

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)

基于不同电力需求的中国减污降碳协同增效路径 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)

城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)

基于可解释性机器学习的城市 O₃ 驱动因素挖掘 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)

基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)

基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O₃ 来源解析 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)

基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)

2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析 李婉苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)

夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)

气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)

2000~2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)

基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM_{2.5} 小时浓度估算 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)

2013~2021 年邢台 PM_{2.5} 重污染过程输送和增长特性 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)

基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源 朱书慧 (3760)

机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢锋, 曹芳, 章炎麟 (3771)

沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)

疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)

西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)

淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)

雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)

流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)

南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)

闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)

金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)

嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郑伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)

水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)

太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)

基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算 张育福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)

千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)

沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)

外秦淮河底泥污染及疏浚效果 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)

新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)

镉在针铁矿界面共吸附的相互作用机制 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)

环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H₂O₂ 氧化水中有机微污染物 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)

Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制 朱敬林, 汪舒 (3990)

微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)

中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价 王静, 魏恒, 潘波 (4006)

渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)

基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)

乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)

荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)

近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)

改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)

沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)

两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果 梁成冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)

秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)

秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)

基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)

地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)

浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)

生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)

低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡廷江 (4170)

沼液施用对麦茬茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)

大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)

马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)

《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)

典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探

吴建强¹, 张书源², 王敏¹, 陈敏², 叶文娟¹, 熊丽君¹, 黄沈发^{1*}

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 上海市岩土工程检测中心有限公司, 上海 200436)

摘要: 为探究上海市典型工业区地下水细菌群落组成结构和多样性, 采用 Illumina MiSeq 高通量测序技术, 结合地下水三氮、重金属和有机物等指标分析, 探讨典型行业地下水细菌群落与环境因子的关联性及其响应机制。结果表明, 石化工业地下水的氨氮(NH_4^+-N)显著高于纺织业、金属制品业和其他行业($P < 0.05$), 分别高出 64.49%、32.46% 和 113.91%; 有机物主要检出指标为总石油烃(TPH)和挥发酚, 石化工业的地下水挥发酚浓度显著高于纺织业、金属制品业和其他行业($P < 0.05$); 金属制品业砷(As)浓度显著高于石化工业和其他行业($P < 0.05$), 分别高出 49.26% 和 50.59%; 氯化物(Cl^-)、锰(Mn)和硫酸盐(SO_4^{2-})等在不同行业中都存在显著性差异($P < 0.05$)。纺织业地下水细菌群落 Shannon 指数最高, 达到 3.14, 金属制品业地下水 Shannon 指数和 Ace 指数最低, 分别为 2.42 和 960.46。工业区地下水细菌中优势菌门为变形菌门(Proteobacteria), 占比为 80.05%~86.18%。As、汞(Hg)和 TPH 等为工业区地下水中主要影响因子, 与地下水环境因子相关的多为硝化菌、反硝化菌和有机物降解菌等。研究结果可为石油化工类和金属制品类工业地下水污染风险管控和微生物修复治理提供理论支持。

关键词: 工业区; 浅层地下水; 细菌群落; 环境因子; 高通量测序

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3892-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202206201

Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas

WU Jian-qiang¹, ZHANG Shu-yuan², WANG Min¹, CHEN Min², YE Wen-juan¹, XIONG Li-jun¹, HUANG Shen-fa^{1*}

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Geotechnical Engineering Detecting Centre Co., Ltd., Shanghai 200436, China)

Abstract: In order to investigate the composition and diversity of groundwater bacterial communities in typical industrial areas in Shanghai, the Illumina MiSeq high-throughput sequencing technology was adopted to explore the correlation and response mechanism of groundwater bacterial communities and environmental factors in typical industries, combined with the analysis of groundwater tri-nitrogen, heavy metals, organic matter, and other indicators. The results showed that the ammonia nitrogen in the groundwater of the petrochemical industry was 64.49%, 32.46%, and 113.91% higher than that of the textile industry, metal products industry, and other industries ($P < 0.05$), respectively. The main detectable indicators of organic matter were total petroleum hydrocarbons (TPH) and volatile phenol. The mass concentration of volatile phenol in groundwater of the petrochemical industry was significantly higher than that of the textile industry, metal products industry, and other industries ($P < 0.05$). The mass concentration of arsenic in the metal products industry was 49.26% and 50.59% higher than that in the petrochemical industry and other industries ($P < 0.05$), respectively. Chloride, manganese, sulfate, etc., were significantly different in different industries ($P < 0.05$). The Shannon index of groundwater in the textile industry was the highest at 3.14, whereas the Shannon index and Ace index of the groundwater in the metal products industry were as low as 2.42 and 960.46, respectively. The dominant bacterial phylum in groundwater in the industrial area was Proteobacteria, accounting for 80.05%-86.18%. Arsenic, mercury, TPH, etc. were the main influencing factors in groundwater in industrial areas, whereas the nitrifying bacteria, denitrifying bacteria, and organic matter-degrading bacteria were mostly related to groundwater environmental factors. The results of this study can provide theoretical support for groundwater pollution risk management and microbial remediation in petrochemical and metal product industrial areas.

Key words: industrial area; shallow groundwater; bacterial community; environmental factors; high-throughput sequencing

地下水是我国自然资源的重要组成部分,是保障经济社会可持续发展的重要战略资源^[1]。随着我国社会、经济和工农业的快速发展,大量污水排放会渗入地下水中,极易造成地下水污染,局部地区地下水污染形势严峻,尤其是工业企业区域及周边,三氮^[2]、重金属^[3]和有机物^[4]等指标检出率高,甚至出现超标现象^[5,6]。

理化性质的改变不仅影响了地下水环境质量,也会造成地下水微生物群落的演变。微生物是地下水污染演变的主要参与者,一方面它可以指示地下水环境变化,另一方面也可以对污染作出响应^[7]。

微生物受到地下水环境因素变化影响后,其群落结构和功能也会随之改变^[8],主要是利用自身调节作用来适应环境的变化。以有机污染物为主的地下水,细菌会将有机物作为能量和营养物质,通过生长代谢等一系列反应,直接或间接将污染物转化为碳、水等物质,从而改变其群落结构并达到降解污染的功能^[9,10]。Amano 等^[11]研究显示,大部分微生物能

收稿日期: 2022-06-18; 修订日期: 2022-09-14

基金项目: 上海市科委科技攻关项目(20dz1204800); 国家自然科学基金项目(51979168)

作者简介: 吴建强(1977~),男,高级工程师,主要研究方向为土壤及地下水调查评价与风险评估, E-mail: wujq@saes.sh.cn

* 通信作者, E-mail: shuang67@163.com

够净化地下水中的有机污染物. 也有学者研究发现随着地下水有机污染物的增加, 地下水中的碳源种类也随之增加, 从而提升地下水中微生物多样性^[12~14]. 然而, 以金属和无机污染物为主的地下水, 细菌群落结构和功能会呈现不同的情况. 许霞等^[15]研究表明, 工业园区地下水无机组分高的点位微生物多样性和丰富度较低. 薛银刚等^[16]研究常州某工业区地下水的微生物群落发现, 工业企业较少的点位的微生物群落丰富度和均匀度明显高于有污染源点位的, 原因是地下水受到了重金属污染. 总体而言, 目前我国地下水环境质量主要关注常规化学指标和毒理学指标, 微生物指标仅涉及菌落总数和总大肠菌群; 对于工业企业地下水的研究也主要集中于污染评价和修复治理等方面, 地下水细菌群落多样性及其与环境因子相关性等方面的研究鲜见报道. 另外, 以往地下水细菌群落多样性的研究主要是基于传统微生物测定方法^[17~19], 存在操作繁琐和分辨率低等缺点, 而高通量测序技术 (high-throughput sequencing) 则克服了这些缺陷^[20], 可以从不同层面对地下水微生物进行全面的解释^[21].

本文选取上海市 2 个典型工业集聚区, 采集浅层地下水样品, 利用 Illumina MiSeq 高通量测序技术研究地下水细菌群落的多样性和组成结构, 并结合地下水三氮、重金属和有机物等指标分析, 探讨主导行业地下水细菌群落多样性特征及其与环境因子的关联性和响应机制, 以为工业区地下水污染评

价、风险管控和微生物修复治理工作提供理论支持.

1 材料与方法

1.1 典型工业区及采样点确定

本研究选择上海市 2 个典型工业区, 其中工业区一 (XH) 面积 8.78 km², 工业区二 (SJ) 面积 43.69 km², 主要涉及石油加工-炼焦及核燃料加工、化学原料及化学制品制造、有色金属冶炼及压延加工、纺织、皮革毛皮、羽毛 (绒) 及其制品等行业类型, 按照主导行业分为石油化工业、金属制品业、纺织业和其他这 4 个类型 (图 1). 区域浅层地下水水位埋深在 1.0 m 左右, 丰枯季节随降水量和径流影响水位变化在 0.5 ~ 1.0 m; 地层渗透性和富水性均较差, 渗透系数普遍小于 0.5 m·d⁻¹, 单井涌水量普遍小于 1.0 m³·d⁻¹.

工业区地下水监测布点以布设在污染风险较大的企业周边为主, 选择原则主要为 3 点: ①企业原材料、中间产物和产品等以化工、金属制品和纺织等主导行业为主; ②企业存在危废储存仓库和污水处理站优先选择; ③企业历史上发生过地下水污染事故和周边居民投诉等情况优先选择. 依此, 2020 年在 2 个工业区各筛选 8 个点位新建浅层地下水监测井, XH 工业区监测井编号为 XH-1 ~ XH-8, SJ 工业区监测井编号为 SJ-1 ~ SJ-8. 其中, 纺织业: XH-1、XH-8、SJ-6 和 SJ-7 共 4 个点位; 金属制品业:

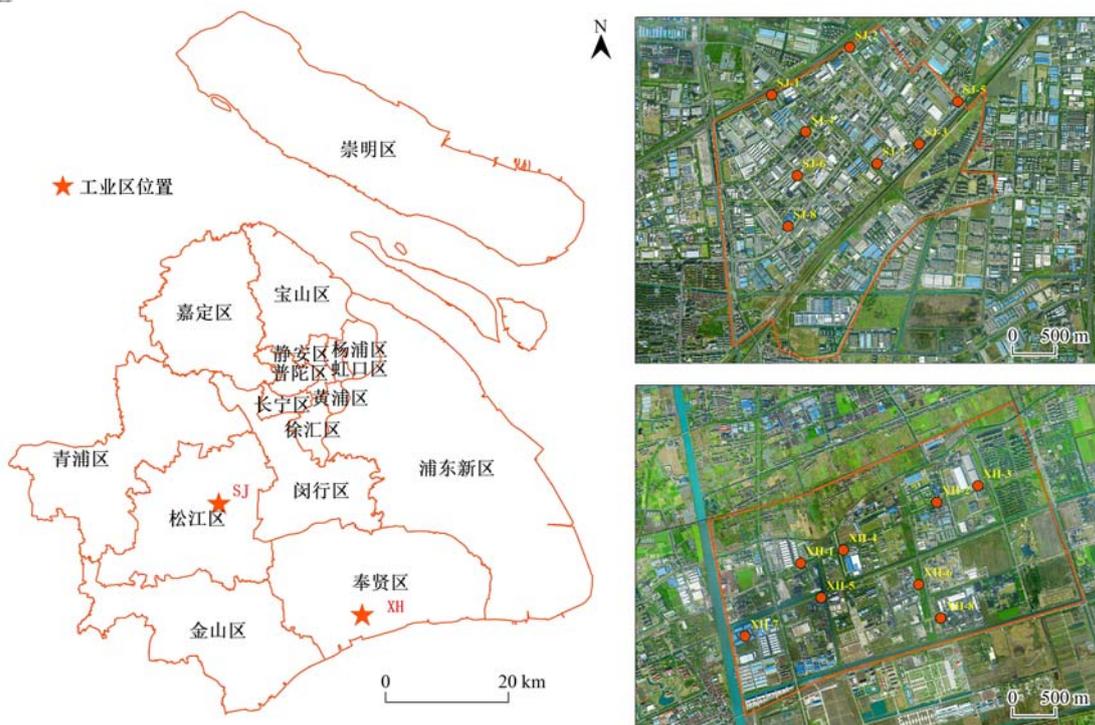


图 1 研究区域布点位置示意

Fig. 1 Location distribution of sampling sites

XH-2、XH-4、SJ-5 和 SJ-8 共 4 个点位; 石油化工业: XH-3、XH-6、XH-7、SJ-3 和 SJ-4 共 5 个点位; 其他行业: XH-5、SJ-1 和 SJ-2 共 3 个点位。

1.2 样品采集与前处理

1.2.1 样品采集

地下水监测井于 2020 年 7 月建成, 成井深度为 6 m, 并于同年 8 月(丰水期)、10 月(平水期)和 12 月(枯水期)分 3 次采集地下水样品, 用于检测理化性质和细菌群落。采样前按规范进行监测井洗井, 后用贝勒管采集地下水, 每个点位采集水样 10 L 于 4℃ 低温保存并及时送至实验室进行检测分析。

1.2.2 地下水细菌群落检测样品前处理

地下水微生物检测前先用 800 目滤网进行初筛, 再用 0.2 μm 聚碳酸酯膜置于抽滤机上抽滤。考虑到地下水菌群含量较低, 每个地下水样品抽滤用量 3~4 L, 以滤膜上可见明显覆盖物为止。抽滤完成后及时将滤膜置于无菌离心管中并 -80℃ 保存, 及时送实验室检测分析。

1.3 检测分析方法

理化指标: 综合区域水文地质条件和筛选点位的主导行业类型, 选择三氮、重金属和有机物等 19 项指标进行检测分析, 检测方法参照《地下水质量标准》(GB 14848-2017)^[22]。

高通量测序: 首先进行脱氧核糖核酸(DNA)提取和聚合酶链式反应(PCR)扩增, 采用 E. Z. N. A.® Soil DNA Kit (Omega Bio-Tek) 试剂盒提取地下水滤膜样品中的微生物 DNA, 采用 NanoDrop2000 紫外-可见分光光度计测定 DNA 纯度和浓度, 最后用 1% 琼脂凝胶电泳, 检测 DNA 完整性。使用 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3') 对 16S rRNA 基因 V3-V4 可变区进行 PCR 扩增, 先 95℃ 预变性 3 min, 然后 72℃ 稳定延伸 10 min, 最后 4℃ 进行保存。将 PCR 产物混合后使用 2% 琼脂

糖凝胶回收, 纯化 PCR 产物, 利用 Illumina 公司的 MiSeq PE300 平台进行测序, 使用 fastp 软件对原始测序序列进行质控, 使用 FLASH 软件进行拼接, 使用 UPARSE 软件 97% 的相似度对序列进行操作分类单元(OTU)聚类并剔除嵌合体, 最后将 OTU 按序列抽平作后续分析使用。

1.4 数据统计分析方法

原始数据均值及标准差采用 Excel 2020 计算, 地下水理化性质、细菌多样性指数、细菌组间差异采用 SPSS24 单因素方差分析, 环境因子与细菌相关性采用皮尔逊(Pearson)相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 地下水理化性质分析

对照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017), 评价 16 个点位丰平枯 3 期地下水 19 项理化指标监测结果(表 1), 结果显示: 2 个工业区浅层地下水环境质量总体尚好, pH 值无明显差异, 整体呈弱碱性, 硝酸盐氮(NO_3^- -N)、铜(Cu)、锌(Zn)和铅(Pb)等 8 项指标达到 I 类标准, 亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)、锑(Sb)和氯化物(Cl^-)等 4 项指标达到 II 类标准, 氨氮(NH_4^+ -N)、铁(Fe)和锰(Mn)等 4 项指标相对较差; 石油化工业区域地下水的 NH_4^+ -N 为 V 类, Fe 和 Mn 为 IV 类。从不同行业类型来看, 石油化工业区域地下水的 NH_4^+ -N 显著高于纺织业、金属制品业和其他行业 ($P < 0.05$), 分别高出 64.49%、32.46% 和 113.91%, 与薛银刚等^[16]研究的结果一致。纺织业总石油烃(TPH)浓度显著低于金属制品业、石油化工业和其他行业 ($P < 0.05$), 分别降低 69.86%、52.05% 和 89.04%; 石油化工业 TPH 浓度略低于金属制品业和其他行业, 但无明显差异 ($P > 0.05$), 可能是与纺织业和石油化工业区域地下水中石油烃降解菌富集, 因而地下水中 TPH 得到有效降解有关^[23]。石油化工业区域地下水挥发酚浓度显著高于

表 1 地下水样品的理化指标和类别¹⁾

Table 1 Physical and chemical properties and categories of groundwater samples

行业类型	$\rho(\text{NH}_4^+\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})$	$\rho(\text{NO}_2^-\text{-N})$	$\rho(\text{Cu})$	$\rho(\text{Zn})$	$\rho(\text{Pb})$	$\rho(\text{Ni})$	$\rho(\text{As})$	$\rho(\text{Sb})$	$\rho(\text{Se})$
纺织业	1.10 ± 0.43bc	0.64 ± 0.20a	0.03 ± 0.01a	0.80 ± 0.77a	2.80 ± 2.40a	1.20 ± 2.08a	0.74 ± 0.37b	0.80 ± 0.39a	0.26 ± 0.10a	1.88 ± 2.05a
金属制品业	1.41 ± 1.19b	0.69 ± 0.20a	0.01 ± 0.01b	1.00 ± 0.97a	3.19 ± 2.95a	1.10 ± 1.71a	0.96 ± 0.68a	1.02 ± 0.67a	0.21 ± 0.10a	2.00 ± 1.10a
石油化工业	1.86 ± 1.28a	0.68 ± 0.24a	0.01 ± 0.01b	1.03 ± 1.24a	3.46 ± 3.86a	0.62 ± 0.59a	1.04 ± 0.52a	0.68 ± 0.41b	0.16 ± 0.10b	1.65 ± 1.18a
其他行业	0.87 ± 0.25c	0.61 ± 0.14a	0.01 ± 0.01b	1.21 ± 0.74a	2.27 ± 1.19a	0.67 ± 0.66a	0.90 ± 0.53a	0.67 ± 0.40b	0.22 ± 0.13a	1.97 ± 1.72a
行业类型	$\rho(\text{Hg})$	$\rho(\text{TPH})$	$\rho(\text{挥发酚})$	$\rho(\text{Cl}^-)$	$\rho(\text{Fe})$	$\rho(\text{Mn})$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	pH	高锰酸盐指数	
纺织业	0.07 ± 0.04a	0.07 ± 0.03b	0.03 ± 0.01b	78.42 ± 37.15b	0.78 ± 0.61b	0.17 ± 0.16b	48.80 ± 27.11b	8.05 ± 0.59a	1.40 ± 0.87b	
金属制品业	0.07 ± 0.04a	0.12 ± 0.07a	0.20 ± 0.04b	148.09 ± 106.83a	1.70 ± 2.50a	0.29 ± 0.20a	35.56 ± 9.33c	7.83 ± 0.43a	3.66 ± 3.09a	
石油化工业	0.05 ± 0.03b	0.11 ± 0.09a	0.50 ± 0.40a	138.64 ± 111.97a	1.14 ± 1.01a	0.18 ± 0.12b	39.94 ± 18.88b	7.93 ± 0.50a	3.10 ± 1.86a	
其他行业	0.07 ± 0.04a	0.14 ± 0.11a	0.40 ± 0.08ab	73.67 ± 22.11b	1.50 ± 1.06a	0.18 ± 0.14b	77.42 ± 39.95a	7.95 ± 0.38a	3.07 ± 2.17a	

1) pH 值无量纲, Cu、Zn、Pb、Ni、As、Sb、Se、Hg 和挥发酚的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 其余单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 不同小写字母表示不同行业间存在显著差异

纺织业、金属制品业和其他行业, 分别高出 1 566.67%、150.00% 和 25.00%, 可能是由于石油化工和炼焦等生产过程中地面渗漏和污水排放扩散等途径增加了地下水中挥发酚的浓度, 与刘娇等^[24] 研究的结果一致. 金属制品业区域地下水重金属浓度普遍高于其他 3 种类型, 砷(As) 浓度显著高于石油化工业和其他行业($P < 0.05$), 分别高出 49.26% 和 50.59%; 汞(Hg) 浓度也显著高于石油化工业($P < 0.05$).

2.2 地下水细菌多样性和群落结构分析

2.2.1 地下水细菌 OTU 水平分析

2 个工业区 16 个地下水样点细菌高通量测序共获得序列 5 801 221 条, 测序平均长度为 372 bp. 在 97% 分类水平下, 不同行业类型的 OTU 分别为纺织业 729、金属制品业 4 180、石油化工业 5 593 和其他行业 4 151. 将 OTU 进行 Venn 图分析(图 2), 以描述不同行业地下水细菌群落结构的差异, 结果表明 4 种行业类型差异较大. 4 种行业共有的 OTU 为 1 631 个, 占总 OTU 的 18.52%. 各行业特有 OTU 从大到小为: 石油化工业 > 纺织业 > 金属制品业 > 其他行业, 石油化工业最高, 达 1 578, 占总 OTU 的 17.92%; 其他行业特有 OTU 数目最低, 为 591, 占总 OTU 的 6.71%. 金属制品业和石油化工业共有 OTU 为 427 个, 占总 OTU 的 4.85%; 纺织业和其他行业共有 OTU 较低, 为 337 个, 占总 OTU 的 3.83%, 表明金属制品业和石油化工业细菌群落同源性较高^[25].

2.2.2 地下水细菌群落多样性分析

采用 α 多样性指数来分析不同行业地下水细

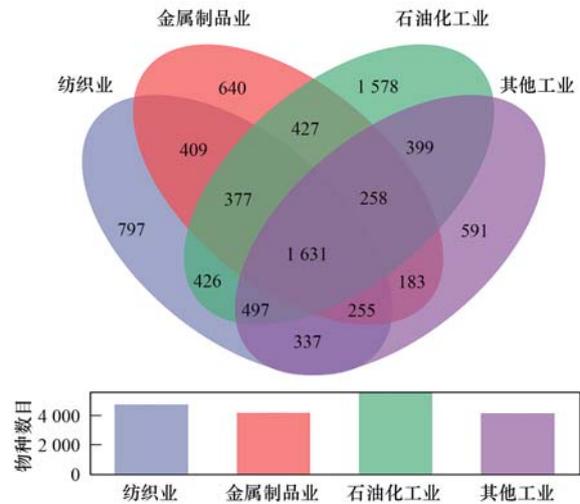


图 2 细菌 OTU 水平 Venn 图

Fig. 2 Venn diagram of bacteria OTU level

菌群落多样性和丰富度^[26], 如表 2 所示. Coverage 指数均在 99% 以上, 无显著性差异, 表明样本测序深度合理, 测序结果接近真实情况. 地下水细菌群落多样性 Shannon 指数分析结果表明, 各行业排序为: 纺织业 > 其他行业 > 石油化工业 > 金属制品业. 细菌群落丰富度 Ace 指数和 Chao 指数分析结果可知, 各行业排序为其他行业 > 纺织业 > 石油化工业 > 金属制品业. 有研究表明, 纺织业废水中有机物浓度高, 能为细菌生长繁殖提供良好的生存条件, 这可能是其地下水细菌多样性最高的原因^[27]; 金属制品业地下水细菌多样性和丰富度均为最低, 这可能是由于金属制品业区域地下水金属浓度较高抑制了细菌的生长繁殖^[28].

表 2 α 多样性指数

Table 2 The α diversity index

行业类型	α 多样性指数			
	Shannon	Ace	Chao	Coverage
纺织业	3.14 ± 0.65a ¹⁾	1 134.58 ± 377.25a	919.82 ± 313.77a	0.991 ± 0.004a
金属制品业	2.42 ± 1.22b	960.46 ± 647.97b	732.39 ± 510.67b	0.992 ± 0.005a
石油化工业	2.71 ± 0.98b	1 126.27 ± 569.78a	890.11 ± 479.64a	0.991 ± 0.005a
其他行业	3.12 ± 0.57ab	1 239.98 ± 454.90a	962.78 ± 364.84a	0.990 ± 0.004a

1) 不同小写字母表示不同行业间存在显著差异

2.2.3 地下水细菌群落主成分分析(PCA)

采用主成分分析法来表征不同行业类型之间细菌群落结构的差异性和相似性, 结果如图 3 所示. 纵轴解释度较低, 为 4.25%, 而横轴解释度较高, 达 8.60%. 横轴看纺织业、金属制品业和其他行业类型样本点距离较近, 说明这 3 种行业群落组成更加相似. 纺织业和其他行业的地下水样本均集中在第 1、3 象限, 金属制品业和石油化工业的样本均在第 2、4 象限分散开, 表明其他行业与纺织业的地下水细菌群落结构较为相似, 金属制品业和石油化工业

则存在差异. 总体而言, 不同行业类型地下水细菌群落结构的相似或差异, 可能是受到地下水理化指标类型和浓度差异的影响.

2.2.4 地下水细菌群落结构组成分析

将 OTU 进行物种注释后, 共检测到 65 个细菌门, 将相对丰度低于 0.5% 的门合并为 others, 得到门水平相对丰度, 如图 4 所示. 变形菌门丰度最高, 其不同行业类型相对丰度依次为: 石油化工业 (86.18%) > 金属制品业 (82.14%) > 其他行业 (81.32%) > 纺织业 (80.05%). 石油化工业变形菌

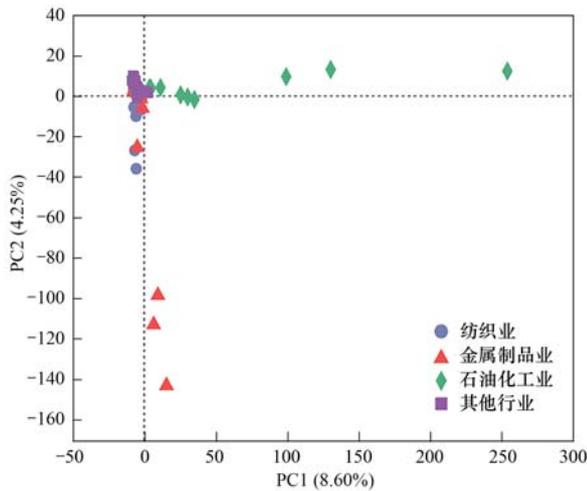


图3 不同行业类型地下水细菌群落 PCA 图

Fig. 3 PCA diagrams of groundwater bacteria communities in different industries

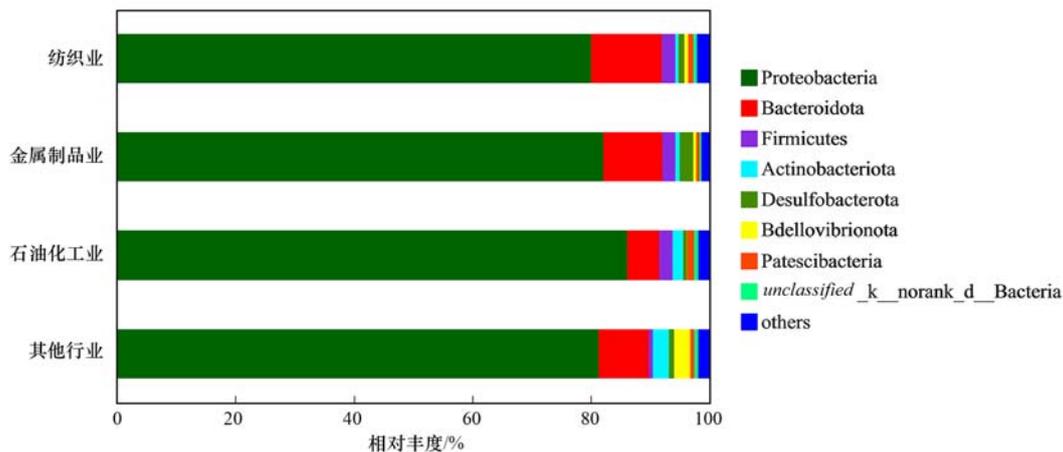


图4 不同行业类型地下水中细菌的相对丰度(门水平)

Fig. 4 Relative abundance of bacteria in groundwater of different types of industries (phylum level)

Comamonadaceae、红细菌属、弯曲杆菌属和 *Gallionella* 等,分别占细菌总数的 19.16%、8.47%、6.16% 和 4.99%。金属制品业的优势菌属为 *unclassified_f_Comamonadaceae*、*Ralstonia*、弯曲杆菌属和 *Malikia* 等,分别占细菌总数的 20.99%、12.50%、10.69% 和 8.62%。有研究表明, *Ralstonia* 可以降解苯酚等有机物,对重金属也有一定耐受性^[32,33],且是一种典型的砷氧化菌和铁氧化菌^[34]。Ruprecht 等^[35]研究表明, *Malikia* 和 *hcgl_clade* 是好氧反硝化菌,可以对污染物浓度变化作出响应,并且在营养丰富的条件下进行硝酸盐还原。石化工业的优势菌属为弯曲杆菌属、*unclassified_f_Comamonadaceae*、*Sulfuritalea* 和 *Ralstonia* 等,分别占细菌总数的 18.07%、15.24%、5.76% 和 5.57%,其中 *Sulfuritalea* 可实现石油烃类厌氧降解^[36]。其他行业中优势菌属为 *Novosphingobium*、*unclassified_f_Comamonadaceae*、弯曲杆菌属和脱氮单胞菌属

门相对丰度最高可能与其地下水含氮水平较高相关,因为变形菌门对含氮或有机物污染废水具有降解作用,与刘莹等^[29]研究的结论一致。其次的优势菌门包括拟杆菌门 (*Bacteroidota*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、放线菌门 (*Actinobacteriota*)、*Desulfobacterota*、蛭弧菌 (*Bdellovibrionota*) 和 CPR 超级杆菌 (*Patescibacteria*) 等, Kadnikov 等^[30]研究发现地下水中厚壁菌门、绿弯菌门、变形菌门和拟杆菌门为主要优势菌门,其中厚壁菌门占比最高,主要是由地下水环境因子差异所造成。CPR 超级杆菌则广泛存在于地下水和湖泊沉积物中,可以很好地适应地下水环境^[31]。

本研究共检测到 1 321 个细菌属,将相对丰度低于 1% 的属合并为 others,得到属水平相对丰度,如图 5 所示。纺织业优势菌属为 *unclassified_f_*

(*Dechloromonas*) 等,分别占细菌总数的 11.26%、11.11%、9.96% 和 5.60%。噬氢菌属在 4 组样本中均有检出,其常存在于石油烃或其他有机物浓度较高的地下水中,可降解多种有机污染物^[37]。

2.3 地下水环境因子与细菌群落相关性分析

地下水环境因子与细菌群落门水平相关性分析结果如图 6 所示。结果显示,纺织业地下水中显著影响细菌群落结构的环境因子为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、Sb、Hg、TPH 和 Fe 等 ($P < 0.05$),金属制品业为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、As、Hg、TPH、Mn 和 Cl^- 等 ($P < 0.05$),石化工业为 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、As、TPH、 SO_4^{2-} 和 Fe 等 ($P < 0.05$);其他行业为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、Se、TPH、 Cl^- 等 ($P < 0.05$)。变形菌门和拟杆菌门受环境因子影响较大,在纺织业和石化工业,As 与变形菌门呈正相关,可能是由于变形菌门对 As 有较高抗性,可在高 As 地下水环境中正常生长^[38]。同时,变形菌门中有许多细菌还可利用碳源快速生长^[39,40],这也是变形菌门丰度最高

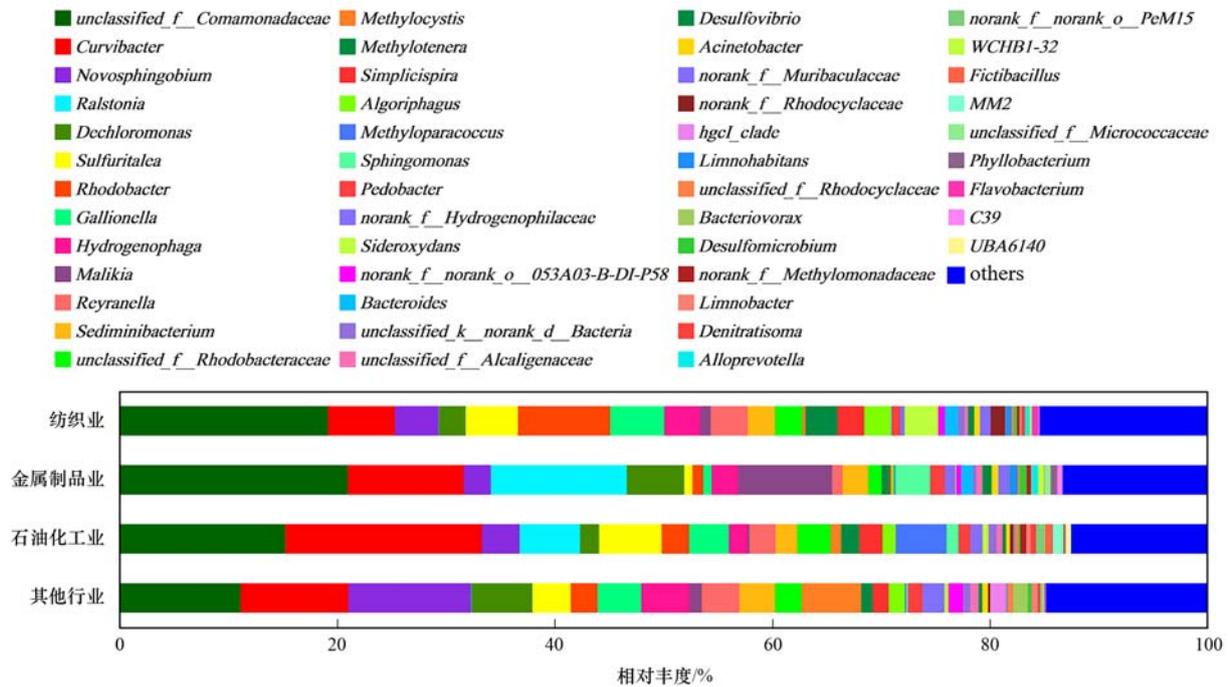
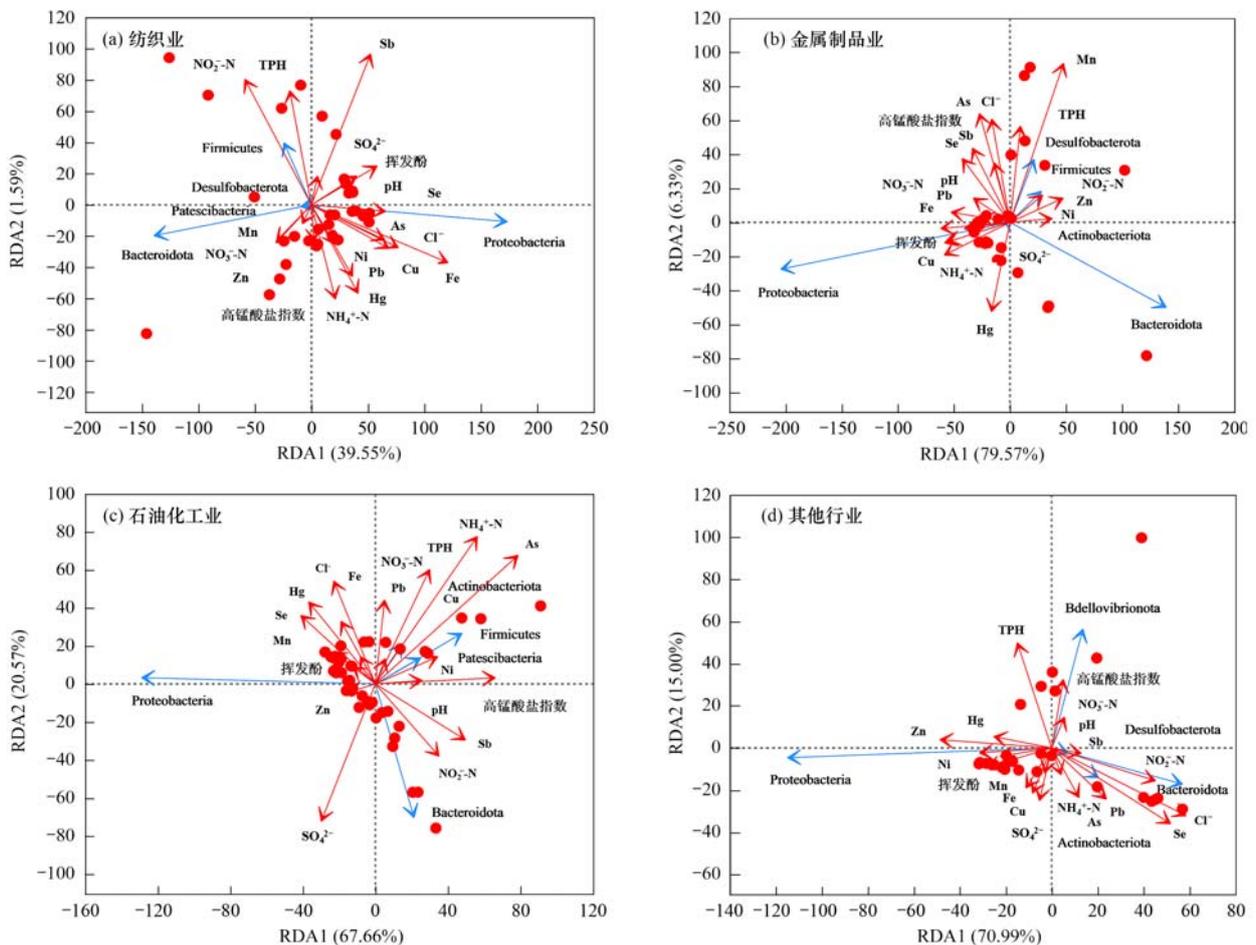


图 5 不同行业类型地下水中细菌的相对丰度(属水平)

Fig. 5 Relative abundance of bacteria in groundwater of different types of industries (genus level)



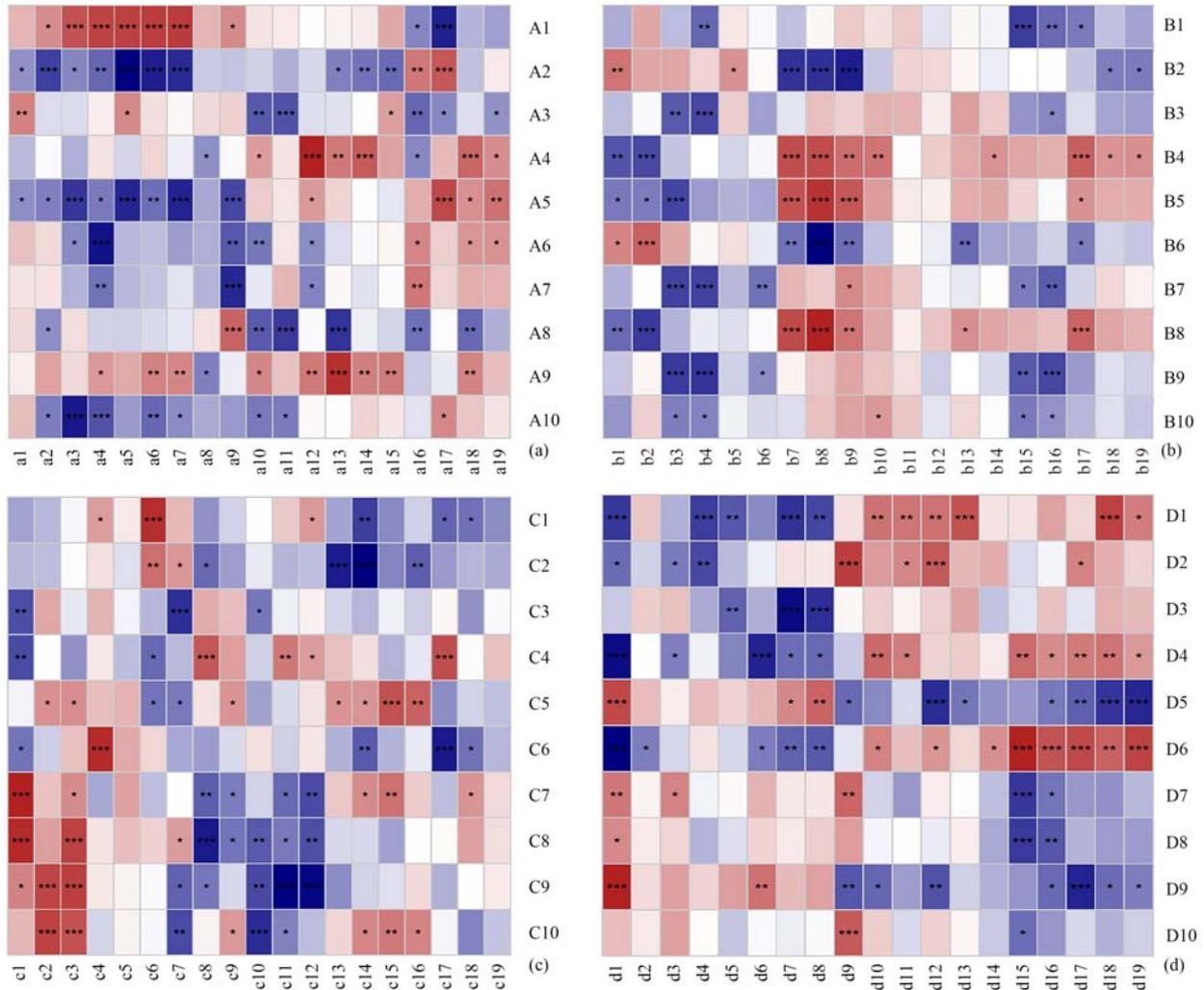
红色箭头表示环境因子,蓝色箭头表示细菌,红点表示样本组

图 6 地下水环境因子与细菌门水平的相关性 RDA 图

Fig. 6 RDA diagram of correlation between environmental factors in groundwater and bacteria in phylum level

的原因之一. 纺织业和石油化工业地下水 NH_4^+ -N浓度较高, 相较于金属制品业和其他行业, 细菌群落结构存在较大差异. 本研究表明不同行业类型地下水理化性质不同, 会直接影响细菌群落结构, 这与 Ji 等^[41]研究的结果一致.

地下水环境因子与细菌群落属水平相关性分析结果如图 7 所示. 与地下水三氮和有机指标相关的多为硝化菌、反硝化菌和有机物降解菌等. 纺织业和石油化工业 *Sulfuritalea* 与 NO_3^- -N和 NO_2^- -N均呈极显著负相关($P < 0.01$), 与 NH_4^+ -N呈显著正相关(P



(a) 纺织业, (b) 金属制品业, (c) 石油化工业, (d) 其他行业; a1. TPH, a2. As, a3. NO_3^- -N, a4. SO_4^{2-} , a5. Mn, a6. Ni, a7. Sb, a8. 高锰酸盐指数, a9. NO_2^- -N, a10. Cl^- , a11. Fe, a12. NH_4^+ -N, a13. Se, a14. Cu, a15. Zn, a16. 挥发酚, a17. pH, a18. Pb, a19. Hg; A1. *unclassified_f_Comamonadaceae*, A2. *Rhodobacter*, A3. *Curvibacter*, A4. *Gallionella*, A5. *Sulfuritalea*, A6. *Novosphingobium*, A7. *Reyranella*, A8. *Hydrogenophaga*, A9. *Sideroxydans*, A10. *Methylotenera*; b1. pH, b2. Hg, b3. Fe, b4. Cu, b5. 挥发酚, b6. NH_4^+ -N, b7. Mn, b8. NO_2^- -N, b9. Zn, b10. NO_3^- -N, b11. Cl^- , b12. Se, b13. SO_4^{2-} , b14. Sb, b15. 高锰酸盐指数, b16. Pb, b17. As, b18. TPH, b19. Ni; B1. *unclassified_f_Comamonadaceae*, B2. *Ralstonia*, B3. *Curvibacter*, B4. *Malikia*, B5. *Dechloromonas*, B6. *Sphingomonas*, B7. *Novosphingobium*, B8. *Hydrogenophaga*, B9. *Sediminibacterium*, B10. *Pedobacter*; c1. NO_2^- -N, c2. pH, c3. Sb, c4. Zn, c5. Ni, c6. SO_4^{2-} , c7. NO_3^- -N, c8. Fe, c9. Hg, c10. Mn, c11. Cl^- , c12. Se, c13. NH_4^+ -N, c14. As, c15. TPH, c16. 挥发酚, c17. Pb, c18. 高锰酸盐指数, c19. Cu; C1. *Curvibacter*, C2. *unclassified_f_Comamonadaceae*, C3. *Sulfuritalea*, C4. *Ralstonia*, C5. *Methyloparacoccus*, C6. *Gallionella*, C7. *Novosphingobium*, C8. *unclassified_f_Rhodobacteraceae*, C9. *Rhodobacter*, C10. *Reyranella*; d1. pH, d2. 挥发酚, d3. Se, d4. Cl^- , d5. Pb, d6. Cu, d7. Fe, d8. Hg, d9. SO_4^{2-} , d10. Mn, d11. TPH, d12. NH_4^+ -N, d13. Zn, d14. As, d15. NO_3^- -N, d16. NO_2^- -N, d17. 高锰酸盐指数, d18. Ni, d19. Sb; D1. *Novosphingobium*, D2. *unclassified_f_Comamonadaceae*, D3. *Curvibacter*, D4. *Dechloromonas*, D5. *Methylocystis*, D6. *Hydrogenophaga*, D7. *Gallionella*, D8. *Sulfuritalea*, D9. *Reyranella*, D10. *Sediminibacterium*; * 表示显著性相关($P < 0.05$), ** 表示极显著性相关($P < 0.01$), *** 表示极显著性相关($P < 0.001$); 红色表示正相关, 蓝色表示负相关, 白色表示无相关性

图 7 地下水环境因子与属水平细菌的相关性 Heatmap 图

Fig. 7 Heatmap of correlation between environmental factors in groundwater and bacteria in genus level

<0.05)。Sampaio 等^[42]研究表明, *Sulfuritalea* 可在厌氧条件下降解石油烃类污染物, 而 NH_4^+ -N 作为营养物质, 可以刺激石油降解菌的生长而加速石油烃的降解。纺织业弯曲杆菌属与 TPH 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与挥发酚呈极显著负相关 ($P < 0.01$); 红细菌属与 TPH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与挥发酚呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 红细菌属在有氧条件下具有较强的代谢能力, 从而降解有毒有害物质。金属制品业中噬氢菌属与 NO_2^- -N 呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其他行业噬氢菌属与 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 均呈显著正相关 ($P < 0.05$)。噬氢菌属是一种反硝化菌属, He 等^[43]研究发现, 该菌属常存在于硝酸盐浓度较高的地下水中, 能通过反硝化作用降低硝酸盐浓度。金属制品业 *Ralstonia* 与 TPH 呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与挥发酚呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

与地下水金属指标相关的多为铁氧化菌、砷还原菌和硝酸盐还原菌等。有研究表明, 噬氢菌属在特定环境中可参与重金属氧化还原过程, 对地下水重金属迁移转化过程起到一定作用^[44]。*Gallionella* 在纺织业地下水中与 Pb、Se 和 Cu 等呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 但在石油化工业地下水中与 As 和 Pb 呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。金属制品业 *Malikia* 与 Zn 和 As 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 Hg 呈极显著负相关 ($P < 0.001$)。*Sphingomonas* 是金属制品业特有优势菌属, 柯添添^[45]研究发现, *Sphingomonas* 是一种耐 As 微生物, 与 Hg 呈极显著正相关 ($P < 0.001$), 与 Zn 和 As 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。纺织业中 *Sulfuritalea* 与 As、Ni 和 Sb 等呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与 Pb 和 Hg 呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 结论

(1) 纺织业地下水细菌多样性最高, Shannon 指数达 3.14, 金属制品业地下水 Shannon 指数和 Ace 指数均最低, 分别为 2.42 和 960.46。纺织业和石油化工业有机物浓度较高, 能促进细菌生长繁殖, 而金属制品业地下水中金属物质抑制了细菌的生长繁殖。

(2) 工业区地下水中变形菌门丰度最高, 占比为 80.05%~86.18%, 其次依次为拟杆菌门、厚壁菌门、放线菌门。石油化工业和金属制品业地下水细菌群落结构差异较大, 主要受两者地下水环境因子差异所影响。

(3) 与地下水三氮和有机物相关的多为硝化菌、反硝化菌和有机物降解菌等, 其中 *Sulfuritalea* 可有效降解石油烃类污染物; 与地下水重金属相关

的多为铁氧化菌和砷还原菌等, 其中噬氢菌属对地下水重金属迁移转化起到一定作用。

参考文献:

- [1] Abiriga D, Vestgarden L S, Klempe H. Groundwater contamination from a municipal landfill: Effect of age, landfill closure, and season on groundwater chemistry[J]. Science of the Total Environment, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140307.
- [2] 吕晓立, 刘景涛, 朱亮, 等. 兰州市地下水中“三氮”污染特征及成因[J]. 干旱区资源与环境, 2019, **33**(1): 95-100. Lv X L, Liu J T, Zhu L, et al. Distribution and source of nitrogen pollution in groundwater of Lanzhou city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, **33**(1): 95-100.
- [3] 李亚静, 黄庭, 谢哲宇, 等. 非正规垃圾填埋场土壤和地下水重金属污染特征与评价[J]. 地球与环境, 2019, **47**(3): 361-369. Li Y J, Huang T, Xie Z Y, et al. Characteristics and assessment of heavy metal pollution in soil and groundwater of informal landfills[J]. Earth and Environment, 2019, **47**(3): 361-369.
- [4] Dong L, Zhang J, Guo Z Z, et al. Distributions and interactions of dissolved organic matter and heavy metals in shallow groundwater in Guanzhong basin of China[J]. Environmental Research, 2022, **207**, doi: 10.1016/j.envres.2021.112099.
- [5] 李军, 赵一, 邹胜章, 等. 会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 184-194. Li J, Zhao Y, Zou S Z, et al. Metal pollutions and human health risks in groundwater from wet, normal, and dry periods in the Huixian Karst Wetland, China[J]. Environmental Science, 2021, **42**(1): 184-194.
- [6] 谢浩, 梁永平, 李军, 等. 龙子祠泉域地下水金属元素分布特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4257-4266. Xie H, Liang Y P, Li J, et al. Distribution characteristics and health risk assessment of metal elements in groundwater of Longzici spring area[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4257-4266.
- [7] 何泽, 宁卓, 黄冠星, 等. 太行山前平原浅层地下水污染的分子生物学响应特征——以滹沱河流域为例[J]. 中国地质, 2019, **46**(2): 290-301. He Z, Ning Z, Huang G X, et al. The response characteristics of microbial diversity to shallow groundwater contamination in the piedmont of the Taihang Mountains using molecular biotechnologies: a case study of groundwater of Hutuo River Basin[J]. Geology in China, 2019, **46**(2): 290-301.
- [8] Melita M, Amalfitano S, Preziosi E, et al. Physiological profiling and functional diversity of groundwater microbial communities in a municipal solid waste landfill area[J]. Water, 2019, **11**(12), doi: 10.3390/w11122624.
- [9] 白美霞, 司徒高铭, 李松昊, 等. 生物质炭配施有机物料对贫瘠红壤酶活性和微生物碳源代谢功能的影响[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(5): 1283-1290. Bai M X, Situ G M, Li S H, et al. Effects of combined application of biochar with organic amendments on enzyme activity and microbial metabolic function of carbon sources in infertile red soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(5): 1283-1290.
- [10] Agnello A C, Bagard M, van Hullebusch E D, et al. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation,

- phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **563-564**: 693-703.
- [11] Amano Y, Sasao E, Niizato T, *et al.* Redox buffer capacity in Water-Rock-Microbe interaction systems in subsurface environments[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2012, **29**(7): 628-639.
- [12] He Q C, Feng C P, Chen N, *et al.* Characterizations of dissolved organic matter and bacterial community structures in rice washing drainage (RWD)-based synthetic groundwater denitrification [J]. *Chemosphere*, 2019, **215**: 142-152.
- [13] Li S L, Li B H, Liu H J, *et al.* The biogeochemical responses of hyporheic groundwater to the long-run managed aquifer recharge: Linking microbial communities to hydrochemistry and micropollutants[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **431**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128587.
- [14] Huang H Y, Jiang Y M, Zhao J H, *et al.* BTEX biodegradation is linked to bacterial community assembly patterns in contaminated groundwater ecosystem [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, **419**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126205.
- [15] 许霞, 刘菲, 薛银刚, 等. 工业园区地下水细菌群落结构及影响因素[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, **35**(2): 255-263.
- Xu X, Liu F, Xue Y G, *et al.* Bacterial community structure and its influence factors of the groundwater in an industry park [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(2): 255-263.
- [16] 薛银刚, 刘菲, 周璐璐, 等. 基于高通量测序的工业园区地下水和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.
- [17] Janssen P H. Identifying the dominant soil bacterial taxa in libraries of 16S rRNA and 16S rRNA genes [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(3): 1719-1728.
- [18] 理鹏, 吴建强, 沙晨燕, 等. 粪肥和有机肥施用对稻田土壤微生物群落多样性影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 4262-4272.
- Li P, Wu J Q, Sha C Y, *et al.* Effects of manure and organic fertilizer application on soil microbial community diversity in paddy fields [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 4262-4272.
- [19] Young J M, Austin J J, Weyrich L S. Soil DNA metabarcoding and high-throughput sequencing as a forensic tool: considerations, potential limitations and recommendations [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2017, **93**(2), doi: 10.1093/femsec/fiw207.
- [20] 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 等. 活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3886-3893.
- Ma Q Q, Yuan L J, Niu Z D, *et al.* Microbial community structure of activated sludge and its response to environmental factors [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3886-3893.
- [21] 薛银刚, 江晓栋, 孙萌, 等. 基于高通量测序的冬季太湖竺山湾浮游细菌和沉积物细菌群落结构和多样性研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, **33**(11): 992-1000.
- Xue Y G, Jiang X D, Sun M, *et al.* Structure and diversity profiles of planktonic and sediment bacteria communities in the Zhushan Bay of Lake Taihu in winter based on high-throughput sequencing [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, **33**(11): 992-1000.
- [22] GB/T 14848-2017, 地下水质量标准[S].
- [23] 张皓辉, 史俊祥, 姜永海, 等. 某污染场地地下水石油烃的健康风险评估及其微生物群落分析[J]. *环境科学研究*, 2022, **35**(4): 1063-1071.
- Zhang H H, Shi J X, Jiang Y H, *et al.* Health risk assessment and microbial community analysis of Petroleum Hydrocarbons in groundwater of a contaminated site [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2022, **35**(4): 1063-1071.
- [24] 刘娇, 吴淑琪, 贾静, 等. 地质环境样品中挥发酚分析现状与进展[J]. *分析测试学报*, 2015, **34**(3): 367-374.
- Liu J, Wu S Q, Jia J, *et al.* Review on analytical methods of Volatile Phenols in geoenvironmental samples [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2015, **34**(3): 367-374.
- [25] Gihring T M, Green S J, Schadt C W. Massively parallel rRNA gene sequencing exacerbates the potential for biased community diversity comparisons due to variable library sizes [J]. *Environmental Microbiology*, 2012, **14**(2): 285-290.
- [26] 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 等. 辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析[J]. *环境科学*, 2022, **43**(5): 2586-2594.
- Li P Y, An Q R, Wang X H, *et al.* Analysis on diversity and structure of microbial community in river sediment of Siping section of Liaohe River [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(5): 2586-2594.
- [27] 张悦. 印染废水处理技术的研究进展[J]. *纺织科学与工程学报*, 2020, **37**(3): 102-109, 116.
- Zhang Y. Research progress of the printing and dyeing wastewater treatment technology [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2020, **37**(3): 102-109, 116.
- [28] Wang J, Li Y, Wang P F, *et al.* Response of bacterial community compositions to different sources of pollutants in sediments of a tributary of Taihu Lake, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(14): 13886-13894.
- [29] 刘莹, 王丽华, 郝春博, 等. 酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2305-2313.
- Liu Y, Wang L H, Hao C B, *et al.* Microbial diversity and ammonia-oxidizing microorganism of a soil sample near an acid mine drainage lake [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(6): 2305-2313.
- [30] Kadnikov V V, Frank Y A, Mardanov A V, *et al.* Uncultured bacteria and methanogenic archaea predominate in the microbial community of western Siberian deep subsurface aquifer [J]. *Microbiology*, 2017, **86**(3): 412-415.
- [31] Tian R M, Ning D L, He Z L, *et al.* Small and mighty: adaptation of superphylum *Patescibacteria* to groundwater environment drives their genome simplicity [J]. *Microbiome*, 2020, **8**(1), doi: 10.1186/s40168-020-00825-w.
- [32] Heidari H, Sedighi M, Zamir S M, *et al.* Bisphenol A degradation by *Ralstonia eutropha* in the absence and presence of phenol [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2017, **119**: 37-42.
- [33] 张扬, 王飞, 黄彦, 等. 罗尔斯顿菌(*Ralstonia* sp.) T6 对三氯吡啶醇污染土壤的修复及能完全矿化毒死蜱工程菌株的构建[J]. *生态与农村环境学报*, 2014, **30**(6): 761-767.
- Zhang Y, Wang F, Huang Y, *et al.* Remediation of 3,5,6-Trichloro-2-Pyridinol polluted soil with *Ralstonia* sp. T6 and construction of a Chlorpyrifos-Mineralizing engineered strain [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2014, **30**(6): 761-

- 767.
- [34] Shelobolina E, Xu H F, Konishi H, *et al.* Microbial lithotrophic oxidation of structural Fe (II) in Biotite [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78** (16): 5746-5752.
- [35] Ruprecht J E, Birrer S C, Dafforn K A, *et al.* Wastewater effluents cause microbial community shifts and change trophic status [J]. Water Research, 2021, **200**, doi: 10. 1016/j. watres. 2021. 117206.
- [36] 王宝山, 温成成, 孙秦川, 等. 石油烃类污染对青藏高原北麓河地区冻区土壤微生物多样性的影响 [J]. 环境工程学报, 2018, **12** (10): 2917-2928.
Wang B S, Wen C C, Sun Q C, *et al.* Effects of petroleum hydrocarbon pollution on soil microbial diversity in permafrost region of Beiluhe area of Qinghai-Tibet plateau [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, **12** (10): 2917-2928.
- [37] 李军, 蓝芙宁, 邹胜章, 等. 琉璃河地区地下水化学特征对微生物群落结构影响 [J]. 南水北调与水利科技, 2019, **17** (3): 97-104.
Li J, Lan F N, Zou S Z, *et al.* Effects of chemical characteristics of groundwater on microbial community structures in the Liuli River [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, **17** (3): 97-104.
- [38] Das S, Jean J S, Kar S, *et al.* Changes in bacterial community structure and abundance in agricultural soils under varying levels of arsenic contamination [J]. Geomicrobiology Journal, 2013, **30** (7): 635-644.
- [39] Fierer N, Lauber C L, Ramirez K S, *et al.* Comparative metagenomic, phylogenetic and physiological analyses of soil microbial communities across nitrogen gradients [J]. The ISME Journal, 2012, **6** (5): 1007-1017.
- [40] 龚宇鹏. 芦苇改性生物质炭制备及用于太湖水生态修复的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Gong Y P. Study on Phragmites based biochar and its application in the ecological remediation of Tai Lake [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [41] Ji L, Zhang L, Wang Z, *et al.* High biodiversity and distinct assembly patterns of microbial communities in groundwater compared with surface water [J]. Science of the Total Environment, 2022, **834**, doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2022. 155345.
- [42] Sampaio D S, Almeida J R B, de Jesus H E, *et al.* Distribution of anaerobic hydrocarbon-degrading bacteria in soils from King George Island, Maritime Antarctica [J]. Microbial Ecology, 2017, **74** (4): 810-820.
- [43] He Y Q, Li G X, Zhou S Y D, *et al.* Bacteria Involved in thiosulfate reduction coupled with anaerobic ammonium oxidation in the critical zone groundwater [J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2021, **5** (8): 2142-2151.
- [44] 丁铁睿, 李定龙, 张毅敏, 等. 漏湖底泥细菌群落结构及多样性 [J]. 环境科学学报, 2017, **37** (5): 1649-1656.
Ding Y R, Li D L, Zhang Y M, *et al.* The structure and the diversity of sediment microbial communities in Gehu Lake [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37** (5): 1649-1656.
- [45] 柯添添. 高砷地下水系统微生物群落结构和砷转化功能微生物多样性 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
Ke T T. Characteristics of microbial community structure and arsenic transformation functional microbes diversity in arsenic-rich groundwater system [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM _{2.5} Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatio-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waiqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrotriazole (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulfurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-yue, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)