

目次

中国城市碳排放强度的时空演变、动态跃迁及收敛趋势 杨清可, 王磊, 朱高立, 李颖, 范业婷, 王雅竹 (1869)

交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 郑琰, 蒋雪梅, 肖玉杰 (1879)

基于扩展STIRPAT模型LMDI分解的碳排放脱钩因素 张江艳 (1888)

基于LEAP模型的工业园区碳达峰路径:以南京某国家级开发区为例 李慧鹏, 李荔, 殷茵, 何文大, 宿杰, 赵秋月 (1898)

高校碳排放核算与分析:以北京A高校为例 曹睿, 封莉, 张立秋 (1907)

北京市制造业减排降碳协同效应分析和驱动因素 俞珊, 韩玉花, 牟洁, 张双, 张增杰 (1917)

碳排放权交易价格与全要素生产率:来自中国的证据 吴雪萍 (1926)

中国城市PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征和影响因素分析 李江苏, 段良荣, 张天娇 (1938)

2017~2021年苏皖鲁豫交界区域PM_{2.5}和O₃时空变化特征及影响因素 陈伟, 徐学哲, 刘文清 (1950)

疫情管控期西安PM_{2.5}和O₃污染特征及成因分析 原晓红, 张强, 李琦, 谢文豪, 刘跃廷, 樊亭亭, 姜旭朋 (1963)

苏南五市秋冬季PM_{2.5}化学组成特征和空间差异 冯蔚, 丁峰, 尚玥, 谢鸣捷 (1975)

湖北咸宁细颗粒物PM_{2.5}来源 罗怡, 朱宽广, 陈璞琬, 田军, 谢旻, 战杨志豪, 赵润琪 (1983)

邢台氨减排对京津冀PM_{2.5}改善的溢出效益 边泽君, 闻超玉, 郎建垒, 范晓茜, 夏祥晨, 周颖 (1994)

聊城市冬季PM_{2.5}载带金属元素污染特征、风险评价及来源分析 张敬巧, 朱瑶, 曹婷, 燕丽, 王淑兰, 刘铮 (2003)

高原城市拉萨典型VOCs排放源成分谱特征 郭淑政, 叶春翔, 林伟立, 陈熠, 曾立民, 尹晴晴, 刘雪莉 (2011)

北京市工业园区VOCs污染特征及健康风险评估案例:高新技术产业的环境影响 王洁, 姚震, 王敏燕, 陈速敏, 龙腾, 王海滨, 李红, 郭秀锐, 郝江虹, 聂磊 (2019)

高温极端天气影响下的成都平原一次典型臭氧污染过程分析 雷丽娟, 张懿, 罗伊娜, 张潇, 冯森 (2028)

水环境中抗病毒毒物的存在、行为与风险 葛林科, 李璇艳, 曹胜凯, 郑金帅, 张蓬, 朱超, 马宏瑞 (2039)

黄河小浪底水库地表水中重金属的时空变化与概率健康风险 王亮, 邓雪娇, 王潇磊, 李明, 刘奕尧, 姜亚敏, 涂响, 张坤锋 (2054)

藏东多曲河流域总富集水化学特征及控制因素 李敬杰, 连晟, 王明国, 张智印, 张涛 (2067)

西北内陆区降水稳定同位素时空分布特征及其水汽来源 张炎炎, 辛存林, 郭小燕, 张博, 陈宁, 史延飞 (2080)

基于水化学和氢氧同位素的泰安城区岩溶地下水补给来源及演化过程 孟令华 (2096)

丹江流域山区地表水-地下水水化学特征及其影响因素 张子燕, 伏永朋, 王宁涛, 谭建民, 刘亚磊 (2107)

金塔盆地鸳鸯池灌区地下水水化学特征及控制因素 王晓燕, 韩双宝, 张梦南, 尹德超, 吴玺, 安永会 (2118)

德阳市平原区浅层地下水水化学特征与健康风险评价 刘楠, 陈盟, 高东东, 吴勇, 王楠楠 (2129)

典型城市河网沉积物微塑料时空分布特征 许万璐, 范一凡, 钱新 (2142)

抚仙湖流域尺度氮排放清单构建及关键源解析 王延杰, 梁启斌, 王艳霞, 侯磊, 陈奇伯, 王伟, 李晓琳, 高俊淑 (2150)

过氧化钙/海泡石海藻酸钠缓释凝胶复合材料的制备及其对内源磷的控制性能 曲思彤, 单苏洁, 王崇铭, 吴玲子, 李大鹏, 黄勇 (2160)

矿物超细颗粒的形成机制、结构特征及其环境行为和效应 刘振海, 张展华, 袁语欣, 朱盼盼, 陈威, 张彤 (2171)

生物炭固定化菌复合材料在环境修复中的应用研究进展 孙淑玉, 黄梦鑫, 孔强, 张焕新, 刘继伟 (2185)

微塑料对沸石吸附水体氨氮的影响及其机制 练建军, 谢诗婷, 吴培, 孟冠军, 陈波 (2195)

紫外老化作用对纳米生物炭吸附环丙沙星的影响机制 马锋锋, 薛之一, 赵保卫 (2203)

土地利用影响下永定河流域浮游植物群落与环境因子响应 郭善嵩, 胡恩, 丁一桐, 张嘉渭, 孙长顺, 卢悦, 潘保柱 (2211)

鄱阳湖湿地细菌群落多样性和可培养细菌功能基因丰度 喻江, 王淳, 龙永, 刘贵花, 李春杰, 范国权, 于镇华 (2223)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系 刘双羽, 蒙俊杰, 邱小琼, 周瑞娟, 李霖 (2233)

污水处理厂尾水排放对受纳河流细菌和真菌微生物群落的影响 郭有顺, 余仲, 郝文彬, 孟凡刚 (2246)

宏基因组学分析深度处理阶段污水中细菌的赋存特征及其功能 胡健双, 王燕, 周政, 汪雅琴, 王秉政, 李激 (2259)

大别山区生境质量时空特征及自然-人为因素驱动机制 郑亚平, 张俊华, 田惠文, 朱航成, 刘舒, 丁亚鹏 (2268)

基于连续小波变换、SHAP和XGBoost的土壤有机质含量高光谱反演 叶森, 朱琳, 刘旭东, 黄勇, 陈蓓蓓, 李欢 (2280)

秸秆还田、覆膜和施氮对旱地麦田土壤质量的影响 叶子壮, 王松燕, 陆潇, 史多鹏, 吕慎强, 李嘉, 杨泽宇, 王林科 (2292)

长期施用有机肥对土壤微塑料赋存及迁移特征的影响 王长远, 马啸驰, 郭德杰, 刘新红, 马艳, 罗佳 (2304)

土壤盐分变化对N₂O排放影响:基于Meta分析 黄艺华, 余冬立, 史祯琦, 胡磊, 潘永春 (2313)

基于土地利用/覆被动态变化的粤港澳大湾区碳储量评价与预测 郑慧玲, 郑辉峰 (2321)

基于InVEST模型的伏牛山地区生态系统碳储量时空变化模拟 张哲, 时振钦, 朱文博, 孙梓欣, 赵体侠, 邓文萍, 刘志强 (2332)

防护林建设过程中土壤微生物养分限制与有机碳组分之间的关系 徐凤璟, 黄懿梅, 黄倩, 申继凯 (2342)

长期秸秆还田褐土有机碳矿化特征及其驱动力 赵宇航, 殷浩凯, 胡雪纯, 解文艳, 刘志平, 周怀平, 杨振兴 (2353)

冬绿肥覆盖对土壤团聚体及有机碳和AMF多样性的影响 鲁泽让, 陈佳钰, 李智贤, 李永梅, 罗志章, 杨锐, 田明洋, 赵吉霞, 范茂攀 (2363)

辽河流域氮素时空分布及其对土地利用和降雨的响应 周波, 李晓光, 童思陈, 吕旭波, 郭朝臣, 雷坤 (2373)

高强度农业种植区不同景观池塘氧化亚氮排放特征 张欣悦, 肖启涛, 谢晖, 刘臻婧, 邱银国, 罗菊花, 徐向华, 段洪涛 (2385)

生物炭与不同类型氮肥施肥对菜地土壤反硝化细菌群落的影响 柳晓婉, 刘杏认, 高尚洁, 李贵春 (2394)

大岳山不同林龄人工油松林土壤微生物特征 马义淑, 曹亚鑫, 牛敏, 张明昱, 程曼, 文永莉 (2406)

基于稀疏样点的土壤重金属含量模拟方法 张佳琦, 潘瑜春, 高世臣, 赵亚楠, 景胜强, 周艳兵, 郇允兵 (2417)

基于特定源-风险评估模型的兰州黄河风情线绿地土壤重金属污染优先控制源分析 李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 陈伟, 脱新颖 (2428)

西南不同类型紫色土pH变化、重金属累积与潜在生态风险评估 张海琳, 张雨, 王顶, 谢军, 张跃强, 张宇亭, 王洁, 石孝均 (2440)

重庆某铁矿周边耕地土壤重金属污染评价及来源解析 廖泽源, 李杰芹, 沈智杰, 李彩霞, 罗程钟, 梅楠, 张成, 王定勇 (2450)

金属矿区周边农田土壤与农作物重金属健康风险评估 魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思 (2461)

赤泥基纳米零价铁对多金属污染土壤修复效果 刘龙宇, 杨世利, 赵黄诗雨, 常凯威, 余江 (2473)

施锌对碱性土壤-小麦幼苗体系累积镉的影响 张瑶, 王天齐, 牛硕, 杨阳, 陈卫平 (2479)

典农河沉积物细菌群落结构特征及其与重金属的关系

刘双羽¹, 蒙俊杰¹, 邱小琮^{2*}, 周瑞娟³, 李霖¹

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 银川 750021; 2. 宁夏大学生命科学学院, 银川 750021; 3. 宁夏回族自治区生态环境监测中心, 银川 750000)

摘要: 河流沉积物细菌对有机物和营养盐的转运起着重要作用, 其群落结构特征也会受到环境因子的影响. 为探究典农河(上游段)沉积物细菌群落结构及其影响因子, 于2021年的1、4、7和10月对典农河上游段进行沉积物样品采集调查, 测定沉积物中9种重金属(Cu、Zn、Pb、Fe、Mn、As、Cr、Cd和Hg)的含量, 基于16S rRNA基因扩增子高通量测序, 分析典农河(上游段)不同季节沉积物细菌群落结构特征, 通过冗余分析(RDA)识别典农河群落结构变化的驱动因子. 结果表明, 在空间上, 典农河永宁段细菌物种丰度高于典农河银川段细菌物种丰度, 在时间上, 7月和10月细菌物种丰度高于1月和4月. 典农河沉积物细菌最优势菌门为变形菌门(Proteobacteria), 较优势菌门为拟杆菌门(Bacteroidetes)和脱硫菌门(Desulfobacterota). 典农河沉积物细菌优势菌属为 *Sulfitobacter*、*Amylibacter*、*Planktomarina*、*Sulfurifustis*、*SUP05_cluster*、*Arenimonas*、*Candidatus_Methanoperedens*、*Thioalkalispira*、*Methylobacterium*、*Trichococcus*、*Ralstonia*、*MND1* 和 *Paraclostridium*. 采样点位中优势菌门具有显著的时间差异, 细菌群落结构组成存在显著变化, 但是空间差异不明显, 其中, 1、4和7月细菌群落结构相似度较高. 不同的重金属因子在不同月份对不同的优势菌门产生影响, As和Hg影响更显著. Euyarchaeota、Bacteroidota、unidentified_Bacteria和unidentified_Archaea更易受到影响.

关键词: 典农河; 沉积物; 细菌; 群落特征; 重金属因子

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)04-2233-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.202304131

Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River

LIU Shuang-yu¹, MENG Jun-jie¹, QIU Xiao-cong^{2*}, ZHOU Rui-juan³, LI Lin¹

(1. School of Civil and Hydratic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. School of Life Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 3. Ningxia Environment Monitoring Center, Yinchuan 750000, China)

Abstract: River sediment bacteria play an important role in the transport of organic matter and nutrients, and their community structure characteristics can be influenced by environmental factors. To investigate the sediment bacterial community structure of the Diannong River (upstream section) and its influencing factors, sediment samples were collected and investigated in the upstream section of the Diannong River in January, April, July, and October 2021. The levels of nine heavy metals (Cu, Zn, Pb, Fe, Mn, As, Cr, Cd, and Hg) in the sediments were measured. Based on high-throughput sequencing of 16S rRNA gene amplicons, the structural characteristics of sediment bacterial communities in different seasons of the Diannong River (upstream section) were analyzed. The drivers of community structure changes in the Diannong River were identified using redundancy analysis (RDA). The results showed that the community structure of the Diannong River (upstream section) was characterized by redundancy analysis (RDA), and the drivers of community structure changes in the Diannong River were identified. The abundance of bacterial species in the Yongning section of the Diannong River was higher than that in the Yinchuan section of the Diannong River spatially, and the abundance of bacterial species in July and October was higher than that in January and April temporally. The most dominant phylum of sediment bacteria in the Diannong River was Proteobacteria, and the other dominant phyla were Bacteroidetes and Desulfobacterota. The dominant bacterial genera in the sediment of the Diannong River were *Sulfitobacter*, *Amylibacter*, *Planktomarina*, *Sulfurifustis*, *SUP05_cluster*, *Arenimonas*, *Candidatus_Methanoperedens*, *Thioalkalispira*, *Methylobacterium*, *Trichococcus*, *Ralstonia*, *MND1*, and *Paraclostridium*. There were significant temporal differences in the dominant phylum in the sampled sites and significant changes in the composition of the bacterial community structure in January, April, and July, but spatial differences were not significant. The similarity of bacterial community structure was higher in January, April, and July. Different heavy metal factors affected different dominant phyla in different months, and As and Hg had more significant effects. Euyarchaeota, Bacteroidota, unidentified_Bacteria, and unidentified_Archaea were more susceptible to the effects of different heavy metal factors in different months.

Key words: Diannong River; sediment; bacteria; community characteristics; heavy metal factor

水域沉积物中承载着许多地球表面和大气层中沉积的物质, 是营养盐等营养物质积蓄的重要载体, 也是生态系统中众多有机物迁移转化的载体^[1]. 沉积物中氮、磷和金属等物质在水体中呈现溶解态或被水体中的悬浮物所吸附, 并在水动力条件下通过迁移、吸附等方式在表层沉积物所累积. 当水环境条件发生变化时, 沉积物中的污染物会重新释放至水环境中, 引发水体二次污染.

细菌是地球生物圈最多样和丰度最高的生物, 在生态系统中占有非常重要的地位. 细菌可以分解

收稿日期: 2023-04-17; 修订日期: 2023-06-30

基金项目: 宁夏高等学校一流学科建设(水利工程)项目(NXYLXK2021A03); 宁夏大学研究生创新项目(CXXM202241); 宁夏回族自治区生态环境厅科研项目(2022015)

作者简介: 刘双羽(1999-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为沉积物微生物, E-mail: liushuangyu1999@163.com

* 通信作者, E-mail: qiu_xc@nxu.edu.cn

生物圈内动物、植物等复杂有机物,再将其转换为无机物,供初级生产者利用,是地球上最重要的分解者^[2].细菌多样性比较高,对环境变化非常敏感,通过对外界条件变化的响应,细菌会进行相应的改变,从而影响更多的功能群.在生态系统中,沉积物与水体进行的物质和能量交换成为水体污染的潜在来源.同时因稳定的物理化学性质更适合细菌的生长和繁殖,使得沉积物中生活着大量的细菌.沉积物细菌是水生态系统的重要组成部分,是水生态系统内物质循环的重要驱动者^[3],沉积物细菌群落状况与水质状况有着密切的联系^[4],生态环境的类型、沉积物性质以及重金属污染等都会对细菌群落造成一定的影响^[5],因此,研究宁夏典农河沉积物细菌群落结构变化及其驱动因子有利于更好地评估该流域水质.

近年来,对宁夏典农河流域水生态系统健康评价、水生态承载力与水体富营养化情况已有大量研究^[6-9],但鲜见对典农河沉积物细菌群落结构特征进行相关研究,对典农河沉积物细菌群落结构的驱动因子尚无明确分析.因此,本文采用16S rRNA基因的高通量测序技术对典农河沉积物细菌多样性和群落结构组成进行研究,揭示细菌群落结构随时间的季节演替变化,分析各采样点

理化指标的空间分布,根据宁夏典农河流域沉积物污染状况,探索细菌群落结构变化与环境因子的相关性,以期对宁夏典农河水环境评价与治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

典农河地处宁夏回族自治区,南起永宁县境内新桥滞洪区,北至石嘴山市惠农区园艺镇石嘴子公园的滨河广场处流入黄河,总长158 km,沿途汇入第二排水沟、平二支沟、方家圈沟、三三支沟和第三排水沟等10条沟道,承接银西防洪6个拦洪库2个滞洪区来水,沿途连接七子连湖、华雁湖、西湖、阅海、北塔湖和沙湖等湖泊湿地,形成水面约46 km².典农河对其流域内城市和农业区的生产、生活和社会发展有重要的作用和影响.

1.2 样点布设

为分析典农河细菌群落结构随季节分布特征,本研究根据季节变化于2021年的1、4、7和10月对典农河上游段进行野外样品采集调查,自南向北共布置11个采样点,各采样点避开死水与回水区,选取河段顺直、河岸稳定和水流平缓地段,采样点分布如图1所示,各采样点具体信息如表1所示.

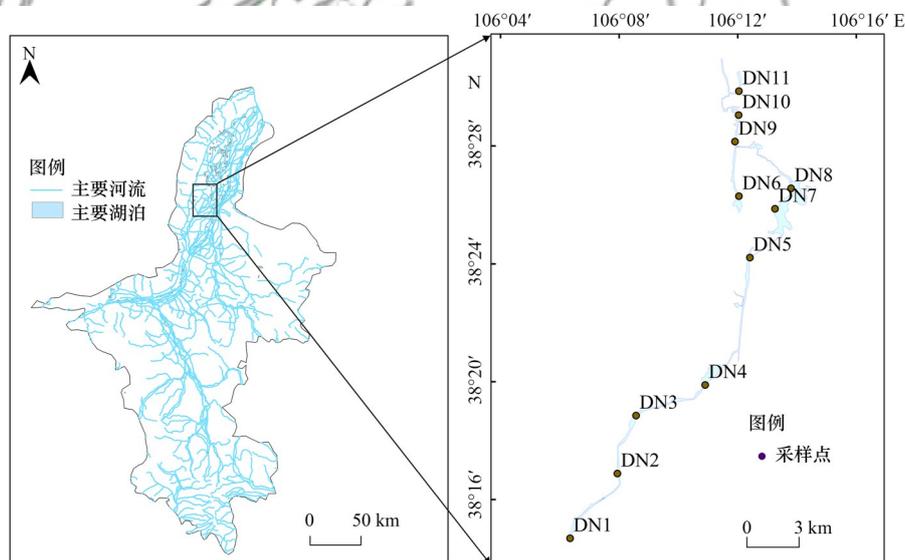


图1 典农河采样点示意

Fig. 1 Diagram of sampling sites in the Diannong River

1.3 样品采集与分析

用抓斗式采泥器采取0~20 cm的表层沉积物样品,部分样品用于理化因子的检测,另一部分样品用于沉积物细菌高通量测序.镉(Cd)和锰(Mn)含量采用电感耦合等离子体质谱法(HJ 803-2016),铁(Fe)采用电感耦合等离子体发射光谱法(HJ 974-2018)进行测定,铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)和铅

(Pb)含量采用火焰原子吸收分光光度法(HJ 491-2019)测定,砷(As)和汞(Hg)采用微波消解/原子荧光法(HJ 680-2013)测定^[10,11].

1.4 DNA提取与高通量测序

用于细菌分析的样品送到北京诺禾致源科技股份有限公司进行细菌总DNA提取,进行16S rRNA扩增子测序^[12,13],然后对高变区进行测

表1 典农河采样点布设情况
Table 1 Sampling sites of the Diannong River

上游段	样点编号	采样点名称	海拔/m	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)
典农河永宁段 (DNYN)	DN1	典农河永宁1号	1 128.01	38.246 516	106.092 140
	DN2	典农河永宁2号	1 121.75	38.281 131	106.124 942
	DN3	典农河永宁3号	1 119.75	38.312 258	106.138 243
	DN4	典农河永宁4号	1 118.12	38.328 230	106.185 610
	DN5	典农河永宁5号	1 112.74	38.396 669	106.217 437
典农河金凤段 (DNYC)	DN6	典农河七十二连湖南	1 109.73	38.429 898	106.210 558
	DN7	典农河大盐湖	1 114.74	38.422 793	106.235 055
	DN8	典农河七十二连湖北	1 114.99	38.433 712	106.246 260
	DN9	典农河宝湖路段	1 112.49	38.459 421	106.208 497
	DN10	典农河黄河路段	1 113.24	38.473 686	106.211 232
	DN11	典农河陶然水岸	1 110.24	38.486 617	106.211 693

序分析和菌种鉴定^[14]. 选择变异区域利用保守区设计通用引物进行PCR扩增. 根据所扩增的16S区域特点, 构建小片段文库, 基于Illumina NovaSeq测序平台对该文库进行双末端测序(Paired_End), 经过Reads拼接过滤, OTUs (operational taxonomic units) 聚类, 可以进行物种注释及丰度分析, 通过 α 多样性(α diversity)和 β 多样性分析(β diversity), 揭示出样本中物种组成和样本间群落结构的差异.

1.5 数据分析与制图

利用Mothur软件计算细菌群落Chao1、Shannon-Wiener和Coverage指数, 分析群落 α 多样性. 利用R语言vegan包, 得出门水平下细菌群落结构柱形堆积图. 基于Bray-Curtis距离分析群落 β 多样性, 使用R语言vegan包和ANOSIM包进行细菌群落结构组成

的ANOSIM分析, 运用非度量多维尺度分析(NMDS)基于OTU水平研究细菌群落组成的相似性或差异性, R语言绘制NMDS分析图^[15]. 沉积物重金属环境标准值取《中国土壤元素背景值》中宁夏地区土壤背景值, 如表2所示. 在进行冗余分析前, 对环境因子计算方差膨胀因子VIF (variance inflation factor), 剔除具有多重共线性的环境因子. VIF值越大, 表明环境因子之间的多重共线性明显, 当VIF>10时, 为无用环境因子. 基于97%相似性的样本OTUs数据和环境因子数据, 使用CANOCO 5.0, 结合多元回归变量筛选中前向选择(forward selection)模式与蒙特卡洛检验, 进行RDA (redundancy analysis) 分析得出冗余分析图^[16]. 基于R语言的pheatmap包绘制物种丰度聚类热图和双相关性系数关联热图.

表2 重金属元素背景值

Table 2 Background values of heavy metal elements

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Pb	Zn	Fe
宁夏地区背景值/mg·kg ⁻¹	11.9	0.112	60	22.1	0.021	524	20.6	58.8	26 500

2 结果与分析

2.1 沉积物细菌群落的多样性分析

对微生物样本进行测序后, 针对高质量序列进行聚类, 得到16 348个OTUs. 如图2所示. 不同季节的OTUs数量显著差异, 其中, 1、4、7和10月分别含有11 003、14 152、16 025和16 348个OTUs, 4组样本共有的OTUs有11 003, 而10月特有323个OTUs, 远高于其他3个月份特有的OTUs数量. 基于细菌群落整体水平覆盖率、OTUs数目、Shannon指数和Simpson指数等指标在97%一致性阈值下对典农河永宁段(DNYN)和典农河金凤段(DNYC)生境沉积物细菌在不同区域和不同季节的 α 多样性进行分析, 结果如表3和图3所示, 典农河沉积物细菌物

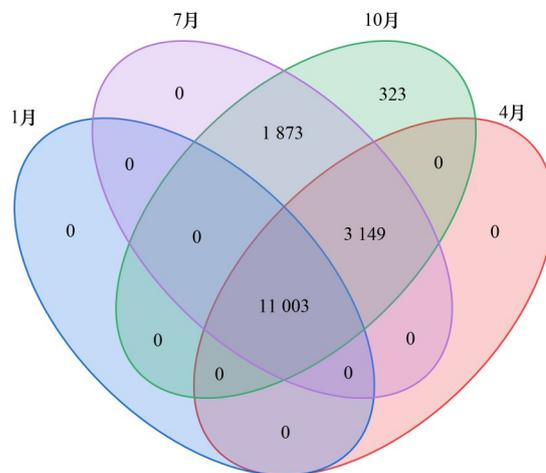


图2 不同月份典农河中沉积物的细菌群落OTUs数量

Fig. 2 Number of bacterial community OTUs in sediments in the Diannong River in different months

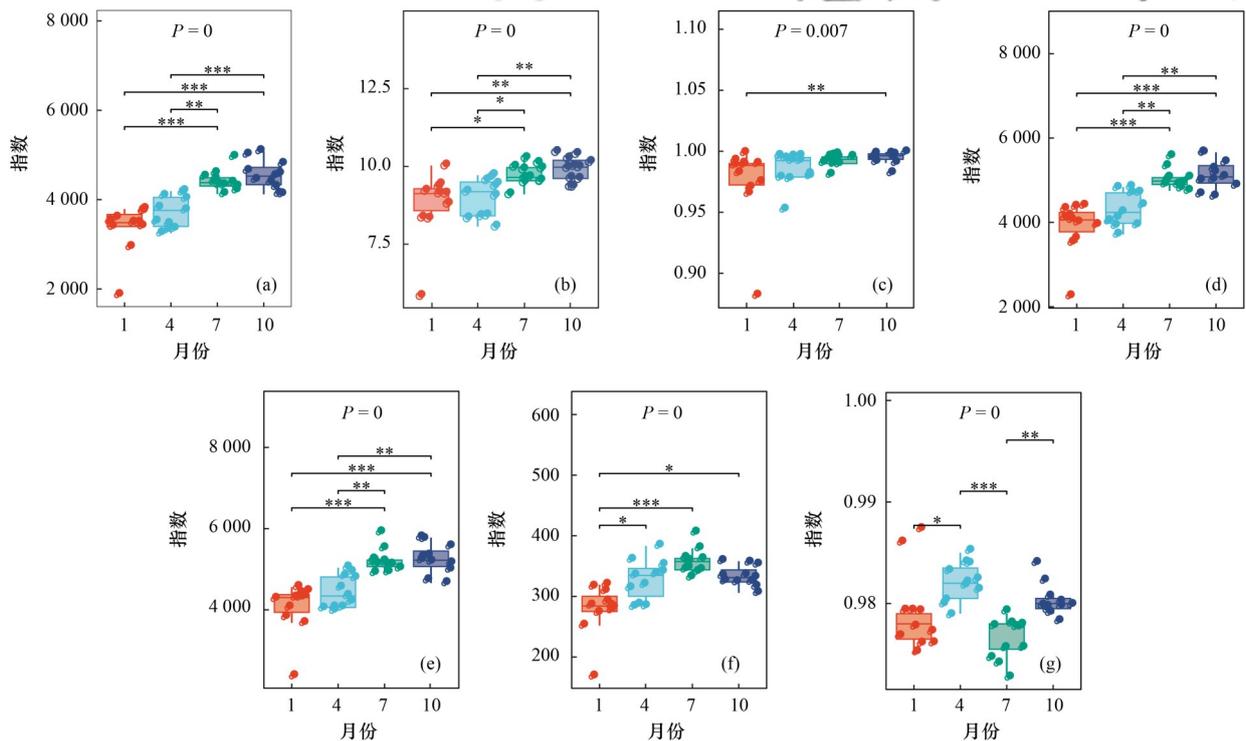
种 Goods_coverage 指数均达到 97% 以上, 测序结果能有效反映沉积物细菌生物信息. Observed_species 指数、Shannon 指数、Simpson 指数、Chao1 指数、ACE 指数和 PD_whole_tree 指数的值越大, 代表群落丰度越高. 对于典农河整体流域, 时间上, Observed_species 指数、Shannon 指数、Simpson 指数、Chao1 指数、ACE 指数和 PD_whole_tree 指数这 6 个多样性指

标与 α 多样性指数变化趋势一致, 7 月和 10 月 α 多样性指数高, 物种群落丰度更高, 其次为 4 月, 1 月多样性指数最低, 丰度最低. 在空间上, 对于典农河永宁段(DNYN)和典农河金凤段(DNYC)来说, 1、7 和 10 月 DNYN 多样性指数高于 DNYC, DNYN 丰度高于 DNYC, 4 月反之. 不同的沉积物细菌群落多样性指标受季节变化影响, 也受不同区域的影响.

表 3 不同区域典农河中沉积物细菌群落的 α 多样性

Table 3 The α diversity of sediment bacterial communities in the Diannong River in different regions

月份	分组	Observed_species 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Chao1 指数	ACE 指数	PD_whole_tree 指数	Goods_coverage 指数
1	DNYN	3 615	9.165	0.982	4 203.94	4 358.38	293.439	0.977
	DNYC	3 146	8.428	0.966	3 618.04	3 793.98	264.901	0.981
4	DNYN	3 636	8.972	0.982	4 235.75	4 335.65	320.911	0.982
	DNYC	3 786	9.064	0.985	4 369.47	4 522.04	331.330	0.982
7	DNYN	4 546	9.896	0.992	5 169.99	5 356.49	358.103	0.976
	DNYC	4 307	9.612	0.989	4 912.63	5 082.72	356.903	0.977
10	DNYN	4 740	10.120	0.994	5 331.19	5 444.77	340.116	0.980
	DNYC	4 382	9.754	0.993	4 959.43	5 070.31	326.551	0.981



(a) Observed_species 指数, (b) Shannon 指数, (c) Simpson 指数, (d) Chao1 指数, (e) ACE 指数, (f) PD_whole_tree 指数, (g) Goods_coverage 指数; *标记为差异显著性水平, 其中, *表述 $P < 0.05$; **表述 $P < 0.01$; ***表述 $P < 0.001$

图 3 不同季节下典农河中沉积物细菌 α 多样性

Fig. 3 Microbial α -diversity in sediments of the Diannong River under different seasons

2.2 沉积物细菌群落物种分布特征

2.2.1 门水平分类下沉积物细菌群落结构组成

在门水平下, 将相对丰度排名前 10 的细菌绘制柱形图, 结果如图 4 所示. 典农河沉积物细菌群落在门水平上较为丰富(图 4). 采样点细菌群落主要由: 变形菌门(Proteobacteria, 73.84% ~ 17.41%)、拟

杆菌门(Bacteroidetes, 18.76% ~ 5.07%)、蓝细菌门(Cyanobacteria, 14.50% ~ 0.09%)、脱硫杆菌门(Desulfobacterota, 14.27% ~ 0.02%)、广古菌门(Euryarchaeota, 10.69% ~ 0.03%)、绿弯菌门(Chloroflexi, 9.11% ~ 1.34%)、放线菌门(Actinobacteria, 7.72% ~ 0.81%)、厚壁菌门(Firmicutes, 6.12% ~

0.65%)、梭杆菌门(*Fusobacteria*, 5.95%~0.02%)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*, 5.68%~0.09%)、酸杆菌门(*Acidobacteria*, 5.56%~0.28%)、弯曲杆菌门(*Campilobacterota*, 5.56%~0.28%)和硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*, 5.56%~0.28%)构成, 未识别门占整个细菌群落的 24.3%。其中最优势菌门为变形菌门(*Proteobacteria*), 较优势菌门为拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和脱硫杆菌门(*Desulfobacterota*)。由

图 4 可见, 采样点位中优势菌门具有显著的时间差异。1 月优势菌门主要为 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 和 *Cyanobacteria*, 4 月优势菌门主要为 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria*, 7 月优势菌门主要为 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes* 和 *Fusobacteria*, 而 10 月明显与其他月份不同, 优势菌门为 *Proteobacteria*, 并出现了 *Desulfobacterota* 等菌门。

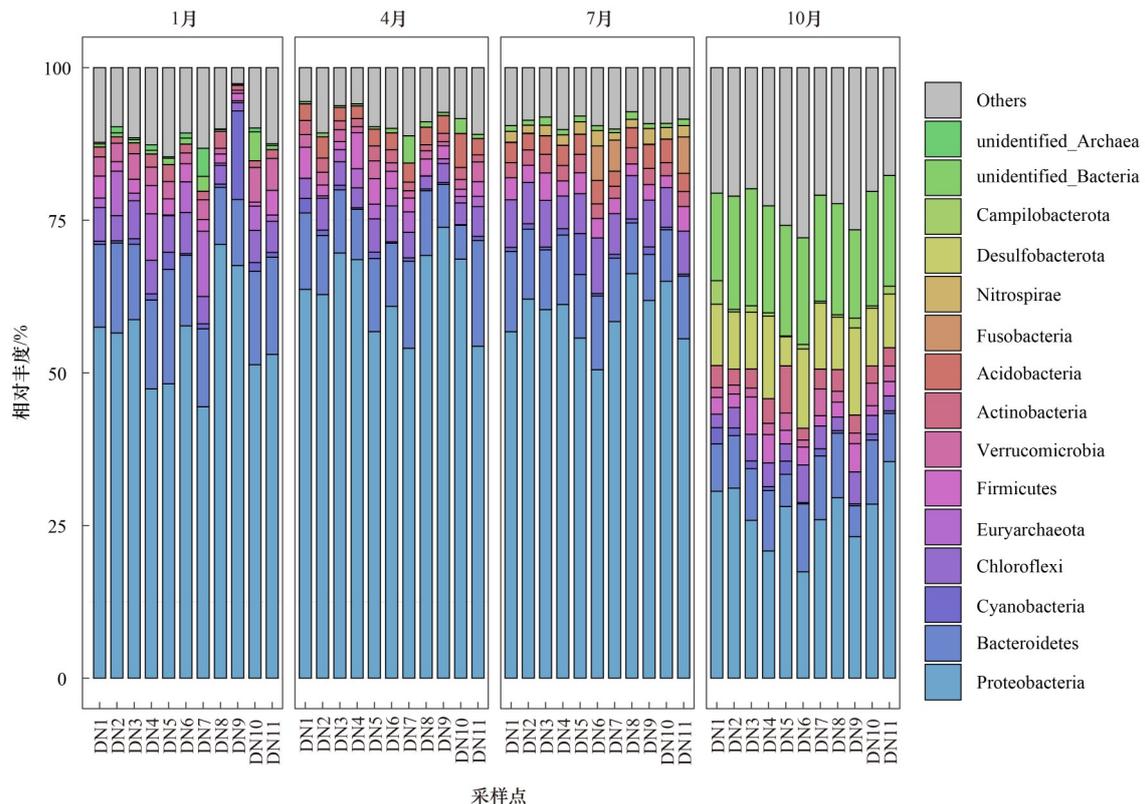


图 4 门分类水平下典农河沉积物细菌群落排名前 10 相对丰度

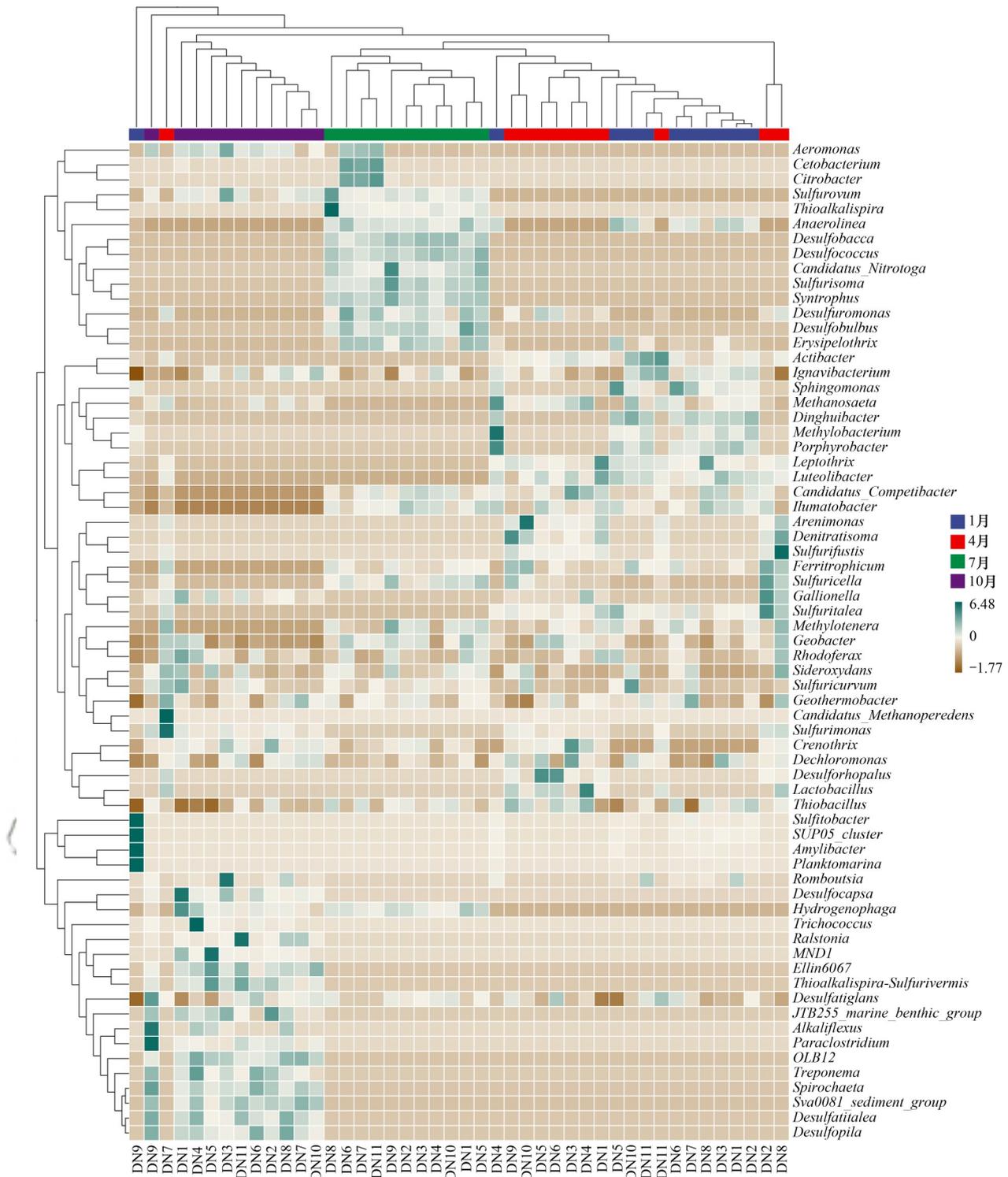
Fig. 4 Relative abundance of bacterial communities (top ten) in the sediments of the Diannong River at the phylum taxonomic level

2.2.2 属水平分类下沉积物细菌群落结构组成

将丰度排名前 35 的物种, 根据其在每个样本中的丰度信息, 从物种和样本两个层面进行 UPGMA 聚类, 绘制为属水平分类下的物种丰度聚类热图, 结果如图 5 所示。不同季节聚集情况有显著差异。10 月份属水平菌群聚集情况明显与 1、4 和 7 月不同, 1 月和 4 月物种丰度相似性高。1 月丰度较高的细菌属包括 *Sulfitobacter*、*Amylibacter*、*Planktomarina*、*Sulfurifustis* 和 *SUP05_cluster*, 一共 5 个菌属。4 月丰度较高的细菌属包括 *Arenimonas*、*Sulfurifustis* 和 *Candidatus_Methanoperedens*, 一共 3 个菌属。7 月丰度较高的细菌属包括 *Thioalkalispira* 和 *Methylobacterium*, 一共 2 个菌属。10 月丰度较高的细菌属包括 *Trichococcus*、*Ralstonia*、*MND1* 和 *Paraclostridium*, 一共 4 个菌属。

2.2.3 沉积物细菌群落结构比较

基于 OTU 水平采用非参数检验 ANOSIM 分析和非度量多维尺度分析 NMDS, 分析各组细菌群落结构, 如图 6 所示。通过点与点之间的距离, 采样点之间距离越近, 则表示群落结构的相似程度越高, 从而可以看出不同季节不同区域 11 个采样点细菌群落之间的相似性, 获得典农河沉积物细菌群落结构随时间与空间的变化情况。ANOSIM 统计检验显示, 典农河(银川段)沉积物细菌群落的组成在不同的季节有显著差异 ($\text{stress} = 0.1374 < 0.2$, $P\text{-value} = 0.001$, $R = 0.08337$), 但在不同的区域之间差异不显著 ($\text{stress} = 0.1374 < 0.2$, $P\text{-value} = 0.798$, $R = -0.0256$)。采样时间对沉积物细菌群落结构组成的影响远高于区域空间的影响。



通过颜色、颜色的深浅程度以及物种聚类树反映细菌群落物种关系;左侧为物种聚类树;颜色越绿表示样本中丰度越高,越棕表示样本中物种丰度越低

图5 属水平分类下典农河沉积物细菌群落排名前35物种丰度聚类热图

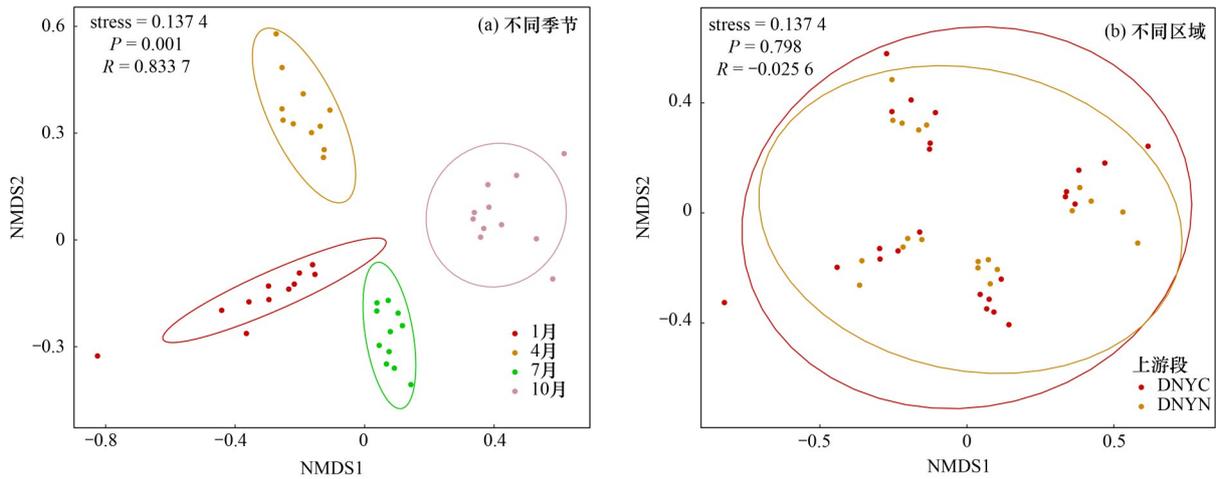
Fig. 5 Heatmap of species abundance clustering of bacteria (top thirty-five) in the sediments of the Diannong River under genus-level classification

2.3 沉积物细菌群落与重金属因子的关系

2.3.1 沉积物重金属含量

重金属并不是永久停留至沉积物中,沉积物中的重金属会随着水体流动再次悬浮至上层水相中不停地迁移转化,导致沉积物间接成为重金属的载体和潜在来源^[17-19].生境中重金属含量会对沉积物细

菌的功能和类型产生一定影响^[20].典农河重金属含量描述如表4所示,沉积物重金属含量时空分布特征如图7所示.典农河金凤段(DNYC)沉积物重金属含量总体高于典农河永宁段(DNYN).典农河1月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>As>Cd>Cr>Hg, 4月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>



stress<0.2 表示可以在 NMDS 分析中准确表示差异程度;R>0 表示分组有效;P-value<0.05 表示有显著差异;椭圆为围绕中心点 95% 的置信区间

图 6 沉积物细菌群落结构在不同季节和不同区域的 NMDS(非度量多维尺度分析)与 ANOSIM 分析
Fig. 6 NMDS (non-metric multidimensional scale analysis) and ANOSIM analysis of sediment bacterial community structure in different seasons and different regions

Cu>Pb>As>Cd>Cr>Hg, 7月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Cr>Hg, 10月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Cr>Hg, 含量比较总体稳定. $\omega(\text{Cu})$ 在 7 月最高, 为 $24.061 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Fe})$ 在 4 月最高, 为 $25\ 323.686 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Mn})$ 在 1 月最高, 为 $507.881 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Zn})$ 在 10 月最高, 为 $77.851 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{As})$ 在 1 月

最高, 为 $8.590 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Hg})$ 在 4 月最高, 为 $0.089 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Cd})$ 在 1 月最高, 为 $0.475 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Pb})$ 在 1 月最高, 为 $22.828 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\omega(\text{Cr})$ 在 7 月最高, 为 $0.686 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 典农河沉积物中 Cu、Fe、Mn、Hg、Cd 和 Pb 污染较严重, 超标率高, Cr 在 4 个月份均未出现超标现象. 总体来看, 沉积物重金属污染较为严重.

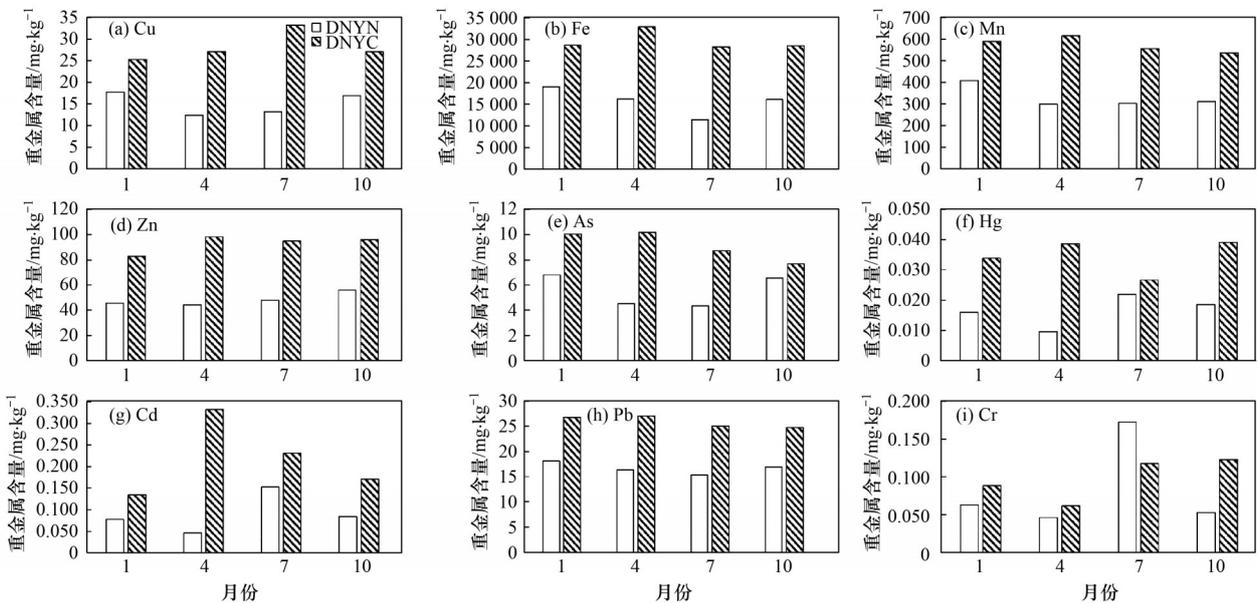


图 7 典农河沉积物重金属含量时空分布特征

Fig. 7 Spatial and temporal distribution characteristics of heavy metal content in sediments of the Diannong River

2.3.2 沉积物细菌群落结构与重金属因子相关性分析

谢学辉等^[21]研究德兴铜矿尾矿重金属污染对沉积物细菌多样性的影响时发现, 样品中含量普遍较高的重金属对细菌多样性有一定影响. 丁苏丽等^[22]

利用 16S rDNA 测序技术发现, 虽然不同红树林之间以及不同类型沉积物之间的重金属含量有显著差异, 但细菌 α 多样性指数却没有显著性差异, 这说明重金属并不影响细菌群落的种类, 这可能与细菌对重金属的适应性和选择性有关^[23-25].

表 4 典农河沉积物重金属含量描述性统计

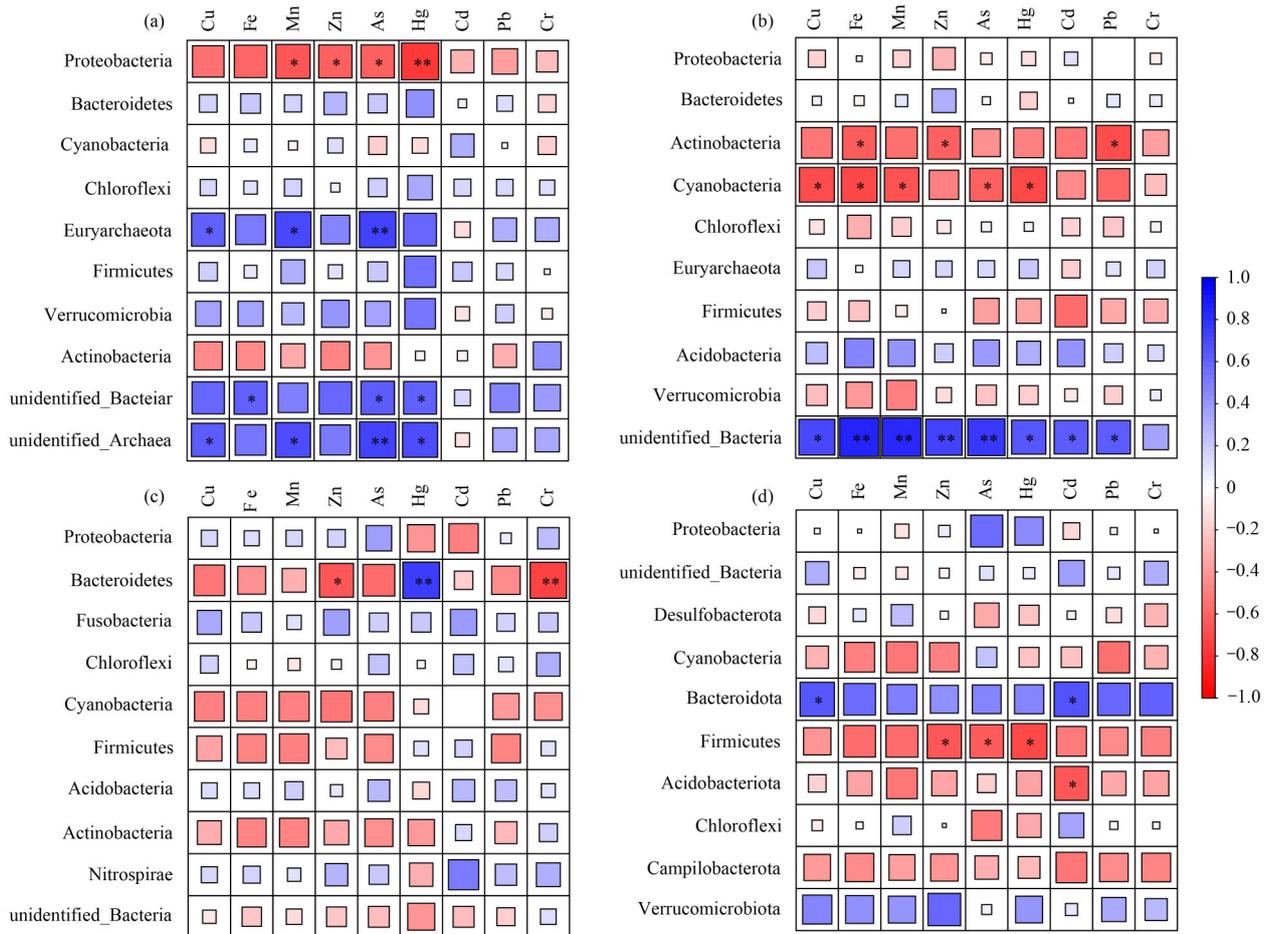
Table 4 Descriptive statistics of heavy metal content in sediments of the Diannong River

月份	重金属种类	重金属含量/mg·kg ⁻¹				变异系数	超标率/%
		最大	最小	平均	标准差		
1	Cu	40.493	5.666	21.863	10.042	0.459	54.545
	Fe	42 722.075	11 853.850	24 301.730	9 053.715	0.373	36.364
	Mn	926.090	264.021	507.881	209.907	0.413	45.455
	Zn	115.260	34.358	66.054	29.223	0.442	45.455
	As	17.076	3.275	8.590	3.927	0.457	18.182
	Hg	0.088	0.007	0.026	0.023	0.888	45.455
	Cd	0.492	0.000	0.109	0.137	1.257	36.364
	Pb	38.985	15.218	22.828	7.068	0.310	45.455
	Cr	0.143	0.040	0.077	0.031	0.409	0.000
4	Cu	34.831	9.016	20.414	8.525	0.418	45.455
	Fe	37 105.160	13 908.850	25 323.686	9 063.941	0.358	45.455
	Mn	740.280	223.600	471.421	180.565	0.383	45.455
	Zn	115.100	37.800	73.837	29.317	0.397	54.545
	As	13.577	3.575	7.625	3.665	0.481	18.182
	Hg	0.089	0.002	0.025	0.023	0.908	45.455
	Cd	0.475	0.000	0.202	0.164	0.815	54.545
	Pb	30.216	15.344	22.166	5.709	0.258	54.545
	Cr	0.072	0.033	0.054	0.014	0.258	0.000
7	Cu	39.977	11.503	24.061	10.607	0.441	54.545
	Fe	34 058.607	9 904.675	20 617.929	8 915.181	0.432	27.273
	Mn	693.545	229.125	441.486	155.873	0.353	27.273
	Zn	120.144	39.494	73.611	26.970	0.366	63.636
	As	10.963	3.449	6.739	2.412	0.358	0.000
	Hg	0.082	0.007	0.025	0.021	0.845	36.364
	Cd	0.341	0.019	0.195	0.084	0.431	81.818
	Pb	26.144	14.657	20.615	4.958	0.241	54.545
	Cr	0.686	0.029	0.142	0.179	1.259	0.000
10	Cu	34.178	10.443	22.402	8.062	0.360	45.455
	Fe	32 835.765	13 466.243	22 911.288	6 752.368	0.295	36.364
	Mn	608.203	239.678	433.948	124.604	0.287	36.364
	Zn	114.458	50.662	77.851	21.965	0.282	63.636
	As	9.167	3.569	7.175	1.772	0.247	0.000
	Hg	0.058	0.015	0.030	0.015	0.487	54.545
	Cd	0.306	0.000	0.131	0.076	0.576	45.455
	Pb	28.723	14.411	21.198	4.724	0.223	54.545
	Cr	0.254	0.029	0.091	0.065	0.715	0.000

计算重金属因子与细菌群落优势菌门之间的 Spearman 相关性系数, 绘制关联热图(见图 8), 可视化相关性. 1 月, Fe、As、Mn 和 Hg 对沉积物细菌的影响最大, 具有显著性, 重金属 As 对细菌优势门 unidentified_Bacteria 和 Euyarchaeota 影响程度最大, 其次为 Mn 对 unidentified_Archaea 和 Euyarchaeota 的影响程度高. 4 月, Fe、Mn 和 As 对沉积物细菌组成及丰度的影响最大, 重金属 Fe 和 Mn 对细菌优势门 unidentified_Bacteria 影响程度最大, 其次为 As 对 unidentified_Bacteria 的影响程度. 7 月, Hg 对沉积物细菌群落组成及丰度的影响最大,

其中, Hg 对细菌优势门 Bacteroidetes 结构影响程度最高. 10 月, Cu 和 Cd 对沉积物细菌组成及丰度的影响最大, Cu 和 Cd 对细菌优势门 Bacteroidota 结构影响程度最大.

经过 DCA (detrended correspondence analysis) 分析^[26], 获取物种分布的最大梯度长度 (lengths of gradient) 为 1.51 < 3.0, 因此选择冗余分析 RDA 探究重金属因子对细菌群落优势菌门的影响. 冗余分析是将对应分析与多元回归分析相结合, 每一步计算均与环境因子进行回归, 又称多元直接梯度分析. 计算环境因子的 VIF 值, 如表 5 所示. 去除具有共线性



(a)1月,(b)4月,(c)7月,(d)10月;色柱表示细菌群落和环境因子的相关性程度;如果两者相关性为正相关,则显示为蓝色,反之,如果是负相关,则显示为红色;颜色深浅表示相关性强弱,蓝色越深,表示正相关关联程度越高;红色越深,表示负相关关联程度越高;不同星号表示具有显著关联的“微生物-环境因子”,*表示 $P < 0.05$,**表示 $P < 0.01$,***表示 $P < 0.001$

图8 沉积物优势菌门细菌群落与重金属环境因子在不同月份的双关联系数矩阵图

Fig. 8 Heatmap of bicorrelation coefficients between bacterial communities of sediment dominant phylum and environmental factors of heavy metals in different months

影响的Fe,筛选出8个重金属因子.对所有样本的重金属含量与不同月份水平下的优势细菌群落结构进行RDA分析,结果如图9所示.重金属因子通过环境因子的长度表征对沉积物细菌的影响,长度越长,相关性越高,影响越大;而重金属因子对各

菌门影响程度通过夹角的余弦值来反映,余弦值越大,则影响程度越高;若正交,则不相关.经过蒙特卡洛检验结果显示,As($F = 2.4, P = 0.022$)和Hg($F = 3.9, P = 0.032$)是显著影响典农河沉积物细菌群落结构变化的关键因子.

表5 重金属因子的方差膨胀因子

Table 5 Variance inflation factor of heavy metal factor

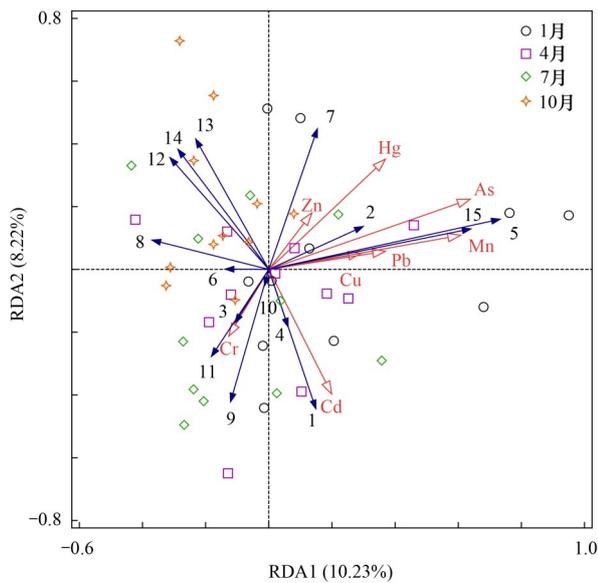
项目	Cu	Fe	Mn	Zn	As	Hg	Cd	Pb	Cr
VIF	4.856	20.446	9.833	7.711	4.234	1.940	2.117	4.572	1.267

3 讨论

3.1 典农河沉积物细菌群落结构与多样性

细菌群落多样性和群落结构特征与环境变化密切相关.由于细菌群落对生态系统环境的变化非常敏感,细菌群落的多样性是衡量生态系统稳定性的重要指标,也是维持生态系统正常功能的前提条件.沉积物细菌群落多样性指标受季节变化影响^[27],

也受不同区域的影响^[28-30].Chen等^[31]运用Illumina MiSeq高通量测序平台对云南高原两个淡水湖泊(滇池和洱海)的沉积物细菌组成研究表明,Proteobacteria、Acidobacteria、Chloroflexi和Bacteroidetes等是其优势群落.黄河沉积物细菌群落组成与黄河三角洲湿地^[32]、丹江口库区^[33]、太湖^[34]、北运河^[35]等河流及其海洋^[36]等水体的沉积物细菌组成类群相似,但又有区别.王鹏等^[37]研究发



1. Proteobacteria, 2. Bacteroidetes, 3. Cyanobacteria, 4. Chloroflexi, 5. Euryarchaeota, 6. Firmicutes, 7. Verrucomicrobia, 8. Actinobacteria, 9. Acidobacteria, 10. Fusobacteria, 11. Nitrospirae, 12. Desulfobacterota, 13. Campilobacterota, 14. unidentified_Bacteria, 15. unidentified_Archaea; 红色箭头为重金属因子, 蓝色箭头表示典农河沉积物优势菌门; 红色箭头长度表示影响细菌群落相关性大小, 红蓝箭头夹角余弦值表示因子对各菌门影响程度

图9 沉积物优势菌门细菌群落与重金属因子的RDA冗余分析

Fig. 9 RDA redundancy analysis of sediment dominant phylum bacterial communities with heavy metal factors

现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; 阴星望等^[33]研究证明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、疣微菌门和硝化螺旋菌门等; 郭建丽等^[38]通过研究发现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、酸杆菌门以及绿弯菌门。

本研究中, 细菌群落多样性具有显著的时间差异和空间差异, 这与已有研究结果一致^[37-39]。10月秋季、7月夏季和4月春季, 受温度和光照等因素影响, 细菌群落多样性高于1月冬季。DNYN细菌群落多样性高于DNYC, 可能是由于典农河DNYC流经更多土地利用类型, 城市用地等类型较多, 同时受人类活动影响, 流入的重金属等污染更多, 而DNYN流经更多农业用地, 农业化肥等进入沉积物中, 环境营养物质充分, 因此导致DNYC细菌群落多样性较低, 而DNYN细菌群落多样性更高。本研究中, 由于典农河流域不同区域之间地理尺度差异小, 不同区域沉积物细菌群落的分离程度低于不同季节的沉积物细菌群落, 因此, 细菌群落结构受季节变化影响远高于区域影响, 10月的优势菌门和优势菌属与其他季节有显著不同, 1月优势菌门主要为 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Cyanobacteria, 4月

优势菌门主要为 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Actinobacteria, 7月优势菌门主要为 Proteobacteria、Bacteroidetes 和 Fusobacteria, 而10月优势菌门为 Proteobacteria, 并出现了 Desulfobacterota 等菌门。最优菌门 Proteobacteria 作为湖泊河流沉积物中存在最广泛的细菌, 对脱氮和除磷等污染物降解起着重要作用。较优菌门 Bacteroidetes 是常见于沉积物环境中参与营养物质循环的菌群。由于温度的影响, 以 SO_4^{2-} 为能源的优势菌门 Desulfobacterota 作为厌氧菌在10月份出现且成为优势菌门, 与文献^[39]结果相同。

3.2 典农河沉积物细菌群落与重金属的关系

有研究表明, 沉积物中不同环境因子能不同程度地影响沉积物细菌群落组成。pH、总磷、氨氮和有机质含量为主要影响因子^[40,41]。重金属因子也是沉积物影响因子中重要的组成部分^[42]。重金属并不是永久停留至沉积物中, 沉积物中的重金属会随着水体流动再次悬浮至上层水中不停地迁移转化, 导致沉积物间接成为重金属的载体和潜在来源。谢学辉等^[21]对德兴铜矿尾矿的土壤中细菌多样性的影响研究发现, 重金属含量对其有重要影响。张明^[43]对中国东部沿海滩内重金属浓度、分布及组合特征进行分析, 结果表明重金属污染物在浙江省和江苏省沿海滩内的浓度不同, 同时发现酸性环境条件有利于 Zn、Cu 和 Pb 等重金属的富集。本研究表明, 典农河沉积物重金属污染较为严重。不同月份下重金属含量不同, 典农河金凤段(DNYC)沉积物重金属含量总体高于典农河永宁段(DNYN)。其中, Cu、Fe、Mn、Hg、Cd 和 Pb 污染严重, 最高超标率可达到 54.545%; Cr 无污染超标情况。1月和7月为重金属含量较高的月份, 可能是由于季节影响, 河流流速缓慢, 沉积物中重金属富集。

长期累积的重金属污染, 由于其固有的毒性和生物累积性, 会严重危害微生物群落的组成结构和代谢功能^[44]。有研究表明, Cu、Zn 和 Cd 等重金属污染使鄱阳湖表层水体中的部分微生物生长受到抑制, 降低了微生物群落的多样性^[45]; Cd、Cu 和 As 等重金属污染会导致土壤微生物群落整体丰度下降但重金属耐受菌的丰度增加, 过量重金属会抑制微生物的基质代谢和呼吸活动^[46]; Cr、Pb 和 Zn 污染的黄金峡沉积物中, 重金属含量与硝化菌、拟杆菌和疣微菌的丰度呈现出显著的负相关关系, 但绿弯菌的生长可能得到了促进^[47]。本研究表明, 不同季节下, 重金属因子对细菌优势菌门影响程度不同, 沉积物中 Mn、As、Cu 和 Hg 等含量较高的重金属因子对典农河沉积物细菌群落影响较大, Cr、Cd 和 Pb

等总体含量较低的重金属因子, 在其相对含量较高的月份, 也会对细菌群落产生影响. 细菌群落优势菌门在重金属污染下的响应机制不同, unidentified_Bacteria、Euyarchaeota、unidentified_Archaea 和 Bacteroidota 容易受重金属因子影响, 其他细菌群落受重金属因子影响较小, 表现出一定的重金属耐受性, 可以较强适应环境, 这与何一凡等^[48]的研究结果相一致. 整体而言, 重金属因子 As 和 Hg 驱动典农河沉积物细菌群落结构变化. 作为沉积物中重要的重金属因子^[49,50], As 超标率较低, 但是影响最为显著, 可能是由于 As 对细菌群落产生 Hormesisi(毒物兴奋效应), 与文献^[51]的研究结果相同.

4 结论

(1) 典农河(上游段)沉积物细菌多样性在不同时空存在显著差异. 在空间上, 典农河永宁段细菌物种丰度高于典农河银川段细菌物种丰度, 在时间上, 7月和10月细菌物种丰度高于1月和4月细菌物种丰度.

(2) 典农河(上游段)沉积物细菌的主要优势菌门空间差异不明显, 不同区域之间最优势菌门相似, DNYN 和 DNYC 的最优势菌门为 Proteobacteria, 较优势菌门为 Bacteroidetes 和 Desulfobacterota. 1月优势菌属为 *Sulfitobacter*、*Amylibacter*、*Planktomarina*、*Sulfurifustis* 和 *SUP05_cluster*, 4月优势菌属包括 *Arenimonas*、*Sulfurifustis* 和 *Candidatus_Methanoperedens*, 7月优势菌属包括 *Thioalkalispira* 和 *Methylobacterium*, 10月优势菌属包括 *Trichococcus*、*Ralstonia*、*MND1* 和 *Paraclostridium*. 采样点位中优势菌门具有显著的时间差异, 10月沉积物细菌群落组成结构与其他季节存在明显差异, 1、4和7月细菌群落结构相似度较高.

(3) 典农河沉积物中重金属含量存在显著空间差异, DNYC 重金属含量明显高于 DNYN 重金属含量. 1月和7月为典农河沉积物中重金属含量较高的月份. 典农河1月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>Pb>Cu>As>Cd>Cr>Hg, 4、7和10月沉积物重金属含量大小为: Fe>Mn>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Cr>Hg. Cu、Fe、Mn、Hg、Cd 和 Pb 超标情况较严重.

(4) 不同重金属在不同月份对不同的优势菌门产生不同影响, 正负相关程度与重金属含量关系较大, 当某一重金属因子含量高于其他重金属因子, 更易于影响细菌群落结构, 同时, 当处于含量较高的月份时, 则该重金属因子在该月份对细菌群落优势菌门影响程度高.

参考文献:

- [1] Sutcliffe B, Hose G C, Harford A J, *et al.* Microbial communities are sensitive indicators for freshwater sediment copper contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **247**: 1028-1038.
- [2] 李继洲, 程南宁, 陈清锦. 污染水体的生物修复技术研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2005, **6**(1): 25-30.
Li J Z, Cheng N N, Chen Q J. Progress in the study of bioremediation for polluted water bodies [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2005, **6**(1): 25-30.
- [3] 张婷. 鄱阳湖河湖交错带水体微生物群落特征研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2018.
Zhang T. Study on the characteristics of water microbial community in Lake-River ecotone of Poyang Lake [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2018.
- [4] 郭秋平. 鄱阳湖河湖交错带丰水期微生物群落特征研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2017.
Guo Q P. Study on microbial community structure in Lake-River ecotone of Poyang Lake [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.
- [5] Schneider A R, Gommeaux M, Duclercq J, *et al.* Response of bacterial communities to Pb smelter pollution in contrasting soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **605-606**: 436-444.
- [6] 胡洁. 典农河银川段水生态状况评价[J]. *皮革制作与环保科技*, 2022, **3**(17): 151-153.
Hu J. Evaluation of water ecosystem in Yinchuan section of Dianong river [J]. *Leather Manufacture and Environmental Technology*, 2022, **3**(17): 151-153.
- [7] 贺树杰. 典农河上游段水生态承载力研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
He S J. Study on water ecological carrying capacity of Dianong River [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [8] 曹占琪. 典农河上游段水生态系统健康诊断与评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.
Cao Z Q. Diagnosis and evaluation of water environmental health in Yinchuan section of Dianong River [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [9] 张乐, 徐慧. 宁夏人工河道典农河的健康状态评价[J]. *水生态学杂志*, 2020, **41**(2): 16-22.
Zhang L, Xu H. Health evaluation of Dianong River in Ningxia [J]. *Journal of Hydroecology*, 2020, **41**(2): 16-22.
- [10] 李世龙, 赵增锋, 邱小琼, 等. 宁夏清水河流域重金属分布特征及风险评价[J]. *灌溉排水学报*, 2020, **39**(7): 128-137.
Li S L, Zhao Z F, Qiu X C, *et al.* Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in Qingshui River basin of Ningxia [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, **39**(7): 128-137.
- [11] 赵增锋. 太阳山湿地水环境重金属分布特征及生态风险评价[D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
Zhao Z F. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the water environment of Taiyangshan Wetland [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [12] Zhao R Z, Zhang W J, Zhao Z F, *et al.* Determinants and assembly mechanism of bacterial community structure in Ningxia Section of the Yellow River [J]. *Microorganisms*, 2023, **11**(2): 496.
- [13] 刘晶晶, 李金花, 季燕, 等. 辉河湿地河岸带土壤微生物群落组成与土壤理化关系[J]. *草地学报*, 2023, **31**(5): 1393-1405.
Liu J J, Li J H, Ji Y, *et al.* Relationship between soil microbial community composition and soil physicochemical properties in riparian zone of Huihe Wetland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, **31**

- (5): 1393-1405.
- [14] 田爽, 吴双, 李欣, 等. 基于 16S rDNA 高通量测序探讨肠道菌群对疟原虫感染小鼠的保护性作用[J]. 中国人兽共患病学报, 2023, **39**(2): 99-106.
Tian S, Wu S, Li X, *et al.* Investigation of protective research of gut microbiome on *Plasmodium* infection mice by 16S rDNA high-throughput sequencing[J]. Chinese Journal of Zoonoses, 2023, **39**(2): 99-106.
- [15] 何中声, 谷新光, 江蓝, 等. 戴云山南坡不同海拔森林土壤优势细菌群落特征及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2022, **44**(7): 107-116.
He Z S, Gu X G, Jiang L, *et al.* Characteristics and its influencing factors of forest soil dominant bacterial community in different elevations on the southern slope of Daiyun Mountain, Fujian Province of eastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, **44**(7): 107-116.
- [16] 王东伟, 陈永进, 周彦锋, 等. 淮中游种质资源保护区浮游植物功能群演替特征及其驱动因子[J]. 生态学杂志, 2023, **42**(11): 2646-2654.
Wang D W, Chen Y J, Zhou Y F, *et al.* Succession characteristics and driving factors of phytoplankton functional groups in the germplasm resources reserve of middle reaches of Huaihe River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, **42**(11): 2646-2654.
- [17] 吕达, 郑祥民, 周立旻, 等. 崇明东滩湿地沉积物重金属污染的磁诊断[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(6): 38-43.
Lv D, Zheng X M, Zhou L M, *et al.* Magnetic diagnosis of heavy metal pollution in sediments of Chongming Wetland[J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(6): 38-43.
- [18] Cantwell M G, Burgess R M, Kester D R. Release and phase partitioning of metals from anoxic estuarine sediments during periods of simulated resuspension [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(24): 5328-5334.
- [19] 衣俊. 潮滩沉积物微生物群落表征及其对污染物的响应研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
Yi J. Study of microbial communities in the intertidal sediments and their responses to pollutants [D]. Shanghai: East China Normal University, 2019.
- [20] Lundberg D S, Yourstone S, Mieczkowski P, *et al.* Practical innovations for high-throughput amplicon sequencing [J]. Nature Methods, 2013, **10**(10): 999-1002.
- [21] 谢学辉, 范凤霞, 袁学武, 等. 德兴铜矿尾矿重金属污染对土壤中微生物多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2012, **39**(5): 624-637.
Xie X H, Fan F X, Yuan X W, *et al.* Impact on microbial diversity of heavy metal pollution in soils near Dexing copper mine tailings [J]. Microbiology China, 2012, **39**(5): 624-637.
- [22] 丁苏丽, 张祁灵, 董俊, 等. 深港红树林沉积物微生物群落多样性及其与重金属的关系[J]. 生态学杂志, 2018, **37**(10): 3018-3030.
Ding S L, Zhang Q J, Dong J, *et al.* Microbial community structure and its relationship to heavy metals in Shenzhen and Hong Kong mangrove sediments [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, **37**(10): 3018-3030.
- [23] Du H X, Harata N, Li F S. Responses of riverbed sediment bacteria to heavy metals: Integrated evaluation based on bacterial density, activity and community structure under well-controlled sequencing batch incubation conditions [J]. Water Research, 2018, **130**: 115-126.
- [24] 邵宗圆, 王悦, 张菊, 等. 耐铜植物茵陈蒿根际细菌群落结构及影响因素[J]. 生态学报, 2017, **37**(22): 7679-7688.
Shao Z Y, Wang Y, Zhang J, *et al.* The bacterial community structure associated with a copper-tolerant plant, *Artemisia capillaries* Thunb., and its influencing factors [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, **37**(22): 7679-7688.
- [25] Gomes N C M, Borges L R, Paranhos R, *et al.* Exploring the diversity of bacterial communities in sediments of urban mangrove forests[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2008, **66**(1): 96-109.
- [26] 秦宇, 郑望, 张曦, 等. 三峡库区中段水体微生物群落结构与环境因子相关性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(5): 1184-1193.
Qin Y, Zheng W, Zhang X, *et al.* Correlation between microbial community structure and environmental factors in the middle section of the three gorges reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(5): 1184-1193.
- [27] 牛漾明, 袁瑞强. 调水和季节变化对河流沉积物古菌群落的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(3): 1294-1304.
Niu Y D, Yuan R Q. Effects of water diversion and seasonal change on archaea community in river sediments [J]. China Environmental Science, 2020, **40**(3): 1294-1304.
- [28] 李雨桐, 杨杉, 张艺, 等. 不同地区土壤古菌群落对重金属污染的响应[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4481-4488.
Li Y T, Yang S, Zhang Y, *et al.* Response of soil archaeal community to heavy metal pollution in different typical Regions [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4481-4488.
- [29] 殷婷婷, 温洪宇, 袁振亚, 等. 青海湖与中国内陆盐湖古菌群落组成的比较[J]. 微生物学报, 2017, **57**(10): 1471-1480.
Yin T T, Wen H Y, Yuan Z Y, *et al.* Comparison of archaeal community composition between Qinghai Lake and other salt lakes in China [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2017, **57**(10): 1471-1480.
- [30] 陈文轩, 李茜, 王珍, 等. 中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2822-2833.
Chen W X, Li Q, Wang Z, *et al.* Spatial distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in arable land soil of China [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2822-2833.
- [31] Chen Y H, Dai Y, Wang Y L, *et al.* Distribution of bacterial communities across plateau freshwater lake and upslope soils [J]. Journal of Environmental Sciences, 2016, **43**: 61-69.
- [32] Yu Y, Wang H, Liu J, *et al.* Shifts in microbial community function and structure along the successional gradient of coastal wetlands in Yellow River Estuary [J]. European Journal of Soil Biology, 2012, **49**: 12-21.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 鲍树林, 陈永娟, 王晓燕. 北运河沉积物中氨氧化微生物的群落特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(1): 179-189.
Bao L L, Chen Y J, Wang X Y. Diversity and abundance of ammonia-oxidizing prokaryotes in surface sediments in Beiyun River [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(1): 179-189.
- [36] Mahmoudi N, Robeson II M S, Castro H F, *et al.* Microbial community composition and diversity in Caspian Sea sediments [J].

- FEMS Microbiology Ecology, 2015, **91**(1): 1-11.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 等. 蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1976-1987.
Jin Z H, Tu C Q, Wang S H, *et al.* Phosphorus adsorption characteristics and loss risk in sediments of Lake Bay during the overwinter period of cyanobacteria [J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1976-1987.
- [40] Tripathi B M, Kim M, Tateno R, *et al.* Soil pH and biome are both key determinants of soil archaeal community structure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015, **88**: 1-8.
- [41] 王秀丽, 徐建民, 姚槐应, 等. 重金属铜、锌、镉、铅复合污染对土壤环境微生物群落的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(1): 22-27.
Wang X L, Xu J M, Yao H Y, *et al.* Effects of Cu, Zn, Cd and Pb compound contamination on soil microbial community [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, **23**(1): 22-27.
- [42] Peng J F, Song Y H, Yuan P, *et al.* The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **161**(2-3): 633-640.
- [43] 张明. 华东沿海滩涂区环境地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
Zhang M. Environmental geochemical study of the East China Intertidal Zone [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [44] 郭大陆, 张建, 申思, 等. 重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 510-520.
Guo D L, Zhang J, Shen S, *et al.* Effects of heavy metal content on fungal community structure in urban soil [J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 510-520.
- [45] Zhang H, Wan Z W, Ding M J, *et al.* Inherent bacterial community response to multiple heavy metals in sediment from river-lake systems in the Poyang Lake, China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, **165**: 314-324.
- [46] 卢永强, 陈浮, 马静, 等. 复垦矿区重金属对土壤微生物群落的影响[J]. 环境科学与技术, 2020, **43**(3): 21-29.
Lu Y Q, Chen F, Ma J, *et al.* Effects of heavy metals on soil microbial community in reclaimed mining area [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **43**(3): 21-29.
- [47] Li C C, Quan Q, Gan Y D, *et al.* Effects of heavy metals on microbial communities in sediments and establishment of bioindicators based on microbial taxa and function for environmental monitoring and management [J]. Science of the Total Environment, 2020, **749**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141555.
- [48] 何一凡, 肖新宗, 王佳文. 重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2103-2112.
He Y F, Xiao X Z, Wang J W. Effects of heavy metal pollution on the structure of microbial communities in different habitats [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2103-2112.
- [49] 王戈慧. 硫铁改性生物炭同步修复土壤砷铅污染的稳定化效果及作用机制[D]. 上海: 华东理工大学, 2022.
Wang G H. Simultaneous immobilization and mechanisms of arsenic and lead in soils by sulfur/iron modified biochar [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2022.
- [50] 周峰, 李朋, 邢新丽, 等. 武汉城市湖泊沉积物氮、磷和重金属分布特征及生态风险评价——以龙阳湖、墨水湖为例[J/OL]. 中国环境科学: 1-8 [2023-06-22]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230606.008>.
Zhou F, Li P, Xing X L, *et al.* Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Longyang Lake and Moshui Lake in Wuhan [J/OL]. China Environmental Science: 1-8 [2023-06-22]. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20230606.008>.
- [51] 王森, 陈建文, 张红, 等. 毫清河水体细菌群落的结构和分布特征[J]. 环境科学, 2023, **44**(4): 2113-2121.
Wang S, Chen J W, Zhang H, *et al.* Structure and distribution characteristics of bacterial community in Boqing River water [J]. Environmental Science, 2023, **44**(4): 2113-2121.

CONTENTS

Spatio-temporal Evolution, Dynamic Transition, and Convergence Trend of Urban Carbon Emission Intensity in China	YANG Qing-ke, WANG Lei, ZHU Gao-li, <i>et al.</i> (1869)
Spatio-temporal Evolution and Trend Prediction of Transport Carbon Emission Efficiency	ZHENG Yan, JIANG Xue-mei, XIAO Yu-jie (1879)
Research on Carbon Emission Decoupling Factors Based on STIRPAT Model and LMDI Decomposition	ZHANG Jiang-yan (1888)
Carbon Peak Pathways of Industrial Parks Based on the LEAP Model: A Case Study of a National Development Zone in Nanjing	LI Hui-peng, LI Li, YIN Yin, <i>et al.</i> (1898)
Accounting and Analysis of Carbon Emissions in Universities: A Case Study of Beijing A University	CAO Rui, FENG Li, ZHANG Li-qiu (1907)
Synergy Effects and Driving Factors of Pollution and Carbon Emission Reduction in Manufacturing Industry in Beijing	YU Shan, HAN Yu-hua, MU Jie, <i>et al.</i> (1917)
Carbon Emissions Trading Prices and Total Factor Productivity: Evidence from China	WU Xue-ping (1926)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and PM ₁₀ in Chinese Cities	LI Jiang-su, DUAN Liang-rong, ZHANG Tian-jiao (1938)
Spatial-temporal Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and Ozone in the Border Area of Jiangsu, Anhui, Shandong, and Henan from 2017 to 2021	CHEN Wei, XU Xue-zhe, LIU Wen-qing (1950)
Analysis of the Characteristics and Causes of PM _{2.5} and O ₃ Pollution in Xi'an During the Epidemic Lockdown Period	YUAN Xiao-hong, ZHANG Qiang, LI Qi, <i>et al.</i> (1963)
PM _{2.5} Chemical Composition and Spatial Variability in the Five Cities of Southern Jiangsu During Fall and Winter	FENG Wei, DING Feng, SHANG Yue, <i>et al.</i> (1975)
Source Apportionment of Fine Particles in Xianning, Hubei	LUO Yi, ZHU Kuan-guang, CHEN Pu-long, <i>et al.</i> (1983)
Spillover Benefits of Ammonia Emission Reduction in Xingtai Area to the Improvement of Atmospheric PM _{2.5} Concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	BIAN Ze-jun, WEN Chao-yu, LANG Jian-lei, <i>et al.</i> (1994)
Characteristics, Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, ZHU Yao, CAO Ting, <i>et al.</i> (2003)
Composition Characteristics of Typical VOCs Sources in the Highland City of Lhasa	GUO Shu-zheng, YE Chun-xiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (2011)
VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment in Typical Industrial Parks in Beijing: Environmental Impact of High and New Technology Industries	WANG Jie, YAO Zhen, WANG Min-yan, <i>et al.</i> (2019)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in the Chengdu Plain Under the Influence of High Temperature Extremes	LEI Li-juan, ZHANG Yi, LUO Yi-na, <i>et al.</i> (2028)
Presence, Behavior, and Risk of Antiviral Drugs in the Aqueous Environment	GE Lin-ke, LI Xuan-yan, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (2039)
Spatio-temporal Variation and Probability Health Risk of Heavy Metals in Surface Water of Xiaolangdi Reservoir in the Yellow River	WANG Liang, DENG Xue-jiao, WANG Xiao-lei, <i>et al.</i> (2054)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Strontium Enrichment of the Duoqu River Basin in Eastern Xizang	LI Jing-jie, LIAN Sheng, WANG Ming-guo, <i>et al.</i> (2067)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Its Moisture Sources in the Inland Regions of Northwest China	ZHANG Yan-yan, XIN Cun-lin, GUO Xiao-yan, <i>et al.</i> (2080)
Recharge Source and Evolution Process of Karst Groundwater in Tai'an Urban Area Based on Hydrochemistry and Hydrogen and Oxygen Isotopes	MENG Ling-hua (2096)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors of Surface Water and Groundwater in the Mountainous Area of Danjiang River Basin	ZHANG Zi-yan, FU Yong-peng, WANG Ning-tao, <i>et al.</i> (2107)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in Yuanyangchi Irrigation Area, Jinta Basin	WANG Xiao-yan, HAN Shuang-bao, ZHANG Meng-nan, <i>et al.</i> (2118)
Hydrochemical Characteristics and Health Risk Assessment of Shallow Groundwater in the Plain Zone of Deyang City	LIU Nan, CHEN Meng, GAO Dong-dong, <i>et al.</i> (2129)
Spatial and Temporal Distribution of Microplastics in the Sediments of Typical Urban River Network	XU Wan-lu, FAN Yi-fan, QIAN Xin (2142)
Construction of Nitrogen Emission Inventory at Sub-basin Scale and Analysis of Key Sources in Fuxian Lake Watershed	WANG Yan-jie, LIANG Qi-bin, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (2150)
Preparation of Lanthanum Crosslinked Calcium Peroxide/Sepiolite/Sodium Alginate Composite Hydrogels and Their Elimination Performance for Endogenous Phosphorus	QU Si-tong, SHAN Su-jie, WANG Chong-ming, <i>et al.</i> (2160)
Formation Mechanism, Structural Characteristics of Ultrafine Mineral Particles, and Their Environmental Effects	LIU Zhen-hai, ZHANG Zhan-hua, YUAN Yu-xin, <i>et al.</i> (2171)
Research Progress in Application of Biochar-immobilized Bacteria Composites in Environmental Remediation	SUN Shu-yu, HUANG Meng-xin, KONG Qiang, <i>et al.</i> (2185)
Effect of Microplastics on Ammonia Nitrogen Adsorption by Zeolite in Water and Its Mechanism	LIAN Jian-jun, XIE Shi-ting, WU Pei, <i>et al.</i> (2195)
Mechanism of Ultraviolet Aging Effect on the Adsorption of Ciprofloxacin by Nano-biochar	MA Feng-feng, XUE Zhi-yi, ZHAO Bao-wei (2203)
Response of Phytoplankton Communities and Environmental Factors Under the Influence of Land Use in the Wuding River Basin	GUO Shan-song, HU En, DING Yi-tong, <i>et al.</i> (2211)
Bacterial Community Diversity and Functional Gene Abundance of Culturable Bacteria in the Wetland of Poyang Lake	YU Jiang, WANG Chun, LONG Yong, <i>et al.</i> (2223)
Bacterial Community Structure and Its Relationship with Heavy Metals in Sediments of Diannong River	LIU Shuang-yu, MENG Jun-jie, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i> (2233)
Impacts of Treated Wastewater on Bacterial and Fungal Microbial Communities in Receiving Rivers	GUO You-shun, YU Zhong, HAO Wen-bin, <i>et al.</i> (2246)
Metagenomics Reveals the Characteristics and Functions of Bacterial Community in the Advanced Wastewater Treatment Process	HU Jian-shuang, WANG Yan, ZHOU Zheng, <i>et al.</i> (2259)
Spatio-temporal Characteristics of Habitat Quality and Natural-human Driven Mechanism in Dabie Mountain Area	ZHENG Ya-ping, ZHANG Jun-hua, TIAN Hui-wen, <i>et al.</i> (2268)
Hyperspectral Inversion of Soil Organic Matter Content Based on Continuous Wavelet Transform, SHAP, and XGBoost	YE Miao, ZHU Lin, LIU Xu-dong, <i>et al.</i> (2280)
Effects of Straw Retention, Film Mulching, and Nitrogen Input on Soil Quality in Dryland Wheat Field	YE Zi-zhuang, WANG Song-yan, LU Xiao, <i>et al.</i> (2292)
Effects of Long-term Application of Organic Fertilizer on the Occurrence and Migration Characteristics of Soil Microplastics	WANG Chang-yuan, MA Xiao-chi, GUO De-jie, <i>et al.</i> (2304)
Effect of Different Soil Salinities on N ₂ O Emission: A Meta-analysis	HUANG Yi-hua, SHE Dong-li, SHI Zhen-qi, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Prediction of Carbon Storage Based on Land Use/Land Cover Dynamics in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	ZHENG Hui-ling, ZHENG Hui-feng (2321)
Simulation of Temporal and Spatial Changes in Ecosystem Carbon Storage in Funiu Mountains Based on InVEST Model	ZHANG Zhe, SHI Zhen-qin, ZHU Wen-bo, <i>et al.</i> (2332)
Relationship Between Microbial Nutrient Limitation and Soil Organic Carbon Fraction During Shelterbelts Construction	XU Feng-jing, HUANG Yi-mei, HUANG Qian, <i>et al.</i> (2342)
Characteristics and Driving Forces of Organic Carbon Mineralization in Brown Soil with Long-term Straw Returning	ZHAO Yu-hang, YIN Hao-kai, HU Xue-chun, <i>et al.</i> (2353)
Effects of Winter Green Manure Mulching on Soil Aggregates, Organic Carbon, and AMF Diversity	LU Ze-rang, CHEN Jia-yan, LI Zhi-xian, <i>et al.</i> (2363)
Spatial and Temporal Distribution of Nitrogen in the Liaohu River Basin and Its Responses to Land Use and Rainfall	ZHOU Bo, LI Xiao-guang, TONG Si-chang, <i>et al.</i> (2373)
Nitrous Oxide Emissions from Ponds in Typical Agricultural Catchment with Intensive Agricultural Activity	ZHANG Xin-yue, XIAO Qi-tao, XIE Hui, <i>et al.</i> (2385)
Effects of Biochar Combined with Different Types of Nitrogen Fertilizers on Denitrification Bacteria Community in Vegetable Soil	LIU Xiao-wan, LIU Xing-ren, GAO Shang-jie, <i>et al.</i> (2394)
Investigation of Soil Microbial Characteristics During Stand Development in <i>Pinus tabulaeformis</i> Forest in Taiyue Mountain	MA Yi-shu, CAO Ya-xin, NIU Min, <i>et al.</i> (2406)
Simulation of Heavy Metal Content in Soil Based on Sparse Sample Sites	ZHANG Jia-qi, PAN Yu-chun, GAO Shi-chen, <i>et al.</i> (2417)
Identification Priority Source of Heavy Metal Pollution in Greenspace Soils Based on Source-specific Ecological and Human Health Risk Analysis in the Yellow River Custom Tourist Line of Lanzhou	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (2428)
Heavy Metal Accumulation and Assessment of Potential Ecological Risk Caused by Soil pH Changes in Different Types of Purple Soils in Southwest China	ZHANG Hai-lin, ZHANG Yu, WANG Ding, <i>et al.</i> (2440)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Arable Land Around an Iron Ore Mining Area in Chongqing	LIAO Ze-yuan, LI Jie-qin, SHEN Zhi-jie, <i>et al.</i> (2450)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils and Crops Around Metal Mines	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (2461)
Effect of Red Mud-based Nano Zero-valent Iron on Remediation of Polymetallic Contaminated Soil	LIU Long-yu, YANG Shi-li, ZHAO Huang-shi-yu, <i>et al.</i> (2474)
Effects of Zinc Application on Cadmium Accumulation in Alkaline Soil-Wheat Seedling Systems	ZHANG Yao, WANG Tian-qi, NIU Shuo, <i>et al.</i> (2480)