

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气 PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季 PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁 (GO-nFe ⁰ /WMF) 对水中Cr(VI) 的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流 CO ₂ 及 CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N ₂ O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析

刘晓丹¹, 黄毅¹, 王永花^{1*}, 汪贝贝¹, 吴兵², 陆光华¹

(1. 河海大学环境学院, 南京 210098; 2. 南京大学环境学院, 南京 210023)

摘要: 尼洋河是雅鲁藏布江的重要支流, 是西藏工布和林芝地区的重要水源地。本研究分析了尼洋河水体理化指标、12种金属含量和沉积物微生物群落结构特征。结果表明, 2017年和2018年沉积物微生物群落在门水平的结构基本相同, 属水平结构相似。变形菌门是尼洋河沉积物的第一优势菌门, 其他优势菌门有拟杆菌门、酸杆菌门和放线菌门等; 属水平上黄杆菌属丰度较高, 气单胞菌属等条件致病菌属可被检出; 聚类分析发现尼洋河沉积物微生物群落空间上存在一定的差异性, 上游、中游和下游不同河段微生物群落之间差异显著, 电站库区沉积物微生物群落具有特异性。相关性分析表明, 温度、溶解氧、电导率和铬、锌、锶和钡等金属含量与尼洋河沉积物门水平特定微生物丰度存在显著相关关系。冗余分析表明, 总氮、总磷、溶解氧、铬、锶、钡和锰等是尼洋河沉积物中微生物群落结构的主要影响因子。本研究结果可为认识尼洋河沉积物中微生物群落的时空变化特征, 识别环境影响因子提供了数据支撑。

关键词: 尼洋河; 沉积物; 高通量测序; 微生物群落; 环境因素

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3249-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201912150

Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet

LIU Xiao-dan¹, HUANG Yi¹, WANG Yong-hua^{1*}, WANG Bei-bei¹, WU Bing², LU Guang-hua¹

(1. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The Niyang River is an important tributary of the Yarlong Zangbo River, which is also an important water source in the Gongbujiangda and Linzhi areas of Tibet. In this study, water and sediment samples from 18 sites in the Niyang River were collected. The physical and chemical properties, concentrations of 12 heavy metals, and the microbial community in the sediments were determined. The microbial community structures in the sediments collected in 2017 and 2018 were highly similar at the phylum and genus levels. The most dominant type of bacteria in the sediment of the Niyang River was Proteobacteria. Other dominant bacteria included Bacteroidetes, Acidbacteria, and Actinobacteria. At the genus level, the abundance of *Flavobacterium* was high. Other conditional pathogenic bacteria, such as *Aeromonas* and *Acinetobacter*, were detected. Cluster analysis found that there were certain spatial differences among the upstream, midstream, and downstream microbial communities. The microbial community of sediments in the power station reservoir area was unique. Correlation analysis showed that the temperature, dissolved oxygen, electrical conductance, Cr, Zn, Sr, and Ba in the sediments had high correlation with abundance of specific microbes at the phylum level. Redundancy analysis suggested that total nitrogen, total phosphorus, dissolved oxygen, Cr, Sr, Ba, and Mn were the main influencing factors of microbial community structure in the sediments of the Niyang River. The results of this study provide data support for understanding the spatial and temporal distribution of the microbial community in sediments of the Niyang River and identifying their environmental impact factors.

Key words: Niyang River; sediment; high-throughput sequencing; microbial community; environmental factor

微生物是河流生态系统中的主要分解者^[1,2]。随着人类活动对河流水质环境的持续影响, 沉积到河流沉积物中的环境污染物日益增多, 沉积物成为多种微生物生存与物质交换的载体^[3]。沉积物中的微生物通过同化、异化等作用能够影响水环境中无机盐、有机污染物等物质的分布、迁移和转化^[4], 因此研究沉积物中微生物群落的分布特征可为阐明水环境中污染物质的迁移转化规律提供基础数据支撑。同时, 微生物群落会对环境因子变化产生响应^[5]。研究环境因子与微生物之间的相关性, 可以更系统地阐述微生物和环境之间的关系, 对环境管理具有重要意义。

尼洋河, 又称“娘曲”, 是青藏高原雅鲁藏布江众支流中重要的一级支流, 同时也是工布江达和林芝地区重要的水源地^[6]。随着西部大开发和我国水能开发战略逐步转移西藏^[7], 近年来对于尼洋河周边地区的开发与建设, 特别是水电站的开发建设如火如荼地进行。已有研究表明, 在尼洋河流域多布电站建成后, 尼洋河水环境质量有一定的下降趋

收稿日期: 2019-12-19; 修订日期: 2020-02-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(B200202105); 污染控制与资源化研究国家重点实验室开放基金项目(PCRRF17028); 国家自然科学基金项目(51879228)

作者简介: 刘晓丹(1996~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境科学与工程, E-mail: liuxiaodan@hhu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: mgflora@hhu.edu.cn

势^[8]. 目前已有研究对尼洋河水体中的重金属进行了调查^[9]. 龚迎春^[10]和刘海平等^[11~13]对尼洋河中的浮游植物和浮游动物等进行调查,发现尼洋河浮游植物类群以硅藻占有绝对优势,浮游动物中原生动物以砂壳虫和瞬目虫属为主. 但现在对于尼洋河沉积物中微生物群落的时空分布特征仍不明确,对微生物群落结构与环境影响因子的关联特征仍缺乏认识. 本文分析了尼洋河沉积物微生物群落结构,研究了微生物群落的时空分布特征,进一步确定了微生物群落结构与典型环境相关因子的相关性,以期对尼洋河流域生态系统保护提供基础数据支撑.

1 材料与方法

1.1 样品采集与预处理

本研究共设 18 个采样点,具体位置如图 1 所示,采样时间为 2017 年 11 月和 2018 年 10 月. 水样采集 1 L, 4℃ 保存; 沉积物样品采用不锈钢抓斗采集湖底 10 cm 以下的沉积物, 4℃ 保存并迅速运回实验室. 1 周内完成所有指标测定.

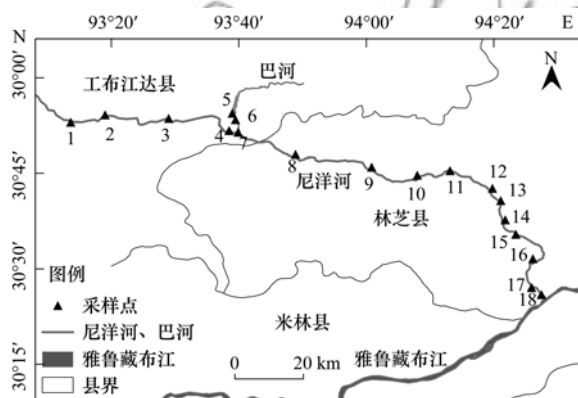


图 1 尼洋河采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Niyang River

1.2 化学指标测定

采用江苏盛奥华 6B-3000A 多参数水质检测仪现场测定水质理化指标,包括 pH 值、电导率(EC)、溶解氧(DO)和温度(T). 总氮(TN)、总磷(TP)和氨氮(NH_4^+-N)等采用文献^[14]推荐方法. 水体中铬(Cr)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)、硒(Se)、锶(Sr)、钼(Mo)、镉(Cd)、钡(Ba)和铅(Pb)等 12 种金属含量采用电感耦合等离子体光谱法测定.

1.3 沉积物微生物 DNA 提取与 PCR 扩增

沉积物微生物总 DNA 采用 FastDNA[®] SPIN Kit 试剂盒(美国,MP Biomedicals)提取,采用 NanoDrop(美国,ThermoFisher 公司)和 1% 琼脂糖凝胶电泳对所提 DNA 的浓度、纯度和完整性进行检测^[15], OD(260/280)值在 1.8~2.0 之间,且 DNA 样品浓

度大于 $50 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 DNA 样品用于 PCR 扩增. 扩增目标为 16S rRNA 的 V3-V4 区(目标片段约:459 bp); PCR 扩增引物序列为: V3F (5'-CCTACGGG NGGCWGCAG-3') 和 V4R (5'-GGACTACHVGGG TWTCTAAT-3'); PCR 反应体系为:30 μL 体系,包括 100 ng 模板 DNA、15 μL 2 $\times$ EasyTaq[®] PCR SuperMix(北京全式金公司)、10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \times 2$ 正/反向引物和 5 μL ddH₂O,每个样品设置 4 个平行样; PCR 扩增通过 Veriti96 PCR 仪(美国,ABI)完成,扩增条件为:95℃ 预变性 2 min; PCR 循环数为 30 次,依次为 95℃ 变性 20 s, 51℃ 退火 30 s, 72℃ 延伸 60 s; 最后 72℃ 延伸 5 min. 采用 QIAquick PCR Purification Kit(德国,QIAGEN)对 PCR 产物进行纯化后用于后续测序.

1.4 16S 沉积物微生物基因测序及微生物群落分析

采用 TruSeq[®] DNA Sample Preparation 文库试剂盒加上接头以及对应的 Barcode,构建形成 16S rRNA 基因测序的文库. 构建好的测序文库采用 Illumina MiSeq(美国,Illumina)测序平台进行测序试验,测序方案为 2 $\times$ 250 bp 两端测序^[16]. 根据文献^[17]的方法,使用 Mothur 软件平台进行原始数据质量过滤、降噪、去嵌合体,以及去除非细菌序列等质量控制操作. 将统一测序深度的 clean reads 提交到 QIIME 平台进行基于可操作分类单元(OTUs)的微生物物种分类信息注释,相似度参数设置为 0.97^[18]. 利用 RDP Classifier 的算法通过比对 Greengenes 数据库(<http://greengenes.secondgenome.com>)进行从门水平到属水平的物种分类信息注释. 使用 PAST 软件对不同样品的细菌群落进行 RDP 分类群的聚类分析.

1.5 数据处理与统计分析

热图及主坐标分析(PCoA)由 R 平台(V3.1.3)的“Vegan”和“gplots”包进行,冗余分析(RDA)采用 Canoco 4.5 软件,聚类分析采用 Past 3.0 软件中的未加权对群算法(UPGMA)进行. 其他统计分析及图表采用 Graphpad Prism 6 和 Origin 9.0 完成.

2 结果与讨论

2.1 微生物群落结构特征及时间变化

沉积物微生物的高通量测序结果显示,2018 年尼洋河沉积物样品中共检出 36 个细菌门和一定量未明确分类的微生物. 各位点细菌丰度排名前 10 的 OTUs 如图 2(a). 变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、酸杆菌门(Acidobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、疣微菌门(Verrucomicrobia)、厚壁菌门(Firmicutes)、芽单胞菌门

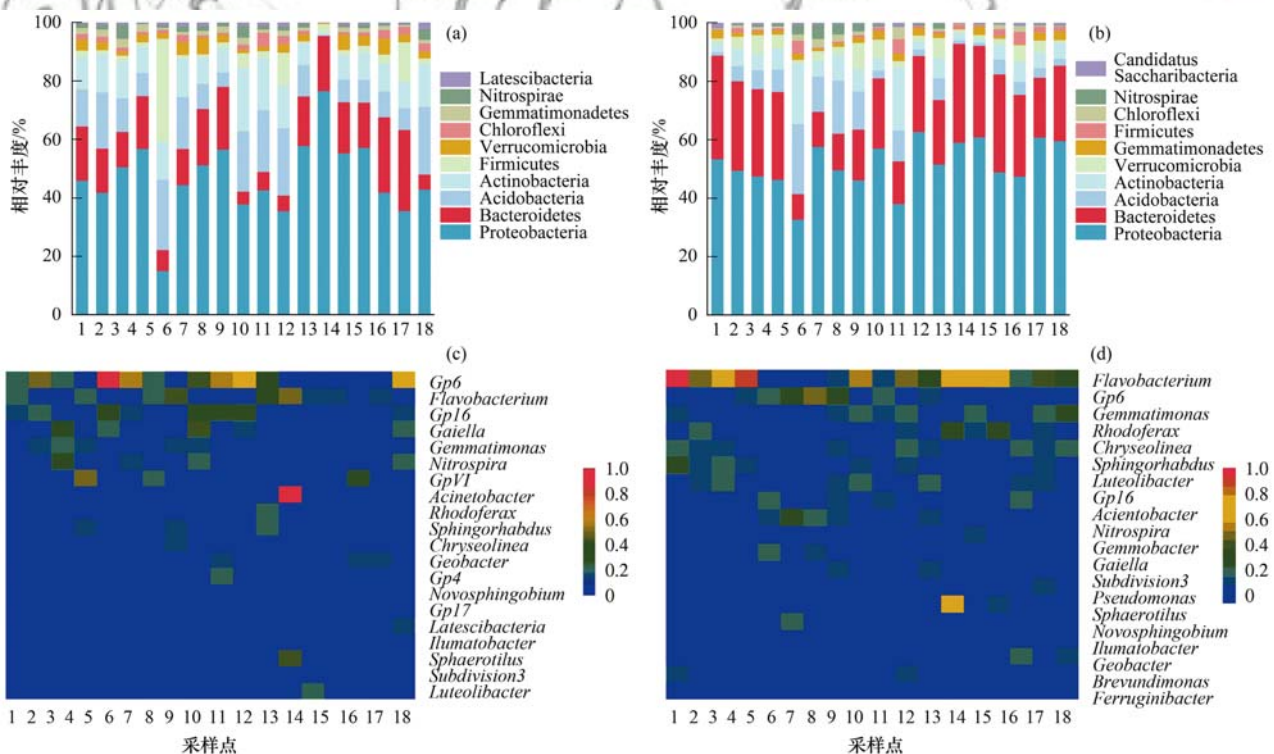
(Gemmatimonadetes)、绿弯菌门(Chloroflexi)、硝化螺旋菌门(Nitrospirae)和拟杆菌门(Latescibacteria)是尼洋河沉积物中的优势微生物,它们的丰度占整个微生物群落的 69.1%~96.7%。2017 年和 2018 年的沉积物微生物群落结构具有很高的相似性[图 2(b)]。主要区别在于 Candidatus Saccharibacteria 在 2017 年属于排行前 10 的优势微生物,而 2018 年 Latescibacteria 取代其进入了前 10。除 5 号位点外,其他位点沉积物中 Proteobacteria 均为优势菌门,2017 年各位点 Proteobacteria 丰度平均占比 50.75%,2018 年各位点 Proteobacteria 丰度平均占比 41.02%。Proteobacteria 是沉积物中具有代表性的细菌群落分支,也是淡水水体中的典型优势微生物^[19~23]。Proteobacteria 中诸多微生物具有脱氮除磷、降解污染物等能力,是水体自净功能的重要承担者^[24,25]。

从属水平对沉积物微生物群落结构进行更深入分析。选取丰度占比 1% 以上的 2018 年沉积物微生物进行热图分析,结果见图 2(c)。微生物丰度较高的属包括黄杆菌属(*Flavobacterium*)和 Gp16 属等。对于 2017 年沉积物,*Flavobacterium* 为主要微生物,其他丰度较高的菌属包括 Gp6 属、芽单胞菌属(*Gemmatimonas*)和红育菌属(*Rhodoferrax*)等[图 2

(d)],与 2018 年属水平微生物群落结构相类似。*Flavobacterium* 在生态系统中是一类具有反硝化优势的功能菌,广泛分布于淡水水体^[26]。此外,尼洋河多个点位的沉积物可检出条件致病菌^[27],如不动杆菌属(*Acinetobacter*)、分支杆菌属(*Mycobacterium*)、链球菌属(*Streptococcus*)和军团菌属(*Legionella*)等,还有鱼类致病菌^[28,29],如气单胞菌属(*Aeromonas*)等。一些特殊位点的致病菌丰度较高,如 13 号沉积物中的 *Acinetobacter* 丰度非常高。13 号位点靠近养猪场废水排水口,可能是此种条件致病菌显著升高的重要原因,需要引起足够重视。当然,由于高通量测序具有灵敏度极高的特点,致病菌易出现假阳性现象^[30],因此尼洋河致病菌需要使用其他方法进一步分离和鉴别,以准确确定其潜在的健康风险。

2.2 微生物结构空间分布特征

尼洋河沉积物微生物群落结构聚类分析显示,2017 年 18 个位点微生物可分为 5 类,其中 5 号和 10 号样品各自单独为一类,1~4、6~9 和 11~18 号样品分为 3 类[图 3(a)]。2018 年 18 个位点微生物则可分为 7 类[图 3(b)],其中 5 号和 18 号各自单独为一类,其他 5 类为 1~4、6~8、9~11、12~13 和 14~17 号。两年的底泥微生物结构聚类虽略有不同,但在空间上都呈现出分段式的特征,不同河



(a) 2018 年门水平微生物相对丰度; (b) 2017 年门水平微生物相对丰度;
(c) 2018 年属水平微生物相对丰度; (d) 2017 年属水平微生物相对丰度

图 2 尼洋河沉积物微生物群落结构

Fig. 2 Microbial community structure of sediments in Niyang River

段的微生物群落之间存在一定差异. 进一步对门水平微生物结构进行 PCoA 分析, 结果如图 3(c) 和图 3(d) 所示. 空间距离相近的采样点在 PCoA 图中距离较近, 说明其微生物群落结构类似. 上述两种分析结果可以确定尼洋河上游、中游和下游之间存在一定差异. Liu 等^[31] 利用分类回归树 (CART) 年代学分析, 认为海拔 3 308 m 以上时, 尼洋河附生原生动物总丰度和 Shannon-Wiener 多样性指数较高, 因此海拔可能是使尼洋河沉积物中微生物群落测序结果

出现空间差异的原因. 此外, 5 号点位的沉积物微生物群落结构与其他位点显著不同, 5 号点位于电站库区, 库区水流速度等水文条件与其他点位存在较大差异, 水文过程对水体沉积物微生物群落结构存在剧烈影响也在定量研究中被证实^[32,33], 水文条件可能通过改变植物生长状况而影响沉积物中养分状况, 进而对微生物群落结构产生影响. 本研究发现电站对底泥微生物结构存在影响, 值得开展更进一步的研究确定这种影响的规律.

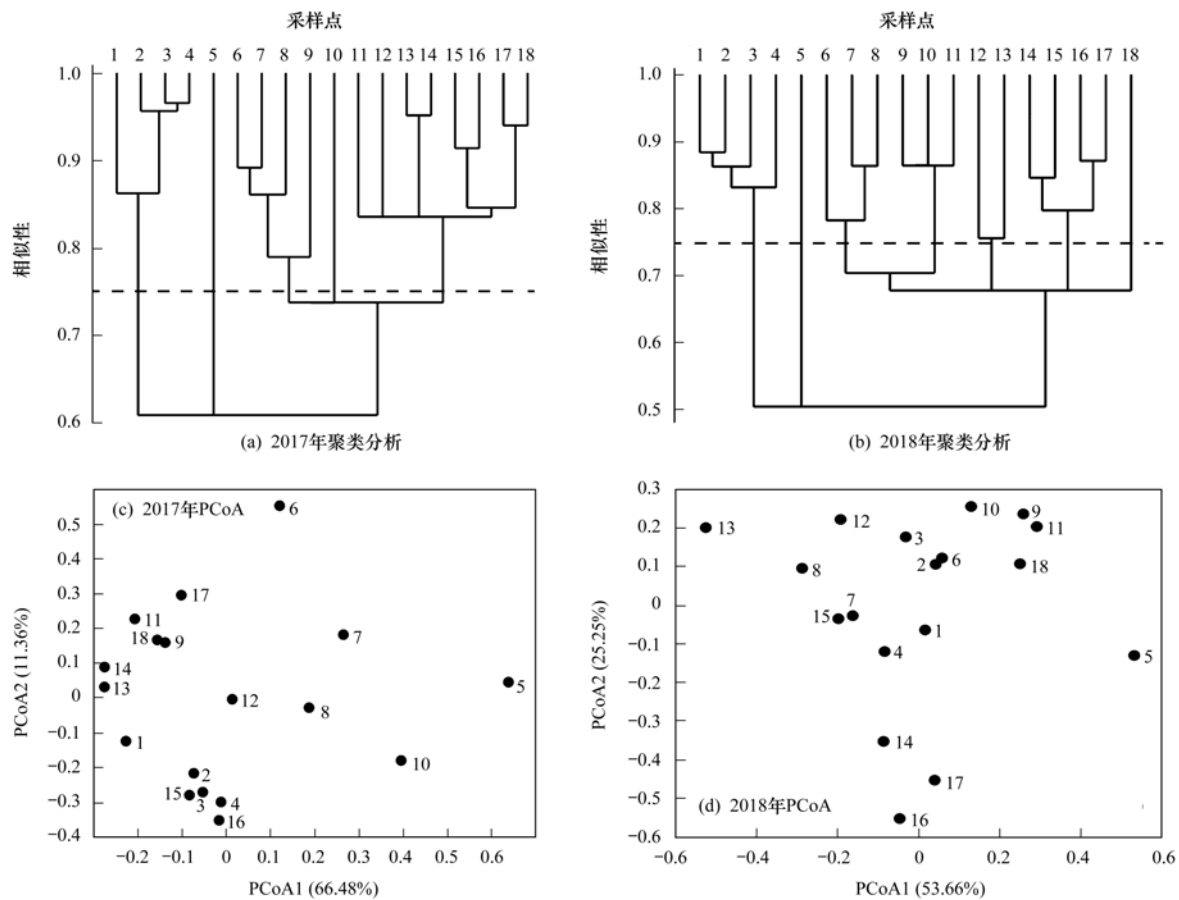


图3 尼洋河底泥微生物群落结构聚类分析及 PCoA 分析

Fig. 3 Results of clustering analysis and PCoA analysis of microbial community structure in Niyang River sediments

2.3 尼洋河沉积物微生物群落与环境因子的相关性

2.3.1 尼洋河水体理化指标分析

为分析尼洋河微生物群落与环境因子的相关性, 选择 2018 年尼洋河各采样点水样为代表进行了分析. 尼洋河 18 个采样点水温差异较大, 水温最高为 15.5℃ (13 号), 最低为 8.4℃ (1 号), 平均水温为 12.8℃ (表 1). 但各位点水体 pH 值差异不显著, 平均值为 8.61. 水体 DO 值较高, 可能与尼洋河流速快, 水体扰动较大有关. 水体 EC 值较低, 表明尼洋河河水整体离子浓度偏低. 对于水体中的 TP、TN 和 NH_4^+ -N 含量, 1 号点样品中 TP 和 TN 含量最

高, 整体呈现上游含量高于下游的趋势. 对比上述水体理化参数, 13 号采样点的所有指标与邻近位点比较出现异常, 该位点靠近养猪场废水排水口, 可能是造成该点位水质相关指标变化的主要原因. 另外, 16 号位点的营养元素指标值也比邻近位点高, 16 号位点靠近林芝县城区, 存在生活污水排入. 综合上述指标, 人类的生产和生活活动可能是造成尼洋河下游 (13 号和 16 号) 理化指标波动的重要原因.

尼洋河水体中 12 种典型金属浓度分析结果如图 4 所示. 尼洋河中金属整体含量较低, 18 个采样点中目标重金属浓度水平均低于地表水环境质量标

表 1 尼洋河水体理化指标
Table 1 Physical and chemical indexes of Niyang River

序号	$T/^{\circ}\text{C}$	pH	$\text{DO}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{EC}/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
1	8.4	8.69	8.10	150	0.34	1.64	0.50
2	10.0	8.65	8.47	151	0.22	1.49	0.39
3	11.2	8.57	8.40	135	0.16	1.37	0.48
4	12.3	8.41	8.95	141	0.14	1.00	0.42
5	15.4	8.62	8.01	94	0.12	1.15	0.53
6	11.8	8.71	8.47	90	0.14	1.46	0.29
7	12.7	8.54	9.07	91	0.16	1.25	0.33
8	14.0	8.59	7.92	119	0.07	0.95	0.60
9	13.2	8.59	7.82	112	0.10	0.90	0.45
10	14.1	8.49	7.62	109	0.17	0.59	0.49
11	13.1	8.56	7.28	107	0.12	0.56	0.18
12	12.1	8.58	8.56	21	0.08	0.44	0.07
13	15.5	9.33	3.26	265	0.29	1.19	0.58
14	14.8	8.48	6.37	105	0.11	0.95	0.36
15	12.0	8.34	8.61	32	0.09	0.77	0.23
16	14.1	8.44	7.95	73	0.29	1.19	0.46
17	12.6	8.65	8.03	99	0.13	0.88	0.11
18	13.1	8.72	8.32	100	0.10	0.93	0.12

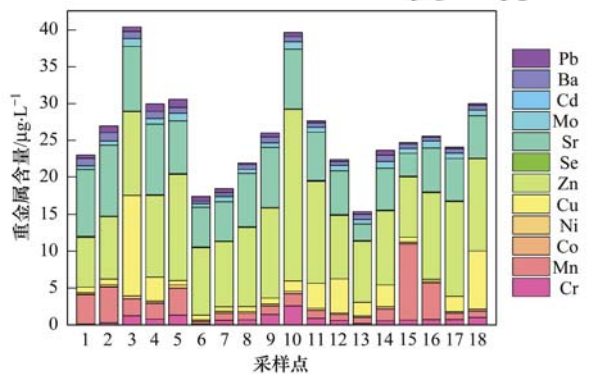


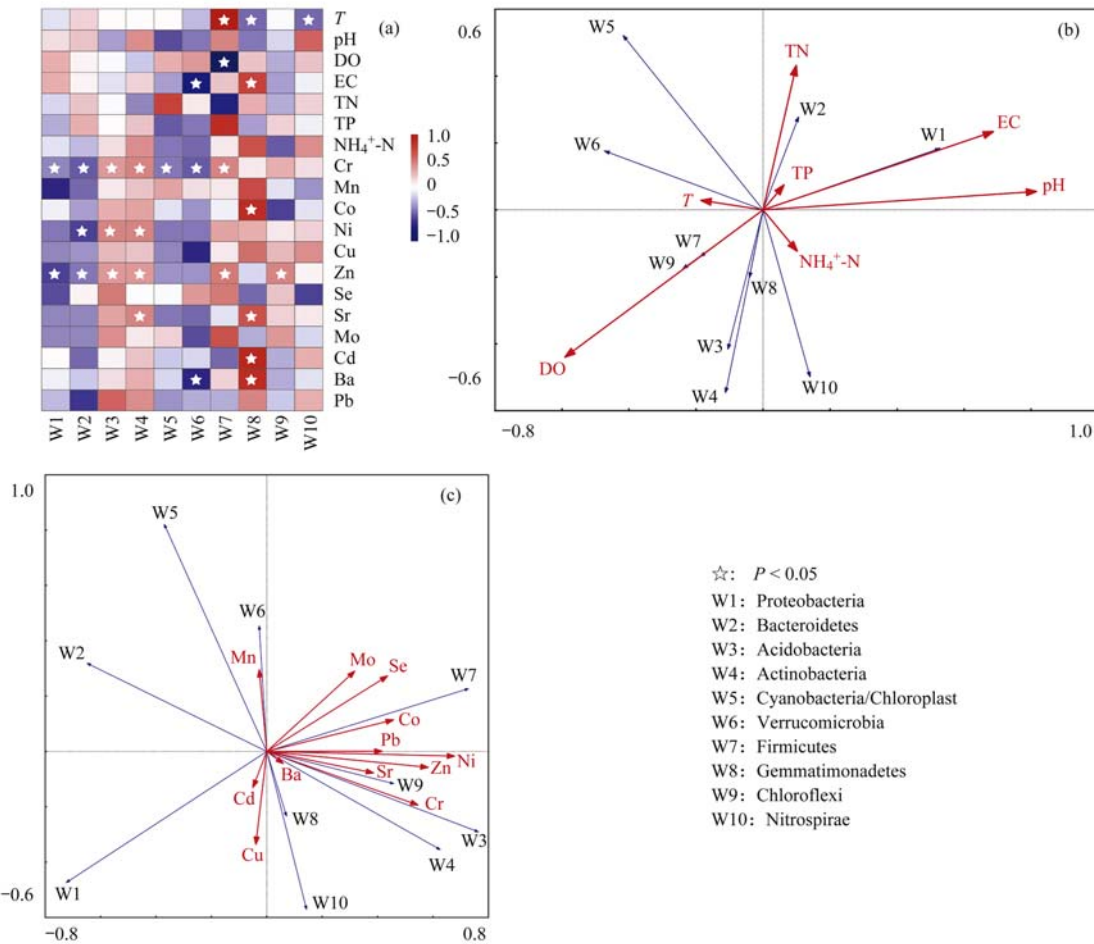
图 4 尼洋河水体中金属含量
Fig. 4 Metal concentrations in water of Niyang River

准(GB 3838-2002). 结合吕琳莉等^[9]对西藏尼洋河河水体重金属分布特征的调查结果,尼洋河整体未受到重金属污染.

2.3.2 尼洋河微生物群落与环境因子的相关性

基于上述获得的尼洋河沉积物微生物门水平丰度及环境因子含量,采用 Spearman 相关分析和 RDA 分析对微生物群落与环境因子的相关性进行了研究. Spearman 相关分析结果显示,尼洋河水体 T 、DO 和 EC 及金属含量与特定微生物门水平丰度存在一定相关性[图 5(a)]. Cr 和 Zn 是与尼洋河沉积物微生物种类相关性最高的两种因子. 其中, Cr 与 Proteobacteria、Bacteroidetes、Cyanobacteria/Chloroplast 和 Verrucomicrobia 呈显著负相关,与 Acidobacteria、Actinobacteria 和 Firmicutes 呈正相关. Zn 含量与 Proteobacteria 和 Bacteroidetes 呈显著负相关,与 Acidobacteria、Actinobacteria、Firmicutes 和

Chloroflexi 呈显著正相关. Gemmatimonadetes 与 T 、EC 及 Co、Sr、Cd 和 Ba 含量均呈现显著相关关系. 基于 RDA 分析, TN、TP 和 DO 是微生物群落结构的主要影响因子[图 5(b)]. TN 与 Acidobacteria、Actinobacteria 和 Gemmatimonadetes 丰度呈现显著负相关,与 Bacteroidetes 丰度呈现显著正相关; Chloroflexi 和 Firmicutes 丰度与 TN 呈现显著负相关,但与 DO 呈显著正相关; Proteobacteria 丰度与 EC 呈显著正相关,与 DO 呈显著负相关. Cr、Sr、Ba 和 Mn 等为尼洋河沉积物中微生物群落结构的重要影响因子[图 5(c)]. Cr、Sr 和 Ba 等与 Acidobacteria、Actinobacteria 和 Chloroflexi 等丰度呈显著正相关,与 Bacteroidetes 丰度显著负相关; Mn 与 Verrucomicrobia 丰度显著正相关,与 Gemmatimonadetes 和 Nitrospirae 丰度呈现显著负相关; Proteobacteria 丰度与 Mo 和 Se 呈现显著负相关. Rajapaksha 等^[34]的研究发现,革兰氏阴性菌中 *Flavobacterium* 等 7 个属对金属有耐受作用. 江玉梅等^[35]就鄱阳湖沉积物中重金属含量对微生物群落的影响进行研究,发现 Cu、Zn、Cd、Pb、Cr 和 Mn 与 138 个主要 OTU 显著相关. 本研究也发现尼洋河沉积物中与多种金属呈正相关的菌门,这些正相关的菌群可能是金属污染修复的重要微生物种质资源,这对尼洋河水环境管理与生态修复具有重要意义. 但尼洋河沉积物微生物群落结构与环境因子相互关系的具体机制较为复杂,不是简单的线性关系,相关分析和 RDA 分析所能解释的响应有限,更为具体的响应机制还需进行更深入和更系统地探究.



(a) Spearman 相关分析; (b) 微生物群落与理化指标的 RDA 分析; (c) 微生物群落与重金属的 RDA 分析

图 5 微生物群落与环境因子的关联分析

Fig. 5 Analysis of relationship between the microbial community and environmental factors

3 结论

(1) 尼洋河沉积物中 Proteobacteria 是优势菌门. 属水平上 *Flavobacterium* 丰度较高, *Aeromonas* 等条件致病菌属可被检出.

(2) 2017 年和 2018 年沉积物微生物门水平特征基本相同, 属水平特征相似. 在空间差异性方面, 上游、中游、下游不同河段沉积物微生物群落之间存在差异, 电站库区沉积物微生物群落具有特异性.

(3) 尼洋河水体环境因子(如 T 、 DO 和 TP 及金属等)对沉积物中微生物群落结构具有显著影响. 更具体的响应机制仍需更深入地研究分析.

参考文献:

- [1] Schindler M H, Gessner M O. Functional leaf traits and biodiversity effects on litter decomposition in a stream [J]. Ecology, 2009, 90(6): 1641-1649.
- [2] Hättenschwiler S, Tiunov A V, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, 36: 191-218.
- [3] Frey S D, Lee J, Melillo J M, et al. The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate [J]. Nature Climate Change, 2013, 3(4): 395-398.
- [4] Vymazal J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2007, 380(1-3): 48-65.
- [5] 赵兴青, 杨柳燕, 尹大强, 等. 不同空间位点沉积物理化性质与微生物多样性垂向分布规律 [J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3537-3545.
- Zhao X Q, Yang L Y, Yin D Q, et al. Vertical distribution of physicochemical characteristics and the microbial diversity in different spatial sediments samples in Lake Taihu [J]. Environmental Science, 2008, 29(12): 3537-3545.
- [6] 扎西达瓦. 浅谈尼洋河水能开发规划及环境保护措施 [J]. 西藏科技, 2014, (6): 26-28, 41.
- Zahidava. A brief discussion on the development planning and environmental protection measures of the Niyang River [J]. Tibet's Science and Technology, 2014, (6): 26-28, 41.
- [7] 马继洋. 浅谈西藏产业结构调整 and 可再生能源开发的关系 [J]. 西藏科技, 2009, (11): 24-27.
- Ma J Y. Discuss simply relation of Tibet industrial structure adjustment and renewable energy development [J]. Tibet's Science and Technology, 2009, (11): 24-27.
- [8] 张永恒, 宗永臣. 多布电站对尼洋河八一段水环境影响综合评价研究 [J]. 高原农业, 2018, 2(4): 427-432.
- Zhang Y H, Zong Y C. Study on the comprehensive evaluation of the influence of Duobu hydropower station on the water environment of Niyang River in Bayi [J]. Journal of Plateau Agriculture, 2018, 2(4): 427-432.

- [9] 吕琳莉, 李朝霞, 黄毅, 等. 西藏尼洋河水体重金属分布特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2019, **35**(9): 193-199.
Lü L L, Li Z X, Huang Y, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Niyang River, Tibet [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, **35**(9): 193-199.
- [10] 龚迎春, 冯伟松, 余育和, 等. 西藏尼洋河流域浮游动物群落结构研究[J]. 水生态学杂志, 2012, **33**(6): 35-43.
Gong Y C, Feng W S, Yu Y H, *et al.* Characteristics of zooplankton community structure in Niyang River basin of Tibet [J]. Journal of Hydroecology, 2012, **33**(6): 35-43.
- [11] 刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 等. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子的关系: 1. 浮游植物[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(5): 695-706.
Liu H P, Ye S W, Yang X F, *et al.* Spatial-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet: 1. Phytoplankton [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(5): 695-706.
- [12] 刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 等. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系: 2. 着生藻类[J]. 湖泊科学, 2013, **25**(6): 907-915.
Liu H P, Ye S W, Yang X F, *et al.* Spatio-temporal dynamics of aquatic organism community and their relationships to environment in Niyang River, Tibet: 2. Periphytic algae [J]. Journal of Lake Sciences, 2013, **25**(6): 907-915.
- [13] 刘海平, 叶少文, 杨雪峰, 等. 西藏尼洋河水生生物群落时空动态及与环境因子关系: 4. 浮游动物[J]. 湖泊科学, 2016, **28**(2): 370-378.
Liu H P, Ye S W, Yang X F, *et al.* Spatio-temporal characteristics of aquatic organism community and their relationship to environment in Niyang River, the branch of Yarlung Zangbo River, Tibet: 4. Zooplankton [J]. Journal of Lake Sciences, 2016, **28**(2): 370-378.
- [14] 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. 836.
- [15] 李明月, 杨雨虹, 米铁柱, 等. 海洋沉积物中细菌 DNA 和 RNA 水平群落差异[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2485-2495.
Li M Y, Yang Y H, Mi T Z, *et al.* Differences between DNA- and RNA-based bacterial communities in marine sediments [J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2485-2495.
- [16] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1704-1716.
Yang H, Zhang G Z, Yang X N, *et al.* Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing [J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1704-1716.
- [17] Guo X C, Miao Y, Wu B, *et al.* Correlation between microbial community structure and biofouling as determined by analysis of microbial community dynamics [J]. Bioresource Technology, 2015, **197**: 99-105.
- [18] Yin J B, Wu B, Liu S, *et al.* Rapid and complete dehalogenation of halonitromethanes in simulated gastrointestinal tract and its influence on toxicity[J]. Chemosphere, 2018, **211**: 1147-1155.
- [19] 林海, 蔡怡清, 李冰, 等. 北京市奶水河底泥微生物群落结构特征[J]. 生态学报, 2019, **39**(20): 7592-7601.
Lin H, Cai Y Q, Li B, *et al.* Characteristics of microbial community structure in Guishui river sediment in Beijing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(20): 7592-7601.
- [20] 张雅洁, 李珂, 朱浩然, 等. 北海湖微生物群落结构随季节变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(8): 3319-3329.
Zhang Y J, Li K, Zhu H R, *et al.* Community structure of microorganisms and its seasonal variation in Beihai Lake [J]. Environmental Science, 2017, **38**(8): 3319-3329.
- [21] 贾远航, 靳振江, 袁武, 等. 会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3313-3323.
Jia Y H, Jin Z J, Yuan W, *et al.* Comparison of soil bacterial community structure between paddy fields and dry land in the Huixian Karst Wetland, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3313-3323.
- [22] 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 等. 基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1666-1675.
Zhou S L, Sun Y, Zhang Y R, *et al.* Evolution characteristics and driving factors of denitrification community based on network analysis in the process of spring thermal layer formation in Zhocun reservoir [J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1666-1675.
- [23] 苏瑶, 许育新, 安文浩, 等. 基于微生物完整性指数的城市河道生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1270-1279.
Su Y, Xu Y X, An W H, *et al.* Assessment of ecosystem health of an urban river based on the microbe index of biotic integrity (M-IBI) [J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1270-1279.
- [24] 王杨, 朱斌, 童俊, 等. 基于活性微生物特征的供水管壁生物膜生长特性[J]. 环境科学, 2019, **40**(2): 853-858.
Wang Y, Zhu B, Tong J, *et al.* Growth features of water supply pipeline biofilms based on active microorganisms [J]. Environmental Science, 2019, **40**(2): 853-858.
- [25] 杨宏, 李会琳, 路璐. 嘉陵江(南充段)水体及其底泥中氨氧化微生物群落空间分布特征及其与环境因子关系[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(8): 1836-1846.
Yang H, Li H L, Lu L. Spatial distribution of ammonia-oxidizing microorganism in surface water and sediment in Jialing River (Nanchong section) and their relationship with environmental factors [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(8): 1836-1846.
- [26] Kanaly R A, Harayama S. Biodegradation of high-molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria [J]. Journal of Bacteriology, 2000, **182**(8): 2059-2067.
- [27] Schmidt A S, Bruun M S, Dalsgaard I, *et al.* Occurrence of antimicrobial resistance in fish-pathogenic and environmental bacteria associated with four Danish rainbow trout farms [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, **66**(11): 4908-4915.
- [28] Nayak S K. Role of gastrointestinal microbiota in fish [J]. Aquaculture Research, 2010, **41**(11): 1553-1573.
- [29] 马富平. 主养草鱼池塘微生物群落结构分析及嗜水气单胞菌拮抗菌筛选[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [30] 朱飞舟, 陈利玉, 陈汉春. 16S rRNA 基因序列分析法鉴定病原细菌[J]. 中南大学学报(医学版), 2013, **38**(10): 1035-1041.
Zhu F Z, Chen L Y, Chen H C. Identification of pathogenic microorganism by sequencing 16S rRNA gene [J]. Journal of Central South University (Medical Science), 2013, **38**(10): 1035-1041.
- [31] Liu H P, Ye S W, Yang X F, *et al.* Spatio-temporal variability

- of periphytic protozoa related to environment in the Niyang River, Tibet, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2017, **35**(3): 489-500.
- [32] 邹锋, 李金前, 韩丽丽, 等. 鄱阳湖湿地土壤微生物活性对年际水文变化的响应[J]. 湖泊科学, 2019, **31**(2): 551-559.
Zou F, Li J Q, Han L L, *et al.* Response of soil microbial functional traits to annually hydrological changes in Lake Poyang wetlands[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, **31**(2): 551-559.
- [33] 王静, 王冬梅, 任远, 等. 漓江河岸带不同水文环境土壤微生物与土壤养分的耦合关系[J]. 生态学报, 2019, **39**(8): 2687-2695.
Wang J, Wang D M, Ren Y, *et al.* Coupling relationships between soil microbes and soil nutrients under different hydrologic conditions in the riparian zone of the Lijiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(8): 2687-2695.
- [34] Rajapaksha R M C P, Tobor-Kaplon M A, Bååth E. Metal toxicity affects fungal and bacterial activities in soil differently[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2004, **70**(5): 2966-2973.
- [35] 江玉梅, 张晨, 黄小兰, 等. 重金属污染对鄱阳湖底泥微生物群落结构的影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3475-3486.
Jiang Y M, Zhang C, Huang X L, *et al.* Effect of heavy metals in the sediment of Poyang Lake estuary on microbial communities structure base on Mi-seq sequencing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3475-3486.

环境科学

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohe Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)