

# 地下水中微生物特征及其环境意义研究综述

鲁振宇, 冯松宝, 刘志鹏

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年2月24日; 录用日期: 2026年3月12日; 发布日期: 2026年3月23日

## 摘要

地下水作为全球重要的淡水资源, 其水质与水量安全直接关系到生态安全与人类社会可持续发展。微生物作为地下水生态系统中的核心驱动者, 广泛分布于各类地下环境中, 通过代谢活动深刻影响地下水的物质循环、能量转换及化学组分的演化。本文系统综述了地下水中微生物的群落结构、生理生态特征及其与环境因子的相互作用机制。重点分析了细菌、真菌、藻类等主要类群的分布规律与功能差异, 探讨了微生物在有机物降解、氧化还原调控及元素生物地球化学循环中的关键作用。文章进一步阐述了微生物在污染修复、生态指示、饮用水安全及资源开发等方面的环境意义与应用前景, 并指出了当前研究存在的主要挑战, 如培养方法局限、多组学技术应用不足及尺度差异问题。最后, 展望了未来研究应加强多组学融合、长期定位观测及“微生物-水文-地球化学”耦合研究, 以推动地下水微生物学的发展及其在水文地质与环境管理中的实际应用。

## 关键词

地下水, 微生物群落, 生物地球化学循环, 污染修复, 环境因子, 水文地球化学

# Microbial Characteristics in Groundwater and Their Environmental Significance: A Review

Zhenyu Lu, Songbao Feng, Zhipeng Liu

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: February 24, 2026; accepted: March 12, 2026; published: March 23, 2026

## Abstract

Groundwater, as a vital global freshwater resource, the safety of its water quality and quantity is directly related to ecological security and the sustainable development of human society. As the core

drivers of the groundwater ecosystem, microorganisms are widely distributed in various subsurface environments, and their metabolic activities profoundly affect the material cycle, energy conversion and evolution of chemical components in groundwater. This paper systematically reviews the community structure, physiological and ecological characteristics of microorganisms in groundwater and their interaction mechanisms with environmental factors. It focuses on analyzing the distribution rules and functional differences of major groups such as bacteria, fungi and algae, and discusses the key roles of microorganisms in organic matter degradation, redox regulation and elemental biogeochemical cycles. The paper further elaborates on the environmental significance and application prospects of microorganisms in pollution remediation, ecological indication, drinking water safety and resource development, and points out the main challenges in current research, such as limitations of culture methods, insufficient application of multi-omics technologies and scale difference issues. Finally, it is prospected that future research should strengthen the integration of multi-omics, long-term in-situ observation and the coupled research of "microbe-hydrology-geochemistry", so as to promote the development of groundwater microbiology and its practical application in hydrogeology and environmental management.

## Keywords

Groundwater, Microbial Community, Biogeochemical Cycle, Pollution Remediation, Environmental Factors, Hydrogeochemistry

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

地下水作为全球重要的淡水资源,在供水、生态维持和地质过程中具有关键作用,其水质与水量安全直接关乎人类社会的可持续发展与生态安全。而微生物是地下水生态系统中不可忽视的“隐形驱动者”,广泛分布于从浅层潜水到深部含水层(可达 1000 米以下)的各类地下环境中,它们通过同化、异化作用等代谢活动,积极参与物质循环和能量转换,从而深刻影响着地下水中化学成分的形成与演化。随着分子生物学与地球化学技术的发展,地下水中微生物的多样性、功能及其生态作用日益受到关注[1][2]。地下水中微生物主要包括细菌、真菌和藻类等,其中细菌占主导地位。地下水中的各种污染物能够通过生态系统循环进入人体,特别是其中的有机污染物难降解、衰减周期长,严重威胁着人类健康。在地下水有机污染物的修复方法中,原位微生物修复具有很高的实用性和经济性[3][4]。然而,原位生物修复在实际工程应用中仍面临诸多瓶颈,例如微生物过量繁殖导致的含水层堵塞、电子受体耗尽引起的代谢停滞,以及复杂污染条件下修复效果的不确定性。因此,必须从工程实践角度重新审视这些技术的适用性与优化路径。此外地下水中微生物还参与元素的循环及生态系统稳定。所以,深入探究地下水微生物的特征、功能及其与环境因子的相互作用,对于深刻理解地下水系统的形成与演化、评估其环境质量、开发高效的污染修复技术以及预警公共健康风险,具有至关重要的理论与现实意义。本文旨在系统梳理地下水中微生物的群落结构、生理特征、功能多样性及其与环境因子的相互作用,探讨其在水文地球化学过程和环境管理中的应用前景并提出未来研究方向与挑战。

## 2. 地下水中微生物的特征与环境作用综述

### 2.1. 地下水中微生物的基本组成与群落特征

地下水中微生物的类群组成复杂多样,涵盖细菌、真菌、藻类、古菌、病毒及原生动物等,不同类群

的分布特征、生理功能存在显著差异,其中细菌占绝对主导地位,是地下水中微生物群落的核心组成部分[5]。细菌是地下水中分布最广泛、数量最多的微生物类群,其数量通常在 $10^2\sim 10^8$ 个/mL之间,具体数量取决于地下水的营养水平、氧化还原条件、温度等环境因子。根据代谢类型的不同,地下水中的细菌可分为喜氧菌和厌氧菌两大类,其中厌氧菌在地下水中(尤其是深层地下水)更为常见,这与地下水环境普遍缺氧的特征密切相关。真菌是地下水中第二大类微生物类群,但其数量远低于细菌,通常仅占地下水中微生物总量的1%~10%,主要分布于富含有机质的地下水环境中(如受地表枯枝落叶、污水输入影响的浅层地下水、岩溶地下水)[6],深层地下水环境中真菌数量极少。地下水中的真菌主要以酵母菌、霉菌为主,常见类群包括念珠菌属、酵母菌属、青霉属、曲霉属等,多数真菌为异养型微生物,以地下水中的有机物质(如腐殖质、碳水化合物、蛋白质)为营养来源,参与有机质的分解与转化,将复杂有机物质分解为简单的无机物质(如二氧化碳、水、氨氮),为其他微生物提供营养支持。此外,部分真菌还具有降解污染物的能力,可分解地下水中的多环芳烃、石油类污染物等难降解有机污染物,在地下水污染修复中具有一定的应用潜力。与细菌相比,真菌对环境条件的适应性相对较弱,对温度、pH值、矿化度等环境因子的变化较为敏感,因此其分布范围远不如细菌广泛。藻类是地下水中数量较少的微生物类群,仅分布于浅层地下水(地表以下0~50米)或光照可到达的区域(如岩溶洞穴、裂隙含水层的透光区),深层地下水环境中几乎没有藻类分布,这是因为藻类的生长繁殖需要光照,依赖光合作用合成有机物,而深层地下水环境处于完全黑暗状态,无法满足藻类光合作用的需求,虽以光合作用为主,但在无光条件下可转为化能自养,具代谢可塑性[7]。

地下水中微生物的群落结构具有显著的多样性特征,这种多样性不仅体现在类群组成的丰富度上,还体现在不同空间尺度、不同环境条件下的群落差异上[8]。地下水中微生物群落结构的多样性主要受地下水深度、含水层类型、水化学条件(如溶解氧、氧化还原电位、pH值、离子组成)、营养水平等环境因子的影响,其中水化学条件和地下水深度是影响微生物群落结构多样性的最核心原因。深部地下水微生物群落更趋特化,具极端环境适应性。

## 2.2. 微生物的生理与生态适应特征

### (1) 广谱生存能力

地下水中的微生物长期处于黑暗、缺氧、营养匮乏等复杂环境中,经长期进化形成了远超地表微生物的广谱生存能力,可适应不同类型地下水环境,核心体现在温度适应、耐矿化度及耐极端条件等方面。

地下水中微生物的温度适应范围极广,可在零下数度至 $85^{\circ}\text{C}\sim 90^{\circ}\text{C}$ 存活,涵盖低、中、高及超高温环境。中温微生物( $20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ )为常见类群,分布于浅中层地下水,代谢活性高;低温微生物( $0^{\circ}\text{C}\sim 20^{\circ}\text{C}$ )多见于寒冷地区浅层、深层低温及永久冻土层地下水,凭借特殊细胞膜和酶系统维持代谢;高温及超高温微生物( $\geq 50^{\circ}\text{C}$ )多为古菌和特殊细菌,分布于深层高温含水层,细胞膜和酶系统具耐高温特性。部分微生物还能适应温度波动,通过调节自身结构适应环境变化。

### (2) 矿化度

不同地下水矿化度差异显著,微生物可适应淡水至盐水等不同环境。多数微生物适宜淡水或微咸水,通过调节细胞内溶质维持渗透压平衡;咸水及盐水环境中以嗜盐微生物为主,依靠特殊渗透压调节机制存活,但矿化度 $>30\text{ g/L}$ 时会显著抑制微生物活性,仅少数嗜盐微生物可存活。

微生物还具备耐极端pH、重金属及干旱的能力。强酸性( $\text{pH}<4.0$ )或强碱性( $\text{pH}>10.0$ )环境中,耐酸、耐碱微生物通过自身代谢调节细胞内pH以适应环境[9];受重金属污染的地下水中,部分微生物可通过吸附、还原等方式降毒,借助重金属结合蛋白保护自身[10];干旱条件下,微生物可形成芽孢或休眠体,环境适宜时恢复活性。

### (3) 代谢多样性丰富

因地下水营养匮乏、氧化还原条件多样,微生物进化出丰富的代谢模式,可利用不同能量来源和电子受体维持生存,代谢多样性远超地表微生物,主要体现在营养代谢、电子受体及代谢途径的多样性上。

营养代谢类型上,微生物涵盖化能自养、异养及兼性代谢型。化能自养型微生物多分布于深层贫营养地下水,以无机物质为能量来源、二氧化碳为碳源合成有机物,是地下水有机物质的重要生产者;异养型微生物为最常见类群,以地下水中各类有机物质为营养和能量来源,参与有机质循环与矿化;兼性代谢型微生物可根据溶解氧、营养物质等环境变化调整代谢模式,适应不同氧化还原环境。

电子受体选择上,微生物具多样性特征。有氧环境中以氧气为电子受体进行有氧呼吸;缺氧或厌氧环境中,可利用硝酸盐、硫酸盐、二氧化碳等无机物质作为电子受体,完成反硝化、脱硫、甲烷生成等代谢过程,部分微生物还可利用有机物质进行发酵获取能量,适配不同氧化还原环境[11]。

微生物代谢途径多样,同种营养物质或电子受体可通过不同途径被利用,且不同类群微生物可通过协同代谢完成复杂过程,进一步提升环境适应性和代谢效率。

### (4) 存在状态

地下水中微生物主要以游离态和生物膜结合态两种可相互转化的状态存在,二者在生存代谢及环境作用中各具特点,其中生物膜结合态微生物在地下水界面反应中作用突出。

游离态微生物悬浮于地下水中,可随水流迁移,以细菌、古菌为主,占微生物总量的10%~30%,其比例受水动力、营养水平及含水层类型影响。此类微生物代谢活性高,可快速参与地下水化学演化和污染物降解,迁移能力强,但对环境变化适应性弱、存活时间短。

生物膜结合态微生物是主要存在状态,占总量的70%~90%,附着于含水层介质或污染物等表面,通过分泌胞外聚合物形成生物膜。生物膜可吸附营养物质和污染物,为微生物提供稳定生长环境,相较于游离态,其环境适应性和稳定性更强,代谢效率更高,可通过协同代谢完成复杂过程[12]。

两种状态可随环境变化相互转化:水动力增强、营养充足时,生物膜微生物可脱离转化为游离态;反之,游离态微生物可附着形成生物膜。生物膜结合态微生物还可参与水-岩相互作用,吸附降解污染物,在地下水自然净化和污染修复中具有重要应用潜力。

## 2.3. 微生物驱动的关键地球化学过程

(1) 有机物降解与矿化:微生物是该过程的核心,可将地下水中的天然有机物质(如腐殖质)和人为有机污染物(如石油类、多环芳烃)分解为无机物质,实现水质净化并为自身供能[13]。其降解具有特异性和多样性,复杂有机物需微生物协同降解,难降解污染物需特定微生物通过特殊途径分解;降解过程受溶解氧、温度、pH值、营养物质等因子影响,有氧、中温(20℃~40℃)、中性或弱碱性(pH 6.0~8.0)及营养充足条件下效率最佳。该过程既是地下水自然衰减的核心机制(贡献率60%~90%),也是地下水污染生物修复的基础。

(2) 氧化还原反应调控:微生物是地下水氧化还原反应的重要调控者,通过参与电子转移催化各类反应,改变地下水氧化还原电位(Eh)。在厌氧/缺氧环境中,微生物催化反硝化、硫酸盐还原、甲烷生成、铁锰还原等还原反应,可去除硝酸盐氮、产生硫化物、生成甲烷,同时影响铁锰离子形态及地下水水质;在有氧/弱氧化环境中,催化硝化、硫化物氧化、铁锰氧化等氧化反应,影响氮素形态、改善地下水异味,同时可能导致管道结垢。

(3) 元素生物地球化学循环:微生物参与并调控碳、氮、硫、铁、锰、砷等关键元素的循环,连接各圈层元素迁移转化[14]。碳循环中,微生物实现有机碳与无机碳的相互转化,参与全球碳平衡;氮循环中,微生物参与固氮、氨化、硝化、反硝化等所有关键过程,维持地下水氮素平衡;硫循环中,通过氧化还原

转化硫的形态,影响地下水化学性质及重金属行为;铁、锰、砷循环中,微生物通过形态转化改变其溶解度、迁移性和毒性,与地下水水质安全密切相关[15]。为了更直观地展示微生物在地下水系统中的作用,本文构建了“地下水微生物参与的生物地球化学循环概念模型图”(图 1)。该图示意了碳、氮、硫等元素在地下水-岩石-微生物界面上的转化过程,突出微生物作为反应催化剂的核心地位,并展示了不同氧化还原带中微生物功能群的空间分布特征。

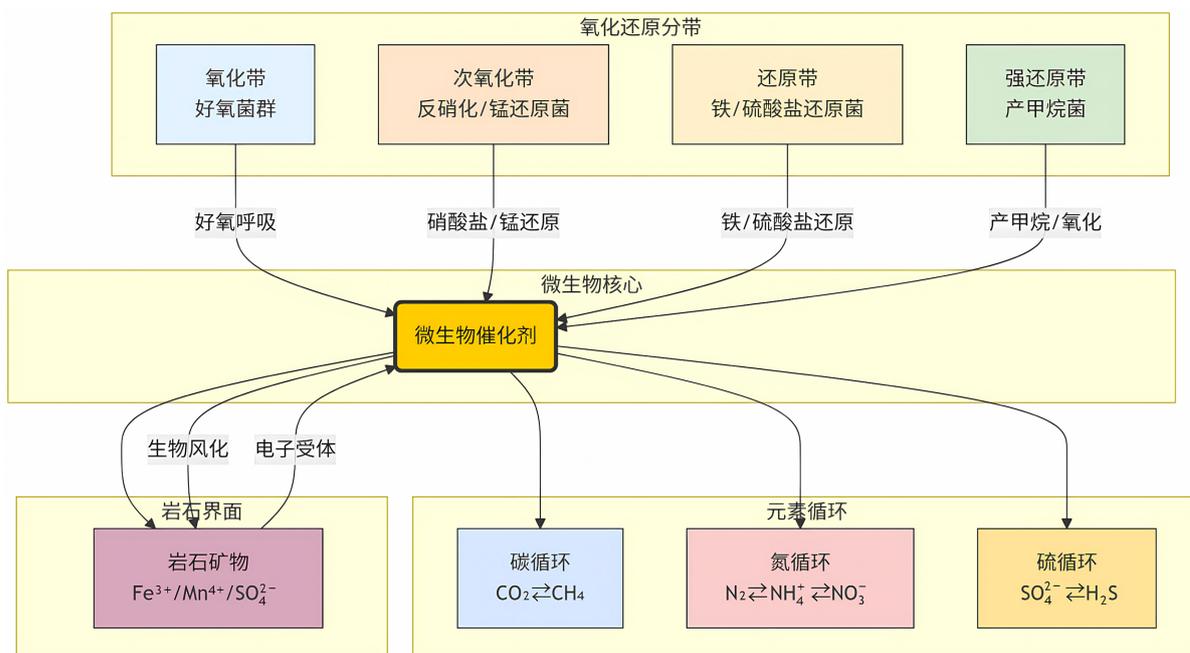


Figure 1. Conceptual model of biogeochemical cycles involving microorganisms in groundwater

图 1. 地下水微生物参与的生物地球化学循环概念模型图

#### (4) 微生物与环境因子的相互作用机制及特殊环境下的微生物特征

微生物与环境因子存在紧密相互作用,环境驱动因素直接调控微生物分布、丰度及群落结构:溶解氧(DO)决定好氧/厌氧菌群的空间分布;TOC含量影响微生物丰度与代谢活性;水动力条件(流速、滞留时间)则调控微生物群落结构演替。微生物对环境变化具有明确响应:农业氮肥、工业废水等污染输入会导致其群落结构剧变[16];地下水水位波动引发的周期性氧化还原交替,会塑造功能菌群的时空动态。特殊环境中的微生物具有独特适应特征:深部地下水微生物呈低营养、高压、低代谢率及古老演化特征;极端环境(高盐、高温、高pH)微生物拥有相应功能适应机制;含水层介质(砂岩、裂隙、黏土)则影响微生物的附着与传播。

### 3. 地下水中微生物的环境意义与应用前景

微生物与环境因子紧密作用,DO决定好氧/厌氧菌群分布,TOC影响其丰度与活性,水动力条件调控群落演替。

微生物对环境变化有明确响应:污染输入致群落剧变,地下水水位波动塑造功能菌群动态。

特殊环境微生物有独特适应性:深部地下水微生物低营养、高压、低代谢且古老;极端环境微生物有适应机制;含水层介质影响其附着与传播。

地下水中微生物意义重大、应用广泛。生态上维持地下水稳定与自净,连接水-岩-生作用;指示

上,反硝化菌可标志氮污染,群落变化反映水文地质扰动或污染。

污染治理中,原位生物修复可降解有机污染物、强化净化,生物屏障阻截污染羽;资源领域,深部微生物参与非常规能源相关气体生成,MICP技术可用于含水层封堵或CO<sub>2</sub>封存。

然而,原位生物修复在实际工程应用中存在显著局限。例如,微生物过量繁殖可能引发严重的生物堵塞效应,降低含水层渗透性,导致修复效率下降;电子受体(如氧气、硝酸盐)的快速耗尽则限制了降解过程的持续性。针对微生物过量繁殖引发的生物堵塞问题,目前主要从预防、杀灭和治理三个层面进行解决。在预防阶段,可通过优化滤料孔隙尺寸和涂刷含杀菌成分的防腐涂料,从设计源头降低生物堵塞风险,并利用微生物生长动力学模型提前预测堵塞发生时间。在杀灭控制方面,可定期投加低浓度杀菌剂,在控制微生物过度繁殖的同时避免完全杀死功能菌群。在运行维护阶段,主要采用水动力冲刷剥离生物膜、投加氧化剂或酸碱调节剂溶解胞外聚合物,以及通过调控营养物质供给诱导生物膜老化脱附等组合技术,恢复含水层渗透性,保障修复效率。针对电子受体耗尽问题,可以采用直接注入(如曝气补充氧气)或缓释材料(如过硫酸钠缓释体)为微生物持续提供电子受体。

饮用水安全上,病原微生物检出警示地下水污染,生物膜可能造成供水堵塞或二次污染[17]-[20]。

为系统总结近年来地下水微生物研究的主要成果[1] [2] [8],本文整理了“代表性研究案例总结表”(表1),归纳了不同区域、不同研究方法、关键发现及关键环境因子,为后续研究提供参考。

**Table 1.** Summary of representative research cases on groundwater microorganisms

**表 1.** 地下水微生物代表性研究案例归纳总结表

研究区域	研究方法	主要发现	关键环境因子
干旱区含氟地下水	16s RNA 高通量测序技术	氟含量对细菌群落的丰富度和多样性指数影响较小,但对群落结构组成影响显著。不同氟含量组间的细菌群落结构存在显著差异。	F <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
黄河三角洲	宏基因组测序、同位素示踪、水化学分析	水中微生物以细菌为主,古菌次之,群落结构随盐度梯度发生显著演替,细菌群落对盐度变化更为敏感,古菌则表现出更强的耐盐适应性。	TDS, SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Fe <sup>2+</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
淮北煤田	16S rRNA 基因 V4 区测序方法	淮北煤田深层煤系水和太灰水具有显著不同的微生物群落结构(包括多样性和优势菌群),这种差异为利用微生物指标识别煤矿涌(突)水水源提供了新的可行方法。	F <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> , ORP, TOC, pH, NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>

#### 4. 研究挑战与未来展望

当前地下水微生物研究存在诸多局限:多数研究依赖培养方法,难以反映微生物真实群落结构;宏基因组等新技术应用尚处于起步阶段,数据解读缺乏统一标准;实验室模拟条件与野外实际环境存在明显尺度差异,导致研究结果难以直接迁移应用。针对上述局限,未来研究可从三方面推进:发展宏基因组、宏转录组、宏蛋白组多组学融合策略,精准解析微生物功能活性;加强长期定位观测,开展跨区域对比研究,提升研究的普遍性与实用性;构建“微生物-水文-地球化学”耦合研究体系,系统揭示三者间的内在关联与协同作用机制。

#### 基金项目

安徽省大学生创新创业项目(淮北煤田浅层地下水的微生物特征, S202510379065);安徽省现代产业学院项目(宿州学院地质勘查与智慧矿山产业学院, 2024xdcy023);宿州学院新建专业质量提升项目(勘查

技术与工程, szxy2023xjzj02); 宿州学院教学创新团队项目(资源勘查学教学创新团队, szxy2024cxttd05); 宿州学院质量工程项目结余经费资助项目(基于教研信息化背景下的教师教学能力提升策略探究, szxy2025jyjf47)。

## 参考文献

- [1] 支传顺, 胡晓农, 白晶, 等. 黄河三角洲高盐地下水中微生物群落结构与环境驱动机制[J]. 地学前缘, 2026, 33(1): 95-105.
- [2] 陈家玉, 桂和荣, 郭艳, 等. 淮北煤田深层地下水微生物群落特征及其水源示踪意义[J]. 煤炭学报, 2023, 48(9): 3503-3512.
- [3] 田邵良. 基于原位微生物修复技术降解地下水有机污染物的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2025.
- [4] 孙瑞, 殷瑶. 缺氧地下水中石油烃类去除的原位生物修复[J]. 净水技术, 2021, 40(7): 12-20.
- [5] 高国宏, 阮梦颖, 郝英豪, 等. 矿区深层地下水微生物群落特征[J]. 煤炭工程, 2024, 56(S1): 163-170.
- [6] 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.
- [7] 张海燕, 彭彤彤, 温玉娟, 等. 五大连池药泉山矿泉微生物多样性及其地质和环境控制特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(3): 815-826.
- [8] 李玲, 范廷玉, 周金龙, 等. 干旱区含氟地下水微生物群落特征及其环境响应[J]. 中国环境科学, 2026, 46(1): 354-364.
- [9] 胡南, 刘晶晶, 马建洪, 等. 微生物群落修复酸化地浸采铀矿山退役采区地下水[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(6): 2031-2042.
- [10] 韦雨杰, 姜伟男, 沈晓芳, 等. 基于高通量测序的 Cr(VI)污染地下水中微生物群落结构和基因表达[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(3): 318-326.
- [11] 戴恒, 吴慧娴, 任婉立, 等. 微生物介导的地下水生物地球化学过程数值模拟研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 14-27.
- [12] 王鹏, 柏耀辉, 毛冠男, 等. 膜组合工艺对地下水中铀的去除及其微生物群落特征[J]. 环境科学学报, 2021, 41(2): 469-476.
- [13] 杨襍凡, 徐智敏, 陈歌, 等. 南方煤矿矿井水水化学特征及生物组合修复研究[J]. 能源与环保, 2025, 47(11): 42-50.
- [14] 於昊天, 马腾, 邓娅敏, 等. 江汉平原东部地区浅层地下水水化学特征[J]. 地球科学, 2017, 42(5): 685-692.
- [15] 谢定昇, 李梦娣, 张翠霞, 等. 天津滨海地区不同碘化物浓度地下水微生物群落结构特征[J]. 水文地质工程地质, 2026, 53(1): 263-276.
- [16] 郭子宁, 王旭升, 向师正, 等. 再生水入渗区典型抗生素分布特征与地下水微生物群落影响因素研究[J]. 岩矿测试, 2022, 41(3): 451-462.
- [17] 关川, 童蕾, 秦丽婷, 等. 洪湖养殖区水环境中微生物的耐药性及其群落功能多样性研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(8): 1748-1757.
- [18] 李泽岩, 曹文庚, 王卓然, 等. 内蒙古河套灌区浅层地下水化学特征和灌溉适宜性分析[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 418-426.
- [19] 吴慧君, 宋权威, 杜显元, 等. 某石化厂区土壤和地下水微生物群落结构特征[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(S2): 34-41.
- [20] 朱子超, 刘慧, 毛胜军, 等. 河水-地下水侧向交互带微生物群落分布特征及其主控因子[J]. 地球科学, 2023, 48(10): 3832-3843.