risk of Heavy Metals in Indoor and Outdoor Ambient Particles at a Scaled Electronic Waste Dismantling Plant, Northwest China .....   | CAO Hong-mei, ZHAO Liu-yuan, MU Xi, <i>et al.</i>            | (1101) |
| Analysis of a Pollution Process in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Satellite and Surface Observations .....                                                                    | QIU Yun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i>               | (1111) |
| Spatial-temporal Variation of Ozone Concentration and Its Driving Factors in China .....                                                                                                 | HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>     | (1120) |
| Ozone Spatial-temporal Distribution and Trend over China Since 2013: Insight from Satellite and Surface Observation .....                                                                | ZHANG Qian-qian, ZHANG Xing-ying                             | (1132) |
| Characteristics of Ozone Pollution Distribution and Source Apportionment in Zhoushan .....                                                                                               | WANG Qiao-li, DONG Min-li, LI Su-jing, <i>et al.</i>         | (1143) |
| Establishment of VOCs Emissions Factor and Emissions Inventory from Using of Architectural Coatings in China .....                                                                       | GAO Mei-ping, SHAO Xia, NIE Lei, <i>et al.</i>               | (1152) |
| Heterogeneous Oxidation of Secondary Organic Tracers of Isoprene and Toluene by Ozone .....                                                                                              | HUANG Ya-juan, CAO Gang, ZHU Rong-shu, <i>et al.</i>         | (1163) |
| Inventory and Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emission from Agriculture and Animal Husbandry in Lanzhou City .....                                                                | LI Shi-xue, GUO Wen-kai, HE Xin, <i>et al.</i>               | (1172) |
| Analysis of Stable Hydrogen and Oxygen Isotope Characteristics and Vapor Sources of Event-based Precipitation in Chengdu .....                                                           | HU Yue, LIU Guo-dong, MENG Yu-chuan, <i>et al.</i>           | (1179) |
| Diffusive CO <sub>2</sub> Flux Across the Water-air Interface of Reclaimed Shrimp Ponds in the Minjiang River Estuary Based on the TBL Model .....                                       | ZHANG Yi-fei, YANG Ping, ZHAO Guang-hui, <i>et al.</i>       | (1188) |
| Distribution and Seasonal Variations of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in the Bohai Sea and the North Yellow Sea .....                                                     | LIU Zhao-bing, LIANG Wen-jian, QIN Li-ping, <i>et al.</i>    | (1198) |
| Sources, Characteristics and Transformation Dynamics of Fluorescent Dissolved Organic Matter in the Silin Reservoir .....                                                                | LAO Xin-yu, YUAN Jie, LIU Yu, <i>et al.</i>                  | (1209) |
| Microplastic Pollution of the Beaches in Xiamen Bay, China .....                                                                                                                         | LIU Qi-ming, LIANG Hai-tao, XI Gui-li, <i>et al.</i>         | (1217) |
| Biogeochemical Characteristics in Shengli Site of Lijiang River Under the High Resolution Monitoring .....                                                                               | WANG Qi-gang, XIAO Qiong, ZHAO Hai-juan, <i>et al.</i>       | (1222) |
| Hydrochemical Characteristics and Possible Controls of Groundwater in the Xialatuo Basin Section of the Xianshui River .....                                                             | HE Jin, ZHANG You-kuan, ZHAO Yu-qing, <i>et al.</i>          | (1236) |
| Pollution Characteristics of OPEs in the Surface Water and Sediment of the Jinjiang River in Chengdu City .....                                                                          | WU Di, YIN Hong-ling, LI Shi-ping, <i>et al.</i>             | (1245) |
| Community Structure and Predictive Functional Analysis of Surface Water Bacterioplankton in the Danjiangkou Reservoir .....                                                              | ZHANG Fei, TIAN Wei, SUN Feng, <i>et al.</i>                 | (1252) |
| Influence of Cyanobacterial Blooms on Denitrification Rate in Shallow Lake Taihu, China .....                                                                                            | LIU Zhi-ying, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i>                 | (1261) |
| Assessment of Ecosystem Health of an Urban River Based on the Microbe Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....                                                                            | SU Yao, XU Yu-xin, AN Wen-hao, <i>et al.</i>                 | (1270) |
| Influences of Biochar Application on Root Aerenchyma and Radial Oxygen Loss of <i>Acorus calamus</i> in Relation to Subsurface Flow in a Constructed Wetland .....                       | HUANG Lei, LIANG Yin-kun, LIANG Yan, <i>et al.</i>           | (1280) |
| Pollution Load Characteristics of Runoff from Urban Roofs of Different Materials .....                                                                                                   | HE Hu-bin, CHEN Cheng, LIN Yu-qing, <i>et al.</i>            | (1287) |
| Preparation of BiOCl-(NH <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> PW <sub>12</sub> O <sub>40</sub> Photocatalyst and a Mechanism for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants .....           | ZHANG Wen-hai, JI Qing-hua, LAN Hua-chun, <i>et al.</i>      | (1295) |
| High Efficiency Removal of 1,2-Dichloroethane from Groundwater by Microscale Zero-valent Iron Combined with Biological Carbon Source .....                                               | WU Nai-jin, SONG Yun, WEI Wen-xia, <i>et al.</i>             | (1302) |
| Removal of Lead Ions from Water by Struvite Natural Zeolite Composite .....                                                                                                              | DEND Man-jun, WANG Xue-jiang, CHENG Xue-jun, <i>et al.</i>   | (1310) |
| Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution By Ca/Mg-Loaded Biogas Residue Biochar .....                                                                                | YI Man, LI Ting-ting, LI Hai-hong, <i>et al.</i>             | (1318) |
| Preparation of Two Kinds of Biochar and the Factors Influencing Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....                                                                         | CHENG Yang, SHEN Qi-bin, LIU Zi-dan, <i>et al.</i>           | (1328) |
| Effect of Zirconium-Modified Zeolite Addition on Migration and Transformation of Phosphorus in River Sediments Under Static and Hydrodynamic Disturbance Conditions .....                | YU Yang, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>           | (1337) |
| Removal Efficiencies and Mechanism Research on Four Sulfonamides and Their Acetyl Metabolites in a Wastewater Treatment Plant .....                                                      | WANG Da-peng, ZHANG Xian, YAN Chang-zhou                     | (1347) |
| Assessing Performance of Pollutant Removal from Municipal Wastewater by Physical and Chemical Methods Based on Membranes .....                                                           | XU Ting, LI Yong, ZHU Yi-jia, <i>et al.</i>                  | (1353) |
| Effect of Influent Ammonia Concentration on a Biological Phosphorus Removal Granules System .....                                                                                        | LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>          | (1360) |
| Start-up and Performance Recovery of Granular Sludge for Phosphorus Removal and Nitrification .....                                                                                      | LI Hai-ling, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i>               | (1367) |
| Realization of Short-cut Nitrification in a CAST Process at High Temperature and Its Phosphorus Removal Performance .....                                                                | MA Juan, YANG Rui-chun, YU Xiao-jun, <i>et al.</i>           | (1375) |
| Nitrogen and Phosphorus Removal from Low C/N Municipal Wastewater Treated by a SPNDPR System with Different Aeration and Aerobic Times .....                                             | YUAN Meng-fei, YU De-shuang, GONG Xiu-zhen, <i>et al.</i>    | (1382) |
| ABR Decarbonization-Nitrosation Coupled with ANAMMOX to Treat Municipal Wastewater .....                                                                                                 | LI Tian, CAO Jia-wei, XIE Feng-lian, <i>et al.</i>           | (1390) |
| Start-up Performance and Sludge Characteristics of Single-stage Autotrophic Nitrogen Removal System with Granular Sludge at Low Ammonia Nitrogen Concentration at Room Temperature ..... | XIE Lu-lin, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i>      | (1396) |
| ANAMMOX Reactor with Two Kinds of Inoculated Sludge: Start-up and Kinetics Characteristics .....                                                                                         | REN Jun-yi, CHEN Lin-yi, LI Hui-chun, <i>et al.</i>          | (1405) |
| Operation Characteristics of the Biofilm CANON Reactor During the Temperature Reduction Process .....                                                                                    | FU Kun-ming, LIAO Min-hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i>      | (1412) |
| Nitrogen Removal Characteristics and Analysis of Microbial Community Structure in an IEM-UF Simultaneous Separation and Denitrification System .....                                     | LIU Zi-qi, ZHANG Yan, MA Xiang-shan, <i>et al.</i>           | (1419) |
| Effect of Temperature on the Activity Kinetics of <i>Nitrobacter</i> .....                                                                                                               | YU Xue, SUN Hong-wei, LI Wei-wei, <i>et al.</i>              | (1426) |
| Enhancement for Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge Based on Microwave Pretreatment Combined with Zero Valent Iron .....                                                       | NIU Yu-tong, LIU Ji-bao, MA Shuang, <i>et al.</i>            | (1431) |
| Effects of Environmental Factors on Tetracyclines and Macrolides Resistance Genes in Cattle Manure Composting Systems .....                                                              | PENG Jing, WANG Ke, GU Yue, <i>et al.</i>                    | (1439) |
| Effect of Environmental Factors on Variation Characteristics of Soil Microbial Respiration and Its Temperature Sensitivity .....                                                         | ZHANG Yan-jun, GUO Sheng-li                                  | (1446) |
| Response of Soil Respiration and Its Components to Simulated Acid Rain in a Typical Forest Stand in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                | LI Yi-fan, WANG Yu-jie, WANG Bin, <i>et al.</i>              | (1457) |
| Effects of Fertilization on the Nitrogen Residual Amounts and Leaching from Citrus Orchard Soil in the Three Gorges Reservoir Area .....                                                 | WANG Tian, HUANG Zhi-lin, ZENG Li-xiong, <i>et al.</i>       | (1468) |
| Microbial Carbon Source Metabolic Profile in Rice Rhizosphere and Non-rhizosphere Soils with Different Long-term Fertilization Management .....                                          | NING Zhao, CHENG Ai-wu, TANG Hai-ming, <i>et al.</i>         | (1475) |
| Characterization of Soil Organic Carbon Mineralization Under Different Gradient Carbon Loading in Paddy Soil .....                                                                       | TONG Yao-yao, WANG Ji-fei, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i>        | (1483) |
| Soil Organic Carbon Distribution and Components in Different Plant Communities Along a Water Table Gradient in the Huixian Karst Wetland in Guilin .....                                 | XU Guang-ping, LI Yan-qiong, SHEN Yu-yi, <i>et al.</i>       | (1491) |
| Distribution of Organic Carbon in Soil Aggregates from Four Kinds of Forest Vegetation on Jinyun Mountain .....                                                                          | WANG Fu-hua, LÜ Sheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>             | (1504) |
| Review of Research on the Impacts of Atmospheric Pollution on the Health of Residents .....                                                                                              | QIN Yao-chen, XIE Zhi-xiang, LI Yang                         | (1512) |