

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, 王洪杰 (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氮氮释放	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, 郭露, 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)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析

吴珊¹, 王淑雅^{1,2}, 王芬^{1*}, 季民¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 济南城建集团有限公司, 济南 250031)

摘要: 针对厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)工艺常低温运行问题, 分别采用无纺布与改性聚氨酯泡沫塑料填料序批式生物膜反应器(sequence batch biofilm reactor, SBBR)处理含氮污水, 考察了从 35℃ 降至 15℃ 过程的脱氮效果。结果表明, 在进水氮容积负荷(NLR)为 110 mg·(L·d)⁻¹ 时, 无纺布填料反应器的平均总氮(TN)去除率先由 71.16% (35℃) 提升至 76.19% (30℃) 后又降低至 61.11% (15℃), 而改性聚氨酯泡沫塑料填料的平均 TN 去除率先由 78.71% (35℃) 提升至 81.75% (20℃) 后又降低至 75.68% (15℃)。与无纺布填料相比, 改性聚氨酯填料脱氮效果更稳定, 可作为优选填料。对改性聚氨酯填料生物膜进行高通量测序, 结果表明主要 ANAMMOX 菌属为 *Candidatus Kuenenia*, 相对丰度分别为 8% (35℃)、5% (25℃) 和 16% (15℃), 可见, 低温条件下, *Candidatus Kuenenia* 仍会增殖富集。降温显著影响了生物膜群落结构。

关键词: 厌氧氨氧化(ANAMMOX); 温度; 改性聚氨酯泡沫塑料填料; 无纺布填料; 微生物群落

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0416-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202105280

Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community

WU Shan¹, WANG Shu-ya^{1,2}, WANG Fen^{1*}, JI Min¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Jinan Urban Construction Group Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract: For the ambient and low-temperature operation of the anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) process, sequence batch biofilm reactors (SBBR) with non-woven fabric and modified polyurethane foam as carriers, respectively, were used to treat nitrogenous wastewater. Nitrogen removal performances of both reactors were investigated while the temperature decreased from 35℃ to 15℃. When the nitrogen loading rate (NLR) was 110 mg·(L·d)⁻¹, the average total nitrogen (TN) removal rate of the non-woven fabric reactor increased from 71.16% (35℃) to 76.19% (30℃) and then decreased to 61.11% (15℃). The average TN removal rate of the modified polyurethane foam reactor increased from 78.71% (35℃) to 81.75% (20℃) and then decreased to 75.68% (15℃). Compared with the non-woven fabric, the modified polyurethane foam provided a more stable nitrogen removal performance and could be used as the preferred carrier. High-throughput sequencing of the modified polyurethane foam biofilm indicated that *Candidatus Kuenenia* was the dominant ANAMMOX genus, with relative abundances of 8% (35℃), 5% (25℃), and 16% (15℃). *Candidatus Kuenenia* still grew and enriched at low temperatures. The decrease in temperature significantly affected the biofilm microbial community structure.

Key words: anaerobic ammonium oxidation(ANAMMOX); temperature; modified polyurethane foam carrier; non-woven fabric carrier; microbial community

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)工艺具有高效节能、污泥产量少和无需外加碳源等显著优势, 适用于高氨氮废水处理, 如垃圾渗滤液^[1]、消化废水^[2]和养殖沼液^[3]等。但是 ANAMMOX 工艺的实际应用受限于 ANAMMOX 菌难以富集, 其倍增时间长^[4], 细胞产率低^[5]。为强化 ANAMMOX 菌的富集, 减少污泥流失, 可利用填料的截留作用, 构建 ANAMMOX 生物膜系统^[6], 有助于工艺启动。

ANAMMOX 生物膜反应器填料包括: 火山岩^[7]、沸石^[8]、活性炭^[9]、聚氨酯海绵^[10]、无纺布^[11]和聚乙烯填料^[12]等。Wang 等^[13]的研究运行无纺布固定床反应器, 经 39 d 完成 ANAMMOX 启动, 367 d 达到最大氮处理负荷 10.3 kg·(m³·d)⁻¹, TN 去除率 90%。王钧等^[14]的研究以聚氨酯海绵作为 ANAMMOX 生物膜载体, 经过 73 d 成功启动反应器; 稳定运行时, 总无机氮去除率达到 87.97%。

温度是影响 ANAMMOX 生物膜工艺运行的重要因素。有研究发现, ANAMMOX 菌在 10 ~ 55℃ 均有活性^[15,16], 最适温度 30 ~ 40℃^[17,18]。曾涛涛^[19]的研究考察了火山岩 ANAMMOX 生物膜反应器常温下的脱氮效果, 结果表明 15℃ 下, 进水氨氮 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 190 mg·L⁻¹, 进水氮容积负荷(NLR)为 3.4 ~ 4.2 kg·(m³·d)⁻¹, 总氮(TN)去除率为 42% ~ 55%; 当温度升高至 20 ~ 23℃, 进水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 46 ~ 78 mg·L⁻¹, NLR 为 2.9 ~ 3.2 kg·(m³·d)⁻¹ 时, TN 去除率可明显提高至 75% 左右。

如何实现常低温下 ANAMMOX 稳定脱氮是目前 ANAMMOX 工艺实际应用面临的问题。本文探讨

收稿日期: 2021-05-27; 修订日期: 2021-06-28

基金项目: 天津市科技计划项目(19ZXSSZSN00080)

作者简介: 吴珊(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污水自养脱氮, E-mail: wu_shan@tju.edu.cn

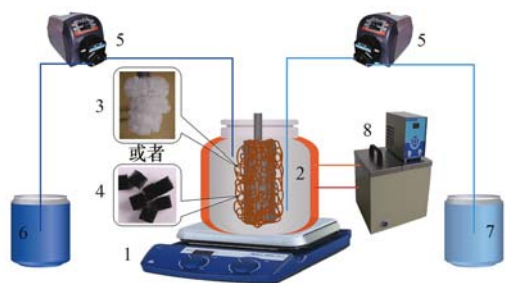
* 通信作者, E-mail: wangfen@tju.edu.cn

了不同温度(35 ~ 15℃)条件下,无纺布与改性聚氨酯泡沫塑料填料(改性聚氨酯填料)序批式生物膜反应器(sequence batch biofilm reactor, SBBR)的脱氮效果和微生物群落变化,以期 ANAMMOX 的实际应用提供基础。

1 材料与方法

1.1 试验装置

SBBR 试验装置如图 1 所示。双层反应器内层直径 80 mm,高 240 mm,有效容积 2 L;外层与恒温水浴锅相连,控制内层反应温度。反应器用锡纸包裹以避免光照。



1. 磁力搅拌器, 2. 双层反应器, 3. 无纺布填料, 4. 改性聚氨酯填料, 5. 蠕动泵, 6. 进水桶, 7. 出水桶, 8. 恒温水浴锅

图 1 ANAMMOX 生物膜反应装置流程

Fig. 1 Schematic diagram of ANAMMOX biofilm reactor

两组反应器分别采用无纺布填料和改性聚氨酯填料,填充比 40%。无纺布填料材质为聚丙烯,购自深圳市昌泰无纺布有限公司。将无纺布裁剪为约 7 cm 宽的条状,然后将无纺布条缠绕在反应器中央的填料棒上,细线扎紧固定。

改性聚氨酯填料为网状聚氨酯泡沫塑料(购自江苏艾勤环保科技有限公司),将其切割为 1.0 cm³ 正方体块备用;采用低温等离子体技术对填料进行表面改性处理^[20]。用细线将填料块穿起并缠绕固定在反应器中央的填料棒上。

1.2 进水水质

进水成分主要包括: $\rho[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$ 236 mg·L⁻¹, $\rho(\text{NaNO}_2)$ 296 mg·L⁻¹, $\rho(\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ 300 mg·L⁻¹, $\rho(\text{NaHCO}_3)$ 为 500 mg·L⁻¹, $\rho(\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$ 为 150 mg·L⁻¹, $\rho(\text{KH}_2\text{PO}_4)$ 为 30 mg·L⁻¹;微量元素 I 和微量元素 II^[21] 各 1 mL·L⁻¹。采用(1+9) HCl 调节 pH 为 7.5 ~ 7.8;为保持厌氧条件,进水曝高纯 N₂ 15 min,使反应器内 DO 降至 0.3 mg·L⁻¹ 以下。

1.3 SBBR 工艺启动与运行

1.3.1 接种污泥

无纺布和改性聚氨酯填料反应器均接种

ANAMMOX 污泥,接种污泥浓度为 4 000 mg·L⁻¹,进行挂膜。接种污泥取自 1 m³ 的 SBR 反应器,该反应器在 25 ~ 30℃ 条件下运行,水力停留时间 16 h,进水 $\rho(\text{TN})$ 为 500 ~ 800 mg·L⁻¹,出水 $\rho(\text{TN})$ 低于 50 mg·L⁻¹,TN 去除率在 90% 以上。

1.3.2 SBBR 工艺启动

启动期,控制恒温 35℃,启动 ANAMMOX 生物膜反应器。两反应器的进水 NLR 为 110 mg·(L·d)⁻¹,其中 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 为 50 mg·L⁻¹, $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 为 60 mg·L⁻¹。试验运行周期为 24 h:进水 15 min,反应时间 23 h,静沉 30 min,排水 15 min;排水比 90%。稳定运行时,无纺布填料反应器的 TN 去除率长期处于 60% ~ 85%;改性聚氨酯填料反应器的 TN 去除率基本保持在 80% 以上。

1.3.3 运行

对已经成功启动并稳定运行一个月的无纺布填料和改性聚氨酯填料反应器进行降温试验,共 5 个阶段,温度梯度设置为 35、30、25、20 和 15℃,每个温度条件下运行 20 ~ 25 d。温度变化时,分两次降温:第一次降温 3℃,稳定 3 d 后,再降温 2℃至所需温度。

1.4 分析项目与检测方法

1.4.1 常规氮指标检测

每个试验运行周期结束时,取水样测定氮指标。 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 均采用国家标准方法检测^[22],TN 为 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 三者之和; pH 和 DO 分别采用便携式 pH 计(Jenco, 6010M, USA)和便携式溶解氧仪(Hach, HQ30d, USA)测定。

1.4.2 微生物群落结构和多样性分析方法

(1) DNA 的提取 在 35、25 和 15℃ 稳定运行期间,剪取适量改性聚氨酯生物膜填料,与反应器出水一同置于 50 mL 离心管中,保证填料被浸没。用多管振荡仪振荡 10 min 至生物膜充分脱落。将泥水混合物在转速 3 000 r·min⁻¹ 下离心 3 min,弃去上清液,保留泥样提取 DNA。采用土壤 DNA 提取试剂盒(Omega Bio-Tek, Inc., Norcross, GA, USA)提取微生物基因组 DNA。

(2) 高通量测序 对提取出的 DNA 进行 qPCR 检测。对所扩增的 16S rRNA 中的 V3-V4 区域,进行小片段基因文库的构建,并基于 Illumina HiSeq 测序平台对该文库进行双末端测序。经过 Reads 拼接过滤,对所有样本的有效数据(effective tags),以 97% 的一致性(identity)进行 OTUs(operational taxonomic units)聚类,然后对 OTUs 的序列进行物种注释丰度分析,揭示样本的物种组成和群落结构的差异。

2 结果与讨论

2.1 不同温度下ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮效果

不同温度条件下,无纺布和改性聚氨酯泡沫塑

料填料反应器进出水 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 、 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 和 TN 去除率见图 2,化学计量系数变化如图 3 所示。

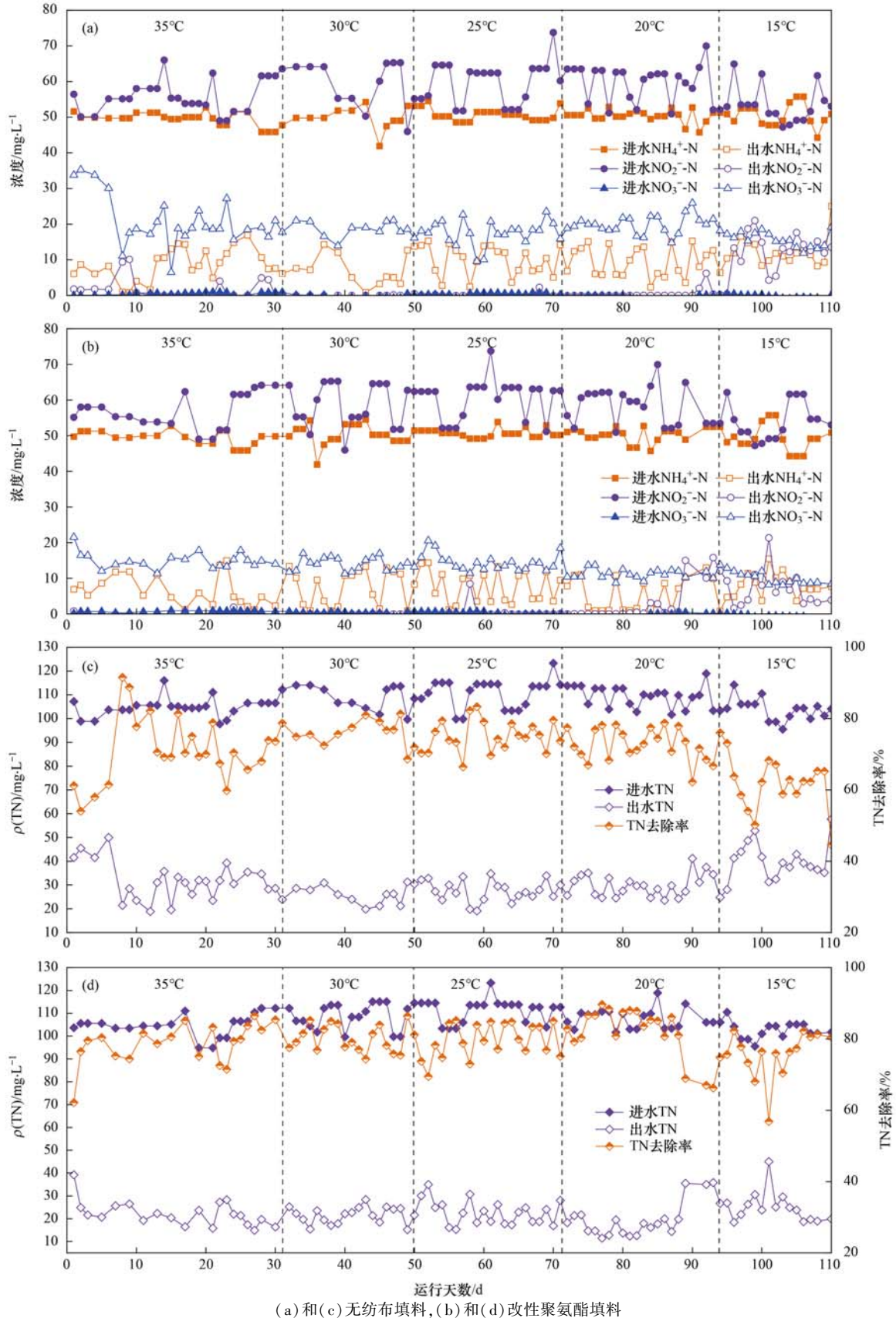


图 2 不同温度下不同填料反应器中含氮化合物的浓度及去除率

Fig. 2 Nitrogen species concentrations and nitrogen removal efficiency of systems with different carriers at various temperatures

进水 $\rho(\text{TN})$ 为 $110 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [$\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$] 时, 在 35、30、25、20 和 15℃ 运行期间, 无纺布填料反应器 TN 平均去除率分别为 71.16%、76.19%、75.15%、72.68% 和 61.11%, 而改性聚氨酯填料反应器 TN 平均去除率分别为 78.71%、80.16%、79.78%、81.75% 和 75.68%。

在降温过程中, 无纺布填料反应器 TN 去除率在 30℃ 时达到最大值 76.19%, 在 35~20℃ 条件下均保持 70% 以上的 TN 去除率, 平均 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 1.34 ~ 1.45 之间, 平均 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 0.42 ~ 0.51 之间; 降温至 15℃ 时, TN 去除率降低至 61.11%, 平均 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降至 1.09, 低于 ANAMMOX 反应理论值 1.32, 平均 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 降至 0.41, 但仍高于 ANAMMOX 反应理论值 0.26^[23]。化学计量系数与 ANAMMOX 反应理论值的偏差说明反应器中还存在其他氮转化的反应^[24]。 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 偏高说明系统中存在反硝化反应, 偏低可能是由于硝化过程中的氨氧化或短程反硝化反应; $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 偏高说明有硝化反应中的亚硝酸盐氧化过程发生, 偏低说明有全程或短程反硝化反应。可以看出, 随着温度降低,

无纺布填料反应器中的硝化反应增强, 反硝化反应减弱。改性聚氨酯填料反应器在 35~20℃ 条件下, TN 去除率均保持 80% 左右; 降温至 15℃ 时, TN 去除率降至 75.68%, 平均 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 从 1.23 ~ 1.41 降至 1.16, 平均 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 从 0.28 ~ 0.33 降至 0.24; 降温过程中, 氨氧化和反硝化反应增强, 亚硝酸盐氧化减弱。

这一现象与李祥等^[25]的研究结果相似: 温度在 26~37℃ 时, ANAMMOX 生物膜反应器氮去除速率在 $1.51 \sim 1.84 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 之间, 变化幅度 4.35%, 当温度低于 20℃ 时, 去除速率快速下降, 尤其当温度低于 15℃ 时, 氮去除速率下降至 $0.55 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 同时出现大量 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累。宋成康等^[26]实验运行 SBR 反应器, 在 20~33℃ 可稳定 ANAMMOX 脱氮, 其中 TN 去除负荷稳定在 $0.4 \text{ g} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$ 左右; 但当温度为 15℃ 时, 出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累。温度降低导致厌氧氨氧化活性下降和活化能提高^[26,27], 使 ANAMMOX 脱氮效率下降。

在相同温度条件下, 与无纺布填料反应器相比, 改性聚氨酯填料反应器 TN 去除率更高, 化学计量系数更接近 ANAMMOX 理论值; 在降温过程中, 改性聚氨酯填料反应器 TN 去除率的下降幅度更小。

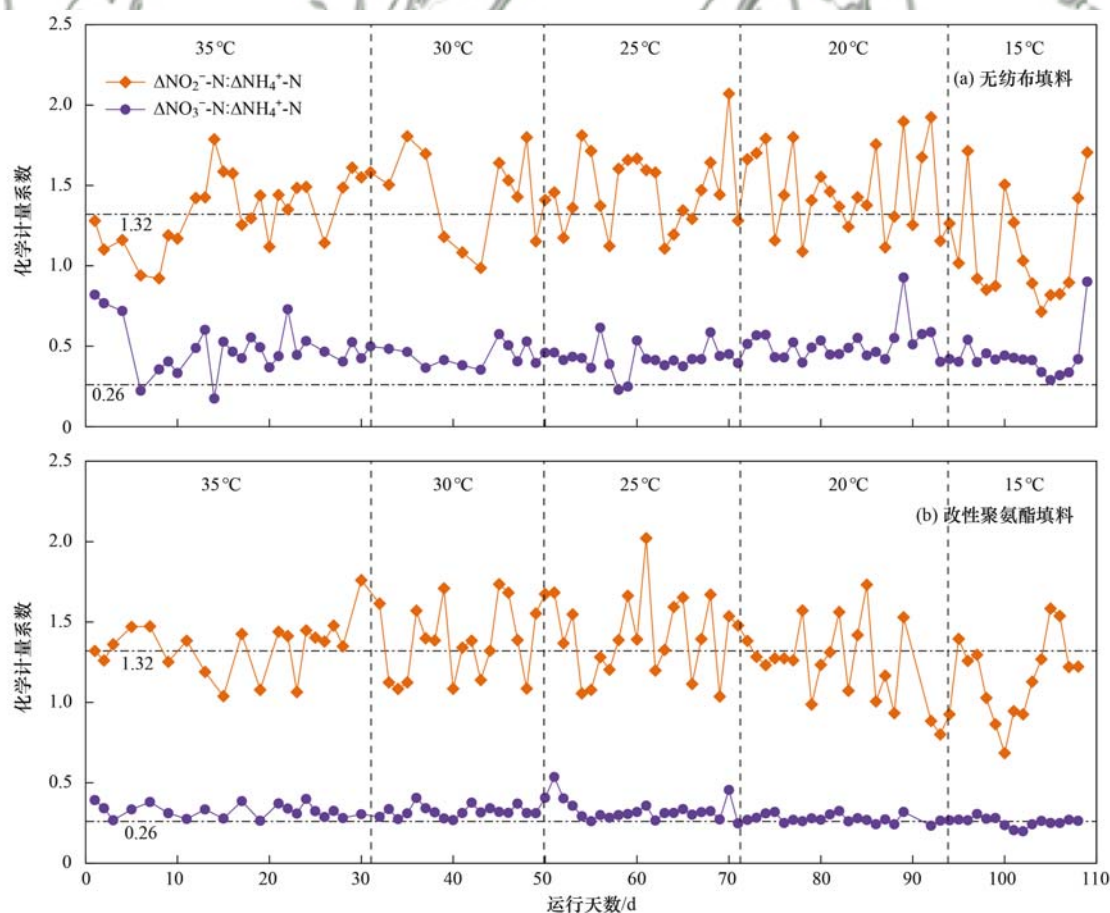


图3 不同温度下不同填料反应器的化学计量系数

Fig. 3 Values of stoichiometric ratio of systems with different carriers at various temperatures

可以看出,改性聚氨酯填料相对于无纺布填料能够达到更好的脱氮效果,同时对低温适应能力更强.这可能是因为改性聚氨酯填料的多孔结构更易形成并维持厌氧环境,从而更有利于 ANAMMOX 反应.因此,改性聚氨酯填料可以作为 ANAMMOX 生物膜工艺的优选填料;同时改性聚氨酯填料反应器 75% 以上的 TN 去除率也说明 ANAMMOX 生物膜工艺具有常低温下处理废水的潜力.

2.2 35、25 和 15℃ 条件下改性聚氨酯填料生物膜菌群分析

选取脱氮效果较好的改性聚氨酯填料反应器,分别在 35、25 和 15℃ 稳定运行期间取 3 个平行泥

样,检测其微生物群落的变化.

2.2.1 基于门水平的微生物群落分布

采用 MiSeq 高通量测序技术分析微生物的特异性 DNA 片段,根据 OTUs 序列的物种注释结果对菌群进行结构组成分析,得到不同温度条件下改性聚氨酯填料生物膜在门水平上的物种相对丰度如图 4 (a) 所示.

结果表明,改性聚氨酯填料反应器中的主要微生物菌群包括浮霉菌门 (Planctomycetes)、变形菌门 (Proteobacteria)、厚壁菌门 (Firmicutes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和酸杆菌门 (Acidobacteria) 等. ANAMMOX 菌所属的浮霉菌门

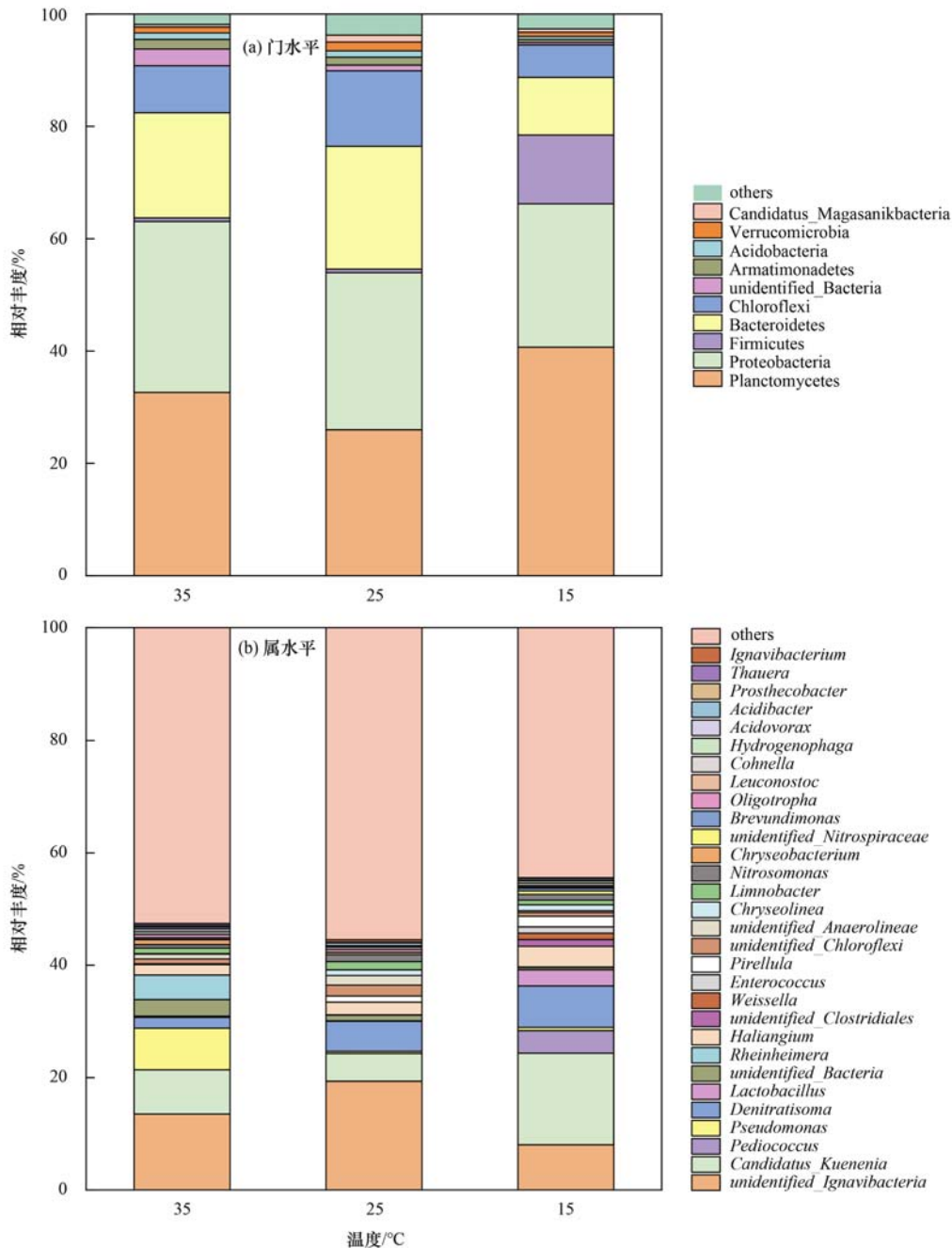


图 4 运行温度为 35、25 和 15℃ 时,改性聚氨酯填料生物膜菌群基于门水平和属水平上的物种相对丰度

Fig. 4 Composition of microbial community of the modified polyurethane foam biofilm at the phylum, and at genus levels at 35, 25, and 15℃

(Planctomycetes), 在 35、25 和 15℃ 的污泥样品中分别占 33%、26% 和 41%, 相对丰度最高. 除此之外, 变形菌门 (Proteobacteria)、拟杆菌门 (Bacteroidetes) 和绿弯菌门 (Chloroflexi) 在 3 个温度条件下的相对丰度也较高, 分别占 30%、19% 和 8% (35℃), 28%、22% 和 13% (25℃), 26%、10% 和 6% (15℃). 这几类相对丰度较高的细菌与 ANAMMOX 菌之间存在协同和竞争关系, 同时得到富集, 成为系统中的优势微生物.

2.2.2 基于属水平的微生物群落分布

由图 4(b) 可知, 35℃ 和 25℃ 下 ANAMMOX 菌属 *Candidatus Kuenenia* 的相对丰度分别为 8% 和 5%, 而 15℃ 条件下, *Candidatus Kuenenia* 的相对丰度达到 16%, 说明温度降低没有对功能菌的富集产生影响. 从 35℃ 到 25℃ 功能菌相对丰度下降可能是因为短期内温度的下降对 ANAMMOX 菌活性产生了影响, 导致增殖速度减缓, 但由于 *Candidatus Kuenenia* 对 20℃ 以下环境温度的良好适应性^[28,29], 很快恢复了活性, 实现了增殖, 在 15℃ 达到相对丰度最大值 16%. 降温过程对 ANAMMOX 菌利用基质的影响大于对增殖的影响, 因此, 15℃ 条件下虽然功能菌的丰度达到最大, 但是脱氮能力弱于 25℃ 和 35℃ 条件下的脱氮能力.

Pseudomonas、*Denitratisoma* 和 *Thauera* 等多个具有反硝化作用的属也在反应器中共存^[30,31]. 其中 *Pseudomonas* 和 *Denitratisoma* 的相对丰度较高, 在不同温度条件下的相对丰度分别为 7.4% 和 1.9% (35℃)、3.4% 和 5.4% (25℃)、5.6% 和 7.4% (15℃). 与 *Candidatus Kuenenia* 类似, 反硝化菌属 *Pseudomonas* 在降温过程中出现了先适应, 后恢复并增殖的现象. *Denitratisoma* 则比较适应低温的环境, 随着温度的降低, 相对丰度逐渐升高. 系统中还存在硝化细菌, 包括 AOB 属 *Nitrosomonas* 和 NOB 属

unidentified_Nitrospiraceae^[32~34]. 在温度从 35℃ 降至 25℃ 再到 15℃ 的过程中, *Nitrosomonas* 相对丰度从 0.6% 上升到 1.2%, 又降至 1.0%; *unidentified_Nitrospiraceae* 相对丰度则持续下降, 从 0.61% 到 0.37% 再到 0.07%.

降温过程对不同脱氮细菌的活性影响不同^[35]. 35、25 和 15℃ 条件下, 平均 $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 分别为 1.35 和 0.33、1.41 和 0.32、1.16 和 0.24. 降温至 25℃ 时, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有明显升高, 但是 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 基本不变, 两个化学计量系数又都高于 ANAMMOX 理论值, 说明此时除 ANAMMOX 之外还发生亚硝酸盐氧化和反硝化反应, NOB 和反硝化菌 (denitrifying bacteria, DNB) 占据较大优势. 继续降温至 15℃ 时, $\Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^- - \text{N} : \Delta\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 均降低且低于 ANAMMOX 理论值, 说明此时发生的脱氮副反应主要为氨氧化和反硝化, AOB 和 DNB 的优势大于 NOB. 化学计量系数和物种丰度变化都表明, 降温过程对不同脱氮细菌的代谢和增殖产生了不同影响.

2.2.3 微生物群落差异分析

为了比较不同温度下的微生物群落构成, 将所有样本的物种注释结果和 OTUs 的丰度信息合并处理后, 进行降维分析, 从中发现不同样本间的差异.

对样品进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 如图 5(a) 所示. 从中可知, 15、25 和 35℃ 条件下的生物膜群落构成有显著差异, 且从各组之间的距离可以看出, 各组间的差异程度相近. 无度量多维标定法 (non-metric multi-dimensional scaling, NMDS) 分析能够克服 PCA 线性模型的缺点, 更好地反映生态学数据的非线性结构. NMDS 分析的结果见图 5(b), 35℃ 条件下的生物膜菌群组成与其它两组差异较大, 说明温度显著影响了生物膜群落结构.

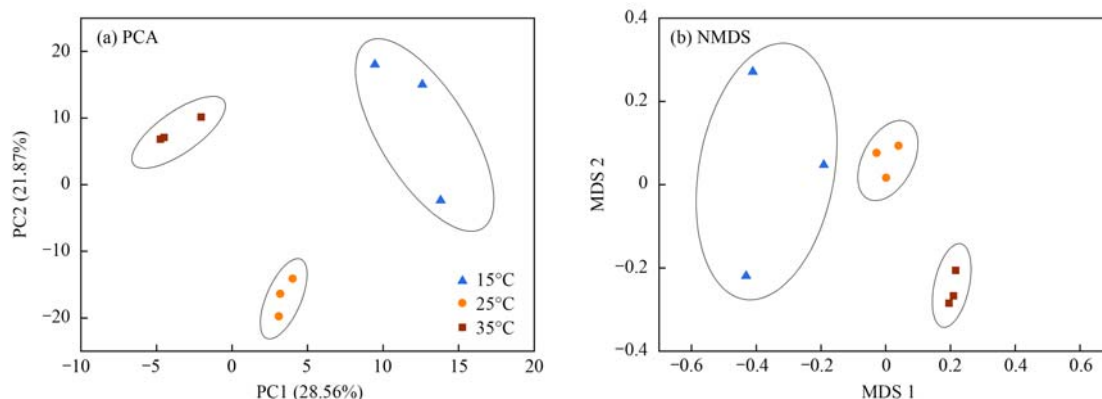


图 5 运行温度为 35、25 和 15℃ 时, 改性聚氨酯填料生物膜菌群 PCA 及 NMDS 分析结果

Fig. 5 PCA and NMDS analysis of microbial communities of the modified polyurethane foam biofilm at 35, 25, and 15℃

3 结论

(1) 在 NLR 为 $110 \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$, 温度由 35°C 逐步降至 15°C 的过程中, 无纺布填料反应器的平均 TN 去除率先由 71.16% (35°C) 提升至 76.19% (30°C) 后又降低至 61.11% (15°C), 而改性聚氨酯泡沫塑料填料的平均 TN 去除率先由 78.71% (35°C) 提升至 81.75% (20°C) 后又降低至 75.68% (15°C).

(2) 与无纺布填料反应器相比, 在相同条件下, 改性聚氨酯填料反应器的脱氮效果好于无纺布填料反应器, 这说明改性聚氨酯填料反应器系统对温度波动的适应能力更强, 更易在常低温环境下实现较好的脱氮效果.

(3) 高通量测序结果表明, 改性聚氨酯填料生物膜主要 ANAMMOX 菌属为 *Candidatus Kuenenia*, 相对丰度分别为 8% (35°C)、5% (25°C) 和 16% (15°C), 说明低温条件下, *Candidatus Kuenenia* 仍会增殖富集. 温度显著影响了生物膜群落结构.

参考文献:

- [1] 陈小珍, 汪晓军, Chayangkun K, 等. 反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液[J]. 环境科学, 2020, **41**(1): 345-352.
Chen X Z, Wang X J, Chayangkun K, *et al.* Nitrogen removal from mature landfill leachate via denitrification-partial nitrification-ANAMMOX based on a zeolite biological aerated filter[J]. Environmental Science, 2020, **41**(1): 345-352.
- [2] Yang S, Xu S N, Boiocchi R, *et al.* Long-term continuous partial nitrification-anammox reactor aeration optimization at different nitrogen loading rates for the treatment of ammonium rich digestate lagoon supernatant[J]. Process Biochemistry, 2020, **99**: 139-146.
- [3] Huang W, Zhou J, He X J, *et al.* Simultaneous nitrogen and phosphorus removal from simulated digested piggery wastewater in a single-stage biofilm process coupling anammox and intracellular carbon metabolism[J]. Bioresource Technology, 2021, **333**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125152.
- [4] 黄佳路, 王小龙, 高大文. 常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4687-4695.
Huang J L, Wang X L, Gao D W. Storage and reactivation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) sludge at room temperature[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4687-4695.
- [5] 钱允致, 马华继, 苑宏英, 等. 厌氧氨氧化工艺在高氨氮废水处理的研究应用进展[J]. 水处理技术, 2019, **45**(12): 7-12.
Qian Y Z, Ma H J, Yuan H Y, *et al.* Research and application progress of anammox process in high ammonia-nitrogen wastewater treatment[J]. Technology of Water Treatment, 2019, **45**(12): 7-12.
- [6] 杨岚, 彭永臻, 李健伟, 等. 缺氧 MBBR 耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3668-3674.
Yang L, Peng Y Z, Li J W, *et al.* Advanced denitrification of municipal wastewater achieved via partial ANAMMOX in anoxic MBBR[J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3668-3674.
- [7] 李冬, 赵世勋, 王俊安, 等. 污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 859-864.
Li D, Zhao S X, Wang J A, *et al.* Lab-scale ANAMMOX process in a wastewater treatment plant[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 859-864.
- [8] Collison R S, Grismer M E. Upscaling the zeolite-anammox process: treatment of anaerobic digester filtrate[J]. Water, 2018, **10**(11), doi: 10.3390/w10111553.
- [9] Ma J Y, Yao H, Yu H Q, *et al.* Hydrazine addition enhances the nitrogen removal capacity in an anaerobic ammonium oxidation system through accelerating ammonium and nitrite degradation and reducing nitrate production[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **335**: 401-408.
- [10] Lin H L, Tsao H W, Huang Y W, *et al.* Removal of nitrogen from secondary effluent of a petrochemical industrial park by a hybrid biofilm-carrier reactor with one-stage ANAMMOX[J]. Water Science & Technology, 2014, **69**(12): 2526-2532.
- [11] Ibrahim M, Yusof N, Yusoff M Z M, *et al.* Enrichment of anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacteria for short start-up of the anammox process: a review[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, **57**(30): 13958-13978.
- [12] Zhang L, Yang J C, Ma Y G, *et al.* Treatment capability of an up-flow anammox column reactor using polyethylene sponge strips as biomass carrier[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2010, **110**(1): 72-78.
- [13] Wang T, Zhang H M, Yang F L, *et al.* Start-up and long-term operation of the Anammox process in a fixed bed reactor (FBR) filled with novel non-woven ring carriers[J]. Chemosphere, 2013, **91**(5): 669-675.
- [14] 王钧, 于德爽, 王晓霞, 等. 两种悬浮填料在 ASBBR 厌氧氨氧化系统中的性能比较与微生物解析[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2438-2448.
Wang J, Yu D S, Wang X X, *et al.* Performance and microbial analysis of ANAMMOX system with different type of suspended carriers in ASSBR[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(7): 2438-2448.
- [15] 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.
- [16] Sobotka D, Zhai J, Makinia J. Generalized temperature dependence model for anammox process kinetics[J]. Science of the Total Environment, 2021, **775**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145760.
- [17] Jin R C, Yang G F, Yu J J, *et al.* The inhibition of the Anammox process: a review[J]. Chemical Engineering Journal, 2012, **197**: 67-79.
- [18] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [19] 曾涛涛. 常温低基质 PN-ANAMMOX 耦合工艺脱氮效能及微生物特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. 78-80.
- [20] Zeng T T. Research on nitrogen removal efficiency and microbial properties of PN-ANAMMOX combination for low strength wastewater treatment at ambient temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 78-80.
- [20] 王淑雅, 刘灵婕, 王芬, 等. 低温等离子体技术改性填料前后 Anammox 工艺运行及微生物群落变化[J]. 环境工程

- 报, 2020, **14**(2): 285-294.
- Wang S Y, Liu L J, Wang F, *et al.* Variation of operating and microbial community of Anammox process with conventional and modified filler by low temperature plasma technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(2): 285-294.
- [21] 姜滢, 郭萌蕾, 谢军祥, 等. 不同培养条件厌氧氨氧化颗粒污泥性质及微生物群落结构差异[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2358-2366.
- Jiang Y, Guo M L, Xie J X, *et al.* Characteristics of ANAMMOX granular sludge and differences in microbial community structure under different culture conditions [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2358-2366.
- [22] 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.
- [23] 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 等. 羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3365-3372.
- Xing C Y, Fan Y C, Chen X, *et al.* Effect of hydroxylamine on community of ANAMMOX sludge [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3365-3372.
- [24] 王晓瞳, 杨宏. 基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(4): 1930-1938.
- Wang X T, Yang H. Analysis of performance and microbial diversity of ANAMMOX sludge based on particle size differentiation [J]. Environmental Science, 2021, **42**(4): 1930-1938.
- [25] 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 等. 温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1288-1292.
- Li X, Huang Y, Zheng Y H, *et al.* Effect of temperature on stability of nitrogen removal in the ANAMMOX reactor [J]. Environmental Science, 2012, **33**(4): 1288-1292.
- [26] 宋成康, 王亚宜, 韩海成, 等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- Song C K, Wang Y Y, Han H C, *et al.* Effect of decreasing temperature on the performance and extracellular polymer substance of anaerobic ammonia oxidation sludge [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 2006-2013.
- [27] 周蒙蒙, 杨婉, 谭锡诚, 等. 温度对 UASB 厌氧氨氧化反应器运行性能的影响及其过程动力学特性[J]. 太原理工大学学报, 2020, **51**(4): 580-586.
- Zhou M M, Yang W, Tan X C, *et al.* Effect of temperature on nitrogen removal performance of UASB Anammox reactor and process kinetics [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020, **51**(4): 580-586.
- [28] He S L, Chen Y, Qin M, *et al.* Effects of temperature on anammox performance and community structure [J]. Bioresource Technology, 2018, **260**: 186-195.
- [29] De Cocker P, Bessiere Y, Hernandez-Raquet G, *et al.* Enrichment and adaptation yield high anammox conversion rates under low temperatures [J]. Bioresource Technology, 2018, **250**: 505-512.
- [30] 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 等. 生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3345-3355.
- Wang X T, Yang H, Su Y, *et al.* Fast start-up ANAMMOX operation strategy and flora characteristics of a biofilter [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3345-3355.
- [31] Zhang S C, Zhang Z J, Xia S B, *et al.* The potential contributions to organic carbon utilization in a stable acetate-fed Anammox process under low nitrogen-loading rates [J]. Science of the Total Environment, 2021, **784**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147150.
- [32] Zhao L, Fu G P, Wu J F, *et al.* Bioaugmented constructed wetlands for efficient saline wastewater treatment with multiple denitrification pathways [J]. Bioresource Technology, 2021, **335**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125236.
- [33] 韩文杰, 吴迪, 周家中, 等. 长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 5037-5049.
- Han W J, Wu D, Zhou J Z, *et al.* Microbial diversity analysis of WWTPs based on hybrid-MBBR process in a low temperature season in the Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 5037-5049.
- [34] Meng Y B, Zhou Z B, Meng F G. Impacts of diel temperature variations on nitrogen removal and metacommunity of anammox biofilm reactors [J]. Water Research, 2019, **160**: 1-9.
- [35] de Almeida Fernandes L, Pereira A D, Leal C D, *et al.* Effect of temperature on microbial diversity and nitrogen removal performance of an anammox reactor treating anaerobically pretreated municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, **258**: 208-219.

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)