

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 方方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年际变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析

李鹏洋^{1,2}, 安启睿^{1,2}, 王新皓¹, 孙思宇^{1,2}, 李肖乾^{1,2}, 郑娜^{2*}

(1. 吉林大学新能源与环境学院, 长春 130012; 2. 吉林大学地下水资源与环境教育部重点实验室, 长春 130012)

摘要: 沉积物微生物群落在水生态系统的物质循环中发挥着关键的作用, 群落结构组成的变化经常与环境的改变有关. 以辽河四平段流域为研究区域, 运用高通量测序结果对沉积物微生物群落的结构组成和多样性进行分析. 结果表明, 辽河四平段流域河流沉积物微生物群落 α 多样性以北河支流最高, 干流次之, 南河支流最低; β 多样性表现为干流、北河支流和南河支流的微生物群落的相似性较低, 差异性较大. 变形菌门是该流域微生物群落门水平上丰度最高的优势菌门, 并且与其他东北地区的河流类似, 该流域河流沉积物中的厚壁菌门含量较低; γ -变形菌纲是该流域河流沉积物微生物群落占比最高的菌纲, 但是 β -变形菌纲在该流域丰度很低; 而属于 β -变形菌纲 *Ellin6067* 菌属在该流域分布很广. 环境因子例如沉积物重金属和水体理化性质也会对微生物群落的多样性和种群结构产生多种影响. 结果为实现修复辽河四平段流域河流的水体污染工作提供了理论依据.

关键词: 沉积物; 微生物群落; 多样性; 群落结构组成; 环境因子

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2586-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202107032

Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River

LI Peng-yang^{1,2}, AN Qi-rui^{1,2}, WANG Xin-hao¹, SUN Si-yu^{1,2}, LI Xiao-qian^{1,2}, ZHENG Na^{2*}

(1. School of New Energy and Environment, Jilin University, Changchun 130012, China; 2. Key Laboratory of Groundwater Resources and Environment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: Sediment microbial communities play a key role in the material cycle of aquatic ecosystems, and changes in community structure are often related to environmental change. In this study, the Siping basin of the Liaohe River was used as the research area, and high-throughput sequencing results were used to analyze the structure and diversity of sediment microbial communities. The results showed that the α -diversity of the river sediment microbial communities in the Siping section of the Liaohe River was the highest in the tributaries of the north river, followed by that in the main stream, and the tributaries of the south river had the lowest. The β -diversity showed that the microbial communities of the main stream, the tributaries of the north river, and the tributaries of the south river had lesser similarities and greater differences. Proteobacteria were the dominant phyla with the highest abundance at the level of the microbial community in this basin. However, the content of Firmicutes in river sediments in this basin was low, which is similar to that in other rivers in Northeast China. γ -Proteobacteria was the class of bacteria that occupied the highest proportion of the sediment microbial communities, but the abundance of β -Proteobacteria in this watershed was very low. However, the genus *Ellin6067* belonging to β -Proteobacteria was widely distributed in this watershed. Environmental factors, such as heavy metals in sediments and physical and chemical properties of water, can also have a variety of effects on the diversity and population structure of microbial communities. The results of this research provide a theoretical basis for the restoration of water pollution in the rivers of the Siping section of the Liaohe River.

Key words: sediment; microbial community; diversity; community structure composition; environmental factors

沉积物作为水生态系统的重要组成部分, 不仅给水生动植物提供了栖息地^[1], 还给微生物提供了生存繁衍的环境^[2,3]. 沉积物微生物通过同化和异化等代谢过程来完成水生态系统中氮、磷和碳等营养元素的降解和生物地球化学循环过程^[4]. 由于微生物对水生态系统环境的变化非常敏感, 微生物多样性和群落结构特征与环境变化密切相关^[5,6]. 因此, 全面系统性了解水生态系统中的沉积物微生物群落的结构组成, 对于维护水体环境具有重要的意义^[7].

辽河流域是我国重要的重工业基地、粮食生产基地和畜牧业基地, 在全国的经济发展中占有举足轻重的地位. 但是随着经济的发展, 水体污染问题也

越来越突出. 尤其是四平市因城镇污水处理能力弱、排放标准低和重污染企业缺乏监管, 因此境内辽河支流存在污染问题^[8]. 本文将研究区域定位成辽河四平段流域, 沿着四平段河流沿线采样, 系统性地分析各点微生物群落的生长情况. 应用高通量测序来实现微生物的基因定序、 α 多样性分析和群落结构类型; 运用层次聚类分析和主成分分析来分析 β 多样性; 运用 Pearson 相关分析和 RDA 分析来探究沉积物重金属和微生物群落结构和多样性的关系.

收稿日期: 2021-07-05; 修订日期: 2021-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41722110, 41571474)

作者简介: 李鹏洋(1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水体沉积物重金属污染, E-mail: 1462762523@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhengnalzz@jlu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽河流域是我国的七大流域之一,位于我国东北地区西南部,属于温带大陆性气候,年平均降水量约为 500 ~ 650 mm,年平均气温为 4 ~ 9℃; 河流总长度为 1 345 km,流域总面积为 21.9 万 km². 其中本研究中的四平市流域属于中部山地和下游平原,河长 199.6 km,流域面积 7 316 km², 占总流域面积的 65.3%.

1.2 样本采集

本文以辽河四平市流域为研究对象,采集该流域的水样和河底沉积物样品进行处理分析. 借助全球定位系统(GPS)于 2020 年 10 月中旬在四平市流域设置沉积物和水体采样点 15 个(N1 ~ N7、M1 ~ M3 和 S1 ~ S5; 其中 N 点表示北河支流, S 点表示南河支流, M 点表示干流),如图 1 所示,采集到水体和底泥样品,每个样品采集 3 份. 将采集到的样品放入干净的聚乙烯瓶和聚乙烯自封袋中冷冻保存运回实验室. 其中水体样品在实验室抽滤过后马上进行分析测定; 沉积物样品在剔除砾石、贝壳及动植物残体等杂质后储存在 -20℃ 冰箱里以备后续微生物等的测定^[9].

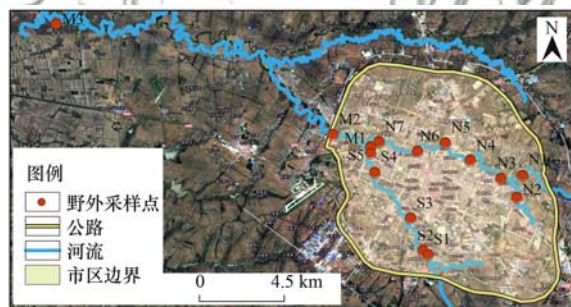


图 1 辽河四平段流域采样点位置示意

Fig. 1 Schematic diagram of sampling sites in the Siping basin of Liaohe River

1.3 样本分析方法

重金属含量的测定^[10]: 首先,将沉积物样品风干后,去除石块和植物碎片,然后将样品打成粉末,之后通过 100 目筛,在分析前将样本粉末存放在酸洗和去离子水冲洗的玻璃瓶中. 重金属元素含量测定时,准确称取 0.25 g(精确到 0.000 1 g)沉积物,放入聚四氟乙烯容器中,用 3 mL 硝酸和 0.25 mL 氢氟酸进行消化. 混合物在电消化仪上于 120℃ 加热 1 h,另外加入 2 mL 硝酸、0.25 mL 氢氟酸和 1 mL 高氯酸后于 180℃ 加热 2 h. 残渣用 1 mL 硝酸在 120℃ 下蒸发近干,重复操作此赶酸步骤 3 次. 冷却后,将残渣用去离子水稀释至 25 mL,过 0.22 μm 滤膜,然

后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)分析 V、Co、Cd、Cr、Pb、Cu、Zn 和 Ni. 测试过程中每批样品均测定空白样和平行样,且控制重金属平行样之间的相对误差在 5% 以下. 最后的实验数据是在扣除空白值后,取各元素平行样的平均值,标准物质的回收率在 80% ~ 120% 范围内,标准物质选用 GBW08301 河流沉积物成分分析标准物质.

理化性质测定: 将采集的水样在实验室抽滤过后测定其理化性质. pH 值用 pH 计测定; 氨氮(NH₄⁺)采用纳氏试剂分光光度法测定; 化学需氧量(COD)采用高锰酸钾法测定; 总氮(TN)用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; 总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼锑钨比色法测定^[11].

微生物活性的测定: 使沉积物样品冷冻干燥后称取 0.5 g 于 2 mL 裂解管中,使用 FastDNA Spin Kit for Soil 试剂盒(MPbio, USA),按照试剂盒说明步骤提取 DNA. 然后用 0.8% 琼脂糖测定 DNA 提取质量,并使用 DNA 分离试剂盒(Omega, Norcross, GA, USA)从 0.5 g 底泥样品中提取总 DNA. 使用 NanoDrop NC 2000(Thermo Scientific, Waltham, MA, USA)对 DNA 进行定量,并通过电泳在 0.8% 琼脂糖凝胶上测定其质量. 纯化后的样品被送至上海派森诺科技有限公司(中国),使用 Illumina MiSeq 高通量测序平台进行测序. 使用细菌 16S rRNA 基因 V4 区域的引物(515F 和 806R)进行 PCR 扩增. 运用 QIIME2(v1.8.0, <http://qiime.org/>)用于确定问题序列. QIIME2 通过应用考虑每个序列的丰度及其与其他序列的相似性的误差模型,采用 DADA2 来构建扩增子序列变体(amplicon sequence variants)^[12].

1.4 数据分析

运用 SPSS24 进行重金属和微生物群落多样性的描述统计和 Pearson 相关分析; 运用 ArcGIS10.2 绘制采样图; 用 Canoco5.0 软件绘制 RDA 分析.

2 结果与讨论

2.1 沉积物微生物群落多样性分析

在群落生态学中, α 多样性主要关注单样本的多样性分析,可以反映微生物群落中物种的数目,通过一系列统计学指数的分析来估计环境群落的物种丰度和多样性. 其中 Chao1 指数和 Observed species 指数用来表征物种的丰富度^[13,14], Shannon 指数和 Simpson 指数用来表征物种的多样性^[15,16]. Chao1 指数和 Observed species 指数数值越大,表明微生物群落丰度越高. 如表 1 所示,辽河四平段流域干支流 Chao1 指数平均值分别为: 12 793[南河(S1 ~ S5)支流]、14 237[北河支流(N1 ~ N7)]和 12 949[干流

(M1 ~ M3)] ; Observed species 指数平均值分别为: 8 224(南河支流)、8 589(北河支流)和8 318(干流). 结果表明,在四平市流域北河支流沉积物微生物群落丰富度最高,南河支流和干流的沉积微生物群落丰富度接近,且均低于北河支流. Shannon 指数和 Simpson 指数数值越大,表明微生物群落多样性和均一性越好. 在四平市流域内,除南河支流样品 S4 之外,其他沉积物样品 Shannon 指数范围为:

表 1 微生物群落 α 多样性指数平均水平

样品	Chao1 指数	Observed species 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
干流	12 949 $\pm$ 1 012	8 318 $\pm$ 1 040	11. 24 $\pm$ 0. 54	0. 997 $\pm$ 0. 001
北河支流	14 237 $\pm$ 1 389	8 589 $\pm$ 1 255	11. 30 $\pm$ 0. 78	0. 996 $\pm$ 0. 004
南河支流	12 793 $\pm$ 2 134	8 224 $\pm$ 1 458	10. 96 $\pm$ 0. 97	0. 992 $\pm$ 0. 012

在群落生态学中, β 多样性指数聚焦于不同生境间多样性的比较,也就是样本间的差异. 图 2 为基于门水平的辽河四平市段干支流 15 个样品点的 Venn 图分析结果. 从中可知,四平市段南河支流(S1 ~ S5)、北河支流(N1 ~ N7)和干流(M1 ~ M3) 15 个样品组共有的 OTU 序列为 98 个, 15 个样品组独有的 OTU 序列范围为1 430 ~ 3 832 个. 整体而言,独有的 OTU 序列平均数分别为: 2 249(南河支流)、2 697(北河支流)和2 675(干流),独有的 OTU 序列数排序为:北河支流 > 干流 > 南河支流. 北河支流流经的地区多为四平市市的郊区和农村,相比南河支流流经四平市市的城区,环境条件更接近自然,水体污染相对较轻,也就更适应微生物的生长繁殖,微生物多样性也就更高,独有的 OTU 序列也就更多^[18]. 图 2 分析结果表明,由于地理位置和外界环境条件(如水体理化性质和沉积物重金属)的不同,干支流间

10. 21 ~ 12. 03; Simpson 指数范围为: 0. 989 ~ 0. 999; Shannon 指数平均值分别为:10. 96(南河支流)、11. 30(北河支流)和 11. 24(干流); Simpson 指数平均值分别为:0. 992(南河支流)、0. 996(北河支流)和 0. 997(干流). α 多样性各项指标的数值比较高,说明辽河四平市流域干支流沉积微生物群落多样性较高,水体环境适合微生物的生长繁殖^[17].

的沉积微生物类型存在较大差异,共有的 OTU 序列数量较少.

基于属的水平上的辽河四平市段干支流 15 个样品点的 PCA 分析结果如图 3 所示. 特征值高于 1 的两个主要成分被提取,这解释了 85. 65% 的沉积物细菌群落组成的变化,坐标轴 PC1 能解释 65. 55% 的微生物群落组成差异,第二坐标轴 PC2 能解释出 20. 1% 的微生物群落组成差异. 结果表明,不同取样点微生物群落组成有明显差异. 在 PC1 维度上,N4 点沉积物样品与其他样品很明显分开;在 PC2 维度上,N7 和 S5 沉积物样品与其他样品明显分开,表明两者的微生物群落存在明显差异. 支流 N1、N2、N3、N5、S3 和干流 M3 群落组成相似,其中 4 个北河支流样品群落组成相似度更高;支流样品 M1 和 N6 沉积微生物群落组成

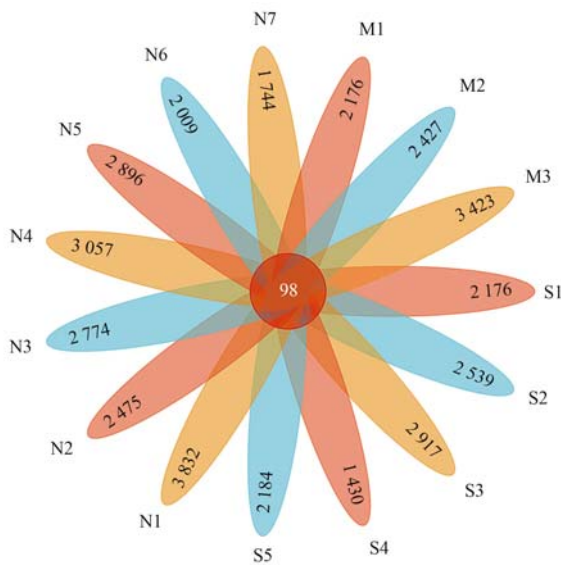


图 2 河流沉积物微生物群落 Venn 图

Fig. 2 Venn diagram of microbial communities in river sediments

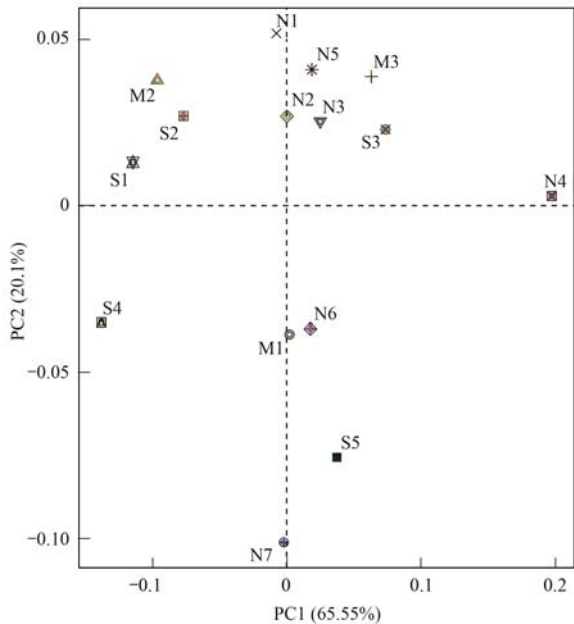


图 3 河流沉积物微生物群落 PCA 分析

Fig. 3 PCA analysis of microbial communities in river sediments

也具有相似性. 此外,北河支流样品 N4、N7 和南河支流样品 S5 与其他样品组在 PCA 图上的距离比较远,PCA 分析的结果与图 4 层次聚类分析相似. 表明这 3 个样品点的沉积微生物群落组成类型与其他样品点差别较大,且这 3 个样品点微生物群落组成类型具有特异性.

层次聚类是常用的 β 多样性分析手段. 如图 4 所示,使用 Bray-Curtis 相似度^[19],将 15 个基于微生物类别的辽河四平市流域干支流沉积物样本分为不同的组. 结果表明,北河支流 (N1 ~ N7) 沉积物样品细菌群落组成类似,南河支流和干流沉积物样品细菌群落组成具有差异性. 第一组由样品 N6、N7、

S4、S5 和 M1 组成,包括北河、南河支流和干流. 与其他组相比,这一组的沉积物样品具有最高的硫化菌属 (*Thiobacillus*, 5.78%) 和拟杆菌属 (*Bacteroides_vadinHA17*, 6.47%); 第二组由南河支流样品 S1、S2 和干流样品 M2 组成,主要以 *Ellin6067* 和 *SC. I. 84* 等细菌为主; 第三组全部由北河支流样品 (N1、N2、N3 和 N5) 组成,具有较高的 *Ellin6067*、*KD4. 96* 和 *Subgroup_6* 细菌的丰富度. 第四组由样品 M3 和 S3 组成,主组成菌属为 *Ellin6067*、*Subgroup_6* 和 *MND1*. 北河支流样品 N4 与其他样品沉积物微生物群落组成差异较大,具有最高的黄杆菌属 (*Flavobacterium*, 18.54%).

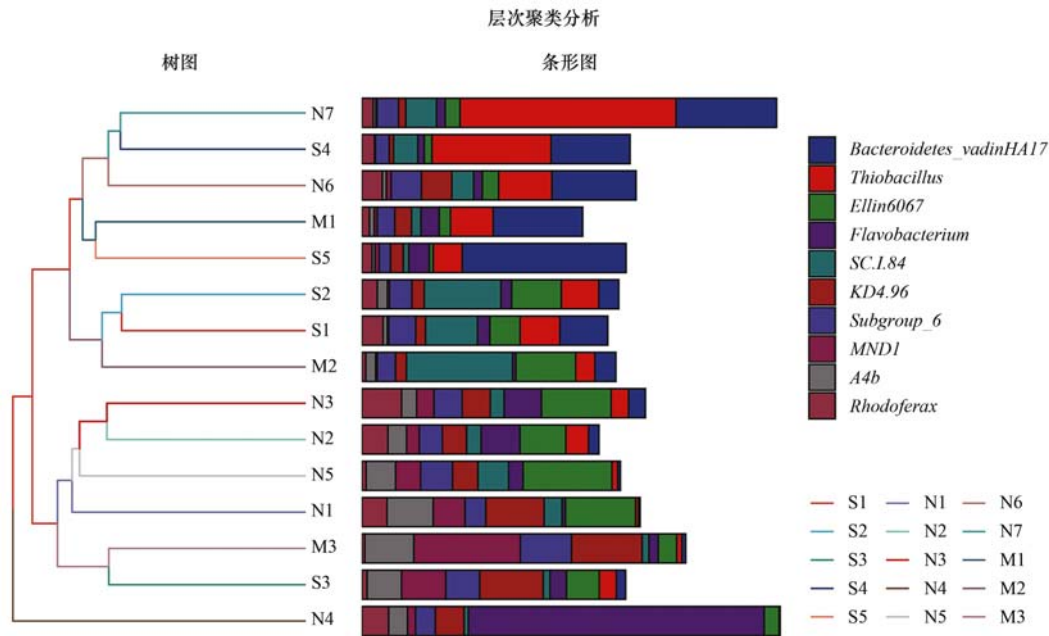


图 4 沉积微生物群落层次聚类树图

Fig. 4 Hierarchical cluster tree diagram of sedimentary microbial community

通过 Venn 图、PCA 分析和层次聚类分析,分别从门和属两个水平上来分析微生物群落的 β 多样性后发现,干流、南河支流和北河支流的差异性较大. 在门水平上, β 多样性:南河支流 < 干流 < 北河支流; 在属水平上,北河支流的各点的优势菌属差异性不大,南河支流各点的优势菌属差异性较大,干流与接近干流的 N6 和 N7 与 S4 和 S5 相近.

2.2 沉积物微生物群落结构特征

辽河四平段流域各采样点沉积物中微生物在门水平上的相对丰度如图 5(a) 所示. 其中干流 (M1 ~ M3) 的优势菌门 (平均丰度大于 5%) 为:变形菌门 (*Proteobacteria*, 50.51%)、绿弯菌门 (*Chloroflexi*, 14.44%)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*, 10.90%)、放线菌门 (*Actinobacteria*, 7.29%) 和酸杆菌门 (*Acidobacteria*, 5.70%); 南河支流 (S1 ~ S5) 的优势菌门为:变形菌门 (*Proteobacteria*, 51.18%)、拟

杆菌门 (*Bacteroidetes*, 13.92%) 和绿弯菌门 (*Chloroflexi*, 7.87%); 北河支流 (N1 ~ N7) 的优势菌门为:变形菌门 (*Proteobacteria*, 43.17%)、拟杆菌门 (*Bacteroidetes*, 13.82%)、放线菌门 (*Actinobacteria*, 6.78%) 和绿弯菌门 (*Chloroflexi*, 6.47%). 在门水平上,辽河四平市段干流和南河、北河支流沉积物微生物群落组成体现出一定的异同性,相似的地方体现在干支流沉积物微生物群落中,变形菌门、拟杆菌门和绿弯菌门均为优势菌门,其中变形菌门为丰度最高的菌落,在干、支流所有样品中相对丰度为 35.86% ~ 70.18%,在地表水体沉积物微生物群落中是常见的优势菌门,这与中国黄河内蒙古段、湖北丹江口库区、辽宁双台子河、江西鄱阳湖、江苏太湖和辽宁辽河入海口以及美国密西西比河等不同河流湖泊的沉积物微生物群落组成类型相似,但又有一定区别^[20~25]. 例如黄河内蒙古

段表层沉积物细菌主要菌群为:变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门和厚壁菌门;鄱阳湖典型湿地主要菌群为:变形菌门、酸杆菌门、绿弯菌门、硝化螺旋菌门和厚壁菌门等;太湖沉积物微生物群落主要菌群为:贝氏和伽玛变形杆菌门、酸性杆菌门、芽孢杆菌门、厚壁菌门和放线菌门等;丹江口库区表层沉积物主要菌群为:变形菌门、绿弯菌门、拟杆菌门和硝化螺旋菌门等;双台子河口沉积物主要菌群是变形菌门、放线菌门、拟杆菌门、酸杆菌门和绿弯菌门;辽河口沉积物主要菌群为变形菌门、拟杆菌门和酸杆菌门.可以看出不同河流沉积物微生物群落组成类型具有差异性,厚壁菌门在大多数地区的河流沉积物微生物群落中均为优势菌门,但在我国东北地

区河流(双台子河和辽河入海口)沉积物微生物群落中丰度较低,这与本研究的结果相似,厚壁菌门在辽河四平段流域干支流沉积物微生物群落中相对丰度低于5%,不作为优势菌门而存在.酸杆菌门在干流属于优势菌门,而在南河、北河支流中丰度较低,不属于优势菌门;支流沉积物微生物优势菌门丰度较为相近,区别在于放线菌门在北河支流是优势菌门(6.78%),而在南河支流却不是优势菌门.

辽河四平段流域各采样点沉积物中微生物在纲水平上的相对丰度如图5(b)所示.其中干流的优势菌纲(相对丰度大于5%)分别为: γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria, 35.30%)、厌氧蝇菌纲(Anaerolineae, 10.74%)、拟杆菌纲(Bacteroidia,

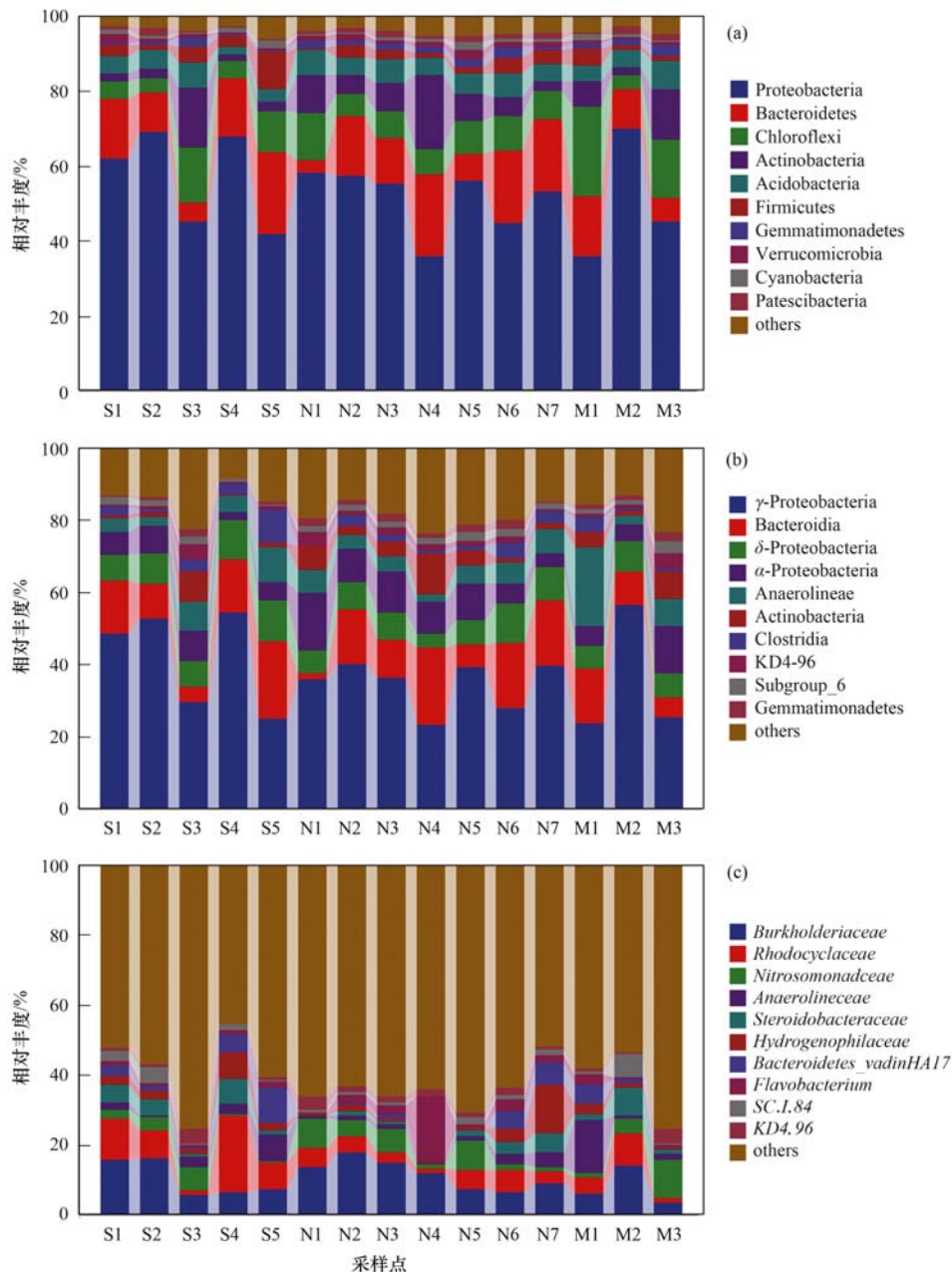


图5 河流沉积物微生物群落结构组成

Fig. 5 Composition of the microbial community structure in river sediments

9.82%)、 α -变形菌纲(α -Proteobacteria, 7.77%)和 δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria, 7.23%);南河支流的优势菌纲与干流基本相同,但是丰度分别为:42.04%、5.70%、12.98%、5.99%和8.97%;北河支流的优势菌属分别为: γ -变形菌纲(γ -Proteobacteria, 34.62%)、拟杆菌纲(Bacteroidia, 13.16%)、 α -变形菌纲(α -Proteobacteria, 9.30%)和 δ -变形菌纲(δ -Proteobacteria, 7.44%)。由此可见,在辽河四平市段干支流沉积物中, γ -变形菌纲占据着比较重要的生态位置。变形菌门不同纲的菌群在沉积物中的丰度变化也是微生物群落结构研究中的一个重要指标。 α -变形菌纲是淡水细菌群落中一个典型的优势类群,包括了能与植物共生的固氮细菌,可为土壤提供更强的固氮能力^[26]。 δ -变形菌纲大部分成员生活在厌氧条件下,很多还是严格的厌氧菌属^[27]。 β -变形菌纲更易存活于受污染的环境中,可作为环境质量监测与评价的生态指标^[28], β -变形菌纲广泛存在于松花江和海宁长山河等^[29,30],但是在辽河四平段流域 β -变形菌纲并非优势菌纲。有研究发现,海洋及近海沉积物中变形菌门以 γ -变形菌纲为主^[31],且 γ -变形菌纲在沉积物厌氧氨氧化过程中起着重要作用^[32]; γ -变形菌纲还包含了大量的致病菌,如沙门氏菌属、军团菌属和弧菌属等^[33]。因此在本研究中, γ -变形菌纲在微生物群落中的大量存在表明辽河四平市干支流沉积物中碳、氮含量较高且碳氮循环较为频繁,同时 γ -变形菌纲的大量存在对人民群众的身体健康也有很大的风险。

辽河四平段流域各采样点沉积物中微生物在属水平上的相对丰度如图5(c)所示,从微生物菌属组成图和层次聚类分析可知,干支流沉积物环境中的优势菌属是有一定的差异性的。干流沉积物样本中丰富度最高的是 SC. I. 84 (2.56%)、拟杆菌属(*Bacteroidetes _ vadinHA17*, 2.38%)和 KD4. 96 (2.06%);南河支流沉积物样本中丰度度最高的是拟杆菌属(*Bacteroidetes _ vadinHA17*, 4.00%)、*Ellin6067*(3.04%)和 SC. I. 84 (2.07%);北河支流

沉积物样本中丰富度最高的是黄杆菌属(*Flavobacterium*, 3.65%)、*Ellin6067*(2.87%)和硫化菌属(*Thiobacillus*, 2.86%)。拟杆菌属是在人体和动物体的消化系统中发挥重要作用的菌属,主要分布在口腔和肠道等处,其中一部分细菌主要用来分解糖类^[34]。硫化菌属常见于矿山的水坑中,可使金属硫化物氧化成硫酸,使矿物中的金属被溶解,其氧化作用提供了植物可利用的硫酸态硫素营养^[35]。从分析结果来看, *Ellin6067* 广泛存在于南河支流、北河支流和干流的部分地区, *Ellin6067* 在微生物分类上属于 β -变形菌纲,在生物的脱氮除磷和去除其他污染物的过程中起关键性作用^[36];辽河四平段流域部分采样点的氮元素和COD轻度超标,沉积物碳氮循环交流也很频繁,但是 β -变形菌纲在辽河四平段流域并不是优势菌纲,据此可以推测,辽河四平段流域存在轻度的水体富营养化问题。

2.3 环境因子对微生物群落差异的影响

由于微生物对水生态系统环境的变化非常敏感,微生物多样性和群落结构特征与环境变化密切相关,研究环境因子对微生物群落差异性的影响具有现实意义。本研究选取沉积物重金属(V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd和Pb)和河流水体的化学需氧量(COD)、氨氮(NH₄⁺)、总氮(TN)、总磷(TP)和pH作为环境因子,具体情况如表2和表3。环境因子与沉积物微生物群落 α 多样性指数的Pearson相关分析如表4所示。其中Cr、Cu和Chao1指数,Cu和Observed species指数呈负相关性($P < 0.05$),水体NH₄⁺与Chao1指数、Observed species指数呈显著负相关($P < 0.01$);据此笔者可以推测出,沉积物Cr、Cu和水体NH₄⁺会降低沉积物中微生物的丰富度^[37,38]。沉积物Ni和Cu对Shannon指数和Simpson指数呈负相关性($P < 0.05$),水体NH₄⁺对Shannon指数呈负相关性;笔者推测,沉积物Cu、Ni和水体NH₄⁺会对沉积物中微生物群落的均一性和多样性造成不利的影响^[38,39]。

表2 沉积物重金属含量
Table 2 Heavy metal content in sediments

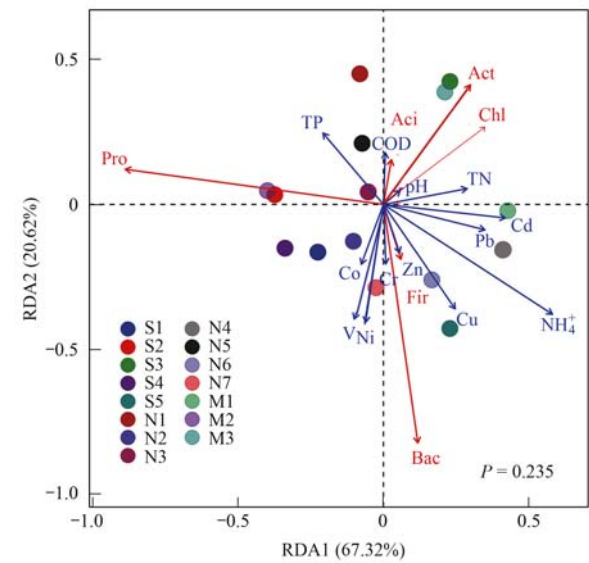
项目	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
$\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	57.72 $\pm$ 10.86	31.80 $\pm$ 18.25	11.38 $\pm$ 2.60	14.14 $\pm$ 6.31	23.47 $\pm$ 10.52	123.62 $\pm$ 61.91	0.60 $\pm$ 0.55	23.71 $\pm$ 15.88

表3 水体理化性质
Table 3 Physical and chemical properties of water body

项目	$\rho(\text{COD})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{NH}_4^+)/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
数值	26.21 $\pm$ 17.39	0.51 $\pm$ 0.26	8.46 $\pm$ 7.33	0.04 $\pm$ 0.07	7.66 $\pm$ 0.15

利用 Canoco5.0 软件对四平段流域细菌门水平丰度与环境因子进行冗余分析(RDA),结果如图6所示.箭头长度表示环境因子对微生物群落结构的影响强度,箭头越长就说明相关性越强,箭头连线之间的锐角表示是正相关,钝角表示是负相关^[40].结果说明,该流域的微生物群落受沉积物金属元素 Cu、V、Ni 和水体的 NH₄⁺ 的影响较大,其中 NH₄⁺ 与绿弯菌门、拟杆菌门和厚壁菌门呈正相关,与变形菌门和酸杆菌门呈负相关;Cu 与拟杆菌门和厚壁菌门呈正相关,与变形菌门、绿弯菌门和酸杆菌门呈负相关;V、Ni 与拟杆菌门和厚壁菌门呈正相关,与绿弯菌门和放线菌门呈负相关.微生物对金属离子的耐性值是一定的,当金属离子浓度过高超过微生物的耐性值时,会引起微生物群落结构发生变化^[41],如在高浓度的 Cu 离子的胁迫下,对 Cu 离子敏感的微生物的生长会受到明显的抑制作用,从而导致微生物群落的衰亡和多样性的降低^[42].氨氮的浓度变化也会影响部分微生物群落的生长,例如高浓度氨氮会抑制与自养型硝化作用有关的 β -变形菌纲细菌的活性,进而降低变形菌门的丰富度

和多样性^[43].



Pro: Proteobacteria (变形菌门), Bac: Bacteroidetes (拟杆菌门), Chl: Chloroflexi (绿弯菌门), Act: Actinobacteria (放线菌门), Aci: Acidobacteria (酸杆菌门), Fir: Firmicutes (厚壁菌门)

图6 环境因子和门水平上优势菌的 RDA 分析

Fig. 6 RDA analysis of dominant bacteria at environmental factor and phylum level

表4 环境因子与微生物 α 多样性指数的 Pearson 相关性¹⁾

Table 4 Pearson correlation between environmental factors and microbial α diversity index

	Chao1 指数	Observed species 指数	Shannon 指数	Simpson 指数
COD	-0.32	0.04	0.06	0.09
pH	0.42	0.30	0.33	0.22
NH ₄ ⁺	-0.73 **	-0.67 **	-0.54 *	-0.22
TN	-0.17	-0.22	-0.16	0.03
TP	-0.13	0.05	0.06	0.02
V	-0.35	-0.51	-0.51	-0.51
Cr	-0.53 *	-0.44	-0.47	-0.47
Co	-0.3	-0.33	-0.34	-0.34
Ni	-0.5	-0.51	-0.54 *	-0.54 *
Cu	-0.58 *	-0.60 *	-0.55 *	-0.57 *
Zn	-0.13	-0.22	-0.13	-0.15
Cd	-0.32	-0.33	-0.21	-0.24
Pb	-0.37	-0.37	-0.28	-0.30

1) * 表示为相关系数在 0.05 水平上显著, ** 表示为相关系数在 0.01 水平上显著

3 结论

- (1)对辽河四平段流域沉积物微生物群落 α 多样性来说,群落丰富度和多样性:北河支流 > 干流 > 南河支流; β 多样性表现为干流、南河支流和北河支流微生物群落的相似度较低,差异性较大.
- (2)变形菌门是沉积物微生物群落占比最高的门类,在其他流域常为优势菌门的厚壁菌门在本流域丰度较低; 包含大量的致病菌的 γ -变形菌纲是该流域沉积物微生物群落占比最高的菌纲,流域内存在着沉积物释放大 量病原菌进入水体影响人体健康

- 的风险; 而生态恶化的指标 β -变形菌纲在该流域丰度很低,属于 β -变形菌纲 *Ellin6067* 菌属在该流域分布很广.
- (3) 沉积物 Cr、Cu、水体 NH₄⁺ 会降低沉积物中微生物的丰富度,沉积物 Cu、Ni 和水体 NH₄⁺ 会对沉积物中微生物群落的均一性和多样性造成不利的影响; 沉积物 Cu、V、Ni 和水体 NH₄⁺ 会通过影响部分微生物的生长,进而影响微生物群落结构的变化.

参考文献:

[1] 季斌, 杭小帅, 梁斌, 等. 湖泊沉积物重金属污染研究进展

- [J]. 污染防治技术, 2013, **26**(5): 33-40.
- Ji B, Hang X S, Liang B, *et al.* Advances in heavy metals contamination of lake sediment [J]. Pollution Control Technology, 2013, **26**(5): 33-40.
- [2] Perkins T L, Clements K, Baas J H, *et al.* Sediment composition influences spatial variation in the abundance of human pathogen indicator bacteria within an estuarine environment [J]. PLoS One, 2014, **9**(11), doi: 10.1371/journal.pone.0112951.
- [3] Jamieson R, Gordon R, Joy D, *et al.* Assessing microbial pollution of rural surface waters: a review of current watershed scale modeling approaches[J]. Agricultural Water Management, 2000, **70**(1): 1-17.
- [4] 王娜, 徐德琳, 郭璇, 等. 太湖沉积物微生物生物量及其与碳、氮、磷的相关性[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(7): 1921-1926.
- Wang N, Xu D L, Guo X, *et al.* Microbial biomass and its correlations with carbon, nitrogen, and phosphorus in the sediments of Taihu Lake [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, **23**(7): 1921-1926.
- [5] Zhu J Y, Zhang J X, Li Q, *et al.* Phylogenetic analysis of bacterial community composition in sediment contaminated with multiple heavy metals from the Xiangjiang River in China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **70**(1-2): 134-139.
- [6] 王金成, 井明博, 肖朝霞, 等. 陇东黄土高原地区石油污染土壤微生物群落及其与环境因子的关系[J]. 水土保持通报, 2012, **32**(5): 145-151.
- Wang J C, Jing M B, Xiao Z X, *et al.* Relationship between microbial-composition of petroleum-contaminated soil and its environmental factors in Longdong Region of Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, **32**(5): 145-151.
- [7] 杜萍, 刘晶晶, 沈李东, 等. Biolog 和 PCR-DGGE 技术解析椒江口沉积物微生物多样性[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(6): 1436-1444.
- Du P, Liu J J, Shen L D, *et al.* Diversity of microorganisms in sediments of the Jiaojiang Estuary as estimated by Biolog and PCR-DGGE[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, **32**(6): 1436-1444.
- [8] 李恒达, 张国坤, 滕洪辉. 四平市城市河流水质状况分析[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 2014, **35**(1): 112-114.
- Li H D, Zhang G K, Teng H H. Water quality analysis on Siping urban rivers system in Jilin Province[J]. Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition), 2014, **35**(1): 112-114.
- [9] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- Zhang J, Guo X Y, Zeng Y, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2202-2210.
- [10] HJ 803-2016, 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦合等离子体质谱法[S].
- [11] 魏晓慧. 六种水生植物对汾河水体中氨氮、COD、总氮和总磷的净化作用研究[D]. 太原: 山西大学, 2012.
- Wei X H. Study on Purification of ammonia nitrogen, COD, total nitrogen and total phosphorus on Fenhe sewage by six aquatic plants[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2012.
- [12] Lima J, Manning T, Rutherford K M, *et al.* Taxonomic annotation of 16S RRNA sequences of pig intestinal samples using MG-RAST and QIIME2 generated different microbiota compositions[J]. Journal of Microbiological Methods, 2021, **186**, doi: 10.1016/J.MIMET.2021.106235.
- [13] 马凤娟, 孙杰, 徐培智, 等. 生防菌 XP1 对香蕉枯萎病防效及土壤细菌群落多样性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, **50**(9): 1981-1989.
- Ma F J, Sun J, Xu P Z, *et al.* Effects of biocontrol bacteria XP1 on banana fusarium wilt and diversity of bacterial community in soil[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, **50**(9): 1981-1989.
- [14] 蒋旭瑶, 吉喜燕, 黄德英, 等. 不同植物类型复合垂直流人工湿地根系微生物群落结构的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, **38**(1): 176-183.
- Jiang X Y, Ji X Y, Huang D Y, *et al.* Microbial community structure in the roots of three kinds of plants in integrated vertical flow constructed wet-lands [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, **38**(1): 176-183.
- [15] 余晨兴, 林洪, 苏玉萍, 等. 闽江口-平潭海域有机解磷菌多样性及群落特征[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(5): 1863-1872.
- She C X, Lin H, Su Y P, *et al.* Diversity and community characteristics of organic phosphate-mineralizing bacteria in the sea area between Minjiang Estuary to Pingtan [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(5): 1863-1872.
- [16] 王雪琳, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栎林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征[J]. 北京林业大学学报, 2020, **42**(7): 77-88.
- Wang X L, Liu J F, He Z S, *et al.* Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, **42**(7): 77-88.
- [17] 王晓丽, 其勒格尔. 黄河内蒙古段表层沉积物细菌多样性及群落结构类型[J]. 生态学报, 2020, **40**(2): 578-589.
- Wang X L, Qi L G E. Bacterial diversity and community structure in surface sediments of Yellow River from Inner Mongolia section [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, **40**(2): 578-589.
- [18] 郭芝芝, 苏振华, 邸琰茗, 等. 北运河京津冀段河道浮游微生物群落多样性变化分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 803-812.
- Guo Z Z, Su Z H, Di Y M, *et al.* Analysis on diversity of Plankton microbial community in the Beijing-Tianjin-Hebei section of the North Canal River [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 803-812.
- [19] Bray J R, Curtis J T. An ordination of the upland forest communities of southern wisconsin[J]. Ecological Monographs, 1957, **27**(4): 325-349.
- [20] 阴星望, 田伟, 丁一, 等. 丹江口库区表层沉积物细菌多样性及功能预测分析[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(4): 1052-1063.
- Yin X W, Tian W, Ding Y, *et al.* Composition and predictive functional analysis of bacterial communities in surface sediments of the Danjiangkou Reservoir [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(4): 1052-1063.
- [21] 郭建丽, 樊景凤, 付慧, 等. 双台子河口沉积物中细菌多样性分析[J]. 微生物学通报, 2013, **40**(9): 1550-1559.
- Guo J L, Fan J F, Fu H, *et al.* Analysis of the bacterial diversity in the sediments of Shuang Taizi estuary [J]. Microbiology China, 2013, **40**(9): 1550-1559.
- [22] 王鹏, 陈波, 张华. 基于高通量测序的鄱阳湖典型湿地土壤细菌群落特征分析[J]. 生态学报, 2017, **37**(5): 1650-1658.
- Wang P, Chen B, Zhang H. High throughput sequencing

- analysis of bacterial communities in soils of a typical Poyang Lake wetland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(5): 1650-1658.
- [23] Wu H N, Li Y, Zhang J, *et al.* Sediment bacterial communities in a eutrophic lake influenced by multiple inflow-rivers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(24): 19795-19806.
- [24] 张慧珍, 常永凯, 陈泉睿, 等. 辽河口沉积物中古菌和细菌群落结构分析[J]. *海洋学报*, 2018, **40**(6): 113-130.
Zhang H Z, Chang Y K, Chen Q R, *et al.* Community structure analysis of archaea and bacteria in sediments of Liaohe Estuary [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, **40**(6): 113-130.
- [25] Staley C, Gould T J, Wang P, *et al.* Species sorting and seasonal dynamics primarily shape bacterial communities in the Upper Mississippi River[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **505**: 435-445.
- [26] Sorokin D Y, Lütcker S, Vejmelkova D, *et al.* Nitrification expanded: discovery, physiology and genomics of a nitrite-oxidizing bacterium from the phylum *Chloroflexi*[J]. *The ISME Journal*, 2012, **6**(12): 2245-2256.
- [27] Brummer I H M, Felske A, Wagner-Doöbler I. Diversity and seasonal variability of β -proteobacteria in biofilms of polluted rivers: analysis by temperature gradient gel electrophoresis and cloning[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(8): 4463-4473.
- [28] Kirchman D L, Dittel A I, Findlay S E G, *et al.* Changes in bacterial activity and community structure in response to dissolved organic matter in the Hudson River, New York [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, **35**(3): 243-257.
- [29] Zhang X, Gu Q, Long X E, *et al.* Anthropogenic activities drive the microbial community and its function in urban river sediment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(2): 716-725.
- [30] 姜磊, 涂月, 侯英卓, 等. 植被恢复的岩溶湿地沉积物细菌群落结构和多样性分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(1): 200-209.
Jiang L, Tu Y, Hou Y Z, *et al.* Bacterial community structure and diversity of sediments in a karst vegetation restoration wetland [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33**(1): 200-209.
- [31] Feng B W, Li X R, Wang J H, *et al.* Bacterial diversity of water and sediment in the Changjiang estuary and coastal area of the East China Sea [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2009, **70**(2): 236-248.
- [32] Freitag T E, Prosser J I. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria within anoxic marine sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(3): 1359-1371.
- [33] Mwanamoki P M, Devarajan N, Thevenon F, *et al.* Assessment of pathogenic bacteria in water and sediment from a water reservoir under tropical conditions (Lake Ma Vallée), Kinshasa Democratic Republic of Congo [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(10): 6821-6830.
- [34] 赵乃听. 拟杆菌属的分类现状[J]. *微生物学通报*, 1996, **23**(4): 241-243.
- [35] Li E Z, Deng T C, Yan L, *et al.* Elevated nitrate simplifies microbial community compositions and interactions in sulfide-rich river sediments [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **750**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141513.
- [36] 高晨晨, 郑兴灿, 游佳, 等. 城市污水脱氮除磷系统的活性污泥菌群结构特征[J]. *中国给水排水*, 2015, **31**(23): 37-42.
Gao C C, Zheng X C, You J, *et al.* Structure characteristics of activated sludge microbial communities in nitrogen and phosphorus removal system of municipal wastewater [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, **31**(23): 37-42.
- [37] 于皓, 安益君, 金德才, 等. 铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1197-1204.
Yu H, An Y J, Jin D C, *et al.* Effects of chromium pollution on soil bacterial community structure and assembly processes [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1197-1204.
- [38] 葛艺, 徐民民, 徐绍辉, 等. 铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 996-1003.
Ge Y, Xu M M, Xu S H, *et al.* Effects of copper pollution on microbial communities in wheat root systems [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 996-1003.
- [39] 管昊, 尹华群, 刘杰, 等. 高浓度镍环境中不同培养条件对浸矿微生物群落的影响 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2009, **40**(3): 543-549.
Guan H, Yin H Q, Liu J, *et al.* Effect of culture conditions on microbial community with high concentration of nickel ion [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2009, **40**(3): 543-549.
- [40] 王能, 张瑞雪, 吴攀, 等. 贵州某废弃煤矿酸性废水处理系统中细菌群落结构及功能分析 [J]. *环境科学研究*, 2021, **34**(9): 2154-2163.
Wang N, Zhang R X, Wu P, *et al.* Analysis bacterial community structure and function in acid wastewater treatment system of an abandoned coal mine in Guizhou province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, **34**(9): 2154-2163.
- [41] Bonilla J O, Kurth D G, Cid F D, *et al.* Prokaryotic and eukaryotic community structure affected by the presence of an acid mine drainage from an abandoned gold mine [J]. *Extremophiles*, 2018, **22**(5): 699-711.
- [42] 王建芳, 严雪. Cu^{2+} 、 Pb^{2+} 污染对苦草生长及底泥表层微生物的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2020, **43**(6): 53-59.
Wang J F, Yan X. Effects of Cu^{2+} and Pb^{2+} pollution on the growth of *Vallisneria* and the surface microorganisms of sediment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **43**(6): 53-59.
- [43] 王坤, 柯水洲, 袁辉洲, 等. 氨氮浓度对 MBBR 工艺中微生物群落结构的影响 [J]. *环境工程*, 2020, **38**(9): 119-125.
Wang K, Ke S Z, Yuan H Z, *et al.* Effect of ammonia-nitrogen concentration on microbial community structure in a MBBR process [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(9): 119-125.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)