

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年) 总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化

岳秀, 刘竹寒, 于广平*, 吉世明, 唐嘉丽

(广州中国科学院沈阳自动化研究所分所, 广州 511458)

摘要: 单级自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 存在启动周期长、运行易失稳的问题. 本文研究了在淹没式生物滤池 (submerged biological aerated filter, SBAF) 体系内, 采用前期更替曝气的满负荷启动方法, 通过严格控制体系中的溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 和温度 (DO 和温度分别控制在 $0.10 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $31^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的范围内), 水力停留时间 (hydraulic retention time, HRT) 控制为 24 h, 于 51 d 成功实现 CANON 的快速启动, 并稳定运行 278 d. 该体系氨氮去除率 (ammonium removal rate, ARR) 最大值为 98.9%, 其平均值为 95.1%; 总氮去除率 (total nitrogen removal rate, TNR) 最大值为 85.9%, 其平均值为 75.1%; 体系存在少量 NO_3^- -N 累积. 采用 16S rDNA 宏基因组高通量测序技术分析该体系中污泥微生物的演化特征, 发现起亚硝化作用的富集微生物主要为门 Proteobacteria, 起厌氧氨氧化作用的富集微生物主要为门 Planctomycete 属 *Candidatus Brocadia*, 其相对丰度随着驯化时间延长而逐渐增大, 两者协同作用共同实现 CANON 中的总氮去除.

关键词: CANON; SBAF; 演化特性; AOB; AnAOB

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5192-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704255

Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms

YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping*, JI Shi-ming, TANG Jia-li

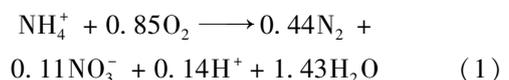
(Shenyang Institute of Automation in Guangzhou, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 511458, China)

Abstract: The CANON process has the disadvantages of long start-up periods and unstable operation. In the SBAF system, under strictly controlled conditions of dissolved oxygen (DO) and temperature, a CANON process is started up in 51 days and is operated stably for 278 days using a new method of independent research and development. The results show that the maximum and average ARR are 98.9% and 95.1%, respectively. The maximum and average TNR are 85.9% and 75.1%, respectively. Furthermore, a small quantity of nitrate nitrogen exists in this system. The microbial structure features of the sludge are analyzed by 16S rDNA macro high-throughput genome sequencing. It is verified that Proteobacteria is the main microorganism in the AOB, and Planctomycete *Candidatus Brocadia* is the main microorganism in the AnAOB. Both of them collaborate on total nitrogen removal in the CANON process.

Key words: CANON; SBAF; evolution properties; AOB; AnAOB

单级自养脱氮是一种基于亚硝酸盐氮的全程自养脱氮工艺, 其理论基础是在一体化反应器体系内同时实现半量短程硝化 (也称氨氧化) 与厌氧氨氧化反应 (anaerobic ammonia oxidation, ANAMMOX)^[1]. 如图 1 所示, 从微生物生长方式来说, 实现 CANON 工艺的具体途径为: 在生物膜表面或颗粒污泥表面, 处于低溶解氧环境, 部分氨氮 (ammonia nitrogen, NH_4^+ -N) 在好氧氨氧化菌 (aerobic ammonia oxidation bacteria, AOB) 的作用下被氧化成亚硝酸盐氮 (nitrite nitrogen, NO_2^- -N); 而在生物膜内部或颗粒污泥内部, 处于厌氧环境, 产生的 NO_2^- -N 和剩余 NH_4^+ -N 在厌氧氨氧化菌 (anaerobic ammonium oxidation bacteria, AnAOB) 的作用下反应生成氮气 (nitrogen, N_2), 并产生很少量的硝酸盐氮 (nitrate nitrogen, NO_3^- -N), 从而实

现 NH_4^+ -N 从废水中的去除^[2,3]. 该工艺的总反应方程式如式 (1) 所示^[4], 由该式可知, CANON 工艺理论总氮 (total nitrogen, TN) 最大去除率为 89%.



由于该工艺存在启动周期较长^[5]、运行易失稳的问题^[6,7], 因此前人的工作内容主要针对反应器类型^[8]、工艺启动方式^[9~11]和工艺参数优化方面^[12~14], 通过构建功能微生物生长的适宜环境,

收稿日期: 2017-04-26; 修订日期: 2017-06-19

基金项目: 广东省科技计划项目 (2016B090918036); 广州市科技计划项目 (201510010199)

作者简介: 岳秀 (1982~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为水治理技术, E-mail: yuexiu@gz.sia.cn

* 通信作者, E-mail: ygping@sia.cn

使其快速富集成优势微生物并保持良好的活性, 最终实现工艺的快速启动和稳定的脱氮性能. 本实验采用与以往不同的工艺启动方法, 在淹没式生物滤

池反应器内, 采用前期更替曝气的满负荷启动方法, 通过严格控制体系中的温度和 DO, 实现 CANON 的快速启动与长时间稳定运行.

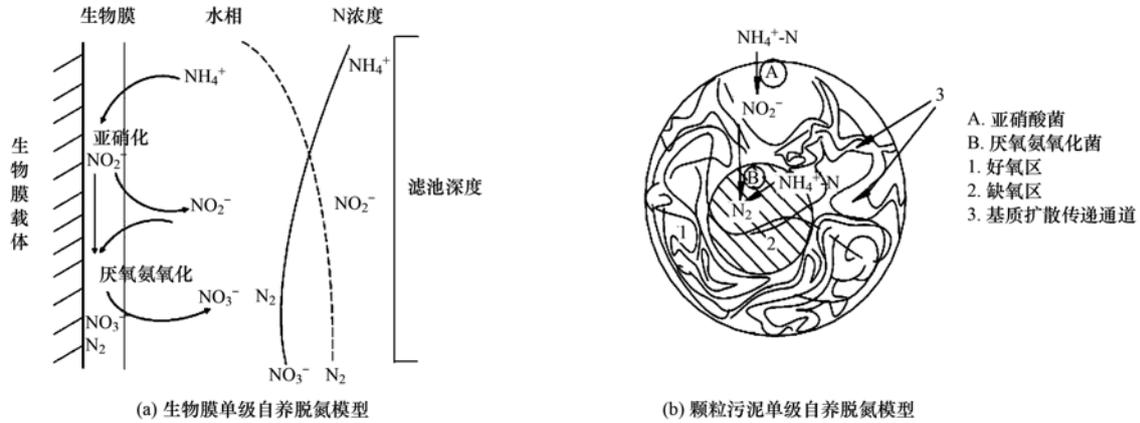


图 1 CANON 工艺模型

Fig. 1 Different models for the CANON process

研究 CANON 微生物种群演化特性, 对深入了解 CANON 快速启动和稳定运行非常关键. 实验采用 16S rDNA 宏基因组高通量测序技术对该体系微生物群落结构特征进行定性定量分析, 掌握接种期、启动期和运行期不同时期该体系微生物的变化特征, 这对于指导 CANON 工艺的快速启动和稳定运行提供了客观的科学依据, 具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 2 所示, 圆柱形反应器主体采用有机玻璃制作, 其内径为 11.0 cm, 高度 38.0 cm,

总容积 3.6 L, 有效容积 3.0 L. 反应器内部悬挂组合填料供微生物附着生长, 外部包裹 2.5 cm 厚的水浴夹层用于保温. 实验所用组合填料材质为醛化纤维, 单位质量为 $3.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 比表面积为 $265 \text{ m}^2\cdot\text{m}^{-3}$, 单个填料由纤维束、塑料环片、套管、中心绳组成, 见图 2(b). 其结构骨架是扣压的双圈大塑料环, 并将醛化纤维压在塑料环的环圈上, 纤维束在中间塑料环片的支撑下均匀分布, 避免了纤维束中心结团的现象; 内圈是雪花状塑料枝条, 既能挂膜, 又能有效切割气泡, 提高氧的转移速率和利用率, 使水气生物膜得到充分交换, 起到良好的布水、布气作用. 每个反应器内悬挂一串填料, 每串由 6 个单个填料组成.

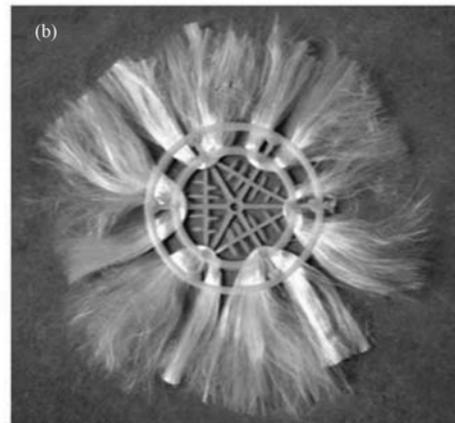
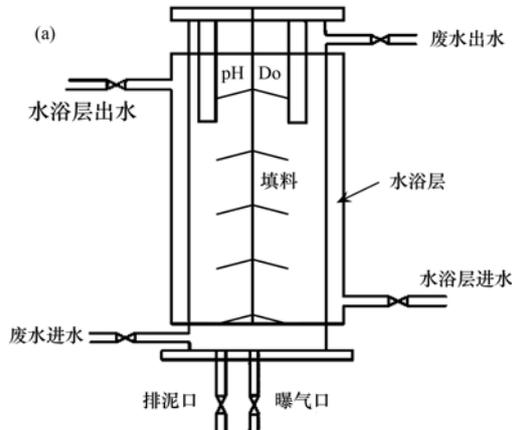


图 2 本实验的装置示意

Fig. 2 Equipment used in this experiment

1.2 接种污泥

取城镇污水处理厂二沉池的普通活性污泥作为

种泥, 颜色为浅黄褐色, pH 在 7.0 ~ 7.2 范围内, MLSS 在 $3\ 000 \sim 4\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内. 经 12 h 沉淀

后, MLSS 在 14 000 ~ 14 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, MLVSS 在 8 000 ~ 8 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 备用。

1.3 实验用水

本实验采用人工模拟氨氮废水, 其主要成分为: 氯化铵 0.33 ~ 0.44 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷酸二氢钾 0.03 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 硫酸镁 0.01 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 氯化钙 0.02 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 碳酸氢钠 1.00 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 微量元素溶液 0.35 $\text{mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

微量元素溶液成分为: 氯化铁 3.52 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 氯化锰 0.36 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 硫酸铜 0.08 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 硫酸镁 0.30 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 氯化钴 0.38 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。实验进水水质见表 1。

表 1 模拟废水进水水质

水质指标	单位	数值
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	82.5 ~ 113.5
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	2.0 ~ 2.3
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.0
pH	—	7.9 ~ 8.2
COD	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.0 ~ 7.0

1.4 反应器启动及运行

(1) 将 1.2 节中备用的种泥曝空气 72 h 后, 调整污泥浓度在 14 000 ~ 14 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内。取 2.5 L 该污泥倒入 1.1 节的 SBAF 反应器中。

(2) 将步骤(1)中的 SBAF 反应器底部通入纯氮气, 气压控制在 0.20 ~ 0.25 MPa 范围内, 持续通入 72 h。反应器中的污泥逐渐附着在组合填料表面, 且颜色由浅黄褐色变为黑色, 此时停止通氮气并静置 2 h 后, 将剩余污泥从反应器底部排泥口排出。

(3) 采用恒流泵将 1.3 节实验用水送入 SBAF 反应器中, 并从该反应器底部微曝气。将该体系的 DO 和温度分别控制在 0.10 ~ 0.30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 31 $^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 的范围内, HRT 控制为 24 h;

(4) 该反应器连续启动并运行, 在启动过程中不排泥。

1.5 污泥微生物选取与制备

在 SBAF 体系内, 分别取接种期、CANON 启动期和 CANON 运行期的污泥进行分析研究。具体为: 接种期的污泥取自原始混合污泥; 启动期的污泥取自反应器内上下层填料上附着的污泥; 稳定运行期的污泥取自反应器内上下层填料上附着的污泥。

污泥样品制备方法为: 先用去离子水将膜上微生物冲洗至烧杯中, 待其沉淀后弃掉上清液留下浓缩的污泥微生物 50 mL, 备用。

1.6 基于 Illumina 平台的 16S rDNA 宏基因组测序
分别取 CANON 不同运行时期样品浓缩污泥,

用冷冻干燥机干燥后, 进行 16S rDNA 宏基因组测序, 其流程如下。

(1) 样品抽提与质检。采用离心吸附柱法进行样品 DNA 抽提, 并用 Agarose Gel Electrophoresis 和 ND-1000 Nanodrop 进行样品质检。

(2) 文库构建与质检。通过质检的样品, 用 TruSeq[®] Custom Amplicon Sample Prep Kit 进行文库构建, 主要包括内侧特异性引物 PCR 扩增、外侧接头特异性引物 PCR 扩增及纯化, 并用 Agilent 2200 TapeStation 和 Qubit 2.0 进行文库质检。

(3) 样本制备。①通过质检的文库, 按照 pooling 比例进行混合, pooling 后的浓度为 2.1 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$; ②将 pooling 样品与 2.1 $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Phix Control 按照 19:1 比例进行混合; ③将 2.0 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 稀释为 0.2 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH; ④将②和③处理结果按照 1:1 比例进行混合, 室温孵育 5 min; ⑤用 HT1 将④中混合物稀释 100 倍, 取 420 μL 作为测序样本。

(4) 上机测序使用 Pair End Flow Cell, 进行 MiSeq 2500 上机操作, 并运行 Pair End (2 \times 100) 标准测序程序。

(5) 数据分析测序程序运行完毕, 对所得数据进行生物信息学分析。首先对原始数据进行过滤, 去除低质量数据, 得到干净数据 (clean data) 后进行后续分析; 其次将 Paired-end reads 拼接为 Tags, 并且去冗余, 获取 Unique Tags; 然后对 Unique Tags 进行聚类, 生成 OTU (operational taxonomic units); 最后利用生成的 OTU 进行物种注释、分类统计及 α 多样性分析。

1.7 分析项目及检测方法

实验中氮素测定均采用国家标准方法^[15]。其中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 测定采用纳氏试剂比色法, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 采用 N-(1-萘基)乙二胺光度法, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用紫外分光光度法, $\text{TN} = \text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$, COD 测定采用重铬酸钾法, pH 值、DO 及温度采用便携式 pH 计 (PBBJ-260, 上海雷磁) 和便携式溶解氧分析仪 (JPB-607A, 上海雷磁) 测定。

ARR 计算公式为:

$$\text{ARR} = \frac{(\text{进水 } \text{NH}_4^+ - \text{N}) - (\text{出水 } \text{NH}_4^+ - \text{N})}{(\text{进水 } \text{NH}_4^+ - \text{N})} \times 100\%$$

TNR 计算公式为:

$$\text{TNR} = \frac{(\text{进水 TN}) - (\text{出水 TN})}{(\text{进水 TN})} \times 100\%$$

2 结果与讨论

2.1 SBAF 体系内各氮素变化分析

CANON 在 SBAF 体系中的启动运行经历了两个阶段(如图 3 所示) I 启动阶段(1~51 d)和 II 运行阶段(52~278 d). 该区分依据为:在出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度下降的同时,体系 TN 去除率达到 70% 时,即可认定启动完成. 其中在启动阶段,从第 1~4 d,污泥处于接种初期,低 DO 严重抑制 AOB 和 NOB 活性,导致绝大多数 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 未能被氧化,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度为 $105.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均质量浓度为 $0.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均质量浓度为 $3.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在第 5~35 d 时,体系内大量 AOB 富集和少量 NOB 存在,引起出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度降低为 $51.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均质量浓度升至 $26.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均质量浓度微量增加至 $5.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 从第 36~50 d 时,体系开始富集 AnAOB 引起 ANAMMOX 现象,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度值同时下降,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度略微增加. 当体系进入运行阶段后,在第 52~278 d,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度为 $96.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度为 $9.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 平均质量浓度为 $5.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,二者均稳定保持在低水平. 根据公式(1)计算,出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 质量浓度理论值为 $10.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,实际出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 平均质量浓度为 $14.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 实际值比理论值偏高,说明体系内微量 NOB 仍会引起硝化反应.

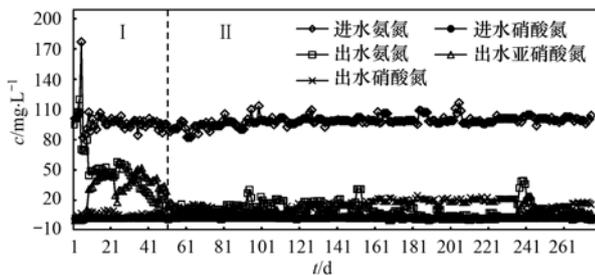


图 3 本实验各氮素变化情况

Fig. 3 Variations of nitrogen concentration in this experiment

2.2 SBAF 体系内 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化分析

为了满足厌氧氨氧化反应中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_2^-\text{-N}$ 达到 1/1.32 的条件,体系在启动初期只需进水中 56.9% 的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 即可^[16]. 图 4 为 SBAF 内 CANON 启动运行过程中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化情况. 在第 1~4 d,由于污泥处于接种初期,ARR 低

于 6.0%. 在第 5~24 d 时, AOB 出现富集, ARR 逐渐上升,最大 ARR 为 58.3%, 平均 ARR 为 46.2%, 与理论值 56.9% 存在偏差. 其原因在于该阶段污泥中有 NOB 存在,少量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 被氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[17]. 在第 25~35 d 时,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 逐渐降低至 $38.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ARR 为 50.0%, AOB 富集情况良好. 在第 36~51 d 时,在体系内 AOB、AnAOB 和少量 NOB 的作用下,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 持续降低至 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ARR 从 45.4% 逐渐提升至 98.9%. 体系进入运行阶段(52~278 d)后,出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均质量浓度保持在 $9.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ARR 平均值保持在 95.1%, 系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化能力很稳定.

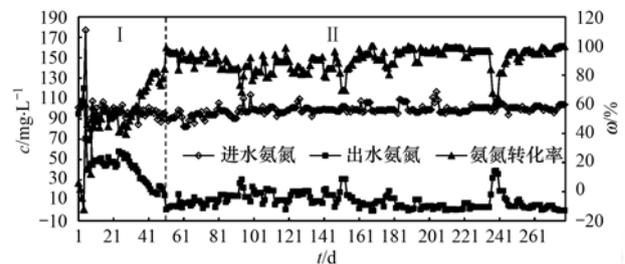


图 4 本实验 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化情况

Fig. 4 Variations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration in this experiment

2.3 SBAF 体系内 TN 变化分析

TN 变化对 CANON 脱氮性能有着重要的指征作用^[18]. 图 5 为本实验的 TN 变化情况. 在启动阶段第 1~35d, SBAF 体系经历污泥接种和半量亚硝化阶段,此阶段主要富集 AOB 和 AnAOB、洗脱 NOB,因此并不具有 TN 去除作用, TN 去除率低且波动很大. 在第 36~51 d,系统的出水 TN 浓度逐渐下降,从 $83.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $28.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 当启动到 51 d 时,进水 TN 质量浓度为 $90.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 TN 达到 70.1%, CANON 工艺完成快速启动. 当体系从 52 d 运行到 278 d 时,进水 TN 平均质量浓度为 $93.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水 TN 平均质量浓度为 $23.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水平均 TNR 为 75.1%,出水最大 TNR 为 85.9%,说明 CANON 工艺运行稳定.

根据公式(1),理论上 CANON 工艺最大 TNR 为 88.0%,而本实验 TNR 比理论值偏小,其主要原因是体系内 ANAMMOX 反应产生的一部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和存在少量 NOB 发生硝化反应产生的一部分 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,引起体系内有少量 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 累积,从而影响了 TN 的去除率^[19~21].

2.4 SBAF 体系内 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 产生量变化分析

CANON 启动运行过程中, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 会出现累积

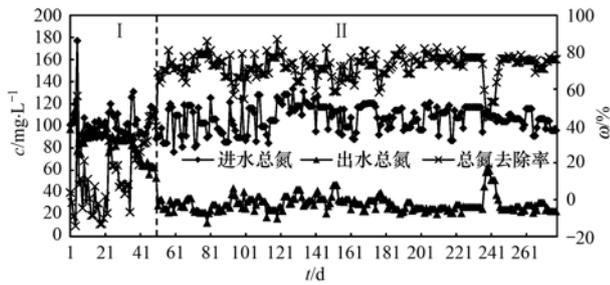
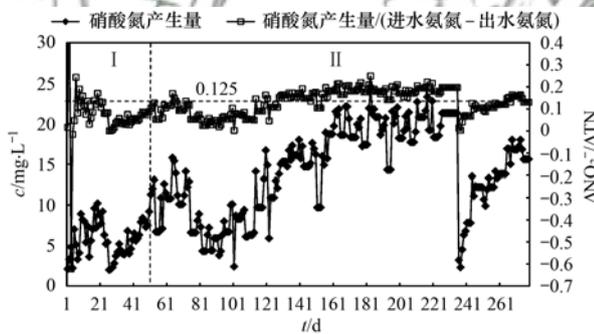


图 5 本实验 TN 变化情况

Fig. 5 Variations of TN concentration in this experiment

现象. 这是由于一方面在 AnAOB 作用下, NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 被转化为 N_2 和 NO_3^- -N, 导致 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度同时下降, 并会产生少量 NO_3^- -N; 另一方面体系内存有极少量 NOB 产生硝化作用, 少量 NO_2^- -N 会被氧化为 NO_3^- -N, 这两方面均对体系 TN 去除有影响.

图 6 为本实验的 NO_3^- -N 产生量变化情况. 在启动阶段第 1 ~ 51 d, NO_3^- -N 产生量 (ΔNO_3^-) 保持在低水平, 其平均质量浓度为 $3.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进入运行阶段 52 ~ 278 d, ΔNO_3^- 缓慢上升后维持在稳定水平. 其中在第 235 d, 由于系统 ARR 突然降低, 导致 ΔNO_3^- 骤降至 $1.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 经 DO 调整后, 体系 ARR 提升, 引起 ΔNO_3^- 再次缓慢上升. 整个运行阶

图 6 本实验 NO_3^- -N 变化情况Fig. 6 Variations of NO_3^- -N concentration in this experiment

段 ΔNO_3^- 平均浓度质量为 $12.1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

由公式(1)可知, NO_3^- -N 产生量 (ΔNO_3^-) 与 TN 去除量 (ΔTN) 的理论比值为 0.125. 本体系因第 1 ~ 51 d 处于启动阶段, 则不做 $\Delta\text{NO}_3^-/\Delta\text{TN}$ 分析. 在运行阶段第 52 ~ 278 d, 该体系 $\Delta\text{NO}_3^-/\Delta\text{TN}$ 实际平均值为 0.13, 与理论值 0.125 非常接近.

2.5 SBAF 体系内 CANON 微生物种群结构特征分析

2.5.1 CANON 微生物聚类与 α 多样性分析

微生物聚类分析: 利用 Qiime 挑选 OTUs, 将所有相似性大于 97% 的序列归为一个 OUT, 默认聚类方法为 uclust, 即一个 OUT 表示一个物种, 体系中 OUT 大于 4000, 微生物物种丰富.

微生物 α 多样性分析: chao1 指数表示微生物的相对丰度, Shannon 指数和 Simpson 指数表示微生物的多样性. 其中, Shannon 值越大, Simpson 值越小, 说明群落多样性越高.

样本覆盖度: 是指测序结果占整个基因组的比例. 通常将该指标与聚类、 α 多样性指标的稀释曲线相结合, 用于评价测序量是否覆盖所有类群, 并间接反映样品中物种的丰富程度. 当曲线趋于平缓或者达到平台期时则认为测序深度已基本覆盖样品中的所有物种^[22].

为了研究 SBAF 体系内 CANON 微生物的种群结构特征, 本实验选取 3 个污泥样品, 分别为种泥 (用样本 A 表示)、启动阶段污泥 (46 d, 用样本 B 表示) 和运行阶段污泥 (196 d, 用样本 C 表示), 对这些微生物样品进行聚类与多样性分析, 其 OTU 数目、有效序列条数统计及微生物 α 多样性相关的各项指标见表 2 和图 7 所示. 根据指标结果, 本研究中样品曲线基本趋于平缓, 各测序结果占整个基因组的 97% 以上, 覆盖度高, 证明样品测序能够准确反映出样品的物种丰度.

表 2 微生物样品的 α 多样性Table 2 The α diversity of the different microbial samples

样本	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	OUT 数目	Tags 数目	样本覆盖度/%
A	8 877.55	10.26	0.99	7 905	111 931	97.91
B	5 021.02	8.09	0.97	4 301	124 162	99.06
C	13 235.56	8.36	0.92	9 219	118 168	97.63

2.5.2 SBAF 体系内 CANON 微生物的演化特性分析

CANON 工艺接种期、启动期和运行期的微生物群落结构有显著差异. 通过对比不同时期 SBAF 体系中微生物的群落特征和丰度变化, 研究了门水平下微生物的演化进程, 检测结果如表 3 所示. 从

接种期到启动期, 即 A-B 期, 在特定的培养环境下, 微生物驯化有效, 部分菌类不适应环境变化从系统中被洗脱出去, 微生物种群数量减少; 留下的微生物群落适合在 CANON 体系中生长. 启动成功后至稳定运行时期, 即 B-C 期, 体系中微生物群落

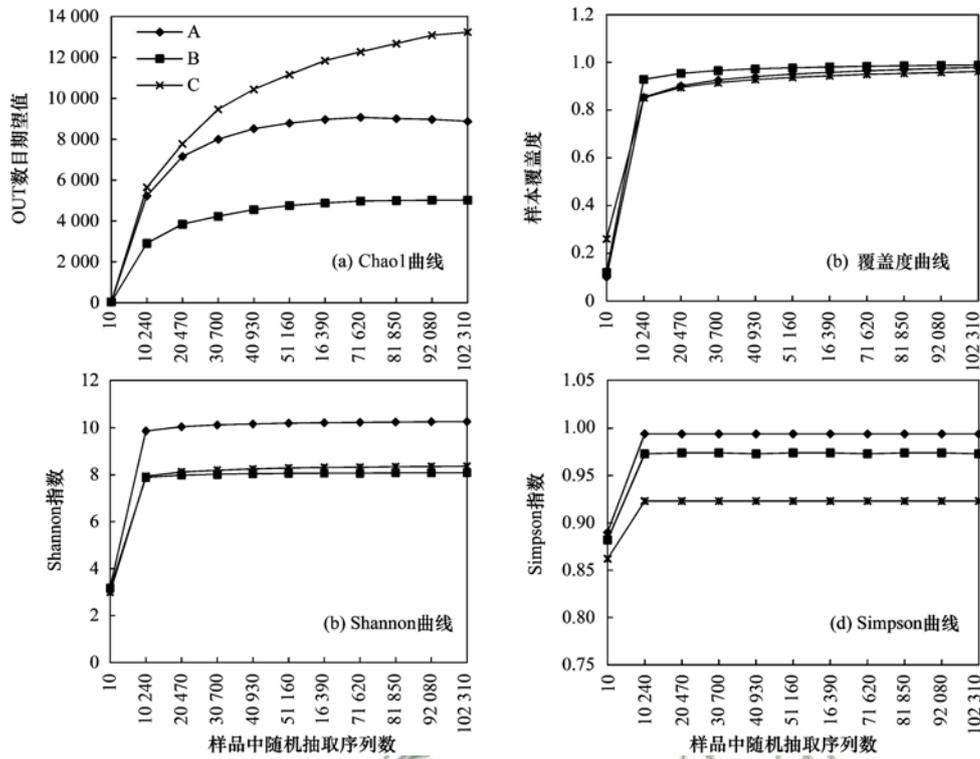


图7 α 多样性指标的稀释曲线

Fig. 7 Rarefaction curve of α diversity indexes

种类没有显著变化, 结构组成相对稳定, 而各丰度发生变化, 特别是 CANON 功能菌种 AOB 和 AnAOB 所在的 Proteobacteria 和 Planctomycetes 两个菌门变化最显著。

在接种期, 除 5.1% 未检出或未识别的菌门, 种泥微生物共包括 49 个菌门, 其中 >1% 的共有 11 个菌门(如表 3), 其中变形菌门 Proteobacteria 和绿弯菌门 Chloroflexi 所占比例达到 51.0%, 为种泥中的绝对优势菌门。其次, 各个菌门根据菌种丰度含量大小依次为: 变形菌门 Proteobacteria > 绿弯菌门 Chloroflexi > 硝化螺旋菌门 Nitrospirae > 浮霉菌门 Planctomycetes > 放线菌门 Actinobacteria > 酸杆菌门 Acidobacteria > 拟杆菌门 Bacteroidetes > 疣微菌门 Verrucomicrobia。

在 CANON 启动期, 污泥微生物由原来的 49 个菌门减少到 38 个菌门, 洗脱出 11 个菌门, 其中变形菌门 Proteobacteria 和浮霉菌门 Planctomycetes 所占比例达到 43.6%, 成为启动期污泥微生物中的绝对优势菌门。各个菌门根据菌种丰度含量大小依次为: 变形菌门 Proteobacteria > 浮霉菌门 Planctomycetes > 疣微菌门 Verrucomicrobia > 绿弯菌门 Chloroflexi > 绿菌门 Chlorobi > 芽单胞菌门 Gemmatimonadetes > 拟杆菌门 Bacteroidetes > 酸杆菌

门 Acidobacteria > 放线菌门 Actinobacteria。与接种期种泥对比, 此阶段代表厌氧微生物的浮霉菌门 Planctomycetes 和芽单胞菌门 Gemmatimonadetes 的

表 3 SBAF 体系内 CANON 工艺功能微生物门水平下的演化分析 (相对丰度 >1%) / %

Table 3 Microbial evolution of the CANON process in the SBAF system at a phylum level (relative abundance >1%) / %

菌门	A	B	C
Proteobacteria	40.0	27.0	18.9
Chloroflexi	11.0	9.1	7.6
Nitrospirae	8.8	—	1.3
Planctomycetes	8.1	16.6	35.2
Actinobacteria	5.8	2.5	2.4
Acidobacteria	5.7	3.8	6.5
Bacteroidetes	4.3	4.8	1.9
Verrucomicrobia	2.3	9.8	4.3
OD1	1.8	—	—
TM7	1.2	—	—
WS3	1.0	—	—
Armatimonadetes	—	1.0	2.9
BRC1	—	1.3	1.7
Chlorobi	—	7.8	2.0
Gemmatimonadetes	—	7.0	3.4
Cyanobacteria	—	—	—
TM6	—	—	1.3
Unassigned & Other	5.1	4.5	6.9
Total	95.1	95.2	96.0

相对丰度有所上升, 分别提升了 8.5% 和 6.84%, 说明厌氧微生物开始显著富集, 而变形菌门 Proteobacteria 的相对丰度从 39.7% 下降到 27.0%. 此阶段代表好氧微生物的硝化螺旋菌门 Nitrospirae 的相对丰度由 8.8% 下降到 0.01%, 说明属于硝化螺旋菌门的 NOB 已经被洗脱出反应体系中, 这保证了半量亚硝化的稳定实现.

在 CANON 运行期, 污泥微生物菌门与启动期基本一致, 说明 CANON 体系中微生物群落结构已基本处于稳定状态, 但微生物各菌门相对丰度有所变化. 其中浮霉菌门 Planctomycetes 和变形菌门 Proteobacteria 所占比例达到 54.1%, 成为该体系的绝对优势菌门. 这也说明 AnAOB (所属浮霉菌门 Planctomycetes) 和 AOB (所属变形菌门 Proteobacteria) 已成为 CANON 体系运行期的绝对优势菌^[23~25].

2.5.3 SBAF 体系内 AOB、AnAOB 富集及 NOB 洗脱分析

CANON 体系的关键点在于洗脱 NOB 和富集 AOB、AnAOB. 为了对 SBAF 体系内功能菌做更为细致的了解, 本实验在属水平下, 对 AOB、AnAOB 和 NOB 的特性做进一步分析, 其结果如表 4 所示. 在属水平上, AnAOB 主要微生物为 *Candidatus Brocadia*, 其相对丰度随着驯化时间的延长分别依次为: 种泥 1.8×10^{-5} , 启动期 14.3%, 运行期 30.6%, 说明 AnAOB 得以快速富集, 逐渐成为体系中的优势菌. 其次, 虽然 AOB (变形菌 Proteobacteria) 主要微生物未能识别, 但从数据趋势上来看, 除门 Proteobacteria 纲 Betaproteobacteria 目 Ellin6067 的微生物有所增加, 其他 AOB 微生物含量逐渐减少. 最后, NOB 主要微生物为 *Nitrospira*, 其相对丰度随着驯化时间的延长分别依次为: 种泥 8.8%, 启动期 0.0%, 运行期 0.2%, 说明从接种期到启动期, NOB 成功洗脱出该体系; 从启动期到运行期, NOB 又得到微量富集, 这也是引起体系出水 NO_3^- -N 浓度值比理论值略高的主要原因.

表 4 SBAF 体系内属水平下的 CANON 功能微生物演化分析 (相对丰度 >1%) / %

Table 4 Microbial evolution of the CANON process in the SBAF system on the genus level (relative abundance >1%) / %

菌属	A	B	C
Planctomycetes; c__OM190; o__CL500-15; f__; g__	3.0	0.2	0.0
Planctomycetes; c__Planctomycetia; o__Planctomycetales; f__Planctomycetaceae; g__Planctomyces	1.3	0.2	0.5
Planctomycetes; c__[Brocadia]; o__Brocadiales; f__Brocadiaceae; g__Candidatus Brocadia	1.8×10^{-3}	14.3	30.6
Proteobacteria; c__Betaproteobacteria; o__Burkholderiales; f__Comamonadaceae; g__	3.3	3.7	2.0
Proteobacteria; c__Betaproteobacteria; o__Ellin6067; f__; g__	1.4	1.4	3.2
Proteobacteria; c__Betaproteobacteria; o__Nitrosomonadales; f__Nitrosomonadaceae; g__	0.3	2.8	0.8
Proteobacteria; c__Betaproteobacteria; o__Rhodocyclales; f__Rhodocyclaceae; g__Dok59	0.3	4.0	1.2
Proteobacteria; c__Deltaproteobacteria; o__Myxococcales; f__; g__	2.0	3.3	1.7
Proteobacteria; c__Deltaproteobacteria; o__Myxococcales; f__OM27; g__	1.1	1.0	4.5×10^{-3}
Proteobacteria; c__Gammaproteobacteria; o__Chromatiales; f__; g__	8.0×10^{-3}	0.2	0.0
Proteobacteria; c__Gammaproteobacteria; o__HOC36; f__; g__	3.9	1.6×10^{-3}	0.0
Nitrospirae; c__Nitrospira; o__Nitrospirales; f__Nitrospiraceae; g__Nitrospira	8.8	0.0	0.2

2.6 SBAF 体系内氮素转化与微生物演化特性间的关系分析

微生物的演化显著影响 SBAF 体系内的氮素转化, 该结果如图 8 所示. 在接种前期, ARR 和 TNR 平均值均为 0; 在启动期间, 浮霉菌门 Planctomycetes 和芽单胞菌门 Gemmatimonadetes 的相对丰度增加, 绿弯菌门 Chloroflexi、变形菌门 Proteobacteria 的相对丰度降低, 硝化螺旋菌门 Nitrospirae 的相对丰度降为 0, 此时 ARR 和 TNR 平均值由 0 分别提升至 53.8% 和 15.1%; 在运行期间, 浮霉菌门 Planctomycetes 相对丰度持续增加, 绿弯菌门 Chloroflexi 和变形菌门 Proteobacteria 相对丰

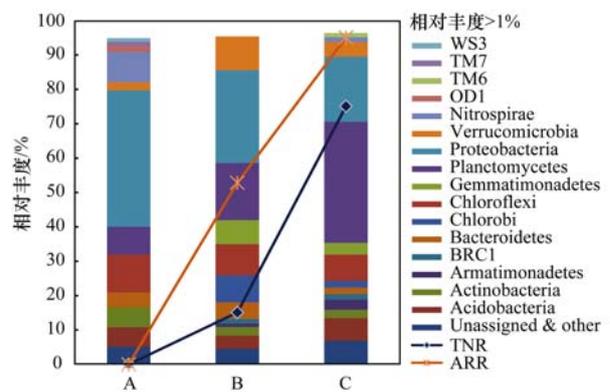


图 8 SBAF 体系内氮素转化与微生物门水平下演化特性间的关系
Fig. 8 Relationship between the nitrogen conversion of the SBAF system and the microbial evolution at the phylum level

度持续降低, 此时 ARR 和 TNR 平均值分别增加至 95.1% 和 75.1%。由此也可说明, 浮霉菌门 Planctomycetes 相对丰度的增加, 对 SBAF 体系内 TN 去除起到关键作用。

3 结论

(1) 在 SBAF 体系内, 采用前期更替曝气的满负荷启动方法, 于 51 d 成功实现 CANON 的快速启动, 并稳定运行 278 d。实验结果表明, 该体系 ARR 平均值为 95.1%, TNR 平均值为 75.1%, 体系存在少量 NO_3^- -N 累积。

(2) 在门水平上, 在 CANON 运行期污泥微生物的优势菌为变形菌门 Proteobacteria 和浮霉菌门 Planctomycetes。其中, Proteobacteria 起亚硝化作用, Planctomycetes 起厌氧氨氧化作用, 两者协同作用共同实现 CANON 中的 TN 去除。

(3) 在属水平上, AnAOB 主要微生物为 *Candidatus Brocadia*, 其相对丰度随着驯化时间延长而逐渐增大; AOB(变形菌 Proteobacteria) 主要微生物未能识别; NOB 主要微生物为 *Nitrospira*。

参考文献:

- [1] Slijkers 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.
- [2] Kartal B, De Almeida N M, Maalcke W J, *et al.* How to make a living from anaerobic ammonium oxidation [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2013, **37**(3): 428-461.
- [3] Siegrist H, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Anammox brings Wwtp closer to energy autarky due to increased biogas production and reduced aeration energy for N-removal[J]. *Water Science and Technology*, 2008, **57**(3): 383-388.
- [4] Miao Y Y, Zhang L, Yang Y D, *et al.* Start-up of single-stage partial nitrification-anammox process treating low-strength swage and its restoration from nitrate accumulation [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **218**: 771-779.
- [5] Leal C D, Pereira A D, Nunes F T, *et al.* Anammox for nitrogen removal from anaerobically pre-treated municipal wastewater: effect of COD/N ratios on process performance and bacterial community structure [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **211**: 257-266.
- [6] 蔡庆, 张代钧, 丁佳佳. 全自养脱氮颗粒污泥的培养及脱氮性能的恢复与强化[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(11): 2805-2812.
- Cai Q, Zhang D J, Ding J J. The cultivation of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite granular sludge and the recovery and enhancement of nitrogen removal [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2805-2812.
- [7] Joss A, Derlon N, Cyprien C, *et al.* Combined nitrification-anammox: advances in understanding process stability [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(22): 9735-9742.
- [8] Huang X W, Urata K, Wei Q Y, *et al.* Fast start-up of partial nitrification as pre-treatment for anammox in membrane bioreactor [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 371-378.
- [9] 付昆明. 全程自养脱氮(CANON)反应器的启动及其脱氮性能[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- Fu K M. Start-up and performance of nitrogen removal of CANON reactor [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [10] 刘竹寒, 岳秀, 于广平, 等. CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 253-259.
- Liu Z H, Yue X, Yu G P, *et al.* Fast start-up of SBAF system assisted CANON process and the microbial analysis [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 253-259.
- [11] 顾书军, 方芳, 李凯, 等. 低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动[J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3120-3127.
- Gu S J, Fang F, Li K, *et al.* Rapid start-up of one-stage autotrophic nitrogen removal process in EGSB reactor for wastewater with low concentration of ammonia [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3120-3127.
- [12] Zhang X J, Yu B Y, Zhang N, *et al.* Effect of inorganic carbon on nitrogen removal and microbial communities of CANON process in a membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2016, **202**: 113-118.
- [13] 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.
- [14] Zhang X J, Zhang H Z, Ye C M, *et al.* Effect of COD/N ratio on nitrogen removal and microbial communities of CANON process in membrane bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **189**: 302-308.
- [15] 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.
- [16] Du R, Cao S B, Li B K, *et al.* Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters [J]. *Water Research*, 2017, **108**: 46-56.
- [17] Li X J, Sun S, Badgley B D, *et al.* Nitrogen removal by granular nitrification-anammox in an upflow membrane-aerated biofilm reactor [J]. *Water Research*, 2016, **94**: 23-31.
- [18] 李冬, 苏庆岭, 梁瑜海, 等. CANON 颗粒污泥高效脱氮及处理生活污水实验研究 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, **47**(8): 79-86.
- Li D, Su Q L, Liang Y H, *et al.* Efficient nitrogen removal from domestic wastewater by CANON granular sludge [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, **47**(8): 79-86.
- [19] Vázquez-Padín J, Mosquera-Corral A, Campos J L, *et al.* Microbial community distribution and activity dynamics of granular biomass in a CANON reactor [J]. *Water Research*, 2010, **44**(15): 4359-4370.
- [20] 胡石, 甘一萍, 张树军, 等. 一体化全程自养脱氮(CANON)工艺的效能及污泥特性[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 111-117.
- Hu S, Gan Y P, Zhang S J, *et al.* Performance and sludge characteristics of the CANON process [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(1): 111-117.

- [21] De Clippeleir H, Vlaeminck S E, Carballa M, *et al.* A low volumetric exchange ratio allows high autotrophic nitrogen removal in a sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(21): 5010-5015.
- [22] Shu D T, He Y L, Yue H, *et al.* Metagenomic insights into the effects of volatile fatty acids on microbial community structures and functional genes in organotrophic anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **196**: 621-633.
- [23] 刘涛, 李冬, 曾辉平, 等. 氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 773-780.
- Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Assessment of the effect of influent NH_4^+ -N concentration on the abundance and community structure of functional bacteria in CANON process [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 773-780.
- [24] 张文艺, 夏绍凤, 翟建平, 等. 曝气生物滤池反应器的沿程生化特性研究[J]. *中国给水排水*, 2006, **22**(15): 71-74.
- Zhang W Y, Xia S F, Zhai J P, *et al.* Study on biochemical characteristic along biological aerated filter reactor [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, **22**(15): 71-74.
- [25] 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.

环 境 科 学

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)