环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪，蒋靖坤，王东滨，邓建国，贺克斌，郝吉明

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2021年7月
第42卷 第7期
Vol.42 No.7

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第42卷　第7期
2021年7月15日

目　次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素 …… 李雪，蒋靖坤，王东滨，邓建国，贺克斌，郝吉明（3091）
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 $PM_{2.5}$ 的影响 …… 逯世泽，史旭荣，薛文博，雷宇，严刚（3099）
基于网格的长三角 $PM_{2.5}$ 分布影响因素及交互效应 …… 黄小刚，赵景波，辛未冬（3107）
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用 …… 李颖若，韩婷婷，汪君霞，权维俊，何迪，焦热光，吴进，郭恒，马志强（3118）
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 …… 赵宇，吴灿，王益倩，陈玉宝，吕少君，汪芳琳，杜伟，刘仕杰，丁志健，王格慧（3127）
四川盆地 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 …… 李梦真，张廷斌，易桂花，秦岩宾，李景吉，刘贤，蒋杰（3136）
河网连续动态模型构建及其在典型杀生剂时空迁移模拟中的应用 …… 邢成，张芊芊，蔡雅雅，烟晓婷，应光国（3147）
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应 …… 黄亚玲，黄金良（3156）
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性 …… 袁海英，侯磊，梁启斌，李佳琛，任甲（3166）
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析 …… 张甜娜，周石磊，陈召莹，张紫薇，孙悦，姚波，崔建升，李再兴，罗晓（3176）
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价 …… 原璐彬，邢书语，刘鑫，周晓红，Adelaide Angela Dadzie（3186）
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险 …… 刘永九，黄素珍，张璐，彭雪，张心怡，葛芳杰，刘碧云，吴振斌（3198）
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价 …… 白冬锐，张涛，包峻松，陈坦，王洪涛，金曦，金军，杨婷（3206）
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价 …… 朱静，侯耀宗，邹书成，曹梦华，涂书新（3215）
升金湖河湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析 …… 崔玉环，王杰，刘友存，郝泷，高祥（3223）
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析 …… 寇馨月，丁军军，李玉中，毛丽丽，李巧珍，徐春英，郑欠，庄姗（3232）
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析 …… 何书晗，欧阳添，赵璐，纪璐璐，杨宋琪，施军琼，吴忠兴（3242）
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子 …… 路枫，李磊，齐青松，陆欣鑫，刘妍，范亚文（3253）
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应 …… 居琪，章奇，曹驰程，白雷雷，张晖（3263）
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征 …… 赵志瑞，吴会清，毕玉方，展庆周，吴海淼，袁凯倪，孟祥源，李方红（3272）
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征 …… 李翔，李致春，汪旋，张思远，王慧敏，厉荣强，王国祥，李启蒙（3281）
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析：以秦淮河流域为例 …… 马小雪，龚畅，郭加汛，王腊春，徐蕴韵，赵春发（3291）
长江下游居民区降水地表径流的污染特征 …… 郭文景，张志勇，闻学政，张瀚文，王岩（3304）
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征 …… 包鑫，江燕，胡羽聪（3316）
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响 …… 单溪环，谢文霞，廖云杰，房志达，杨晓晶，苏静君，赵洪涛，李叙勇（3328）
基于概率方法的中国居民饮水途径砷暴露健康风险评估 …… 秦宁，刘运炜，侯荣，王彩云，王贝贝，段小丽（3338）
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性 …… 李梦雅，宋钰莹，张晓岚，黄海鸥（3348）
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布 …… 王杜珈，何帅，周小霞（3358）
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因 …… 杜彩丽，李中浓，李晓光，张列宇，陈素华，黎佳茜，李曹乐（3366）
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析 …… 唐振平，肖莎莎，段毅，刘迎九，高媛媛，吴月月，陈怡雯，周帅（3375）
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水 …… 吕恺，邵贤明，王康舟，姚雪薇，彭党聪，韩芸（3385）
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能 …… 唐义，马邕文，万金泉，王艳，叶刚（3392）
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响 …… 吕永涛，朱传首，张旭阳，徐超，潘永宝，刘爽，崔双科，王磊（3400）
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷 …… 张玉君，李冬，王歆鑫，张富国，张杰（3405）
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响 …… 古柏铭，金春姬，温淳，侯金源，赵阳国，高孟春（3413）
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析 …… 钱飞跃，刘雨馨，王建芳，刘文如（3422）
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化 …… 张发文，董明坤，陈辰慧，赵长民（3430）
2000～2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氨排放的影响 …… 王文锦，王卿，朱安生，黄凌，顾莹，王杨君，王敏，李莉（3442）
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氨挥发排放的影响 …… 韩晨，侯朋福，薛利红，冯彦房，余姗，杨林章（3451）
水肥管理对热带地区双季稻田 CH_4 和 N_2O 排放的影响 …… 李金秋，邵晓辉，缑广林，邓艺欣，谭诗敏，徐文娴，杨秋，刘文杰，伍延正，孟磊，汤水荣（3458）
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径 …… 杨雨虹，贺惠，米铁柱，刘玥腾，刘佳音，张国栋，李明月，甄毓（3472）
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响 …… 赵仲婧，郝庆菊，涂婷婷，胡曼利，张尧钰，江长胜（3482）
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价 …… 陈莹，刘汉燚，刘娜，蒋珍茂，魏世强（3494）
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素：以云南哀牢山为例 …… 刘旭，王训，王定勇（3507）
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征 …… 林挺，赵述华，郗秀平，杨坤，吴静雅，朱艳，罗飞（3518）
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选 …… 周嗣江，刘针延，熊双莲，马烁，黄倚豪，雷寅，曹梦华，涂书新（3527）
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复 …… 袁峰，唐先进，吴骥子，赵科理，叶正钱（3535）
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征 …… 刘丽娅，印红玲，蹇林洁，徐子文，熊远明，罗怡，刘小雯，徐维新（3549）
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析 …… 刘奇鑫，王昌全，李冰，赵海岚，方红艳，邓茜，李启权（3555）
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异 …… 席北斗，王燕，檀文炳，余红，崔东宇，程东会，党秋玲（3565）
《环境科学》征订启事(3315)　《环境科学》征稿简则(3357)　信息(3391，3441，3564)

生态环境知识网
Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第42卷第7期 2021年7月
Vol.42, No.7 Jul., 2021

提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响

古柏铭[1], 金春姬[1,2*], 温淳[1], 侯金源[1], 赵阳国[1,2], 高孟春[1,2]
(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 使用序批式生物反应器驯化耐盐活性污泥,探究提盐速率对污染物去除效果、活性污泥特性和微生物群落结构的影响. 结果表明,快速提升盐度至30‰(30 d内提升盐度),COD和NH_4^+-N去除率均出现明显下降,由最初的85.5%和98.5%,分别降低至72.2%和81.7%; 缓慢提升盐度至30‰(90 d内提升盐度),COD和NH_4^+-N去除率受盐度影响较小,表现出良好的去除性能. 在缓慢提升盐度过程中,盐度为20‰,出水NO_2^--N升高至11.13 mg·L^{-1},NO_3^--N降低为0.56 mg·L^{-1},实现短程硝化; 盐度为30‰,亚硝酸盐积累率约为90%,TN去除率升高至75%左右. 随着盐度升高,胞外聚合物中多糖和蛋白质的含量不断增加,当盐度高于15‰时,多糖明显增加. 高通量测序结果表明,经快速提盐和缓慢提盐驯化,微生物多样性明显下降,Shannon指数由8.06分别降为4.34和6.17. 随着盐度增加,*Micropruina*、*Denitromonas*、*TM7a*和*Marinicella*表现出良好的耐盐特性. 经快速提盐驯化后,*Denitratisoma*、*Defluviimonas*、*Arenimonas*和*Denitromonas*等反硝化菌的相对丰度明显减少.

关键词: 序批式生物反应器(SBR); 提盐速率; 短程硝化; 胞外聚合物; 微生物群落结构
中图分类号: X172; X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2021)07-3413-09 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202012110

Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors

GU Bai-ming[1], JIN Chun-ji[1,2*], WEN Chun[1], HOU Jin-yuan[1], ZHAO Yang-guo[1,2], GAO Meng-chun[1,2]
(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In this study, three sequence batch reactors were selected to evaluate the effects of salt-tolerant activated sludge acclimation. The effect of salinity increase rate on pollutant removal, physicochemical characteristics of activated sludge, and microbial community were investigated. The results showed that a rapid salinity increase to 30‰ (within 30 d) reduced removal efficiencies of COD and NH_4^+-N from 85.5% and 98.5% (18 d) to 72.2% and 81.7% (51 d), respectively. In comparison, a slower salinity increases to 30‰ (within 90 d) had a minor effect on COD and NH_4^+-N removal. During the rapid salinity increase, a stable shortcut nitrification occurred under 20‰ salinity, in which the effluent NO_2^--N reached 11.13 mg·L^{-1} and NO_3^--N decreased to 0.56 mg·L^{-1}. When salinity increased to 30‰, the nitrite accumulation rate was about 90%, and the removal efficiency of total nitrogen increased to approximately 75%. The contents of polysaccharide and protein in extracellular polymer substances increased as salinity increased, and the polysaccharide content increased significantly when the salinity was higher than 15‰. High-throughput sequencing results illustrated that microbial diversity reduced as salinity increased, following the Shannon index decrease from 8.06 (0‰ salinity) to 4.34 (rapid salinity increase) and 6.17 (slower salinity increase). As salinity increased, *Micropruina*, *Denitromonas*, *TM7a*, and *Marinicella* exhibited good salt tolerance. The relative abundance of *Denitratisoma*, *Defluviimonas*, *Arenimonas*, and *Denitromonas* decreased more significantly following the rapid salinity increase compared with that after the slower salinity increase.

Key words: sequencing batch reactor (SBR); salinity promotion rate; shortcut nitrification; extracellular polymeric substances; microbial community structure

在中国沿海城市,因淡水资源短缺,生活用水和工业生产常采用海水直接代替淡水作为原水进行利用[1]. 例如,将海水用于海产品加工、道路清洗、冲厕和消防等[2]; 海水也常用作工业冷却水,广泛应用于钢铁、石化、机械火电和核电等行业[3]. 同时,海水养殖业的快速发展,也产生大量养殖废水[4]. 这些含盐废水中除含有大量无机盐外,还存在有机物、氮和磷等污染物,若未经处理排放会对沿海生态系统造成巨大破坏[5]. 生物法因具有经济、环保等优点[6],广泛应用于市政和工业废水的处理. 然而,高浓度的无机盐会改变微生物群落结构,影响有机物和营养物的去除[7]. 有研究表明,无机盐会抑制亚硝酸盐氧化菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB),而氨氧化菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)具有更强的适应能力,在好氧段造成亚硝酸盐的积累[8],形成短程硝化.

通过耐盐驯化,可提高污泥中微生物对盐度的适应能力[9],且驯化方式对污泥的耐盐性也会产生

收稿日期: 2020-12-14; **修订日期**: 2021-01-08
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(201964004)
作者简介: 古柏铭(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为生物法处理海水养殖废水,E-mail:gbm19970311@163.com
* 通信作者,E-mail:jinhou@ouc.edu.cn

影响. 有研究表明,逐步提升盐度和高盐环境直接驯化污泥对反应器性能和微生物群落会产生不同的影响[10,11]. 然而,快速提升盐度和缓慢提升盐度的驯化方式,对活性污泥特性及微生物群落结构的影响却很少研究. 本实验采用序批式生物反应器(sequencing batch reactor, SBR)处理含盐废水,考察了提盐速率对 COD 降解和脱氮性能的影响,以及盐度和曝气量对亚硝酸盐积累率(nitrite accumulation rate, NAR)的影响. 同时,本文研究盐度对污泥沉降性能和胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)的影响,探究驯化过程中微生物群落结构的演变,以期为快速驯化具有良好特性的耐盐污泥提供理论参考与支撑.

1 材料与方法

1.1 实验装置和进水水质

本实验装置如图 1 所示,SBR 主体是有机玻璃材质的圆柱体,高 25 cm,直径 22 cm,有效容积为 8 L,温度通过电热丝控制在 30℃左右. 接种污泥取自青岛市海泊河污水处理厂,混合液悬浮固体浓度为4 000 mg·L^{-1}左右. 进水为模拟含盐有机废水,主要成分为葡糖糖、NH_4Cl 和 KH_2PO_4,浓度分别约为 200、150 和 9 mg·L^{-1},pH 为 7.3 ~ 8.2(投加 $NaHCO_3$),盐度和微量元素均由海水晶提供.

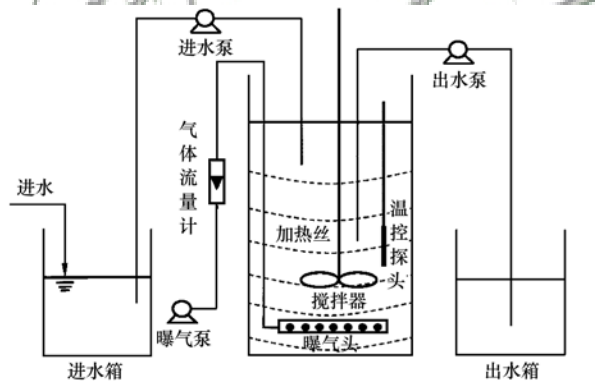


图 1 SBR 装置示意

Fig. 1 Schematic of the SBR

1.2 污泥的耐盐驯化

通过逐步提升盐度来驯化污泥,设置盐度梯度为 5‰、10‰、15‰、20‰、25‰和 30‰, SBR1、SBR2 和 SBR3 每个盐度梯度的驯化时间分别为 5、10 和 15 d,盐度达到 30‰后,继续运行. 反应器每天运行 4 个周期,每个周期分 6 个阶段:进水(5 min)、缺氧(60 min)、曝气(180 min)、沉淀(30 min)、出水(5 min)和闲置(80 min). 反应器运行 115 d,其中阶段 1(1 ~ 71 d)曝气量 1.0 L·min^{-1},阶段 2(71 ~ 119 d)曝气量 0.5 L·min^{-1}.

1.3 EPS 的提取

取 50 mL 污泥混合液,在4 000 r·min^{-1}下离心 10 min 后,弃去上清液后加入等体积的 0.9% NaCl 溶液,摇匀后 80℃水浴 30 min,在4 000 r·min^{-1}下离心 10 min 后,取上清液经 0.45 μm 滤膜过滤后即为 EPS. EPS 主要成分为蛋白质和多糖,两者之和即为 EPS 的含量.

1.4 水质指标测定方法

本实验过程中对 COD、NH_4^+-N、NO_2^--N 和 NO_3^--N 等常规水质指标进行监测,每两天测定一次. NH_4^+-N、NO_2^--N和NO_3^--N 分别采用水杨酸比色法、*N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法和紫外分光光度法测定; COD 采用重铬酸钾法测定; MLSS 采用重量法测定; 蛋白质采用 Folin-酚分光光度法测定,多糖采用蒽酮比色法测定.

另外,当 SBR1 运行第 113 d,SBR3 运行第 18、69 和 113 d 时(盐度分别为 0‰、15‰和 30‰)取活性污泥样品,命名为 F-3、T-1、T-2 和 T-3.

1.5 DNA 提取和 PCR 扩增

采用 SDS 方法对样本的基因组 DNA 进行提取,利用琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 的纯度和浓度,使用无菌水稀释样本 DNA 至1 ng·μL^{-1}. 以稀释后的基因组 DNA 为模板,采用引物 515F、806R 和高效高保真酶对 16S rDNA 的 V4 区域进行扩增,确保扩增效率和准确性.

1.6 高通量测序与 OTUs 聚类

采用 Illumina NovaSeq 测序平台进行双末端测序(paired end),经过 Reads 拼接过滤,OTUs(operational taxonomic units)聚类,进行物种注释及丰度分析; 通过 α 多样性(α diversity)和 β 多样性分析(β diversity),可以揭示出样品中物种组成和样本间群落结构的差异.

2 结果与讨论

2.1 不同提盐速率下盐度对 COD 去除效果的影响

如图 2 所示,各个盐度阶段初期,COD 去除率均出现明显的下降,表明微生物的活性受到抑制. 经过长时间的驯化,COD 去除率达到 85% 左右. 当 SBR1 盐度低于 20‰,COD 去除率高于 80% ; 盐度高于 20‰,COD 去除率降至 70% 左右,且需较长适应时间达到较好的去除效果. 相较于 SBR1,SBR2 能够很快适应盐度变化. SBR3 仅在 71 ~ 83 d(活性污泥恢复期)COD 去除率较低,其它期间,均表现出良好的 COD 降解能力. Wang 等[12]的研究结果与本研究的类似,当盐度低于 30‰,COD 去除率高于 90%,

但盐度提升至 60‰，去除率降至 33%．也有研究报道，采用活性污泥法处理皮革废水[13]，出水 COD 平均为 225 mg·L⁻¹，去除率约为 70%．这种差异可能是由于实际废水中含有难降解有机物且有机负荷较高．

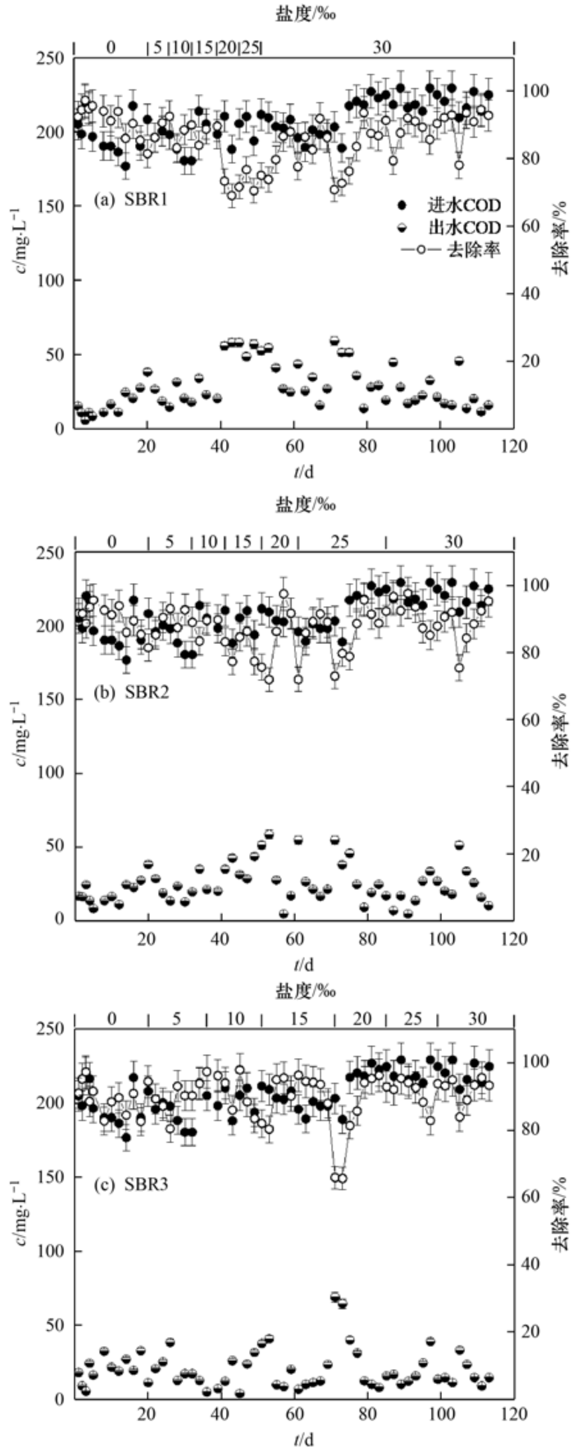


图 2　不同提盐速率下出水 COD 的变化

Fig. 2　Variation in COD in effluent at different rates of salinity increase

2.2　不同提盐速率下盐度对脱氮性能的影响

图 3 所示，提盐速率和盐度对NH_4^+-N去除影响较小．类似地，Navada 等[14]的研究也发现提盐速率

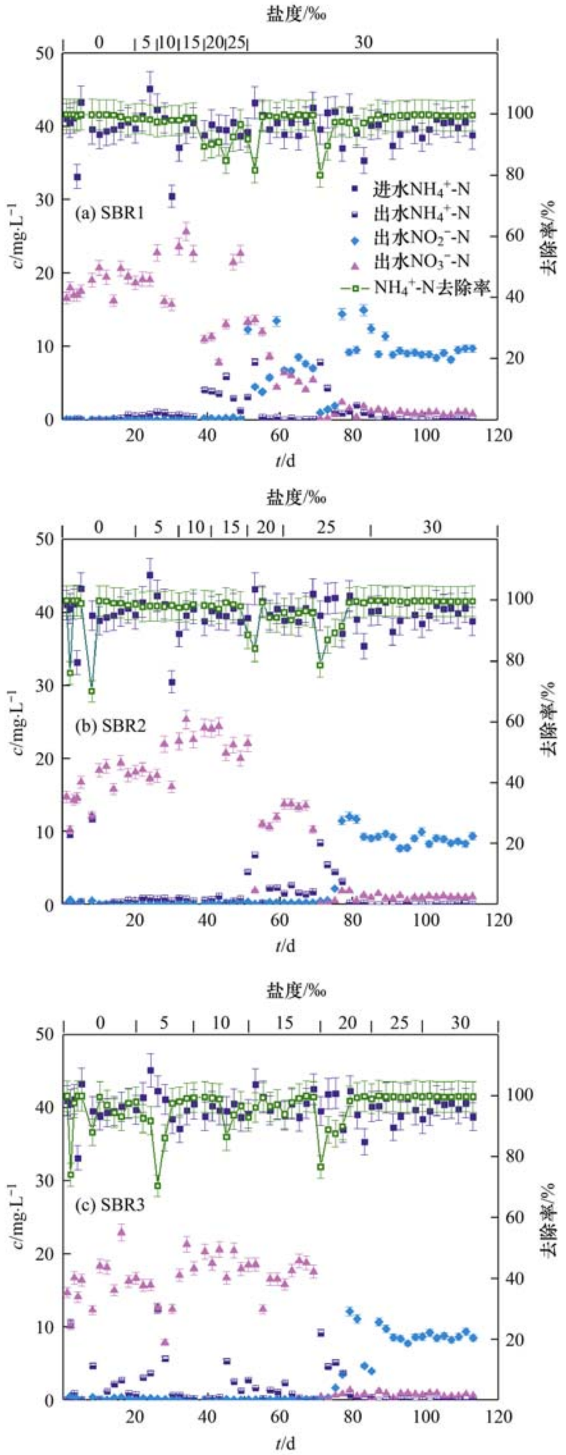


图 3　不同提盐速率下出水氮素的变化

Fig. 3　Variation in nitrogen in effluent at different rates of salinity increase

对氨氧化能力影响较小．当 SBR1 盐度提升至 30‰，出水NO_2^--N浓度高于NO_3^--N，表明高盐抑制NO_2^--N向NO_3^--N 的转化[15]，实现短程硝化．当 SBR2 盐度为 20‰，NO_2^--N出现积累，但 NAR 较低，值得注意的是，出水NO_3^--N 大幅减少，由 22.67 mg·L⁻¹降至 13.39 mg·L⁻¹．SBR3 盐度低于 20‰，出水以NO_3^--N为主，脱氮途径仍为传统的硝化-反硝化；盐度为 30‰，出水NO_3^--N 浓度极低，NO_2^--N浓度为 8.69

mg·L^{-1}.

图 4 为不同提盐速率下 NAR 和总氮(total nitrogen, TN)去除率的变化. SBR1 盐度为 25‰, NAR 突然升高; 盐度升至 30‰,NAR 约为 60%; 降低曝气量后 NAR 明显升高,稳定在 90% 左右,TN 去除率约为 75%. 当 SBR2 和 SBR3 盐度高于 20‰, 均实现 NO_2^--N 积累, NAR 和 TN 去除率与 SBR1 相似.

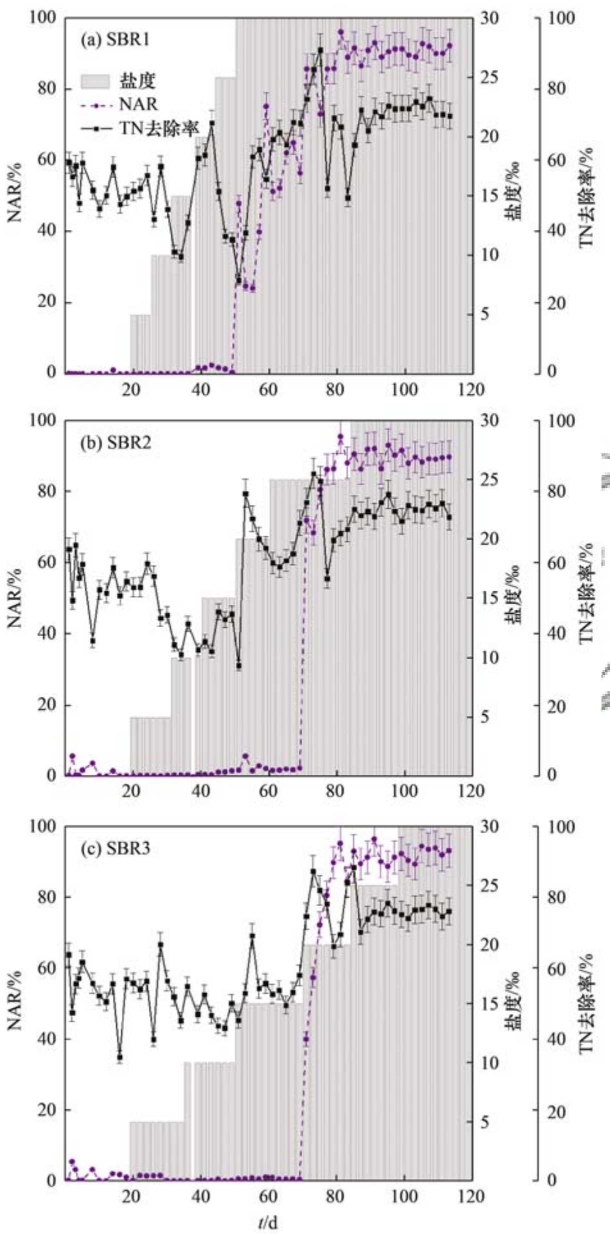


图 4 不同提盐速率下 NAR 和 TN 去除率的变化

Fig. 4 Variation in NAR and TN removal rates in different rates of salinity increase

图 5 为特定周期内 NH_4^+-N、NO_2^--N 和 NO_3^--N 的变化,其中图 5(a) ~ 5(c)为 67 d 周期实验,图 5(d)为 95 d 周期实验. 由图 5(a)可知,盐度为 30‰,SBR1 实现短程硝化,且较高曝气量不利于 NO_2^--N 积累[16]. 图 5(b)所示,SBR2 好氧段末期 NO_2^--N 浓度很低,但整个周期仍有一定的 NO_2^--N,推测部分 NH_4^+-N 通过短程硝化-反硝化得以去除,提高碳源利用率[17],降低出水 TN. 由图 5(c)和 5(d)可知,盐度为实现短程硝化的决定性因素,盐度为 15‰,缺氧段末期 NO_2^--N 和 NO_3^--N 较高; 盐度为 25‰,周期内 NO_3^--N 浓度较低,缺氧段反硝化主要为 NO_2^--N.

上述实验结果表明, 20‰的盐度为实现短程硝化的阈值,较低的曝气有利于 NO_2^--N 积累,提高碳源利用率,提高脱氮性能.

2.3 不同提盐速率下盐度对 SVI 的影响

通过污泥体积指数(sludge volume index, SVI)表征污泥的沉降性能. 如图 6 所示,驯化初期 SVI 约为 50 mL·g^{-1},盐度提升后,SBR1 和 SBR3 污泥 SVI 显著下降,在 50 d 降至 30 mL·g^{-1}左右. 推测高盐环境抑制了丝状菌生长,污泥絮体紧密结合,提高污泥的沉降性能[18]. SBR2 污泥 SVI 随着盐度提升无明显变化,为 50 ~ 60 mL·g^{-1},但恢复期出现污泥膨胀现象.

2.4 不同提盐速率下盐度对 EPS 的影响

图 7 为不同提盐速率下 EPS 中蛋白质和多糖含量的变化情况. 结果表明,EPS 含量(以 VSS 计,下同)随着盐度提升而增加. 最初 EPS 主要为蛋白质,多糖很低. SBR1 盐度为 20‰,多糖为 13.9 mg·g^{-1}(41 d); SBR2 和 SBR3 盐度为 15‰,多糖升至 13.5 mg·g^{-1}(41 d)和 14.5 mg·g^{-1}(67 d). 有研究发现,多糖可减轻钠离子对细胞的压力,在保护细胞中发挥重要作用[19]. 本实验, 15‰的盐度为微生物大量分泌多糖的阈值. 也有研究报道,蛋白质随着盐度升高而降低[20],本实验中蛋白质含量明显升高,该差异可能是由于污泥特性和最终的盐度不同所造成.

2.5 微生物群落丰富度和多样性分析

Shannon 指数常用来评价微生物多样性,Shannon 指数越大,说明微生物多样性越高[21]. 如表 1 所示,随着盐度提升,SBR3 活性污泥 Shannon 指数由 8.06 降至 6.91(盐度 15‰)和 6.17(盐度 30‰). 而 SBR1 盐度为 30‰,活性污泥 Shannon 指数为 4.34. 表明快速提盐驯化活性污泥会显著降低微生物多样性.

根据测序结果,绘制 Venn 图(图 8). 样品 T-3 与 T-2 共有物种同 T-1 与 T-2 共有物种对比,明显减少,表明部分微生物难以适应高盐环境而被淘汰. 当盐度为 30‰,相比 SBR1,SBR3 的 OTUs 数目更多,说明较长的驯化时间能够使微生物更好适应高

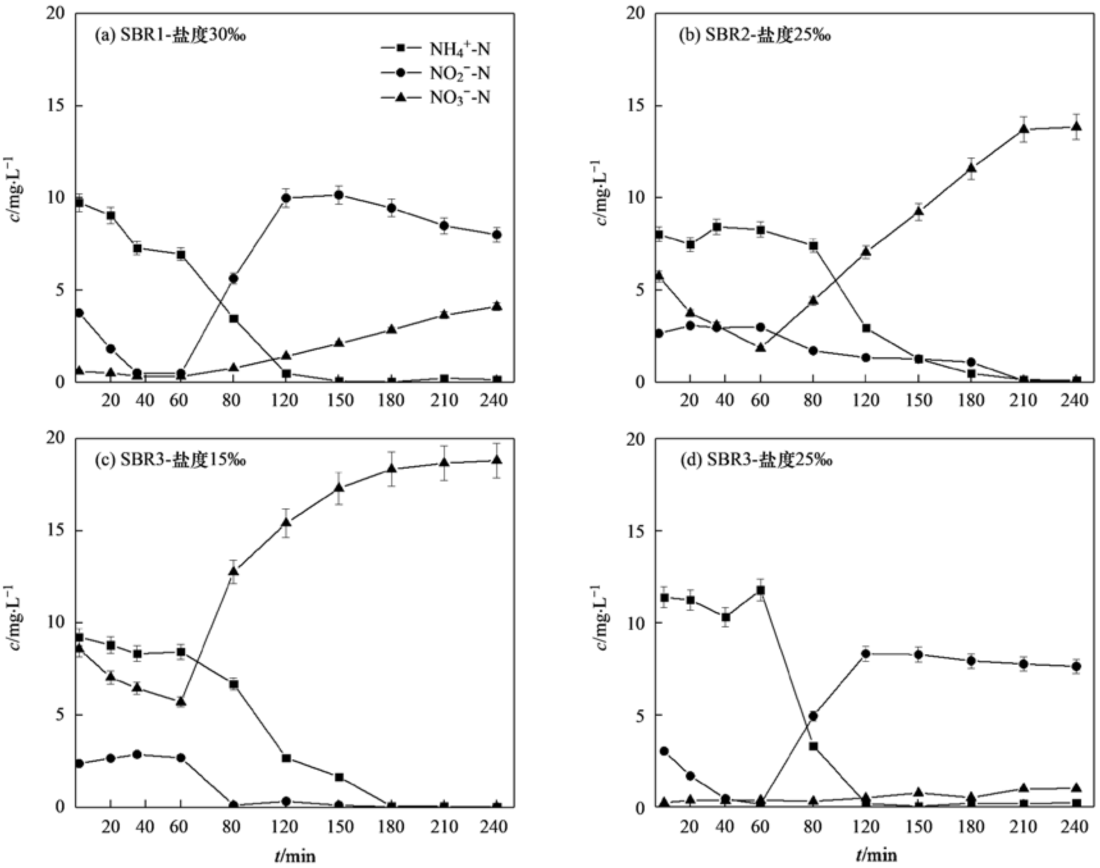


图 5　特定周期内 SBR1、SBR2 和 SBR3 中氮素的变化

Fig. 5　Variation in nitrogen in specific cycle of SBR1, SBR2, and SBR3

表 1　活性污泥多样性指数

Table 1　Diversity of activated sludge samples

样品	OTUs	Ace 指数	Chao 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
T-1	2 630	2 978	2 819	8. 06	0. 979
T-2	2 772	2 978	2 937	6. 91	0. 894
T-3	2 000	2 247	2 209	6. 17	0. 947
F-3	1 347	1 619	1 547	4. 34	0. 842

盐环境[22].

2. 6　微生物群落结构分析

对门水平上相对丰度排名前 10 的菌门(图 9)进行分析, 样品中主要包括: Proteobacteria、Actinobacteria、Bacteroidota、Chloroflexi 和 Planctomycetes 菌门. 据报道,前 4 个菌门在很多环境样品中占比较大[21]；Proteobacteria 和 Bacteroidota 存在与脱氮除磷相关的功能菌[23]；Planctomycetes 存在脱氮菌属,且在海水微生物群落构成中含量较多[24]. 当 SBR3 盐度由 0 提升至 30‰,Proteobacteria 由 20. 74% (T-1)增加至 40. 26% (T-3),相应 SBR1 盐度为 30‰时,Proteobacteria 占比为 34. 18% (F-3). 快速提盐后, Actinobacteria 在 SBR1 占比为 35. 42%,高于 SBR3 的 17. 43%,表明 Actinobacteria 能够抵御快速提盐的选择压力,并成为高盐环境下的优势菌门.

本实验还从属水平上对 4 个样品中前 35 位的微生物菌属进行分析,绘制相对丰度柱状图(图 10). 随着盐度增加, *Candidatus_Competibacter* 和 *Ferruginibacter* 相对丰度由 2. 22% 和 1. 69% 均降至为 0；而 *Micropruina* 受盐度影响较小,经快速提盐和缓慢提盐,相对丰度分别为 34. 1% 和 11. 4%,具有良好的耐盐性. Huang 等[25] 的研究发现,当盐度为 12‰, 在缺氧/好氧交替运行模式下, *Candidatus_Competibacter* 在反硝化过程中起主要作用；据报道,污水处理厂的活性污泥样品中普遍含有 *Ferruginibacter*,能够水解有机物,在高 COD 浓度的环境中相对丰度较高[26]. Wang 等[27] 的研究也发现 *Micropruina* 具有很强的耐盐特性,盐度为 0 ~ 80‰, *Micropruina* 在生物膜中相对丰度较高.

盐度为 30‰,优势菌属发生变化,*Denitromonas*、

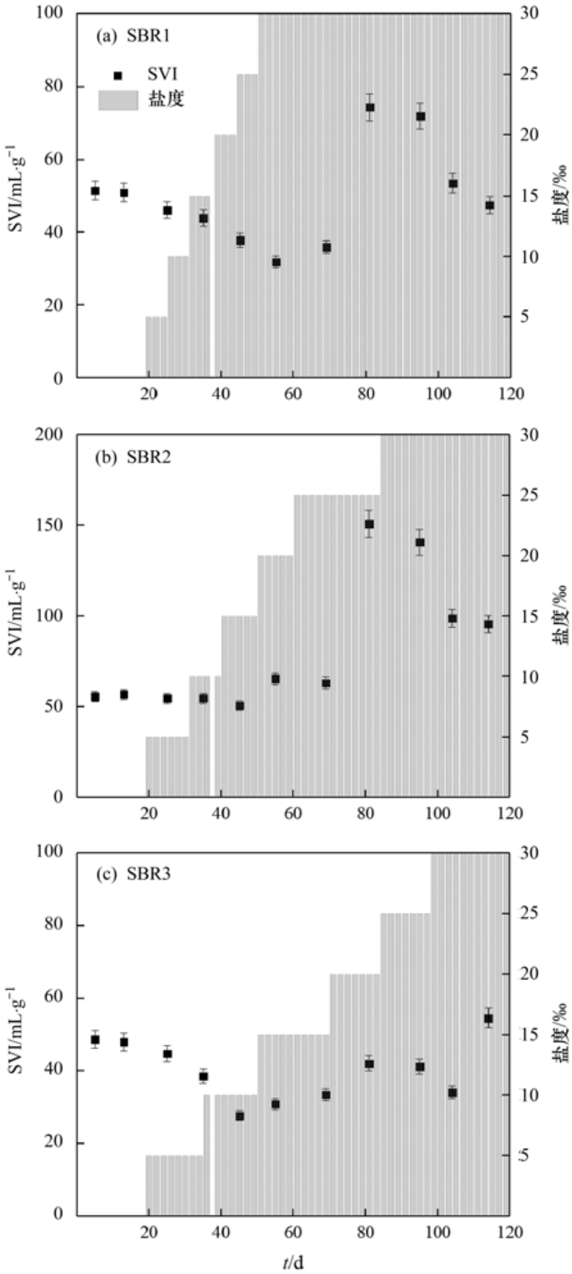


图 6 不同提盐速率下 SVI 的变化

Fig. 6 Variation in SVI in different rates of salinity increase

TM7a 和 *Marinicella* 的相对丰度明显升高,快速提盐后占比为 3.91%、13.3% 和 14.5%,缓慢提盐后占比为 7.22%、4.12% 和 11.6%. 推测高盐条件造成菌群间的竞争压力减小,有利于 *Denitromonas*、*TM7a* 和 *Marinicella* 的生长. 属于红环菌科的 *Denitromonas* 是一种反硝化菌[28],同时 *Marinicella* 可将NO_3^--N 还原为 N_2[29],与该系统较强的反硝化性能相一致. 提盐速率对 *Defluviimonas*、*Maribacter*、*Denitratisoma* 和 *Arenimonas* 影响较大. 快速提盐至 30‰,占比接近于 0;缓慢提盐至 30‰,占比分别为 0.712%、0.629%、1.09% 和 2.13%. 据报道,*Denitratisoma*、*Defluviimonas* 和 *Arenimonas* 均具有反硝化脱氮特性[30~32]. 上述表明,随着盐度增加,污泥中反硝化菌群结构发生明显变化;对比缓慢提盐,快速提盐后反硝化菌的类别明显减少.

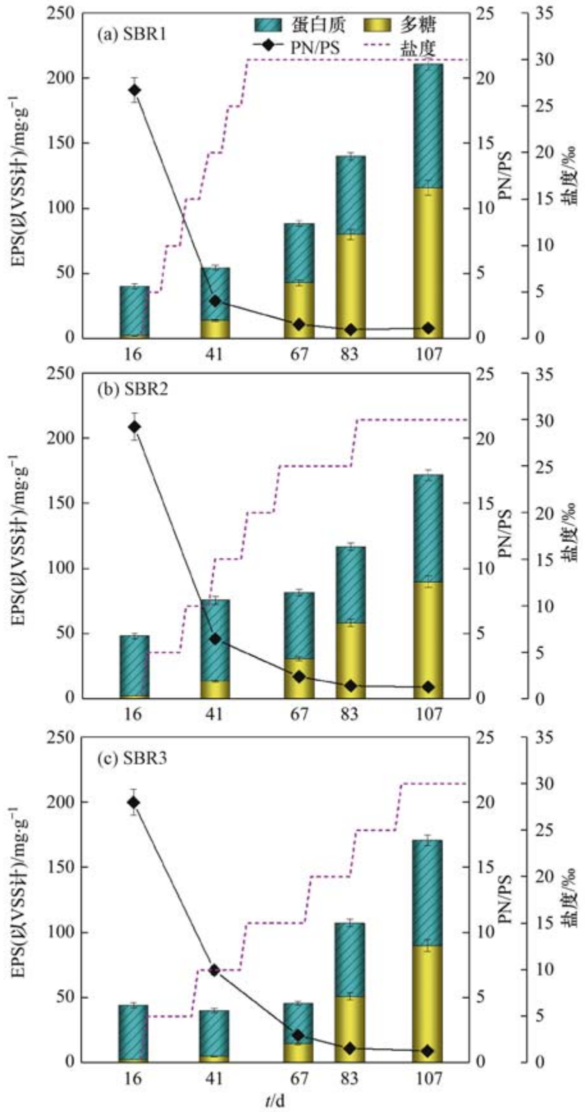


图 7 不同提盐速率下 EPS 的变化

Fig. 7 Variation in EPS concentration in different rates of salinity increase

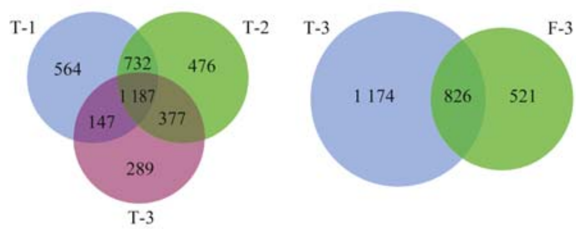


图 8 OTUs 分布维恩图

Fig. 8 Venn diagrams showing the distribution of OTUs

2.7 盐度对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的影响

为更深入了解盐度对硝化菌的影响,从属层面对氨氧化菌(*Nitrosomonas*)和亚硝酸盐氧化菌(*Nitrotoga*)进行分析(图 11). 随着盐度升高,SBR3 污泥样品 *Nitrosomonas* 相对丰度先降低后升高,维

持在0.3%~0.5%；然而，*Nitrotoga*随盐度升高明

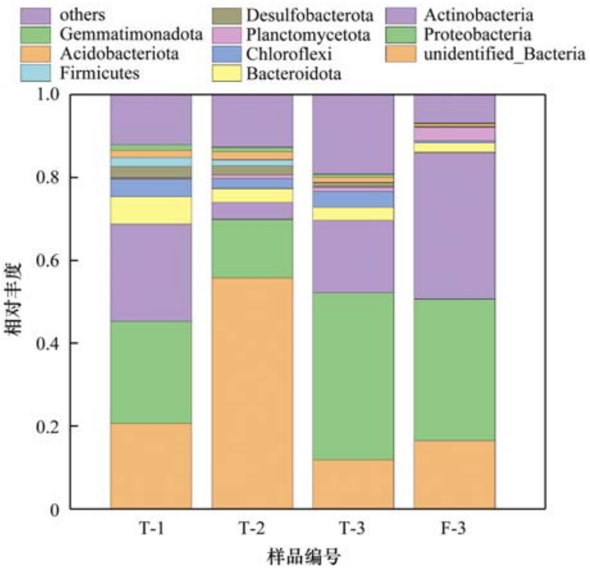
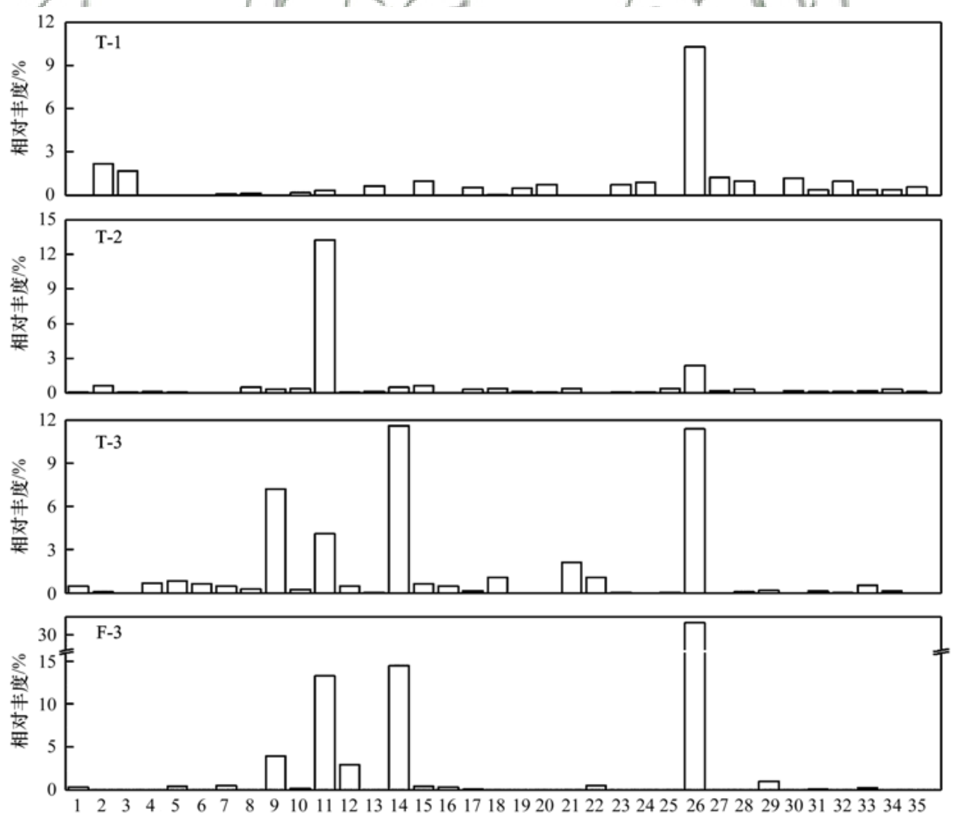


图 9　门水平细菌群落结构及分布

Fig. 9　Bacterial community structure and distribution of samples at the phylum level

显减少，由最初 0.948‰降至 0.327‰（盐度 15‰）及 0.052‰（盐度 30‰）. SBR1 污泥样品 *Nitrotoga* 相对丰度为 0.086‰，而 *Nitrosomonas* 相较于 SBR3 明显减少. 上述表明盐度为 15‰，NOB 还存在一定的活性，出水仍以NO_3^--N 为主；盐度提升至 30‰，NOB 无法适应高盐环境，相对丰度急剧减少，造成NO_2^--N积累. 推测当盐度提升至 20‰，由于 NOB 减少，形成短程硝化.

综上所述，采用逐步提升盐度的方式来驯化活性污泥时，提盐速率对NH_4^+-N去除效果影响较小；对比缓慢提盐（90 d），污泥经快速提盐驯化（30 d）后，微生物菌群结构多样性明显降低，多种反硝化细菌的相对丰度明显降低，反硝化菌属比较单一. 实际污水处理系统运行条件复杂，且一般需在缺氧段外加大量碳源实现深度脱氮，而快速提盐的驯化方式使得反硝化细菌相对丰度显著降低，进而降低碳源的利用率. 在实际工程中，应尽量采用缓慢的提盐速率来驯化活性污泥.



1 表示 *Vitellibacter*，2 表示 *Candidatus_Competibacter*，3 表示 *Ferruginibacter*，4 表示 *Defluviimonas*，5 表示 *Lewinella*，6 表示 *Maribacter*，7 表示 *Pseudomonas*，8 表示 *Sva0081_sediment_group*，9 表示 *Denitromonas*，10 表示 *MND1*，11 表示 *TM7a*，12 表示 *SM1A02*，13 表示 *Anaeromyxobacter*，14 表示 *Marinicella*，15 表示 *Defluviicoccus*，16 表示 *Oceanicaulis*，17 表示 *Pseudolabrys*，18 表示 *Denitratisoma*，19 表示 *Mariprofundus*，20 表示 *Flavihumibacter*，21 表示 *Arenimonas*，22 表示 *Alcanivorax*，23 表示 *Bradyrhizobium*，24 表示 *Terrimonas*，25 表示 *IheB3-7*，26 表示 *Micropruina*，27 表示 *9M32*，28 表示 *Ignavibacterium*，29 表示 *Arenibacter*，30 表示 *Oleiagrimonas*，31 表示 *Paracoccus*，32 表示 *Propioniciclava*，33 表示 *Nitrosomonas*，34 表示 *unidentified_MBNT15*，35 表示 *Truepera*

图 10　属水平细菌群落相对丰度柱状图

Fig. 10　Bacterial community relative abundance of samples at the genus level

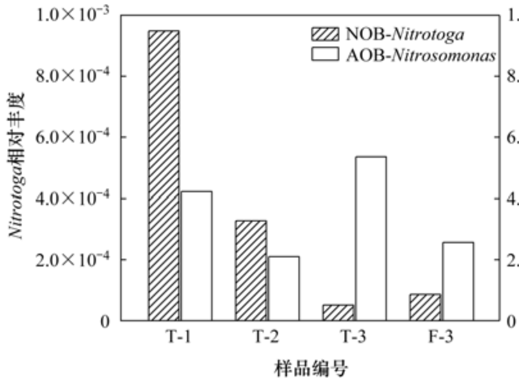


图 11 不同盐度下 *Nitrotoga* 和 *Nitrosomonas* 相对丰度变化

Fig. 11 Variations in *Nitrotoga* and *Nitrosomonas* abundance under different salinity levels

3 结论

(1)快速提盐驯化污泥,COD 和氨氮的去除率明显下降; 缓慢提盐驯化污泥,各盐度梯度下,COD 和氨氮的去除率均较高. 经过 120 d 驯化, 3 个反应器对污染物的去除效果没有明显差异.

(2)盐度是实现短程硝化的决定因素,随着盐度增加, *Nitrosomonas*(AOB)所受影响较小,而 *Nitrotoga*(NOB)明显减少. 由 SBR3 推测盐度 20‰ 是实现短程硝化的阈值.

(3)随着驯化时间增加,污泥沉降性能更好,且 SVI 与盐度没有明显的相关性; EPS 中蛋白质受盐度影响较低,当盐度升高至 15‰,多糖明显增加.

(4) *Micropruina*、*Denitromonas*、*TM7a*、和 *Marinicella* 具有良好的耐盐特性,盐度为 30‰,相对丰度较高; 缓慢提盐有利于 *Denitratisoma*、*Defluviimonas*、*Arenimonas* 和 *Denitromonas* 等反硝化菌属的生长.

参考文献:

[1] 高忠文, 蔺智泉, 王铎, 等. 我国海水利用现状及其对环境的影响[J]. 海洋环境科学, 2008, **27**(6): 671-676.
Gao Z W, Lin Z Q, Wang D, *et al*. Seawater utilization and impact on environment in China[J]. Marine Environmental Science, 2008, **27**(6): 671-676.

[2] Liu X M, Dai J, Wu D, *et al*. Sustainable application of a novel water cycle using seawater for toilet flushing[J]. Engineering, 2016, **2**(4): 460-469.

[3] Ahmadi M, Jorfi S, Kujlu R, *et al*. A novel salt-tolerant bacterial consortium for biodegradation of saline and recalcitrant petrochemical wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2017, **191**: 198-208.

[4] Hong J M, Li W B, Lin B, *et al*. Deciphering the effect of salinity on the performance of submerged membrane bioreactor for aquaculture of bacterial community[J]. Desalination, 2013, **316**: 23-30.

[5] Ferreira C I A, Calisto V, Otero M, *et al*. Removal of tricaine methanesulfonate from aquaculture wastewater by adsorption onto pyrolysed paper mill sludge[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 139-146.

[6] 万一平, 马丙瑞, 董俊伟, 等. 盐度对序批式生物膜反应器性能及微生物活性的影响[J]. 中国海洋大学学报, 2019, **49**(7): 94-101.
Wan Y P, Ma B R, Dong J W, *et al*. Effects of salinity on performance and microbial activity of sequencing biofilm batch reactor[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, **49**(7): 94-101.

[7] Wang X G, Yang T Y, Lin B, *et al*. Effects of salinity on the performance, microbial community, and functional proteins in an aerobic granular sludge system[J]. Chemosphere, 2017, **184**: 1241-1249.

[8] Wan C L, Yang X, Lee D J, *et al*. Partial nitrification of wastewaters with high NaCl concentrations by aerobic granules in continuous-flow reactor[J]. Bioresource Technology, 2014, **152**: 1-6.

[9] 许睿骁, 李冰, 张勇, 等. 压力环境下活性污泥的耐盐驯化过程[J]. 环境工程学报, 2017, **11**(7): 3952-3956.
Xu R X, Li B, Zhang Y, *et al*. Acclimation process of salt-tolerant activated sludge under pressurized condition[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, **11**(7): 3952-3956.

[10] Naufal M, Wu J H. Stability of microbial functionality in anammox sludge adaptation to various salt concentrations and different salt-adding steps[J]. Environmental Pollution, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114713.

[11] Bassin J P, Kleerebezem R, Muyzer G, *et al*. Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling of nitrifying sludge in sequencing batch reactors[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, **93**(3): 1281-1294.

[12] Wang Z C, Gao M C, Wang S, *et al*. Effects of salinity on performance and microbial community structure of an anoxic-aerobic sequencing batch reactor[J]. Environmental Technology, 2015, **36**(16): 2043-2051.

[13] 李新利, 吴迪, 张晶晶, 等. MBBR 处理皮革废水中试研究[J]. 中国给水排水, 2017, **33**(13): 30-34.
Li X L, Wu D, Zhang J J, *et al*. Comparison between MBBR and activated sludge process for treatment of leather wastewater[J]. China Water & Wastewater, 2017, **33**(13): 30-34.

[14] Navada S, Vadstein O, Tveten A K, *et al*. Influence of rate of salinity increase on nitrifying biofilms[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **238**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117835.

[15] She Z L, Zhao L T, Zhang X L, *et al*. Partial nitrification and denitrification in a sequencing batch reactor treating high-salinity wastewater[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, **288**: 207-215.

[16] Isanta E, Reino C, Carrera J, *et al*. Stable partial nitritation for low-strength wastewater at low temperature in an aerobic granular reactor[J]. Water Research, 2015, **80**: 149-158.

[17] Jia Y T, Zhou M M, Chen Y C, *et al*. Insight into short-cut of simultaneous nitrification and denitrification process in moving bed biofilm reactor: Effects of carbon to nitrogen ratio[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, **400**, doi: 10.1016/j.cej.2020.125905.

[18] He H J, Chen Y J, Li X, *et al*. Influence of salinity on microorganisms in activated sludge processes: a review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, **119**: 520-527.

[19] Corsino S F, Capodici M, Torregrossa M, *et al*. Physical properties and extracellular polymeric substances pattern of aerobic granular sludge treating hypersaline wastewater[J].

Bioresource Technology, 2017, **229**: 152-159.

[20] Chen Y J, He H J, Liu H Y, *et al*. Effect of salinity on removal performance and activated sludge characteristics in sequencing batch reactors[J]. Bioresource Technology, 2018, **249**: 890-899.

[21] 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 等. 淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 321-329.
Zhao T T, Qiao K, Wang L, *et al*. Measurements of bacterial community and biodiversity from activated sludge for a wastewater treatment containing starch[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 321-329.

[22] Trapani D, Bella G, Mannina G, *et al*. Comparison between moving bed-membrane bioreactor (MB-MBR) and membrane bioreactor (MBR) systems: influence of wastewater salinity variation[J]. Bioresource Technology, 2014, **162**: 60-69.

[23] 张冰, 吴林蔚, 文湘华. 全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3699-3705.
Zhang B, Wu L W, Wen X H. Potential source environments for microbial communities in wastewater treatment plants (WWTPs) in China[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3699-3705.

[24] Yoon D N, Park S J, Kim S J, *et al*. Isolation, characterization, and abundance of filamentous members of *Caldilineae* in activated sludge[J]. The Journal of Microbiology, 2010, **48**(3): 275-283.

[25] Huang W Y, She Z L, Gao M C, *et al*. Effect of anaerobic/aerobic duration on nitrogen removal and microbial community in a simultaneous partial nitrification and denitrification system under low salinity[J]. Science of the Total Environment, 2019, **651**: 859-870.

[26] Han X M, Wang Z W, Ma J X, *et al*. Membrane bioreactors fed with different COD/N ratio wastewater: Impacts on microbial community, microbial products, and membrane fouling[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(15): 11436-11445.

[27] Wang Z Z, Gao M C, Wei J F, *et al*. Long-term effects of salinity on extracellular polymeric substances, microbial activity and microbial community from biofilm and suspended sludge in an anoxic-aerobic sequencing batch biofilm reactor[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2016, **68**: 275-280.

[28] Zhang Y, Li B, Xu R X, *et al*. Effects of pressurized aeration on organic degradation efficiency and bacterial community structure of activated sludge treating saline wastewater[J]. Bioresource Technology, 2016, **222**: 182-189.

[29] van Duc L, Song B, Ito H, *et al*. High growth potential and nitrogen removal performance of marine anammox bacteria in shrimp-aquaculture sediment[J]. Chemosphere, 2018, **196**: 69-77.

[30] 许晓毅, 尤晓露, 吕晨培, 等. 包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 2052-2058.
Xu X Y, You X L, Lü C P, *et al*. Nitrogen removal performance and microbial community analysis of activated sludge immobilization[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 2052-2058.

[31] 王思宇, 李军, 王秀杰, 等. 添加芽孢杆菌污泥反硝化特性及菌群结构分析[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(12): 4649-4656.
Wang S Y, Li J, Wang X J, *et al*. Denitrification characteristics of Bacillus subtilis sludge and analysis of microbial community structure[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(12): 4649-4656.

[32] Foesel B U, Drake H L, Schramm A. *Defluviimonas denitrificans* gen. nov., sp. nov., and *Pararhodobacter aggregans* gen. nov., sp. nov., non-phototrophic *Rhodobacteraceae* from the biofilter of a marine aquaculture[J]. Systematic and Applied Microbiology, 2011, **34**(7): 498-502.

HUANJING KEXUE Vol. 42 No. 7
Environmental Science (monthly) Jul. 15, 2021

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission ······ LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, *et al.* (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on $PM_{2.5}$ Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period ······ LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, *et al.* (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta Based on Grids ······ HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration ······ LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, *et al.* (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China ······ ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, *et al.* (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of $PM_{2.5}$ Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China ······ LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, *et al.* (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides ······ XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, *et al.* (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed ······ HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake ······ YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, *et al.* (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer ······ ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, *et al.* (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City ······ YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, *et al.* (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland ······ LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, *et al.* (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou ······ BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, *et al.* (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan ······ ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, *et al.* (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface ······ CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, *et al.* (3223)
Identifying the Sources of Groudwater NO_3^--N in Agricultural Region of Qingdao ······ KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, *et al.* (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir ······ HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, *et al.* (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season ······ LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, *et al.* (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments ······ JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, *et al.* (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland ······ ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, *et al.* (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay ······ LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, *et al.* (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment ······ MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, *et al.* (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China ······ GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, *et al.* (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed ······ BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles ······ SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, *et al.* (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents ······ QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, *et al.* (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants ······ LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, *et al.* (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant ······ WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge ······ DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, *et al.* (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants ······ TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, *et al.* (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitritation-ANAMMOX SMBBR ······ LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, *et al.* (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source ······ TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, *et al.* (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System ······ LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, *et al.* (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration ······ ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, *et al.* (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors ······ GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, *et al.* (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure ······ QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, *et al.* (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent ······ ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, *et al.* (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018 ······ WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, *et al.* (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields ······ HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, *et al.* (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH_4 and N_2O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions ······ LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, *et al.* (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil ······ YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, *et al.* (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands ······ ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, *et al.* (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil ······ CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, *et al.* (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province ······ LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen ······ LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, *et al.* (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil ······ ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, *et al.* (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials ······ YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, *et al.* (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau ······ LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, *et al.* (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain ······ LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, *et al.* (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost ······ XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, *et al.* (3565)