

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 邓露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性

邓翠兰^{1,2}, 郭露^{1,2}, 汪晓军^{1,2,3*}, 陈振国^{3,4}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006; 3. 佛山市化尔铵生物科技有限公司, 佛山 528300; 4. 华南理工大学化学与化工学院, 广州 510665)

摘要: 本研究以沸石为重要原料研制新型沸石悬浮填料, 并将其用于启动沸石悬浮填料移动床反应器(ZMBBR), 与装填普通陶粒的陶粒悬浮填料移动床(CMBBR)对比考察其亚硝化性能。结果表明: 通过游离氨(FA)抑制的方法快速实现两种反应器的稳定亚硝化, 两个反应器出水亚硝酸氮积累率均能达到90%以上; 沸石对铵离子的吸附解吸作用使ZMBBR比CMBBR更快缓解FA对AOB的抑制, 更有利于快速实现亚硝化; 当 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 分别为 $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1\,050 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CMBBR与ZMBBR均能保持长期稳定的亚硝化, NPR_{AVG} 分别为 $0.43 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 和 $1.26 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, ARE分别为82.21%和88.85%; 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 由 $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐升至 $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 过程中CMBBR的最大亚硝酸氮产率(NPR_{max})仅为 $0.5634 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $750 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\rho(\text{FA})$ 为 $166 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CMBBR受FA抑制崩溃; 而ZMBBR的 NPR_{max} 可达 $1.800 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反应器在 $\rho(\text{FNA})$ 达到峰值 $1.9611 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后运行效果变差, 随后 $\rho(\text{FA})$ 增至 $158 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NPR 大幅降至 $0.9028 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, ZMBBR运行效果显著变差。高通量测序表明, ZMBBR和CMBBR的优势菌群均为*Nitrosomonas europaea*, 相对丰度分别为11.15%和10.92%。

关键词: 沸石悬浮填料; 陶粒; 亚硝化; 生物移动床(MBBR); 高通量测序

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0409-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104151

Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment

DENG Cui-lan^{1,2}, GUO Lu^{1,2}, WANG Xiao-jun^{1,2,3*}, CHEN Zhen-guo^{3,4}

(1. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Cluster, Guangzhou 510006, China; 3. Huanan Biotech Co., Ltd., Foshan 528300, China; 4. School of Chemistry and Chemical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510665, China)

Abstract: A new type of zeolite-suspended packing was developed by using zeolite as an important raw material, which was then used to start the zeolite moving bed biofilm reactor (ZMBBR). ZMBBR was compared with the ceramsite moving bed biofilm reactor (CMBBR) packed with ordinary ceramsite-suspended packing to investigate the different nitrification performance. The results showed that stable nitrification was successfully achieved in two reactors by the inhibitory effect of free ammonia (FA), and both of their nitrite accumulation rates (NAR) reached 90%; due to the adsorption of zeolite to ammonium, ZMBBR relieved the inhibition of FA on AOB faster than CMBBR and achieved nitrification earlier; CMBBR and ZMBBR could maintain long-term stable nitrosation when $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ was $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $1\,050 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and NPR_{AVG} was $0.43 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ and $1.26 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, respectively, and $\text{ARE}_{\text{CMBBR}} = 82.21\%$ and $\text{ARE}_{\text{ZMBBR}} = 88.85\%$. In the process of the influent $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ gradually increasing from $250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ to $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, the maximum nitrite production rate (NPR) of CMBBR was $0.5634 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; when $\rho(\text{FA})$ reached $166 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at the influent $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ of $750 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CMBBR broke down for the heavy inhibition of FA. The maximum NPR of ZMBBR was $1.800 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, and the performance of ZMBBR was getting worse after the $\rho(\text{FNA})$ reached the peak value of $1.9611 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ at the influent $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ of $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Subsequently, the $\rho(\text{FA})$ of ZMBBR reached $158 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ rapidly, the NPR dropped significantly to $0.9028 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, and the performance of ZMBBR became significantly worse. It was demonstrated by high-throughput sequencing analysis that the dominant strain of ZMBBR and CMBBR was *Nitrosomonas europaea*, and the relative abundances of *N. europaea* in ZMBBR and CMBBR were 11.15% and 10.92%, respectively.

Key words: zeolite-suspended packing; ceramsite; nitrification; moving bed biofilm reactor (MBBR); high-throughput sequencing

随着经济的飞速发展,大量的氨氮随人类活动产生的各类污水进入水体^[1,2], 2017年全国污水氨氮排放总量达139.51万t,由此引发的水环境问题不容忽视^[3,4]。作为目前最常见的生物脱氮工艺,完全硝化反硝化工艺在硝化阶段曝气能耗高、反硝化阶段碳源投加量大且污泥产量大,运营成本高,是一种高碳高耗能的脱氮技术。因而研发经济高效的生物脱氮工艺成为水污染控制领域的研究热点^[5,6]。与传统完全硝化反硝化工艺相比,以亚硝化为前提的厌氧氨氧化工艺具有低能耗、污泥减量和消耗

碳源等优势^[7~9],而维持高效稳定的亚硝酸氮积累是新型生物脱氮工艺推广应用的关键技术难点。目前常通过控制游离氨(FA)选择性抑制亚硝酸盐氧化菌(NO)而不抑制氨氧化细菌(AOB)来实现稳定亚硝化^[10,11],但FA对NOB的抑制会随着氨氮的

收稿日期: 2021-04-16; 修订日期: 2021-06-18

基金项目: 2019年广东省科技计划项目重点领域研发计划项目(2019B110205002); 中国博士后科学基金项目(2019M662930)

作者简介: 邓翠兰(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染控制理论与技术, E-mail: 916624209@qq.com

* 通信作者, E-mail: cexjwang@scut.edu.cn

氧化减少而削弱. 有研究表明,沸石具有微孔结构是良好的生物载体,对铵离子的强离子交换能力能够控制 FA 浓度从而实现稳定亚硝化^[12~14]. 但沸石用作固定床填料^[15,16]时孔隙率小、易堵塞,不利于提升传质效率,还需定期反冲洗,而悬浮填料则无需固定,可直接投加使用^[17],且反应器内悬浮填料呈现流化态,更有利于传质,从而提高亚硝化处理效率. 然而目前尚未有沸石悬浮填料应用的相关研究报道.

本研究通过装填沸石研制新型沸石悬浮填料,并将其用于启动沸石悬浮填料移动床反应器 (zeolite moving bed biofilm reactor, ZMBBR), 同时与装填普通陶粒的陶粒悬浮填料移动床 (ceramsite moving bed biofilm reactor, CMBBR) 作对比,探究这两种反应器处理高氨氮废水时亚硝化性能差异,再结合高通量测序方法对比其中微生物群落变化与差异情况,以期 ZMBBR 应用于高氨氮废水的亚硝化处理提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 实验流程和反应装置

本实验两个反应器均由有机玻璃制成,长和宽各280 mm,高600 mm,有效容积47 L,分别投加沸

石悬浮填料 (ZMBBR) 和陶粒悬浮填料 (CMBBR). 采用蠕动泵从反应器底部进水,溢流水并设沉淀池回流污泥,反应器底部设曝气头,通过流量计调控曝气量,如图 1 所示.

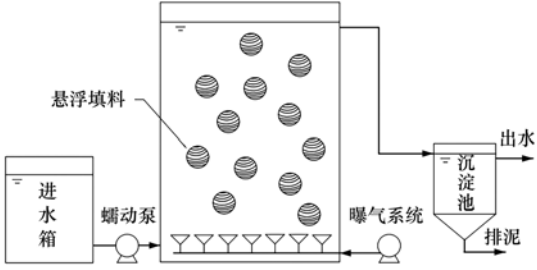


图 1 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

1.2 反应器填料

沸石悬浮填料: 本实验采用的沸石悬浮填料为直径 100 mm 的空心聚丙烯悬浮球,内部填充 60 g 沸石和适量的浮力配件调控其比重,使沸石悬浮填料在曝气条件下于反应器中翻滚. 主要参数见表 1.

陶粒悬浮填料: 为了对比沸石悬浮填料与传统活性污泥在亚硝化过程中微生物群落的变化与差异,将上述填料内的沸石更换为对 NH₄⁺-N 无吸附作用的陶粒,用来做实验对比.

表 1 填料技术参数

Table 1 Technical parameters of filler					
项目	粒径/mm	比表面积 /m ² ·g ⁻¹	密度 /g·cm ⁻³	氨氮吸附容量 /mg·g ⁻¹	价格 /元·t ⁻¹
沸石	3~4	500~800	2.00~2.20	8.23	1 800~2 000
陶粒	5~8	3.50~4.00	0.95~1.05	—	1 200~1 600

1.3 接种污泥和实验进水

本文取实验室培养成熟的普通硝化污泥作为反应器 ZMBBR 和 CMBBR 挂膜的接种污泥,接种污泥的 ρ (MLSS) 为 3 200 mg·L⁻¹, ρ (MLVSS) 为 2 095 mg·L⁻¹.

本实验进水采用的是自来水配置的模拟废水, NaHCO₃ 提供碱度, NH₄Cl 为氮源, 并投加微量元素、KH₂PO₄、CaCl₂ 和 MgSO₄ 组成的营养物质^[18], 不添加任何有机碳源. 本实验进水 ρ (NH₄⁺-N) 为 150~1 250 mg·L⁻¹, 碱度 (以 CaCO₃ 计) 为 1 050~8 750 mg·L⁻¹, 进水 pH 控制在 8.0~8.2.

1.4 分析方法

根据文献 [19], 氨氮 (NH₄⁺-N)、亚硝酸氮 (NO₂⁻-N) 和硝酸氮 (NO₃⁻-N) 分别采用纳氏试剂分光光度法、N-(1 萘基)-乙二胺分光光度法和紫外分光光度法测定; MLSS 和 MLVSS 采用重量法; 碱度采用电位滴定法 (以 CaCO₃ 计, 单位 mg·L⁻¹); pH

值, 溶解氧 (DO) 分别采用 PHS-3C 型 pH 计 (上海雷磁, 中国) 和 HQ30d 溶解氧仪 (哈希, 美国) 测定.

氨氮去除率 (ARE)、进水总氮负荷 (NLR)、亚硝酸氮积累率 (NAR) 和亚硝酸氮产率 (NPR) 参考文献 [20] 的公式进行计算; 游离氨浓度 [ρ (FA)] 和游离亚硝酸浓度 [ρ (FNA)] 分别根据 Anthonisen 等^[21] 提出的公式 (1) 和 (2) 进行计算.

$$\rho(\text{FA}) = \frac{17}{14} \frac{10^{\text{pH}}}{\exp\left\{\frac{6\,334}{(273+T)}\right\} + 10^{\text{pH}}}} \times \rho(\text{NH}_4^+\text{-N}) \tag{1}$$

$$\rho(\text{FNA}) = \frac{47}{14} \frac{1}{\exp\left\{-\frac{2\,300}{(273+T)}\right\} + 10^{\text{pH}}}} \times \rho(\text{NO}_2^-\text{-N}) \tag{2}$$

1.5 实验方法

本实验中两个反应器的悬浮填料填充率均为 25%, 采用上流式进水, 溢流水, 后接沉淀池回流污泥. 根据进出水情况, 本实验可分为两个阶段, 不

同阶段的运行参数详见表 2. 阶段 1 为启动阶段, 在进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下连续进水, 污泥全部回流, 直至填料表面形成淡黄色生物膜; 阶段 2 为负荷提升阶段, 考察两个反应器在不同

NLR 下的亚硝化性能及微生物群落的变化与差异. 整个实验过程温度控制在 $(26\pm 1)^\circ\text{C}$, 溶解氧 $4\sim 6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 进水碱度比(碱度与 NH_4^+-N 的质量比)为 7:1.

表 2 ZMBBR 与 CMBBR 在不同阶段下的运行条件
Table 2 Detailed operational conditions for different stages of the ZMBBR and CMBBR

阶段	反应器	时间/d	进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	HRT/h	NLR / $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	进水碱度(以 CaCO_3 计) / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	ZMBBR	1~12	150	12	0.300	1 050
	CMBBR	1~14	150	12	0.300	1 050
2	ZMBBR	13~86	250~1 250	16	0.375~1.875	1 750~8 750
	CMBBR	15~67	250~750	16	0.375~1.125	1 750~5 250

2 结果与讨论

2.1 ZMBBR 与 CMBBR 亚硝化的建立

在启动阶段, 本实验采用连续进水的方式来促进反应器快速实现氨氮废水的亚硝化. 启动阶段各反应器的进出水三氮浓度、NAR、 $\rho(\text{FA})$ 和 pH 等数值如图 2 所示. 反应器启动初期, 由于 ZMBBR 中沸石对铵离子的吸附能力和 CMBBR 中高碱度比下 pH 过高导致的氨吹脱现象, 两个反应器出水总氮浓度都明显低于进水总氮浓度. 运行 4 d 后 ZMBBR 的 NAR 就达到 95% 以上, 实现了亚硝化; 而 CMBBR 在同等运行条件下, 耗时 7 d 后 NAR 也达到了 95%, 进出水总氮浓度趋于相等. 在第 12 d 时 ZMBBR 出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 仅为 $10.56\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而在第 14 d CMBBR 的出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 也降低至 $10.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明两个反应器都实现了稳定亚硝化. 硝化过程中, FA 对 AOB 和 NOB 活性的抑制浓度分别为 $10\sim 150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.1\sim 1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [21]. 从图 2 可以看出, 由于沸石对铵离子的吸附解吸动态平衡作用[22], ZMBBR 内的 $\rho(\text{FA})$ 变化比 CMBBR 内的更为平缓, 第 4 d 就将 $\rho(\text{FA})$ 控制在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 而 CMBBR 没有这种“缓冲剂”, 于启动第 10 d 将 $\rho(\text{FA})$ 降到 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 解除了 FA 对 AOB 的抑制, 相比于 ZMBBR 更晚达到较低的出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$. 张功良[23]的研究在低溶解氧 ($0.3\sim 0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 下历时 70 个周期 (35 d) 才实现 SBR 反应器亚硝化的初步启动; 梁俊宇等[24]的研究在高温 [$(30\pm 1)^\circ\text{C}$]、低溶解氧 ($0.5\pm 0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 条件下, NAR 在 20 d 后才达到 80%. 相比而言, 本研究发现通过高 $\rho(\text{FA})$ 抑制 NOB 进而实现亚硝化是非常快速有效的方法, 且沸石悬浮填料比陶粒悬浮填料更有助于反应器亚硝化的快速启动.

2.2 ZMBBR 与 CMBBR 的亚硝化特性

$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 是 $\rho(\text{FA})$ 大小的主要影响因素, 可

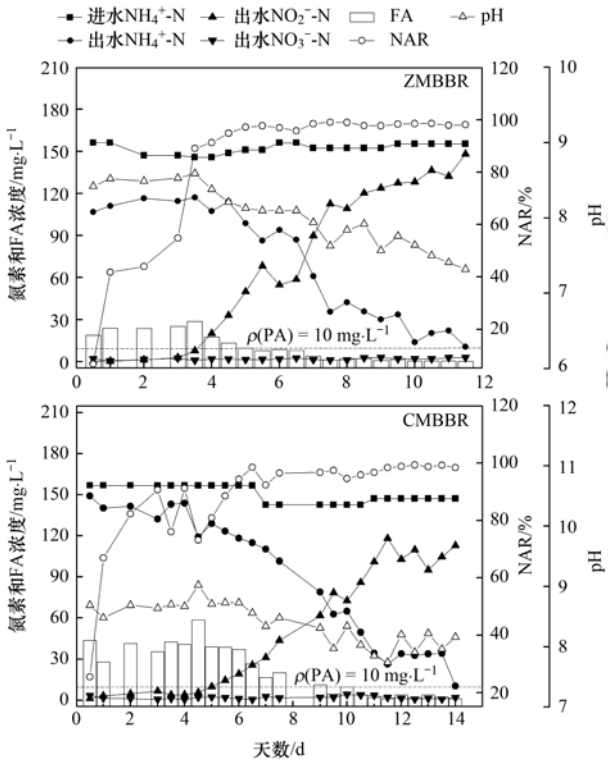


图 2 ZMBBR 与 CMBBR 启动阶段运行状况

Fig. 2 Operational performance during the start-up period of the ZMBBR and CMBBR

通过调整进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 来控制反应器内的 $\rho(\text{FA})$, 以实现 AOB 与 NOB 的不同程度抑制. 实验阶段 2 考察了不同进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 对 ZMBBR 和 CMBBR 亚硝化性能的影响, 结果如图 3 所示. 通过逐步将进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 从 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高至 $1\,250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 发现在 CMBBR 中, NAR 虽一直维持在 95% 左右, 但在进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $450\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 NPR 就达到最大值 (NPR_{max}) $0.5634\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 继续升高后反应器的 NPR 无法进一步升高, 出水平均 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 则由 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提升至 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 而 ZMBBR 在运行至第 35 d 后 NAR 开始逐渐降至 73%, 出水 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 升至 260

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 后逐渐提高进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 至 $950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NAR 开始回升, 第 66 d 升至 95%. 最终进

水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时 $\text{NPR}_{\max}$ 为 $1.800 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 是 CMBBR 的 3.2 倍.

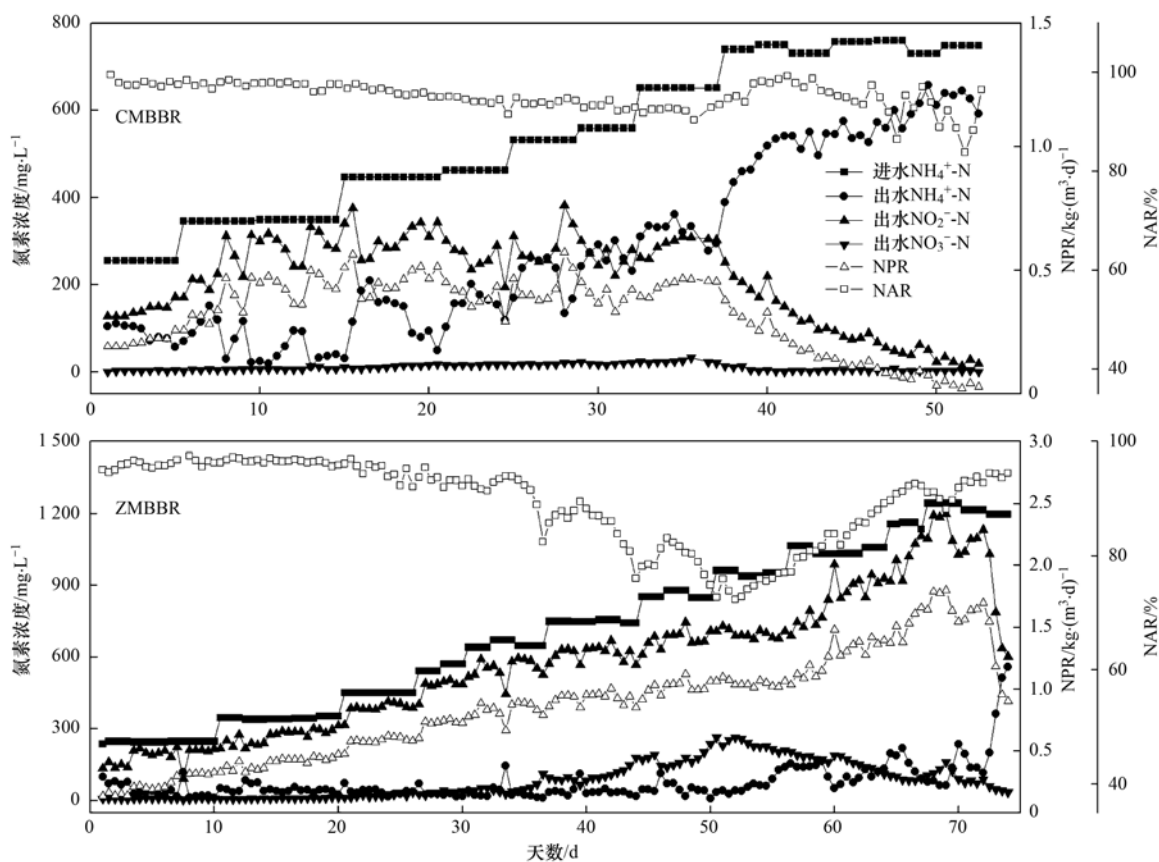


图3 不同进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 下 ZMBBR 和 CMBBR 的氮转化情况

Fig. 3 Transformation characteristics of nitrogen in the ZMBBR and CMBBR during different $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$

为了进一步了解 ZMBBR 与 CMBBR 的亚硝化机制, 计算两个反应器出水中 $\rho(\text{FA})$ 与 $\rho(\text{FNA})$ 的变化情况, 结果如图 4 所示. 在 CMBBR 中, 当 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 从 $450 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐提高到 $650 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\rho(\text{FA})$ 从 $25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐上升至 $110 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 由 $120 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐提高到 $360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 但 NPR 由 $0.4459 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 降到 $0.4389 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 减少了 1.5%, 说明此时 CMBBR 内的 AOB 菌已经受到一定程度的抑制, 亚硝化性能开始受到影响; 当 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 进一步提高到 $750 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, $\rho(\text{FA})$ 跃升到 $166 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($> 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), CMBBR 的 NPR 在 5 d 内下降到 $0.20149 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 第 15 d 仅为 $0.02145 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 与此同时, 反应器在高 pH 条件下也出现了氨吹脱现象, 溶液中部分 HCO_3^- 以 CO_2 的形式被吹脱导致反应器内 pH 升高, $\rho(\text{FA})$ 最终高达 $404.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 加速了反应器的崩溃. 因此, 要同时达到较低的出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 与较高的处理负荷, CMBBR 能够稳定运行的进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 应控制在 $350 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右 (具体数据详见表 3).

由于沸石对铵离子的吸附解吸作用, 前期 (1 ~ 50d) ZMBBR 中的 $\rho(\text{FA})$ 一直维持在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, $\rho(\text{FNA}) < 0.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{FA})$ 虽然处于抑制 NOB 的阈值, 但 NOB 在较低 FA 浓度条件下可以逐渐适应抑制^[15], 由图 3 可知, 从第 35 d 起反应器内的 NAR 开始下降; 为提高 $\rho(\text{FA})$ 以恢复 ZMBBR 的亚硝化性能, 第 50 ~ 68 d, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 由 $950 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐升高到 $1\,150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{FA}) > 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NAR 提高至 90%, 亚硝化性能得到恢复, 也进一步说明 $\rho(\text{FA})$ 是反应器实现亚硝化的主要因素; 由图 4 可知, 每次提高 NLR 都会导致 $\rho(\text{FA})$ 小幅提升至 $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 经 3 ~ 4 个周期回落, ZMBBR 表现出良好的抗冲击性能. 当进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 由 $1\,150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高至 $1\,250 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (第 66 ~ 69 d), 出水 $\rho(\text{FNA})$ 从 $0.0876 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 升至 $1.9611 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 此时 AOB 活性开始受到 FNA 严重抑制, 第 70 d 反应器的运行效果开始变差, 在随后几天内出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 浓度升高到 $560 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{FA})$ 剧增至 $158 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NPR 大幅降至 $0.9028 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 反应器运行效果显著变差. 由图 3 和

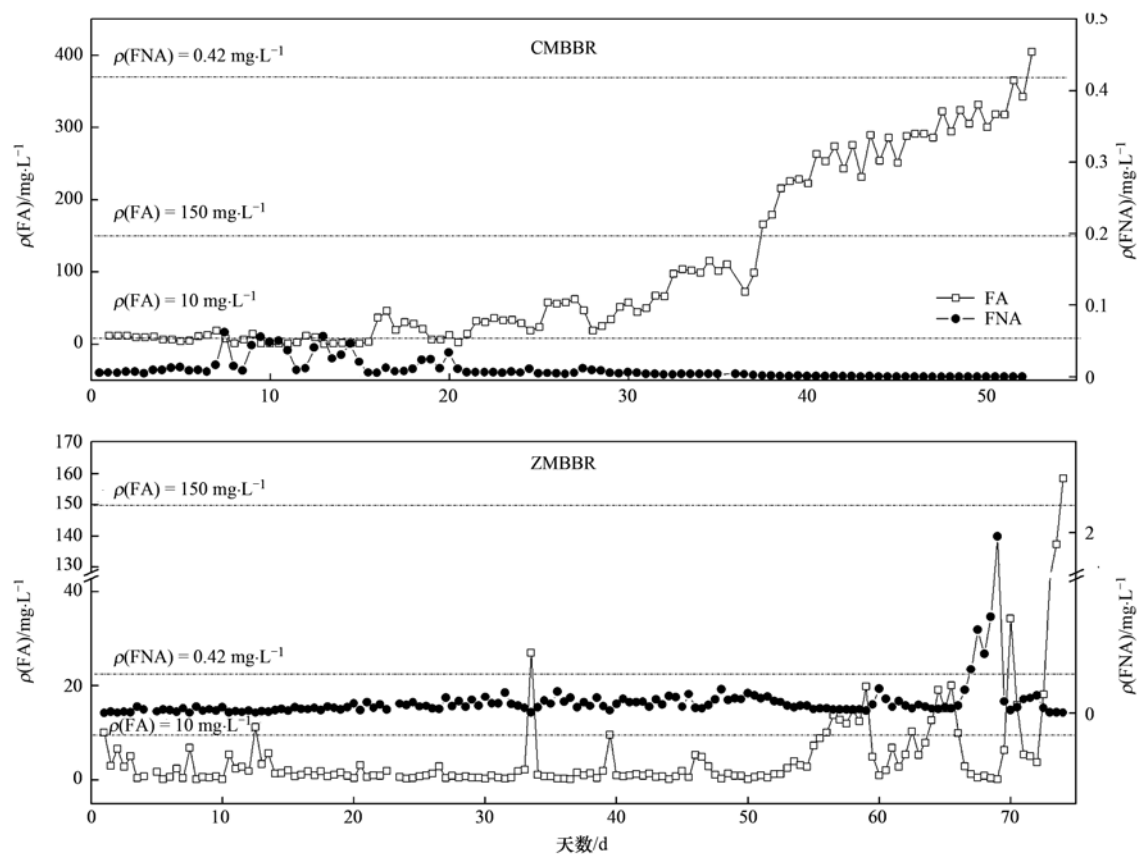


图4 CMBBR和ZMBBR出水 $\rho(\text{FA})$ 和 $\rho(\text{FNA})$ 的变化
Fig. 4 Overall variations in $\rho(\text{FA})$ and $\rho(\text{FNA})$ in the CMBBR and ZMBBR

图4可知,为保证ZMBBR的稳定运行,进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 不宜超过 $1\,050\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\rho(\text{FA})$ ($<10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)与 $\rho(\text{FNA})$ ($<0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)均在抑制AOB的阈值内,保证 $\text{NAR}>90\%$ 且拥有较高的ARE与NPR(表3).

有研究表明FNA会对硝化功能微生物产生抑制作用,但其抑制浓度阈值范围差异较大,Miao等^[25]的研究采用SBR处理模拟氨氮废水时发现,当 $\rho(\text{FNA})=0.118\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,反应器内AOB和NOB的活性分别下降27.7%和54.4%.Jiang等^[26]的研究发现A/A/O工艺内的活性污泥在 $\rho(\text{FNA})$

$=1.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下暴露18 h后,NOB完全失活,而AOB仅保持52.50%活性.在本实验中,第67 d ZMBBR的 $\rho(\text{FNA})$ 浓度达到 $0.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上,2 d后达到峰值 $1.961\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.在此过程中,反应器的亚硝化性能在出现峰值12 h后才被明显抑制,说明ZMBBR的硝化污泥对FNA具有更高的耐受度.本实验数据显示,第67~70 d $\rho(\text{FNA})$ 剧增的原因在于高NPR消耗大量碱度,使得pH从7.21降至6.65, $\rho(\text{FNA})$ 不断升高至 $1.961\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.这也与邓佳^[27]的研究发现pH变化比亚硝酸氮浓度和温度等变化对反应器硝化抑制作用更大的结论相一致.

表3 CMBBR与ZMBBR稳定运行参数与效果对比

Table 3 Comparison of operational parameters and operational performance of CMBBR and ZMBBR in stable operation						
反应器	进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{FA})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{FNA})$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NAR/%	ARE/%	NPR / $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$
CMBBR	350	0.50~19.09	0.008~0.062	≥ 95	81.21	0.43
ZMBBR	1 050	1.09~19.84	0.043~0.273	≥ 90	88.85	1.26

2.3 微生物群落分析

利用高通量测序方法,本实验从接种污泥、ZMBBR和CMBBR中分别获得了2148、1606和909 OTUs(操作分类单元),为分析ZMBBR和CMBBR实现亚硝化的生物群落变化及关键功能微生物,对序列分别在门、目和种水平上进行分类,结

果如图5所示.Seed(接种污泥)与驯化后ZMBBR和CMBBR的污泥群落区别明显,接种污泥的优势群落分别是Proteobacteria(59.73%)、Bacteroidetes(8.92%)和Chloroflexi(8.56%),而ZMBBR和CMBBR的优势群落分别是Proteobacteria(50.28%和49.23%)、Patescibacteria(20.23%和17.56%)

和 *Deinococcus-Thermus* (14.63% 和 13.71%)。门水平下与硝化作用相关的 *Proteobacteria* 占比下降,这与王瑞鑫等^[28]的研究发现 *Proteobacteria* 在亚硝化过程中得到增殖的结果不一致。但从目水平可见 β -

Proteobacteriales 由 3.32% 提高到 28.95% 和 25.36%,说明 *Proteobacteria* 中与亚硝化性能有关的微生物得到富集,无关微生物则被淘汰,这与污泥驯化后亚硝化性能增强的实验结果一致。

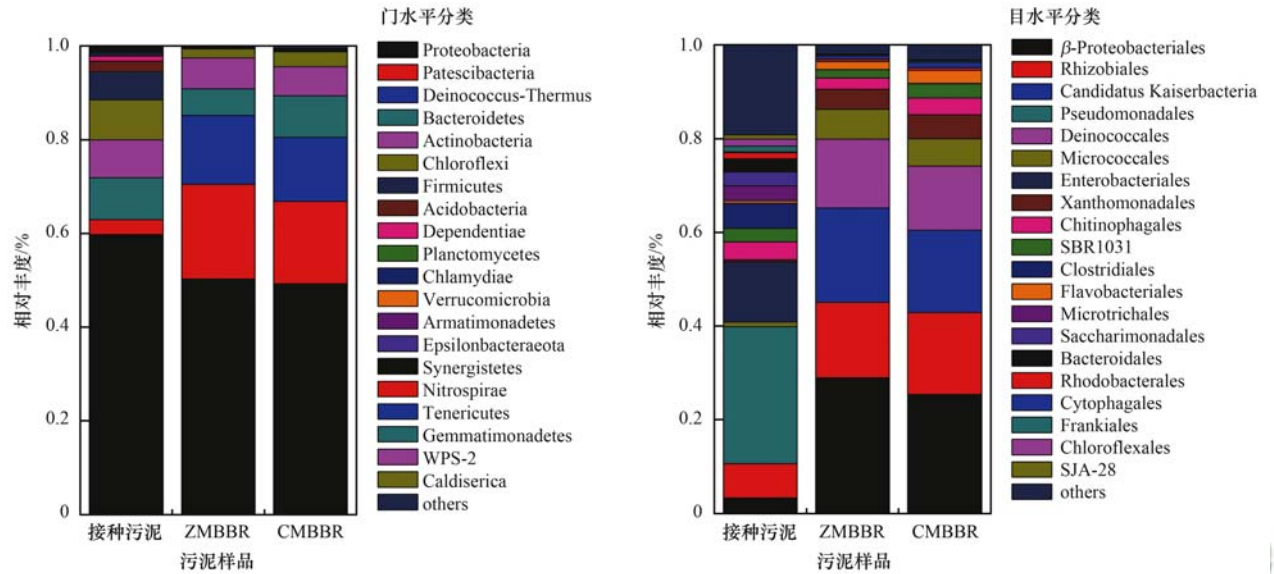


图5 接种污泥、ZMBBR 和 CMBBR 样品的微生物群落分析

Fig. 5 Microbial community analysis of seed sludge, ZMBBR samples, and CMBBR samples

表4展示了各样品在种水平上微生物丰度,作为AOB的优势菌属, *Nitrosomonas_europaea* 在Seed中的相对丰度仅为0.001643%,而该微生物在ZMBBR和CMBBR中的相对丰度则高达11.15%和10.92%。所有样品均未检测出 *Nitrospira*,表明ZMBBR和CMBBR均实现了AOB的富集和NOB的淘洗。

表4 不同样品种水平下AOB和NOB的相对丰度¹⁾/%

Table 4 Relative abundance of AOB and NOB at the genus level for different samples/%

功能微生物		接种污泥	ZMBBR	CMBBR
AOB	<i>Nitrosomonas_europaea</i>	0.001643	11.15	10.92
NOB	<i>Nitrospira</i>	ND	ND	ND

1) ND 表示未检测出

3 结论

(1)在常温(26±1)℃下,沸石悬浮填料移动床(ZMBBR)和陶粒悬浮填料移动床(CMBBR)分别经过12d和14d即可成功启动亚硝化,NAR均保持在95%左右。基于沸石对铵离子的吸附解吸作用,可使ZMBBR比CMBBR更快缓解FA对AOB的抑制,从而更快实现稳定亚硝化。

(2)为保证两个反应器亚硝化长期稳定运行,CMBBR的进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})=350\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为宜,获得较高的 $\text{NPR}_{\text{AVG}}[0.43\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}]$ 和较好的ARE[82.21%];而ZMBBR的进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 不宜超过

$1050\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,获得 $\text{NPR}_{\text{AVG}}=1.26\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,ARE=88.85%,均优于CMBBR的亚硝化性能。

(3)在进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $450\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,CMBBR的 NPR_{max} 为 $0.5634\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,NAR维持在95%左右,在进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $750\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,反应器中 $\rho(\text{FA})$ 高达 $166\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,AOB受到严重抑制导致CMBBR崩溃;而ZMBBR在进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 $1250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NPR_{max} 为 $1.800\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,是CMBBR的3.2倍, $\rho(\text{FNA})$ 达到峰值 $1.9611\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后ZMBBR运行效果变差,随后 $\rho(\text{FA})$ 剧增至 $158\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,NPR大幅降至 $0.9028\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,ZMBBR运行效果显著变差。

(4)高通量测序结果表明,长时间运行之后反应器中微生物群落结构发生显著变化,ZMBBR和CMBBR的优势菌群均为 *Nitrosomonas_europaea*,相对丰度分别为11.15%和10.92%,两个反应器均未检测出NOB。

参考文献:

[1] 杨垒. 高效异养硝化细菌的脱氮特性及其处理高氨氮废水研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
Yang L. Nitrogen removal characteristics of heterotrophic nitrifying bacteria and potential application for the treatment of high-strength ammonium wastewater[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
[2] 郑平, 徐向阳, 胡宝兰. 新型生物脱氮理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
[3] 李子成, 邓义祥, 郑丙辉. 中国湖库营养状态现状调查分析[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(S1): 209-213.

- Li Z C, Deng Y X, Zheng B H. Investigation of the eutrophication status of the lakes and reservoirs in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **35** (S1): 209-213.
- [4] 羌佳鑫. 基于氨氮快速吸附再生的短流程污水处理技术研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2020.
- Qiang J X. Research on short-flow wastewater treatment technology based on rapid adsorption regeneration of ammonia nitrogen [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2020.
- [5] Ma W J, Li G F, Huang B C, *et al.* Advances and challenges of mainstream nitrogen removal from municipal wastewater with anammox-based processes [J]. *Water Environment Research*, 2020, **92**(11): 1899-1909.
- [6] 王泽斌, 马云, 王强. 含氮废水生物处理技术研究现状及发展趋势[J]. *环境科学与管理*, 2011, **36**(9): 108-112.
- Wang Z B, Ma Y, Wang Q. Advance and trend of biological nitrogen removal technologies in Wastewater Treatment [J]. *Environmental Science and Management*, 2011, **36**(9): 108-112.
- [7] 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.
- [8] Okabe S, Oshiki M, Takahashi Y, *et al.* Development of long-term stable partial nitrification and subsequent anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(13): 6801-6807.
- [9] 杨麒, 李小明, 曾光明, 等. 同步硝化反硝化机理的研究进展[J]. *微生物学通报*, 2003, **30**(4): 88-91.
- Yang Q, Li X M, Zeng G M, *et al.* Study progress on mechanism for simultaneous nitrification and denitrification [J]. *Microbiology China*, 2003, **30**(4): 88-91.
- [10] Ma B, Yang L, Wang Q L, *et al.* Inactivation and adaptation of ammonia-oxidizing bacteria and nitrite-oxidizing bacteria when exposed to free nitrous acid [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **245**: 1266-1270.
- [11] Yao Q, Peng D C, Wang B, *et al.* Effect of free ammonium and free nitrous acid on the activity, aggregate morphology and extracellular polymeric substance distribution of ammonium oxidizing bacteria in partial nitrification [J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2017, **124**(3): 319-326.
- [12] Chen Z G, Wang X H, Chen X Z, *et al.* Nitrogen removal via nitrification pathway for low-strength ammonium wastewater by adsorption, biological desorption and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2018, **267**: 541-549.
- [13] Lin L D, Lin Y, Li C J, *et al.* Synthesis of zeolite/hydrous metal oxide composites from coal fly ash as efficient adsorbents for removal of methylene blue from water [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2016, **148**: 32-40.
- [14] 梁国飞. 镇江沸石净化氨氮污染浅井水的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- Liang G F. Ammonia removal from well water using natural Zhenjiang zeolite [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008.
- [15] 陈振国, 汪晓军, 周松伟, 等. 基于吸附-生化解吸实现低浓度氨氮废水的亚硝化[J]. *中国给水排水*, 2019, **35**(3): 19-25.
- Chen Z G, Wang X J, Zhou S W, *et al.* Stable nitrification for low-strength ammonium wastewater based on adsorption and biological desorption [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, **35**(3): 19-25.
- [16] 杨永愿, 汪晓军, 赵爽, 等. 沸石曝气生物滤池短程硝化特性及其机制 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(12): 4518-4525.
- Yang Y Y, Wang X J, Zhao S, *et al.* Partial nitrification performance and mechanism of zeolite biological aerated filter for ammonium wastewater treatment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(12): 4518-4525.
- [17] 王彬, 张进, 魏亮, 等. 高效生物膜悬浮填料研究进展[J]. *四川环境*, 2020, **39**(1): 201-206.
- Wang B, Zhang J, Wei L, *et al.* Research progress on high efficiency biofilm suspension filler [J]. *Sichuan Environment*, 2020, **39**(1): 201-206.
- [18] 鲁颐琼, 左剑恶, 杨洋. 动力学调控实现单一反应器内亚硝化与硝化过程的互相转化[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(7): 1265-1271.
- Lu Y Q, Zuo J E, Yang Y. Interchange between short-cut nitrification and nitrification in one single reactor by dynamic regulation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(7): 1265-1271.
- [19] 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.
- [20] Chen J, Wang R X, Wang X J, *et al.* Response of nitrification performance and microbial community structure in sequencing biofilm batch reactors filled with different zeolite and alkalinity ratio [J]. *Bioresource Technology*, 2019, **273**: 487-495.
- [21] 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.
- [22] Yang Y Y, Chen Z G, Wang X J, *et al.* Partial nitrification performance and mechanism of zeolite biological aerated filter for ammonium wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, **241**: 473-481.
- [23] 张功良. 高、低 DO 浓度下 SBR 亚硝化启动对比研究[J]. *中国资源综合利用*, 2020, **38**(5): 10-12.
- Zhang G L. Comparative study of SBR nitrosation initiation at high and low DO [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2020, **38**(5): 10-12.
- [24] 梁俊宇, 周鸿, 赵晴, 等. 垃圾渗滤液部分亚硝化的启动运行及菌群分析 [J]. *水处理技术*, 2018, **44**(3): 99-103, 108.
- Liang J Y, Zhou H, Zhao Q, *et al.* Analysis of start-up, operation and microbial community during landfill leachate partial nitrification [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, **44**(3): 99-103, 108.
- [25] Miao J, Yin Q D, Hori T, *et al.* Nitrifiers activity and community characteristics under stress conditions in partial nitrification systems treating ammonium-rich wastewater [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **73**: 1-8.
- [26] Jiang C C, Xu S J, Wang R, *et al.* Achieving efficient nitrogen removal from real sewage via nitrite pathway in a continuous nitrogen removal process by combining free nitrous acid sludge treatment and DO control [J]. *Water Research*, 2019, **161**: 590-600.
- [27] 邓佳. 游离氨和游离亚硝酸对硝化过程的影响研究[D]. 成都: 西华大学, 2020.
- Deng J. Study on the effect of free ammonia and free nitrous acid on nitrification process [D]. Chengdu: Xihua University, 2020.
- [28] 王瑞鑫, 陈婧, 汪晓军, 等. 碱度对沸石序批式反应器亚硝化的影响[J]. *环境科学*, 2019, **40**(6): 2807-2812.
- Wang R X, Chen J, Wang X J, *et al.* Effects of alkalinity on partial nitrification in a zeolite sequencing batch reactor [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2807-2812.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)