

目次

气候变化对中国夏季臭氧影响 ..... 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)  
基于 EOF 分解和 KZ 滤波的 2019 ~ 2021 年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 ..... 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)  
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 ..... 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)  
2015 ~ 2020 年中国城市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染时空演变特征 ..... 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)  
2015 ~ 2021 年京津冀及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧复合污染时空特征分析 ..... 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)  
2000 ~ 2020 年中国典型经济区 PM<sub>2.5</sub> 时空变化及其与植被景观格局的关系 ..... 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)  
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 ..... 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)  
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 ..... 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)  
西安冬季 PM<sub>2.5</sub> 中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 ..... 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)  
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 ..... 王红磊, 刘思哈, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇僊, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)  
伊犁河谷核心区春季 PM<sub>2.5</sub> 组分特征及来源解析 ..... 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)  
基于高空间分辨率的郑州市城镇居民 PM<sub>2.5</sub> 暴露浓度与健康风险变化评估 ..... 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)  
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 ..... 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)  
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)  
2020 年和 2021 年南京城区臭氧生成敏感性和 VOCs 来源变化分析 ..... 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)  
北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势 ..... 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)  
青岛市臭氧污染与非污染期间 VOCs 化学特征及来源解析 ..... 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)  
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O<sub>3</sub> 生成特征 ..... 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)  
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 ..... 李少林, 王齐齐 (1985)  
北京市减排降碳协同控制情景模拟和效应评估 ..... 俞珊, 张双, 张增杰, 翟培芝, 刘桐珊 (1998)  
基于不同排放清单的长三角人为 CO<sub>2</sub> 排放模拟 ..... 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)  
武汉汉江水源水质变化趋势及风险分析 ..... 卓海华, 姜保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)  
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 ..... 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)  
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 ..... 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘辉, 张亚宁 (2040)  
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 ..... 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)  
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 ..... 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)  
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 ..... 张静, 胡愈焯, 胡圣, 黄杰 (2072)  
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 ..... 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)  
武汉市 3 种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因素 ..... 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娟, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)  
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 ..... 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)  
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 ..... 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)  
微塑料暴露对小棒指软珊瑚 (*Sinularia microclavata*) 共附生细菌群落结构和功能的影响 ..... 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)  
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 ..... 严棋 (2136)  
铝改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 ..... 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)  
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 ..... 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳玉荣, 贺德春, 潘杰 (2158)  
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 ..... 辛勃, 单超, 吕路 (2168)  
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 ..... 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)  
基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 ..... 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)  
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 ..... 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)  
基于 BP 神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 ..... 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)  
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 ..... 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)  
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 ..... 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)  
岩溶区不同母质土壤 Cd 地球化学特征及玉米籽实 Cd 含量预测 ..... 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)  
龙岩市不同利用类型土壤及农作物 Pb、Cd 和 As 污染风险与贡献分析 ..... 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)  
小麦籽粒镉含量影响因素 Meta 分析和决策树分析 ..... 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)  
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 ..... 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)  
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 ..... 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)  
黄河源区斑块退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 ..... 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)  
不同海拔鳧箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及 PICRUSt 功能预测 ..... 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏卢璐, 马飞 (2304)  
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 ..... 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)  
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 ..... 刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (2325)  
磷渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 ..... 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)  
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 ..... 胡锦涛, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹国帅 (2348)  
外源褪黑素对胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 ..... 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)  
面向 2035 的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 ..... 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)  
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 ..... 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)  
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 ..... 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)  
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 ..... 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)  
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

# 重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响

何一凡<sup>1,2</sup>, 肖新宗<sup>3</sup>, 王佳文<sup>2\*</sup>

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871; 3. 中国南水北调集团中线有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 重金属污染严重危害了生态系统中微生物群落的多样性和组成结构, 然而目前关于重金属污染对“地表水-沉积物-地下水”这3种生境中微生物群落结构的影响差异知之甚少. 以唐河污水库地表水、沉积物和地下水为研究对象, 基于16S rRNA高通量测序技术分析对比不同生境下微生物群落多样性和组成差异, 揭示了3种栖息地中微生物群落结构的主要驱动因素. 结果表明, 不同生境中微生物群落的多样性具有显著差异, 地下水微生物 $\alpha$ 多样性显著高于沉积物微生物和地表水微生物; 不同生境中的微生物物种组成也具有显著差异, 地表水中 *Pedobacter*、*Hydrogenophaga*、*Flavobacterium* 和 *Algoriphagus* 丰度较高, 沉积物中 *Ornatilinea*、*Longilinea*、*Thermomarinilinea* 和 *Bellilinea* 等重金属耐受菌占据主要优势, 而 *Arthrobacter*、*Gallionella* 和 *Thiothrix* 是地下水中的标志性物种; 理化因素和重金属变量共同驱动了3种生境中微生物的群落结构变化, pH、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 Li 是影响地表水微生物群落结构的主要因素, TP、 $\text{NH}_4^+$ -N、Cr、Fe、Cu 和 Zn 显著影响沉积物中微生物的群落结构, 而地下水中微生物群落与 pH 呈弱相关关系, 几乎不受重金属污染的影响. 整体上, 重金属污染对不同生境微生物群落结构的影响大小为: 沉积物 > 地表水 > 地下水. 研究结果将为重金属污染环境的生态修复及可持续发展提供重要科学依据.

**关键词:** 重金属污染; 微生物; 地表水; 沉积物; 地下水

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)04-2103-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205041

## Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats

HE Yi-fan<sup>1,2</sup>, XIAO Xin-zong<sup>3</sup>, WANG Jia-wen<sup>2\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Middle Route of China South-to-North Water Diversion Group, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Heavy metal pollution seriously threatens the diversity and composition of microbial communities in various ecosystems. However, little is known about the effects of heavy metal pollution on the structure of microbial communities in the three habitats of “surface water-sediment-groundwater.” Here, with help of 16S rRNA high-throughput sequencing technology, the diversity and composition of microbial communities, as well as the underlying controlling factors, were investigated and compared among the surface water, sediment, and groundwater of the Tanghe sewage reservoir. The results showed significant differences in the diversity of microbial communities among different habitats, with the highest  $\alpha$  diversity observed in groundwater rather than surface water or sediment. Meanwhile, microbial communities also displayed distinct compositions among the three different habitats. Specifically, *Pedobacter*, *Hydrogenophaga*, *Flavobacterium*, and *Algoriphagus* were dominant in surface water; metal-tolerant bacteria such as *Ornatilinea*, *Longilinea*, *Thermomarinilinea*, and *Bellilinea* prevailed in sediment; and *Arthrobacter*, *Gallionella*, and *Thiothrix* were abundant in groundwater. Furthermore, physicochemical factors and metal variables jointly determined the microbial community structure in the three habitats. Among the influencing factors, pH,  $\text{NO}_3^-$ -N, and Li were the main factors affecting the microbial structure in surface water; TP,  $\text{NH}_4^+$ -N, Cr, Fe, Cu, and Zn significantly impacted microorganisms in sediment; and only pH (not metal pollutants) was weakly associated with the microbial composition in groundwater. Overall, heavy metal pollution significantly shaped the microbial community structure in sediment, followed by that in surface water and groundwater. These results provide important scientific guidance for the ecological restoration and the sustainable development of heavy metal-polluted ecosystems.

**Key words:** heavy metal pollution; microbes; surface water; sediment; groundwater

随着城市化和工业化的快速发展,大量含有毒重金属的工业废水排放到环境中,对生态环境和人类健康构成了严重威胁<sup>[1]</sup>. 微生物是生态系统中多样性最丰富和分布最广泛的生命形式之一,在物质循环和能量运输中发挥着关键作用,是生态系统中生物化学循环的重要驱动力之一<sup>[2]</sup>. 外界环境干扰会显著影响微生物群落结构的变化,甚至改变整个生态系统的物质循环和能量流动过程<sup>[3]</sup>. 不同生境中微生物的组成、多样性和对环境的响应始终是微生物生态学与环境学研究的重点. 有研究表明,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<sup>[4]</sup>. 例如,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<sup>[5]</sup>; Cd、Cu 和 As 等重金属污染会导致土壤微生物群落的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<sup>[6]</sup>; Cr、Pb 和 Zn 污染的黄金峡沉积

收稿日期: 2022-05-05; 修订日期: 2022-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209078)

作者简介: 何一凡(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为重金属污染防治, E-mail: 1103790718@qq.com

\* 通信作者, E-mail: wwjjww@pku.edu.cn

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<sup>[7]</sup>. 然而,目前的研究主要集中在单一类型生境如污水<sup>[8,9]</sup>、地下水<sup>[10,11]</sup>、地表水<sup>[12]</sup>、土壤<sup>[13,14]</sup>和沉积物<sup>[15]</sup>等,鲜见研究同步调查重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响.

白洋淀是华北平原最大的以植物为主的淡水湿地,在洪水储备和维持生态平衡等方面发挥重要作用<sup>[16]</sup>. 唐河污水库位于白洋淀上游,用于储存和管理来自保定市和附近村庄的工业和城市废水,是白洋淀淡水湿地的最后一道防线<sup>[17]</sup>. 有研究表明,工业污染等外源输入导致污水库的沉积物环境已被 Fe、As、Zn 和 Cu 等多种重金属污染<sup>[18]</sup>,这些污染物可能会通过地表径流进入白洋淀,从而严重影响白洋淀的生态安全<sup>[19]</sup>. 更重要的是,长期的重金属污染对表层水和周边地下水的生态环境以及微生物结构的影响,目前仍不清楚. 鉴于此,同步调查重金属污染对唐河污水库“地表水-沉积物-地下水”这3种栖息地中微生物的影响,是深入揭示唐河污水库中重金属污染危害的关键.

本研究将基于 16S rRNA 高通量测序方法,调查唐河污水库的“地表水-沉积物-地下水”这3种生境中的微生物群落结构特征,进一步明确不同生境中微生物群落结构的驱动因素,揭示污水库重金属污染对不同生境的影响,以期为唐河污水库生态修复和白洋淀生态系统的可持续发展提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 样点布设及样品采集

研究区域位于河北省保定市的唐河污水库(38°47'43"~38°47'52"N, 115°40'11"~115°42'22"E),采样面积约 0.75 km<sup>2</sup>,该区域属温带大陆性季风气候,多年平均气温约 13℃,年平均降雨量约为 513.6 mm,年平均蒸发量约为 1 773.40 mm<sup>[20]</sup>. 本研究于 2018 年 11 月共设置 5 个采样点,分别采集了沉积物、地表水和地下水样品(图 1).

每个站点使用无菌 PET 瓶收集 10 L 的水进行水样的采集;同时,在同一站点使用采泥器采集水体之下对应的表层沉积物样品,用 PE 自封袋和 50 mL 无菌离心管进行密封保存;此外,在站点周边深度 20 m 左右的浅层含水层新建监测井同步采集了地下水样本. 所有采集的样品分为两份,一份用于微生物的分子生物学鉴定,另一份用于环境指标分析. 将用于分子生物学鉴定的样品保存在 -80℃ 冷冻,将用于环境指标分析的样品在 4℃ 左右保存.

对所有样品均测定了其环境指标,包括理化指

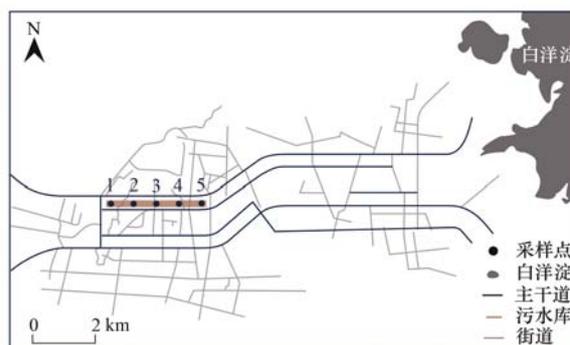


图 1 采样点位置分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

标和重金属含量. 具体地,在采样现场,使用 YSI-85 水质分析仪(YSI, USA)测定 pH,同时,参照之前的研究方法和相关的标准<sup>[21]</sup>,在实验室测定总氮(total nitrogen, TN)(HJ 636-2012)、总磷(total phosphorous, TP)(HJ 632-2011)、氨氮(ammonia nitrogen, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)(HJ 535-2009)和硝氮(nitrate nitrogen, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)(GB/T 7480-1987)等理化指标. 此外,参照相关的测定标准(HJ 677-2013, HJ 680-2013, HJ 766-2015),测定样品中铁(Fe)、铬(Cr)、砷(As)、铜(Cu)、锌(Zn)和锂(Li)等重金属元素的含量<sup>[22]</sup>.

### 1.2 DNA 提取、PCR 扩增和 Illumina MiSeq 测序

对于所有环境样品,使用 FastDNA<sup>®</sup> SPIN 土壤试剂盒(MP Biomedicals, USA)分别提取环境 DNA,具体过程根据说明书进行操作. 采用细菌的通用引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCA-3')和 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')扩增 16S rRNA 基因的 V3-V4 区<sup>[23]</sup>. 扩增产物使用 AxyPrepDNA 凝胶提取试剂盒(Axygen Biosciences, USA)从 2% 的琼脂糖凝胶中纯化,并用 QuantiFluorTM-ST 蓝色荧光定量系统(Promega, USA)进行定量检测,纯化后的产物按等比例混合. 同时,本研究使用无菌水代替 DNA 开展了 3 个阴性对照实验,以监测 DNA 提取和 PCR 扩增过程中可能出现的任何污染,为后续 Illumina MiSeq 测序数据的真实性和准确性提供保证. 最终,质检合格的扩增产物采用 Illumina MiSeq PE250 平台进行测序,测序结束后,使用 Trimmomatic 和 VSEARCH 软件对原始 FASTQ 序列进行质控<sup>[24,25]</sup>,高质量的序列使用 VSEARCH 软件按照 97% 的相似度阈值进行 OTUs (operational taxonomic units)聚类,并对 OTU 序列参考 Silva 16S rRNA 数据库进行物种注释<sup>[26]</sup>.

### 1.3 统计学分析

利用 Mothur 软件计算各样品中微生物的  $\alpha$  多样性,包括 Chao1、Shannon-Wiener 和 Coverage 指

数. 采用非度量多维尺度分析 (NMDS), 基于 Bray-Curtis 距离, 对样本间的  $\beta$  多样性差异进行可视化分析, 进一步使用相似性分析 (ANOSIM) 来检验分组间微生物群落的差异, NMDS 和 ANOSIM 均使用 R 软件的 *vegan* 工具包完成. 同时, 使用 *circlize* 工具包对门水平上的微生物群落组成进行可视化. 使用线性判别分析效应 (linear discriminant analysis effect size, LEfSe) 分析识别微生物群落在 3 种生境的生物标记物 (biomarker), 以 LDA 判别阈值 (LDA 得分) 大于 4, 且  $P$  值小于 0.05 为标准进行筛选.

使用 Excel 2021 对环境变量进行整理, 为优化分析, 利用 PRIMER & PERMANOVA + 6.0 软件对每个环境变量进行标准化, 使其平均值为 0, 标准差为 1<sup>[27]</sup>. 利用 SPSS 26.0 软件通过 Kruskal-Wallis 检验分析环境变量在不同生境的差异, 显著性水平的参数选取 0.05. 探究微生物群落与环境变量的关系时, 为避免共线性的问题, 首先通过 VIF 方差膨胀因子分析将自相关性较高 ( $VIF > 10$ ) 的环境变量 (包括理化指标和重金属指标进行剔除), 随后利用

*vegan* 工具包进行典范对应分析 (canonical correspondence analysis, CCA) 进一步判断环境变量对微生物群落的影响. 采用 SPSS 26.0 软件计算微生物属与环境变量之间的 spearman 相关性, 并使用 R 软件的 *heatmap* 工具包绘制热图进行可视化.

## 2 结果与分析

### 2.1 微生物群落多样性

在唐河污水库的 5 个站点, 同步研究了地表水、沉积物和地下水中的微生物群落. 利用 Illumina 16S rRNA 高通量测序技术, 对 15 个微生物样本进行测序, 共产生了 2 109 119 条序列, 所有样本的覆盖率 (coverage) 为  $0.971 \pm 0.012$ , 表明在当前测序深度下可以很好地揭示细菌群落的绝大部分物种. 对所有高质量的序列进行聚类后, 此次调查共得到 5 108 个 OTUs. 如图 2(a) 所示, 地表水、沉积物和地下水分别含 2 645、3 020 和 4 213 个 OTUs, 3 组样本共有的 OTUs 有 1 577, 而地下水有 1 264 个特有的 OTUs, 远远超过地表水 (170) 和沉积物 (451) 中特有的 OTUs 数量.

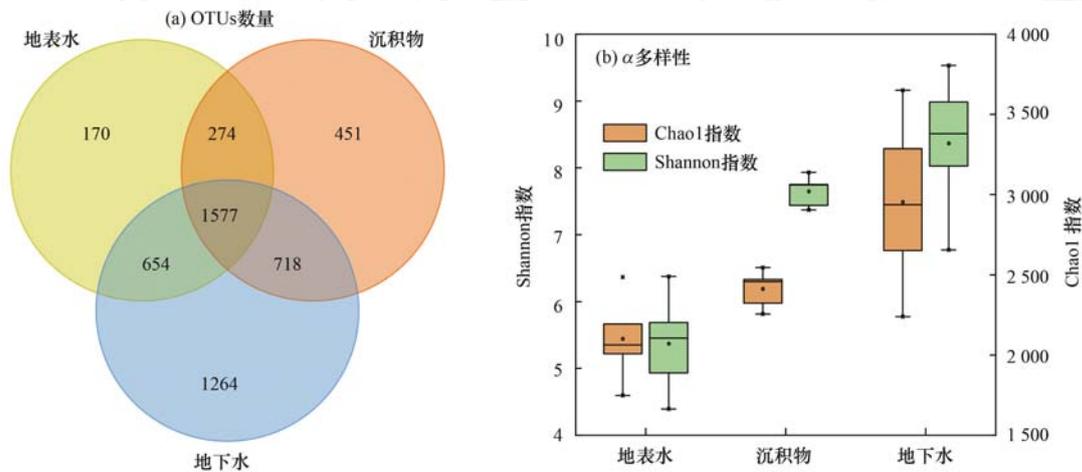


图 2 不同生境中微生物群落的 OTUs 数量和  $\alpha$  多样性

Fig. 2 OTUs number and  $\alpha$  diversity of microbial communities in different habitats

如图 2(b) 所示, 不同样本中微生物群落的  $\alpha$  多样性具有显著差异. 地下水样本的微生物丰富度和多样性 (Chao1:  $2 952.84 \pm 712.95$ , Shannon:  $8.37 \pm 1.59$ ) 远高于地表水中的微生物丰富度和多样性 (Chao1:  $2 099.87 \pm 386.21$ , Shannon:  $5.37 \pm 1.01$ ) 和沉积物中的微生物丰富度和多样性 (Chao1:  $2 410.78 \pm 155.61$ , Shannon:  $7.65 \pm 0.29$ ). 基于非度量多维尺度分析 (NMDS) 和相似性分析 (ANOSIM), 发现 3 种生境中微生物群落组成存在显著差异 ( $R = 0.96$ ,  $P = 0.001$ , 图 3).

### 2.2 微生物群落组成

对所有 OTUs 进行注释, 共鉴定出微生物 1 102 属, 隶属于 50 门、105 纲、173 目和 346 科. 如图 4

所示, 在门水平上, 不同生境中微生物群落的优势菌组成存在一定差异. 地表水微生物中优势门为变形菌 (Proteobacteria)、拟杆菌 (Bacteroidetes) 和放线菌 (Actinobacteria), 分别占总丰度的 38.88%、34.84% 和 10.71%; 沉积物样本微生物以绿弯菌 (Chloroflexi) 为主, 相对丰度占比高达 41.02%, 变形菌和厚壁菌 (Firmicutes) 也占据一定优势, 占比分别为 16.49% 和 9.04%; 地下水样本微生物群落中以变形菌 (44.89%)、放线菌 (15.54%) 和厚壁菌 (7.34%) 为优势菌门.

在属水平上, 3 个生境中的微生物群落差异也很明显. LEfSe 分析共鉴定出 21 个细菌生物标记物, 地表水、沉积物和地下水样本中分别识别出 8、

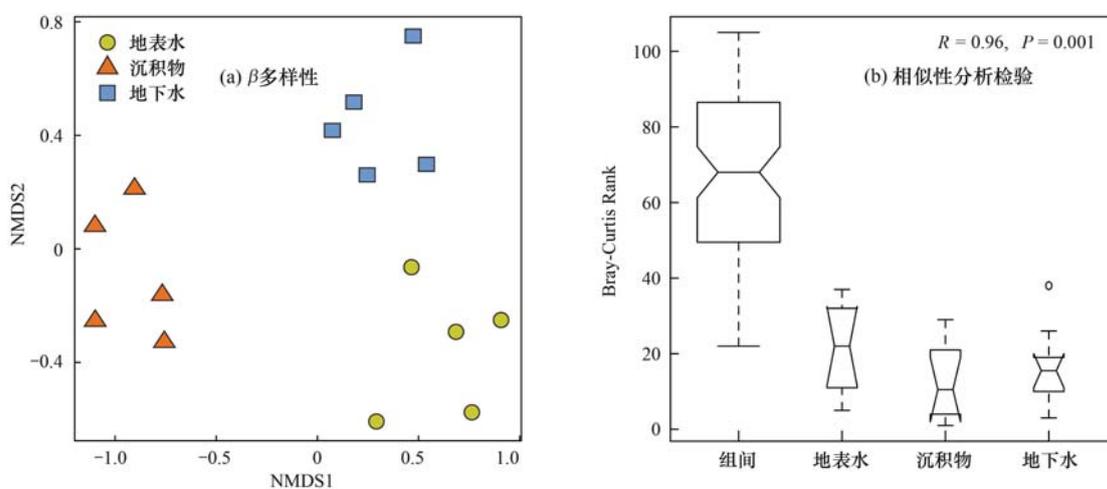


图3 不同生境中微生物群落 OTU 水平的  $\beta$  多样性和相似性分析检验

Fig. 3 The  $\beta$  diversity of microbial communities at the OTU level in different habitats and analysis of similarity statistics

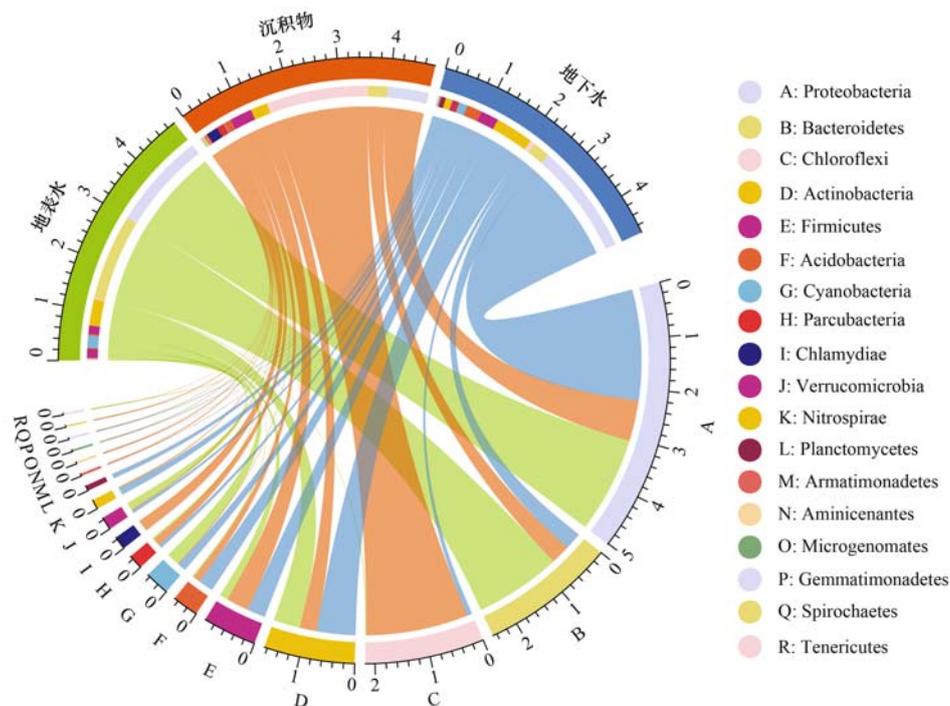


图4 不同生境中微生物门水平的物种组成

Fig. 4 Composition of microbial communities at the phylum level in different habitats

10 和 3 个生物标记物(图 5). 不同生境中的生物标记物有较明显的差异,地表水中的标志性物种为 *Pedobacter* (11.66%)、噬氢菌属 (*Hydrogenophaga*, 10.3%)、黄杆菌属 (*Flavobacterium*, 8.15%) 和噬冷菌 (*Algoriphagus*, 6.56%); 除 *Hydrogenophaga* 属于变形菌外, *Pedobacter*、*Flavobacterium* 和 *Algoriphagus* 均为拟杆菌. 沉积物中 *Ornatilinea*、长绳菌属 (*Longilinea*)、*Thermomarinilinea* 和 *Bellilinea* 分别占 10.61%、7.51%、7.42% 和 4.91%, 均隶属于绿弯菌. 而地下水的 3 种指示物种为节杆菌属 (*Arthrobacter*, 4.06%)、披毛菌属 (*Gallionella*, 3.79%) 和丝硫菌属 (*Thiothrix*, 2.49%);

*Arthrobacter* 隶属于放线菌, *Gallionella* 和 *Thiothrix* 均为变形菌.

### 2.3 环境因子对微生物群落的影响

不同生境中监测的理化指标和金属指标数值, 具体如表 1 和表 2 所示. 进一步使用 Kruskal-Wallis 进行检验分析, 结果显示, 所有的环境变量, 包括 pH、TP、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、Fe、Cr、As、Cu、Zn 和 Li, 在不同生境下均具有显著差异 ( $P < 0.05$ ).

如图 6 所示, 剔除共线性强的环境变量后, CCA 分析揭示了理化指标和重金属指标对不同生境中 OTU 水平微生物群落结构的影响. 环境变量对微生物群落的总解释量为 54.91%, 显著影响 3 种微生物

群落结构的环境变量依次为 pH ( $R^2 = 0.88$ ,  $P = 0.001$ )、Fe ( $R^2 = 0.83$ ,  $P = 0.001$ )、TP ( $R^2 = 0.77$ ,  $P = 0.001$ )、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  ( $R^2 = 0.58$ ,  $P = 0.002$ ) 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  ( $R^2 = 0.43$ ,  $P = 0.002$ )。

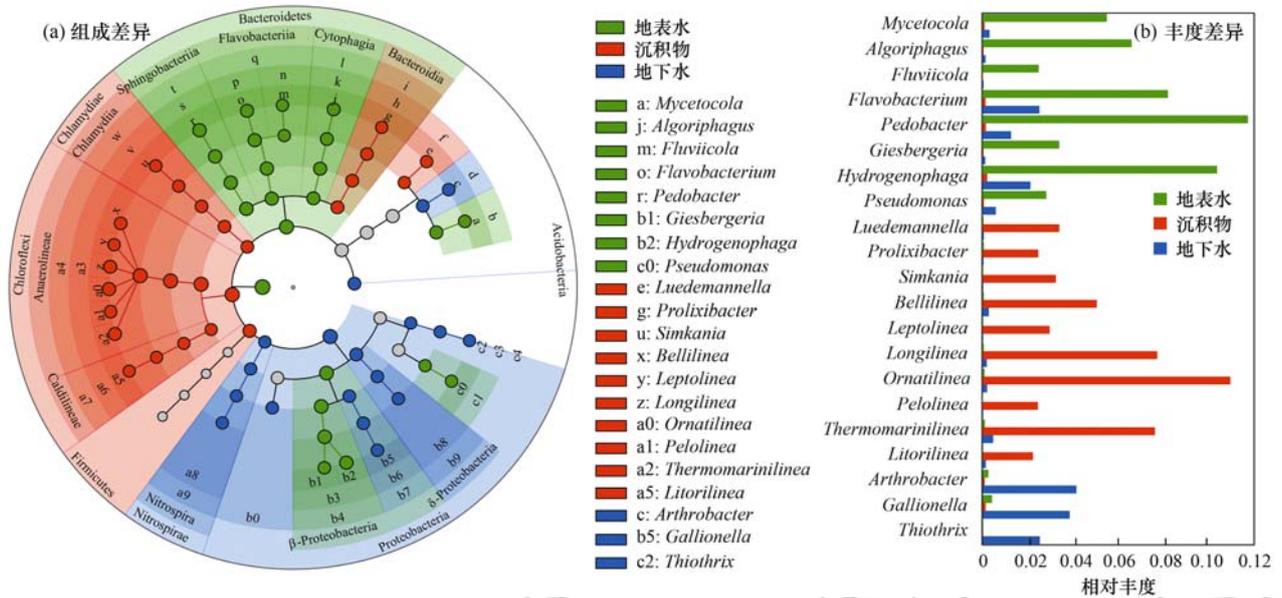


图 5 不同生境中微生物属水平的组成和丰度差异

Fig. 5 Differences in composition and abundance of microbial genera among different habitats

表 1 不同生境的理化指标<sup>1)</sup>

Table 1 Physicochemical parameters of different habitats

项目	生境			Kruskal-Wallis 检验
	地表水	地下水	沉积物	
pH	8.13 ± 0.65	7.47 ± 0.16	6.56 ± 0.42	$P = 0.003$
TP	0.63 ± 0.71	0.2 ± 0.31	1 072.8 ± 533.25	$P = 0.002$
TN	18.96 ± 22.15	1.14 ± 1.05	6 320 ± 2 756.27	$P = 0.007$
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	1.1 ± 1.13	0.01 ± 0	14.83 ± 14.49	$P = 0.002$
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	4.32 ± 2.97	1.16 ± 1.01	0.19 ± 0.34	$P = 0.005$

1) 除 pH 外, 地表水和地下水理化指标单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 沉积物理化指标单位为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

表 2 不同生境的重金属含量<sup>1)</sup>

Table 2 Metal contents in different habitats

项目	生境			Kruskal-Wallis 检验
	地表水	地下水	沉积物	
Fe	754 ± 1018.76	175.4 ± 208.05	17 435.6 ± 6 836.35	$P = 0.004$
Cr	8.62 ± 4.88	4.38 ± 5.26	100.88 ± 46.10	$P = 0.006$
As	312.6 ± 144.72	0.39 ± 0.25	121.08 ± 22.25	$P = 0.004$
Cu	12.56 ± 7.72	1.8 ± 2.18	7 409.4 ± 7 159.37	$P = 0.003$
Zn	70.88 ± 73.17	1.87 ± 1.92	9 502.2 ± 4 835.27	$P = 0.002$
Li	50.26 ± 12.24	25.86 ± 36.32	16.89 ± 6.75	$P = 0.045$

1) 地表水和地下水重金属浓度单位为  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 沉积物重金属含量单位为  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

此外, 基于 Spearman 分析的热图显示, 不同生境中的微生物标志物对理化因子和重金属含量的响应截然不同 (图 7). 地表水中绝大多数微生物标志属仅与 pH、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和 Li 呈现显著正相关关系; 沉积物中的微生物标志属丰度与 TP 和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  等理化因子及 Cr、Fe、Cu 和 Zn 等重金属含量存在显著正相关性; 地下水中除 pH 和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  外, 微生物标志属

与其他理化因子和重金属含量均呈现负相关关系. 具体地, 地表水中 *Flavobacterium* 和 *Algoriphagus* 等标志属对 Li 表现出一定的重金属耐受性, 可能偏好较高的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度下生存; 沉积物微生物组成多以重金属耐受菌为主, 如 *Pelolinea*、*Leptolinea* 和 *Ornatilinea* 能在被多种重金属污染的环境中生存, 具有很强的适应性; 而地下水优势属与多种重金属

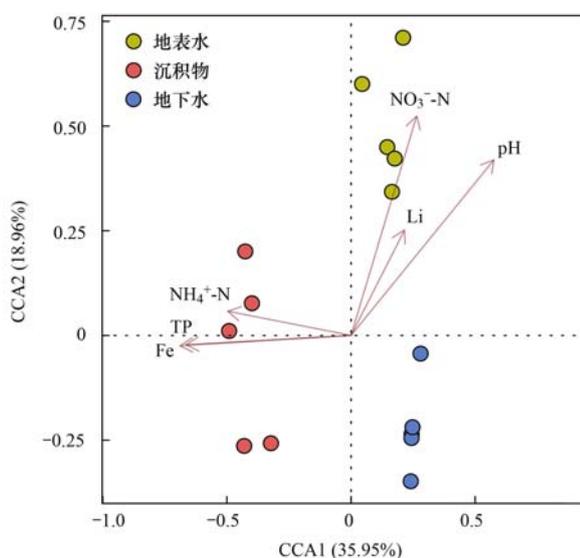


图 6 CCA 分析揭示环境因子对 OTU 水平微生物群落结构的影响

Fig. 6 CCA analysis revealing the effects of environmental factors on microbial communities at the OTU level

含量呈现负相关,可能多为重金属敏感菌。

### 3 讨论

#### 3.1 不同生境微生物群落多样性差异

多样性是微生物群落稳定性的重要指标之一,高多样性意味着生态系统的稳定性以及微生物群落功能的健全性<sup>[28]</sup>.有研究表明<sup>[29]</sup>,地下水环境相比于其他生态环境微生物种群数量规模小、活性水平低且环境条件稳定,但本研究中地下水微生物群落的丰富度和多样性显著高于沉积物和地表水环境.导致这一结果的原因可能是由于地下水环境与地表污染物质交换较少,与此不同的是,地表水和沉积物与外界交互作用强烈,易受外源污染物干扰如重金属污染等因素的影响,从而降低了沉积物微生物群落多样性<sup>[30,31]</sup>.过量重金属会对微生物降解和细胞代谢等功能产生严重影响,从而迫使微生物多样性下降<sup>[32]</sup>.其他研究也表明,微生物多样性与重金属含量呈负相关,低污染河流中的微生物群落具有更

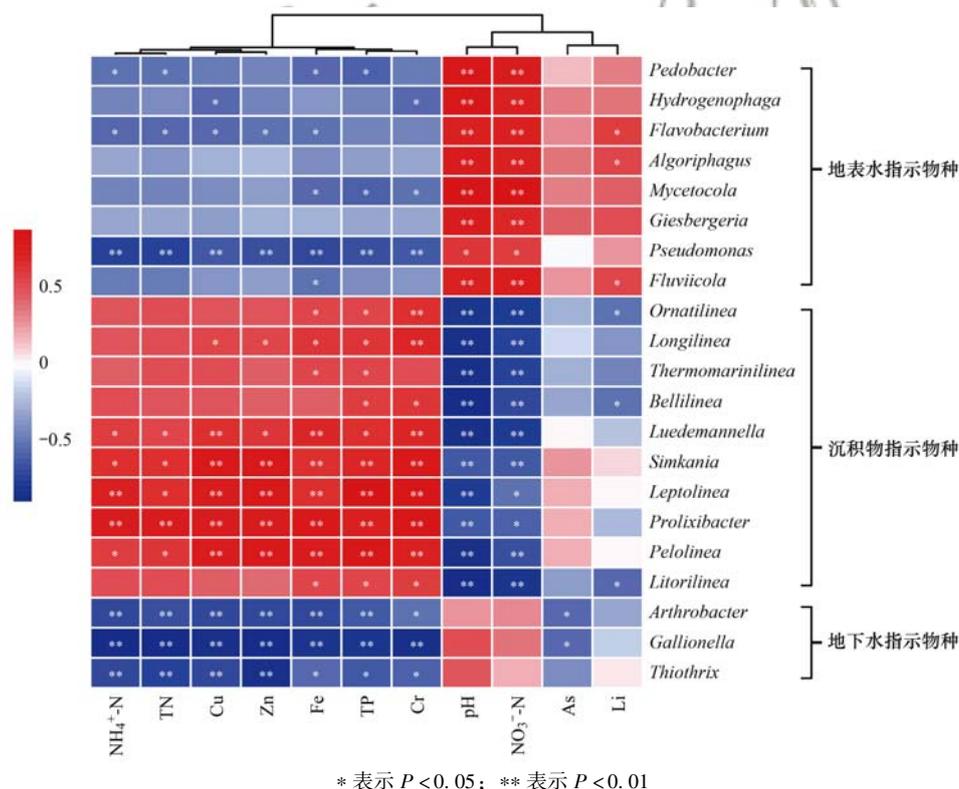


图 7 地表水、沉积物和地下水的微生物标记属与环境因子的相关性热图

Fig. 7 Heatmap displaying the correlations between microbial indicator genera and environmental factors in surface water, sediment, and groundwater

高的  $\alpha$  多样性<sup>[33]</sup>.此外,沉积物比地表水拥有更丰富的微生物群落,这可能由于沉积物中积累的丰富有机物可以为微生物提供充足的碳源并促进微生物在沉积环境中更好地生存<sup>[34,35]</sup>.

#### 3.2 不同生境微生物群落组成差异

由于地表水、沉积物和地下水三者的生态环境

差异,不同生境中的优势微生物和特有微生物也具有显著差异.在门水平,变形菌是地表水和地下水中最主要的微生物.这是因为变形菌属于水体环境中常见的优势菌群<sup>[30,36]</sup>.但本研究中地表水和地下水在次级优势菌门上存在差异,拟杆菌是地表水中的次级优势菌门,其相对丰度接近变形菌门,而地下水

中放线菌门和厚壁菌门占据一定优势. 有研究表明被 Zn、Cu 和 Cd 等重金属污染的河流水体中微生物群落组成会随水质恶化而转变, 污染严重的区域中拟杆菌门会呈现更高的相对丰度, 而变形菌门的生物降解和新陈代谢会被污染物抑制<sup>[37]</sup>. 地下水环境由于其氧气含量低、还原条件更显著, 因此厌氧的厚壁菌门和放线菌门相对丰度会普遍升高<sup>[38]</sup>. 有研究发现高 As 污染的沉积物和地下水中, 地下水始终呈现出较低多样性<sup>[31]</sup>, 而本研究中的地下水受到的人为污染较轻, 导致其表现出来较高的微生物多样性. 在属水平上, 地表水中的标志属如 *Pedobacter*、*Flavobacterium* 和 *Hydrogenophaga* 等对重金属污染的水体具有一定的适应性, 可能是潜在的重金属耐受菌<sup>[39]</sup>; 而地下水仅有硝酸盐还原功能菌 *Gallionella*<sup>[40]</sup>、硫氧化菌 *Thiothrix*<sup>[41]</sup> 和固氮菌 *Arthrobacter*<sup>[42]</sup> 这 3 种功能各不相同的微生物标志属, 表明地下水生态系统受重金属污染的影响较小.

而对于沉积物, 微生物群落以绿弯菌门为主, 丰度远高于第二优势菌——变形菌. 这可能与沉积物中重金属污染物的积累有关, 早期研究也发现沉积物中重金属污染物的增加可能导致绿弯菌门丰度的升高<sup>[43]</sup>. 此外, Subsidy-Stress 理论指出耐受性物种的丰度会随着敏感性物种的减少而增加<sup>[44,45]</sup>, 可以认为, 绿弯菌门对沉积物中的重金属有很强的抵抗力, 而变形菌门对重金属的抵抗力较差. 兼性厌氧的绿弯菌有光能自养、光能异养和化能自养等多样的营养方式, 能够较好地适应重金属污染的环境<sup>[46]</sup>. 同时, 绿弯菌可以高度适应极端环境, 在受污染的沉积物环境中, 绿弯菌能够在维持微生物群落结构稳定方面发挥重要作用<sup>[47]</sup>. 属水平上, 沉积物中存在着丰度更高的重金属耐受菌如 *Leptolinea* 和 *Longilinea* 等<sup>[48]</sup>, 这可能表明重金属污染导致沉积物微生物群落进化出适应机制以更好地生存.

### 3.3 环境因子对微生物群落结构的影响

生态系统的环境条件如 pH 值、营养物浓度和重金属含量, 会显著影响微生物群落的组成结构和物种多样性<sup>[49,50]</sup>. 生态系统中微生物会和重金属之间发生协同作用或拮抗作用, 因此不同物种可能以不同的方式来应对重金属污染, 表明了微生物群落对重金属污染的多样化响应策略<sup>[51,52]</sup>. 在本研究中, 3 种生境中的微生物群落对重金属污染表现出了不同的响应特征, 尽管理化因素和重金属变量共同驱动该区域的微生物生长, 但重金属污染主要影响了沉积物微生物群落结构, 其次为地表水和地下水.

地表水微生物与 pH 和  $\text{NO}_3^-$ -N 表现出显著的相

关性, 与 Li 等重金属呈现弱正相关. 环境 pH 值是影响微生物生长的主要控制因素<sup>[53]</sup>, 同时, pH 值能够介导重金属迁移率和生物利用度的理化性质, 溶液中的重金属离子随着 pH 的增加发生水解, 从而可以部分减轻重金属对微生物的毒性<sup>[53]</sup>. 地表水中的微生物标志属喜好碱性环境, 且多为硝化和反硝化功能菌, 如 *Flavobacterium* 在异养硝化和代谢难降解有机化合物中发挥作用<sup>[54]</sup>, *Arcobacter* 菌可将氨基酸和有机酸作为碳源, 可使硝酸盐还原为亚硝酸盐, *Hydrogenophaga* 菌能利用硝酸盐厌氧呼吸, 起反硝化作用, 但较少利用碳水化合物<sup>[55]</sup>. Li 是生物体必需的微量元素, 过量 Li 的毒性并不明显, 有实验表明 *Pseudomonas* 菌具有一定的 Li 吸附能力<sup>[56]</sup>, *Flavobacterium* 能够在富 Li 的极端环境中生存<sup>[57]</sup>. 地表水微生物与其他重金属的负相关, 可能暗示了重金属污染对这些微生物活性的负面影响<sup>[58]</sup>. 因此, 地表水生物多样性的降低, 可能反映了被多种重金属污染的地表水中微生物群落具有较低的完整性, 甚至造成了一定程度的生态功能损失.

在沉积物生境中, TP、 $\text{NH}_4^+$ -N、Cr、Fe、Cu 和 Zn 等是影响微生物群落结构的主要环境因子. 氮磷等营养物质浓度变化会影响部分微生物生长进而改变其群落结构<sup>[59,60]</sup>. Zhang 等<sup>[61]</sup>对博斯腾湖的沉积物微生物进行研究, 表明 TP 与微生物生长和繁殖相关, 是微生物多样性的重要贡献者. 本研究中, *Ornatilinea* 和 *Thermomarinilinea* 等微生物标志属是典型的有机物降解菌<sup>[55]</sup>, 因此其丰度与营养物质呈显著的正相关关系. 与地表水和地下水相比, 沉积物中的重金属耐受菌数量更高, 这可能是由于沉积物中重金属的长期积累过程. 有研究表明, 长期的重金属污染胁迫会改变微生物群落结构组成, 导致重金属耐受性细菌相对数量和种类增加, 并逐渐成为重金属污染环境中的优势种群<sup>[62,63]</sup>. 从图 7 中, 可明显看出, 沉积物中的多种重金属污染与重金属耐受微生物显著正相关, 不同的优势属均表现出一定的重金属耐受性. 例如, 沉积物中 *Leptolinea* 和 *Longilinea* 等指示菌属, 被报道可以适应重金属污染或有机污染, 并可能有助于重金属的去除<sup>[48]</sup>, 表明这些重金属含量的增加可能有利于这些耐受菌群的生长, 从而促进了沉积物中微生物群落对重金属污染的适应性.

地下水微生物群落与大部分的重金属含量及 TP、 $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 呈负相关, 仅与 pH 和  $\text{NO}_3^-$ -N 呈现弱正相关. 这可能是由于在厌氧环境中, 地下水微生物能利用  $\text{NO}_3^-$ -N 进行反硝化过程, 而  $\text{NH}_4^+$ -N 和生物可利用磷通常是微生物在好氧条件下的能量储

备<sup>[64]</sup>. 地下水标志微生物 *Gallionella* 能在低氧环境下生存,并具有硝酸盐还原功能<sup>[40]</sup>, *Thiothrix* 是嗜甲烷菌,也可以通过硫氧化能力生成硫化物来减弱重金属污染<sup>[41]</sup>,而 *Arthrobacter* 属于好氧细菌,但能够利用硝酸盐氨化来适应地下水的厌氧环境<sup>[65]</sup>. 因此,地下水微生物几乎不受重金属污染的影响,群落较为稳定. 此外,本研究中所测定的环境因子对地下水微生物的解释度较低,这可能是由于漫长的地质和进化时间促进了微生物对地下咸水条件的适应<sup>[66]</sup>,而本研究中未被量化的盐度可能是决定地下水微生物群落结构的关键因素.

本研究同步调查重金属污染对不同生境微生物群落的影响,深入揭示了唐河污水库中重金属污染的危害. 3 个栖息地中微生物群落结构以及对环境条件的响应差异,表明重金属污染对唐河污水库的沉积物其次是地表水微生物有较大影响. 因此,未来的重金属污染防控应重点加强沉积物重金属污染治理,防止其进一步污染人们赖以生存的地下水环境. 该结果对于评估和预测重金属污染等人为活动对微生物群落的影响具有重要意义,并将为唐河污水库生态修复和白洋淀生态环境管理和污染防治提供重要参考.

#### 4 结论

(1) 唐河污水库区域地下水微生物  $\alpha$  多样性显著高于地表水和沉积物样品,3 种生境中的微生物群落  $\beta$  多样性差异显著.

(2) 3 种生境微生物群落结构显著不同. 地表水微生物以变形菌和拟杆菌为主; 沉积物微生物以厌氧的绿弯菌为主,变形菌丰度较低,其中优势属均以重金属耐受菌组成; 地下水微生物优势菌为变形菌.

(3) 理化因素和重金属变量共同决定该区域的微生物群落结构,不同生境中微生物群落的响应存在明显差异. pH、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 Li 是影响地表水微生物群落结构的主要环境因素,TP、 $\text{NH}_4^+$ -N、Cr、Fe、Cu 和 Zn 显著影响沉积物微生物的群落结构,而重金属变量几乎不影响地下水微生物.

(4) 重金属污染对不同生境微生物群落结构的影响大小为: 沉积物 > 地表水 > 地下水. 未来应重点关注沉积物环境中的重金属污染,防止其进一步扩散影响地下水生态安全.

#### 参考文献:

[ 1 ] Wang F, Dong W Y, Zhao Z L, *et al.* Heavy metal pollution in urban river sediment of different urban functional areas and its influence on microbial community structure[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146383.

[ 2 ] Lin W, Wang Y Z, Gorby Y, *et al.* Integrating niche-based process and spatial process in biogeography of magnetotactic bacteria [J]. *Scientific Reports*, 2013, **3**, doi: 10.1038/srep01643.

[ 3 ] Martiny J B H, Eisen J A, Penn K, *et al.* Drivers of bacterial  $\beta$ -diversity depend on spatial scale[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, **108** (19): 7850-7854.

[ 4 ] Pal A, Bhattacharjee S, Saha J, *et al.* Bacterial survival strategies and responses under heavy metal stress: a comprehensive overview [J]. *Critical Reviews in Microbiology*, 2022, **48**(3): 327-355.

[ 5 ] 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.

[ 6 ] 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.

[ 7 ] 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.

[ 8 ] Ouyang E M, Liu Y, Ouyang J T, *et al.* Effects of different wastewater characteristics and treatment techniques on the bacterial community structure in three pharmaceutical wastewater treatment systems [J]. *Environmental Technology*, 2019, **40** (3): 329-341.

[ 9 ] Verburg I, Van Veelen H P J, Waar K, *et al.* Effects of clinical wastewater on the bacterial community structure from sewage to the environment [J]. *Microorganisms*, 2021, **9**, doi: 10.3390/microorganisms9040718.

[ 10 ] 王丽华, 吕铮, 郝春博, 等. 某石油污染场地地下水中降解菌群落结构研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(7): 1-8.  
Wang L H, Lv Z, Hao C B, *et al.* Degrading bacteria community structure in groundwater of a petroleum-contaminated site [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(7): 1-8.

[ 11 ] Meier A, Singh M K, Kastner A, *et al.* Microbial communities in carbonate rocks—from soil via groundwater to rocks [J]. *Journal of Basic Microbiology*, 2017, **57**(9): 752-761.

[ 12 ] Wang J T, Yuan S, Tang L, *et al.* Contribution of heavy metal in driving microbial distribution in a eutrophic river [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **712**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136295.

[ 13 ] 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.

[ 14 ] 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.

[ 15 ] Rajeev M, Sushmitha T J, Aravindraj C, *et al.* Exploring the impacts of heavy metals on spatial variations of sediment-associated bacterial communities [J]. *Ecotoxicology and*

- Environmental Safety, 2021, **209**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111808.
- [16] Li W P, Zhang S K, Zhang L Y, *et al.* In-situ remediation of sediment by calcium nitrate combined with composite microorganisms under low-DO regulation[J]. Science of the Total Environment, 2019, **697**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134109.
- [17] Gao F, Guo W, Wang J X, *et al.* Historical record of trace elements input and risk in the shallow freshwater lake, North China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2015, **155**: 26-32.
- [18] Wang J K, Zeng X L, Xu D Y, *et al.* Chemical fractions, diffusion flux and risk assessment of potentially toxic elements in sediments of Baiyangdian Lake, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **724**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138046.
- [19] Li C H, Zheng X K, Zhao F, *et al.* Effects of urban non-point source pollution from Baoding City on Baiyangdian Lake, China [J]. Water, 2017, **9**(4), doi: 10.3390/w9040249.
- [20] Li J R, Chen Q, Wang T, *et al.* Hydrochemistry and nutrients determined the distribution of greenhouse gases in saline groundwater[J]. Environmental Pollution, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117383.
- [21] Wang J W, Chen Y, Cai P G, *et al.* Impacts of municipal wastewater treatment plant discharge on microbial community structure and function of the receiving river in Northwest Tibetan Plateau[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, **423**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127170.
- [22] Wang J W, Liu T, Sun W L, *et al.* Bioavailable metal(loid)s and physicochemical features co-mediating microbial communities at combined metal(loid) pollution sites [J]. Chemosphere, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127619.
- [23] Xu N, Tan G C, Wang H Y, *et al.* Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure [J]. European Journal of Soil Biology, 2016, **74**: 1-8.
- [24] Bolger A M, Lohse M, Usadel B. Trimmomatic: a flexible trimmer for Illumina sequence data [J]. Bioinformatics, 2014, **30**(15): 2114-2120.
- [25] Edgar R C. Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST[J]. Bioinformatics, 2010, **26**(19): 2460-2461.
- [26] Quast C, Pruesse E, Yilmaz P, *et al.* The SILVA ribosomal RNA gene database project: improved data processing and web-based tools [J]. Nucleic Acids Research, 2012, **41** (D1): D590-D596.
- [27] Jiang X M, Pan B Z, Song Z Y, *et al.* Do functional traits of chironomid assemblages respond more readily to eutrophication than taxonomic composition in Chinese floodplain lakes? [J]. Ecological Indicators, 2019, **103**: 355-362.
- [28] Mori A S, Furukawa T, Sasaki T. Response diversity determines the resilience of ecosystems to environmental change [J]. Biological Reviews, 2013, **88**(2): 349-364.
- [29] Guo L, Wang G C, Sheng Y Z, *et al.* Groundwater microbial communities and their connection to hydrochemical environment in Golmud, Northwest China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **695**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.133848.
- [30] 薛银刚, 刘菲, 周璐璐, 等. 基于高通量测序的工业园区地下水与土壤细菌群落结构比较研究[J]. 生态毒理学报, 2017, **12**(6): 107-115.
- Xue Y G, Liu F, Zhou L L, *et al.* Comparison study of bacterial community structure between groundwater and soil in industrial park based on high throughput sequencing[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(6): 107-115.
- [31] Li P, Wang Y H, Dai X Y, *et al.* Microbial community in high arsenic shallow groundwater aquifers in Hetao Basin of Inner Mongolia, China[J]. PLoS One, 2015, **10**(5), doi: 10.1371/journal.pone.0125844.
- [32] 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.
- [33] Zhang M Z, Wu Z J, Sun Q Y, *et al.* The spatial and seasonal variations of bacterial community structure and influencing factors in river sediments [J]. Journal of Environmental Management, 2019, **248**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109293.
- [34] 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.
- [35] Xia M, Xiong F, Li X M, *et al.* Different assembly patterns of planktonic and sedimentary bacterial community in a few connected eutrophic lakes[J]. Water, 2022, **14**(5), doi: 10.3390/w14050723.
- [36] Wang P, Zhao J, Xiao H Y, *et al.* Bacterial community composition shaped by water chemistry and geographic distance in an anthropogenically disturbed river [J]. Science of the Total Environment, 2019, **655**: 61-69.
- [37] Zou H Y, He L Y, Gao F Z, *et al.* Antibiotic resistance genes in surface water and groundwater from mining affected environments [J]. Science of the Total Environment, 2021, **772**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145516.
- [38] Mayer F, Müller V. Adaptations of anaerobic archaea to life under extreme energy limitation [J]. FEMS Microbiology Reviews, 2014, **38**(3): 449-472.
- [39] 刘幸春, 王洪杰, 王亚利, 等. 府河水体及沉积物细菌群落结构分布特征及其影响因素[J]. 生态毒理学报, 2021, **16**(5): 120-135.
- Liu X C, Wang H J, Wang Y L, *et al.* Distribution characteristics and influencing factors of bacteria community structure in water and sediments of Fuhe river[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2021, **16**(5): 120-135.
- [40] Li J M, Zeng W, Liu H, *et al.* Performances and mechanisms of simultaneous nitrate and phosphate removal in sponge iron biofilter[J]. Bioresource Technology, 2021, **337**, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125390.
- [41] Miyazato N, Yamamoto-Ikemoto R, Takamatsu S. Microbial community change of sulfate reduction and sulfur oxidation bacteria in the activated sludge cultivated with acetate and peptone[J]. Water Science and Technology, 2006, **54**(8): 111-119.
- [42] Chen J, Li J M, Tang Y J, *et al.* Chinese black truffle-associated bacterial communities of *Tuber indicum* from different geographical regions with nitrogen fixing bioactivity[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, **10**, doi: 10.3389/fmicb.2019.02515.
- [43] Yin H Q, Niu J J, Ren Y H, *et al.* An integrated insight into the response of sedimentary microbial communities to heavy metal contamination[J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi: 10.1038/srep14266.
- [44] Odum E P, Finn J T, Franz E H. Perturbation theory and the subsidy-stress gradient [J]. Bioscience, 1979, **29**(6): 349-

- 352.
- [45] Aristi I, Von Schiller D, Arroita M, *et al.* Mixed effects of effluents from a wastewater treatment plant on river ecosystem metabolism; subsidy or stress? [J]. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(7): 1398-1410.
- [46] 鲜文东, 张潇橦, 李文均. 绿弯菌的研究现状及展望[J]. *微生物学报*, 2020, **60**(9): 1801-1820.  
Xian W D, Zhang X T, Li W J. Research status and prospect on bacterial phylum Chloroflexi [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, **60**(9): 1801-1820.
- [47] Spain A M, Krumholz L R, Elshahed M S. Abundance, composition, diversity and novelty of soil *Proteobacteria*[J]. *The ISME Journal*, 2009, **3**(8): 992-1000.
- [48] Fernández-Cadena J C, Ruíz-Fernández P S, Fernández-Ronquillo T E, *et al.* Detection of sentinel bacteria in mangrove sediments contaminated with heavy metals[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, **150**, doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110701
- [49] Cui H, Liu L L, Dai J R, *et al.* Bacterial community shaped by heavy metals and contributing to health risks in cornfields[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **166**: 259-269.
- [50] Chen X P, Chen H Y, Sun J, *et al.* Shifts in the structure and function of the microbial community in response to metal pollution of fresh water sediments in Finland [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, **18**(11): 3324-3333.
- [51] Jose J, Giridhar R, Anas A, *et al.* Heavy metal pollution exerts reduction/adaptation in the diversity and enzyme expression profile of heterotrophic bacteria in Cochin estuary, India[J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2775-2780.
- [52] Wei Y Q, Zhao Y, Zhao X Y, *et al.* Roles of different humin and heavy-metal resistant bacteria from composting on heavy metal removal [J]. *Bioresource Technology*, 2020, **296**, doi: 10.1016/j.biortech.2019.122375.
- [53] Ghosh A, Dastidar M G, Sreekrishnan T R. Recent advances in bioremediation of heavy metals and metal complex dyes: review [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, **142**(9), doi: 10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000965.
- [54] Zhao B, He Y L, Hughes J, *et al.* Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(14): 5194-5200.
- [55] García-Ruiz M J, Maza-Márquez P, González-López J, *et al.* Nitrogen removal capacity and bacterial community dynamics of a Canon biofilter system at different organic matter concentrations [J]. *Chemosphere*, 2018, **193**: 591-601.
- [56] Tsuruta T. Removal and recovery of lithium using various microorganisms[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, **100**(5): 562-566.
- [57] Bruna N, Galliani E, Oyarzún P, *et al.* Biomineralization of lithium nanoparticles by Li-resistant *Pseudomonas rodheisiae* isolated from the Atacama salt flat [J]. *Biological Research*, 2022, **55**(1), doi: 10.1186/S40659-022-00382-6.
- [58] Dell'Anno A, Mei M L, Ianni C, *et al.* Impact of bioavailable heavy metals on bacterial activities in coastal marine sediments [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2003, **19**(1): 93-100.
- [59] Simsek H, Kasi M, Ohm J B, *et al.* Impact of solids retention time on dissolved organic nitrogen and its biodegradability in treated wastewater[J]. *Water Research*, 2016, **92**: 44-51.
- [60] Azari M, Walter U, Rekers V, *et al.* More than a decade of experience of landfill leachate treatment with a full-scale anammox plant combining activated sludge and activated carbon biofilm[J]. *Chemosphere*, 2017, **174**: 117-126.
- [61] Zhang L, Shen T T, Cheng Y, *et al.* Temporal and spatial variations in the bacterial community composition in Lake Bosten, a large, brackish lake in China[J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-019-57238-5.
- [62] Martiny J B H, Bohannan B J M, Brown J H, *et al.* Microbial biogeography: putting microorganisms on the map [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, **4**(2): 102-112.
- [63] Hancock P J, Boulton A J, Humphreys W F. Aquifers and hyporheic zones: towards an ecological understanding of groundwater[J]. *Hydrogeology Journal*, 2005, **13**(1): 98-111.
- [64] Korbel K L, Greenfield P, Hose G C. Agricultural practices linked to shifts in groundwater microbial structure and denitrifying bacteria[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **807**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150870.
- [65] Eschbach M, Möbitz H, Rompf A, *et al.* Members of the genus *Arthrobacter* grow anaerobically using nitrate ammonification and fermentative processes: anaerobic adaptation of aerobic bacteria abundant in soil [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, **223**(2): 227-230.
- [66] Zhang X Y, Qi L L, Li W M, *et al.* Bacterial community variations with salinity in the saltwater-intruded estuarine aquifer [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **755**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142423.

## CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China .....	HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, <i>et al.</i>	(1801)
Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter .....	WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, <i>et al.</i>	(1811)
Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain .....	ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Evolution Characteristics of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020 .....	NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, <i>et al.</i>	(1830)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of PM <sub>2.5</sub> and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021 .....	SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, <i>et al.</i>	(1841)
Spatio-temporal Variation in PM <sub>2.5</sub> Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, <i>et al.</i>	(1852)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing .....	ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1865)
Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing .....	LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling	(1873)
Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter PM <sub>2.5</sub> Over Xi'an .....	LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, <i>et al.</i>	(1882)
Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels .....	WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, <i>et al.</i>	(1890)
Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in the Core Area of Ili River Valley in Spring .....	GU Chao, XU Tao, MA Chao, <i>et al.</i>	(1899)
Evaluation of Changes in PM <sub>2.5</sub> Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids .....	LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i>	(1911)
Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration .....	LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, <i>et al.</i>	(1924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City .....	SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ling, <i>et al.</i>	(1933)
Changes in O <sub>3</sub> -VOCs-NO <sub>x</sub> Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021 .....	LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, <i>et al.</i>	(1943)
Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer .....	ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, <i>et al.</i>	(1954)
Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao .....	JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, <i>et al.</i>	(1962)
Characteristics of O <sub>3</sub> Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical .....	YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, <i>et al.</i>	(1974)
Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect .....	LI Shao-lin, WANG Qi-qi	(1985)
Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing .....	YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, <i>et al.</i>	(1998)
Simulation of Anthropogenic CO <sub>2</sub> Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories .....	MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, <i>et al.</i>	(2009)
Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source .....	ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, <i>et al.</i>	(2022)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River .....	LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, <i>et al.</i>	(2032)
Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China .....	WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, <i>et al.</i>	(2040)
Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes .....	XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, <i>et al.</i>	(2052)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin .....	LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, <i>et al.</i>	(2062)
Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin .....	ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, <i>et al.</i>	(2072)
Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area .....	Ji Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, <i>et al.</i>	(2083)
Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan .....	ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, <i>et al.</i>	(2093)
Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats .....	HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen	(2103)
Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water .....	WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, <i>et al.</i>	(2113)
Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in <i>Sinularia microclavata</i> .....	LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, <i>et al.</i>	(2122)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai .....	YAN Qi	(2136)
Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar .....	LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(2147)
Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics .....	LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, <i>et al.</i>	(2158)
Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation .....	XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu	(2168)
Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data .....	ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, <i>et al.</i>	(2177)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model .....	MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, <i>et al.</i>	(2192)
Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter .....	HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, <i>et al.</i>	(2204)
Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network .....	MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, <i>et al.</i>	(2215)
Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City .....	ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, <i>et al.</i>	(2223)
Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background .....	DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, <i>et al.</i>	(2234)
Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize .....	DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, <i>et al.</i>	(2243)
Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City .....	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi	(2252)
Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis .....	LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, <i>et al.</i>	(2265)
Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau .....	LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(2275)
Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains .....	JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, <i>et al.</i>	(2283)
Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River .....	YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i>	(2293)
Diversity and Predictive Functional of <i>Caragana jubata</i> Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes .....	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(2304)
Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest .....	WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, <i>et al.</i>	(2315)
Effects of Phosphogypsum and <i>Suaeda salsa</i> on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil .....	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(2325)
Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil .....	GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, <i>et al.</i>	(2338)
Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields .....	HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, <i>et al.</i>	(2348)
Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress .....	CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, <i>et al.</i>	(2356)
Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035 .....	FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, <i>et al.</i>	(2365)
Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil .....	BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, <i>et al.</i>	(2375)
Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils .....	HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, <i>et al.</i>	(2384)
Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China .....	LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, <i>et al.</i>	(2395)