

https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.033



河水—地下水交互带铁循环的微生物指示物—FMN 还原酶基因

黄莹芸¹, 沈俊豪¹, 朱子超¹, 毛胜军¹, 刘慧^{1,2*}

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430078

摘要: 黄素类还原酶(FMN 还原酶)是微生物分泌电子穿梭体引导铁氧化还原的重要酶。为探讨 FMN 还原酶基因作为铁循环微生物指示物的可行性,以汉江下游河水—地下水交互带为研究区,研究了 3 个不同特点的河水—地下水交互带剖面沉积物中不同价态 Fe 浓度、代表性铁循环微生物和 FMN 还原酶基因相对丰度的分布相关性。结果表明:(1)在离河较近的地下水位以下区域聚积 Fe(II),而 Fe(III)主要聚集在地下水位线上或离河较远的区域;(2)铁循环微生物和 FMN 还原酶主要分布在近河岸地下水位线下的区域或水位线的周围,不同的铁循环微生物聚集的区域不同;(3)铁循环微生物总丰度 ICB 与 FMN 还原酶基因呈现出极显著的正相关。该研究结果表明 FMN 还原酶基因可以作为交互带铁循环的微生物指示物。

关键词: 交互带;不同价态铁;铁循环微生物;FMN 还原酶;水文地质学;地球化学。

中图分类号: P593

文章编号: 1000-2383(2025)04-1575-10

收稿日期: 2024-01-02

Microbial Indicator of Iron Cycling in Riverwater-Groundwater Interaction Zone - FMN Reductase Gene

Huang Yingyun¹, Sheng Junhao¹, Zhu Zichao¹, Mao Shengjun¹, Liu Hui^{1,2*}

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

Abstract: Flavin mononucleotide (FMN) reductases are important enzymes secreted by microorganisms to facilitate iron oxidation and reduction through electron transfer. In order to explore the feasibility of using FMN reductase genes as indicators of iron cycling microbes, in this study it focused on the interaction zone at the lower reaches of Han River as the research area. In the study it investigated the distributional correlations of different forms Fe, representative iron-cycling microorganisms, and the relative abundance of FMN reductase genes in sediments from three differently characterized riverwater-groundwater interaction zone profiles. The results indicate that (1) Fe(II) accumulates in the area below the water table closer to the river, while Fe(III) mainly accumulates in the area at the water table line or farther away from the river; (2) iron cycling microbes and FMN reductases were

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41830862).

作者简介: 黄莹芸(1999-),女,硕士研究生,主要研究方向为河水—地下水交互带中铁的生物转化。ORCID: 0009-0004-1386-004X.
E-mail: 1968761667@qq.com

* **通讯作者:** 刘慧, ORCID: 0000-0002-1080-0883, E-mail: hliu2009@cug.edu.cn

引用格式: 黄莹芸, 沈俊豪, 朱子超, 毛胜军, 刘慧, 2025. 河水—地下水交互带铁循环的微生物指示物—FMN 还原酶基因. 地球科学, 50(4): 1575-1584.

Citation: Huang Yingyun, Sheng Junhao, Zhu Zichao, Mao Shengjun, Liu Hui, 2025. Microbial Indicator of Iron Cycling in Riverwater-Groundwater Interaction Zone-FMN Reductase Gene. *Earth Science*, 50(4): 1575-1584.

mainly distributed in the areas below the groundwater level close to the river bank or around the water level, with different areas of aggregation for different iron cycling bacteria; (3) there was a significant positive correlation between the total abundance of iron cycling microbes and FMN reductase genes. These findings validate the feasibility of using FMN reductase genes as indicators of iron cycling microbes.

Key words: interactive zone; different forms of iron; iron cycling microorganism; FMN reductase; hydrogeology; geochemistry.

0 引言

河水—地下水交互带是指河水与地下水相互交换和混合的区域(Liu and Chui, 2019),河水与地下水之间存在温度(T)、溶解氧(DO)、氧化—还原电位(Eh)、酸碱度(pH)、有机质、微生物、水化学组分等差异(Krause *et al.*, 2011),因此河水与地下水混合形成的交互带存在陡峭的化学和生物梯度(Sackett *et al.*, 2019).同时交互带的沉积物也为微生物提供了一个合适的栖息地(Maazouzi *et al.*, 2017).河水与地下水两者交互会发生一系列生物地球化学过程,如C、N、P、Fe和Mn等元素的循环及污染物的降解净化(苏小四等, 2019; 曹意茹等, 2021).前人对于河流交互带区域,已经开展了许多研究工作,主要集中在交互过程引起的元素循环和代谢及污染物的迁移转化(郭伟强等, 2018; 马腾等, 2020; Hou *et al.*, 2020)以及沉积物对污染物的去除(Gandy *et al.*, 2007).近些年来,以侧向交互带为主要对象的研究也在逐渐增加,主要涉及河岸地貌对交互带的影响(Kasahara and Hill, 2007)及交互流的同位素特征等方面(Mendoza-Sanchez *et al.*, 2013; Engelhardt *et al.*, 2014).

Fe具有十分活泼的化学性质,广泛存在于交互带环境中.Fe循环通常会耦合其他元素的循环(Li *et al.*, 2012; Melton *et al.*, 2014),例如,有研究证明了地下水—湖水交互带中铁的氧化还原会对磷固定和释放产生影响,这也证明了Fe的氧化还原过程是沉积物对污染物固定和释放的重要驱动力(武显仓, 2022),所以研究交互带中Fe的转化对认识整个交互带中复杂的生物地球化学反应尤为重要.本课题组前期研究发现,离河较近的微生物多样性高的区域相对好氧,主要富集氧化态的Fe(III),而河水与地下水交互边缘区域微生物多样性低,并且河水—地下水交互带可能主要通过影响DO以及TOC的分布(Lee *et al.*, 2012; Stegen *et al.*, 2018)进而影响微生物群落结构(朱子超等, 2023),那么交互带剖面上不同浓度的DO以及TOC可能会影响不同价态铁及铁循环微生物的分布.

然而,目前对于铁的氧化还原尚未确定相关的微生物功能基因,因此铁循环功能微生物的研究存在很大的局限性.黄素类电子穿梭体(如FMN)引导的电子穿梭机制在铁转化中有着重要的地位(Marsili *et al.*, 2008; Brutinel and Gralnick, 2012),其FMN还原酶是一类以FMN为辅基的黄素还原酶,催化FMN成为还原态FMNH₂或FADH₂,参与铁还原过程,因此FMN还原酶与铁生物的还原过程循环息息相关(Hlavica, 2015).由此,FMN还原酶基因有望成为指示铁循环功能微生物的指示物.

为了验证以上科学假说,本文以汉江下游作为研究区,选择了具有不同交互特点的3个剖面,通过采集剖面上离河岸不同距离、不同深度的土壤—沉积物样品,采用邻菲罗啉显色法测定沉积物中Fe(II)和Fe(III)的浓度,qPCR(实时荧光定量PCR)定量分析代表性铁循环微生物的16S rRNA基因和FMN还原酶基因的相对丰度,研究不同交互环境下不同价态Fe、铁循环功能微生物与FMN还原酶基因的空间分布特性,并分析三者之间的相关性,以探讨FMN还原酶基因作为铁循环微生物指示物的可行性.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于湖北省中部的天门市多宝镇白龙泉新村附近,地处汉江下游,降雨量充沛,集中在夏季,属于典型的亚热带季风气候.江汉平原西、北、东三面环山,河网密布且湖泊众多,是典型的河湖相沉积平原(马奥兰等, 2022),地下水位埋深较浅,一般为1~2 m(蓝坤等, 2020).该区域孔隙潜水主要接受平原区降水入渗补给和江河湖泊渗漏补给(Ma *et al.*, 2023).研究区河段上游建有大型水利工程兴隆大坝,中段与引江济汉工程交汇,受自然地形条件和大型水利工程的影响,该区域河水与地下水交互作用强烈.有研究表明大型水坝可以改变河流的水动力,引起河段波动,从而有可能影响河流和地下水之间交换(Li *et al.*, 2023).

综合考虑不同河水与地下水的交互特点及大型水利工程的影响,在研究区河段的上中下游垂直河流方向上分别设置了3个采样剖面:一号剖面(PM01)处于兴隆大坝上游,大坝的蓄水作用致使该处河水水位高于地下水水位,进而河水长期补给地下水;二号剖面(PM02)位于兴隆大坝下游至引江济汉工程交汇口之间,受大坝长期蓄水的影响,主要为地下水排泄河水;三号剖面(PM03)位于引江济汉工程交汇口之下,会受到兴隆大坝和引江济汉工程的共同影响,河水和地下水的补排关系随时间变化而变化,交互比较频繁.当兴隆坝和引长江工程大坝不定期开闸放水时,PM02和PM03的3-1至3-3点将被淹没.3个剖面的沉积物组成差异较大,研究区域的河水与地下水的水流场及水文地质剖面见文献(Ma *et al.*, 2023),研究发现大坝上游和下游的交互带中分别有河水的持续补给和地下水的持续排泄,大坝对上游的影响比下游的影响更明显,因为下游地下水补给模式似乎主要由波动河段的动态控制,该区域河详细的水与地下水动态补给过程见文献(Li *et al.*, 2023).

1.2 样品采集与保存

样品采集时间为2019年12月,处于汉江枯水期,地表水位较低.使用手持钻机在PM01和PM02各采集5根沉积柱,PM03采集4根沉积柱,每1 m取一个样品,在地下水位线附近加密取样.具体采样点位、深度及对应编号如图1所示.采集沉积物样品时,钻机取出原位沉积柱样品(33 mm×1 m的塑料套管)后两端立即使用保鲜膜、橡胶塞和透明胶带封闭,外面包上一层锡箔纸避光,低温运输至实验室,并在厌氧手套箱内将样品分装到厌氧袋后,抽真空,置于-80 °C冰箱内冷冻保存待用.用于理化指标分析的样品经风干,研磨,过100目筛待用.

1.3 样品测定

样品DNA提取:(1)DNA提取与保存:取0.4 g沉积物采用土样DNA提取试剂盒(Power Soil®DNA)提取DNA.剩余DNA模板在-80 °C下保存待用.(2)DNA质量检测:采用NanoDrop紫外分光光度计测定DNA的浓度及纯度.DNA浓度大于10 ng/L且OD_{260/280}为1.8~2.0的样品进行后面分析.

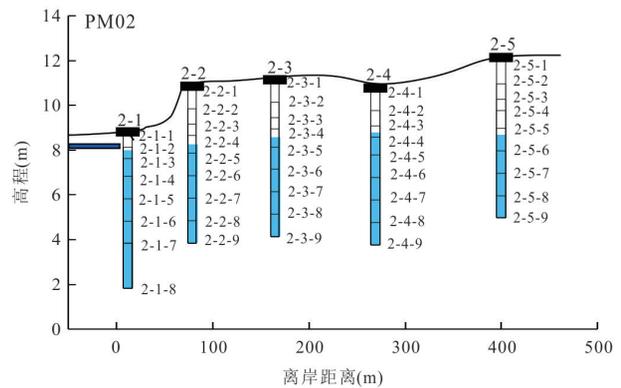
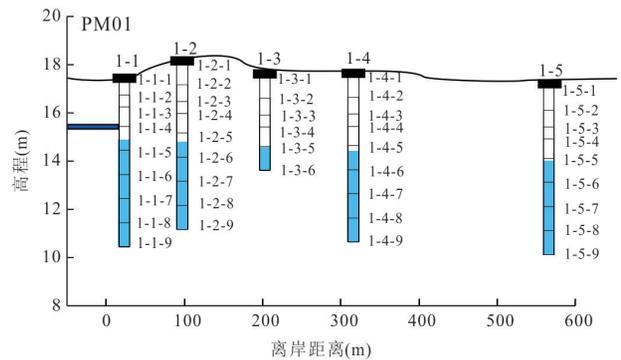
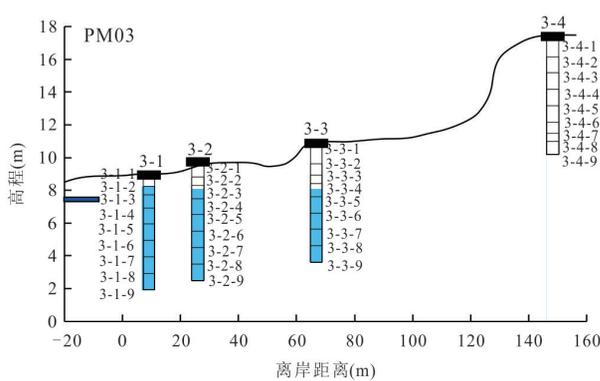


图1 研究区及采样点分布

Fig. 1 Distribution of study area and sampling points

右图蓝色分别代表河水和地下水水位,红色为点位,线段标号为取样点的位置

本研究中以 16S rRNA 总量为内参基因,以其他功能基因为目的基因,应用相对定量法($\Delta\Delta\text{CT}$ 法)处理数据.实验试剂:PowerUp™ SYBR™ Green 预混液(Applied Biosystems™);实验仪器:荧光定量检测仪(QuantStudio 3, Applied Biosystems)及离心机(FLX800T, BioTek).首先通过筛选及测试得到合适的功能基因引物条件(表 1),其次,采用提取的样品 DNA 为模板,每个样品做 3 个复孔,测定内参基因和功能基因的 Ct 值,根据方法计算得到功能基因的表达式.

由于铁转化没有明确的功能基因,选择了具有代表性的四株铁循环功能微生物的 16S rRNA 基因作为代表,其中包括:铁还原菌:地杆菌属 *Geobacter* spp.,革兰氏阴性严格厌氧微生物,是一类广泛分布于水体沉积物、土壤和多种地下厌氧环境中的异化铁还原菌(马雍基等, 2022);铁还原菌:红育菌属 *Rhodospirillum* spp.,有文献报道该菌属可以在厌氧条件下还原 Fe(III)(Kato and Ohkuma, 2021);铁还原菌:厌氧粘细菌属 *Anaeromyxobacter* spp.,是一种典型的异化铁还原菌属(Wang *et al.*, 2020);铁氧化菌:披毛菌属 *Gallionella* spp.,在中性 pH、微氧环境中参与铁氧化的细菌(Eggerichs *et al.*, 2014).

Fe(II)和 Fe(III)使用硫酸和氢氟酸浸提后用邻菲罗啉显色法测定.所有的提取实验都进行了 3 次,每个样品测试 3 次,结果取平均值.

1.4 数据分析

使用 coreldraw 2020 绘制交互带沉积物 Fe 含量分布图和交互带沉积物铁循环功能微生物相对丰度及 FMN 还原酶基因相对丰度分布图,使用 IBM SPSS(Version R24.0.0.0)完成铁、铁循环功能微生物与 FMN 还原酶相对丰度的相关性分析,数据采用平均数.

2 结果与讨论

2.1 交互带中不同价态 Fe 含量的分布特征

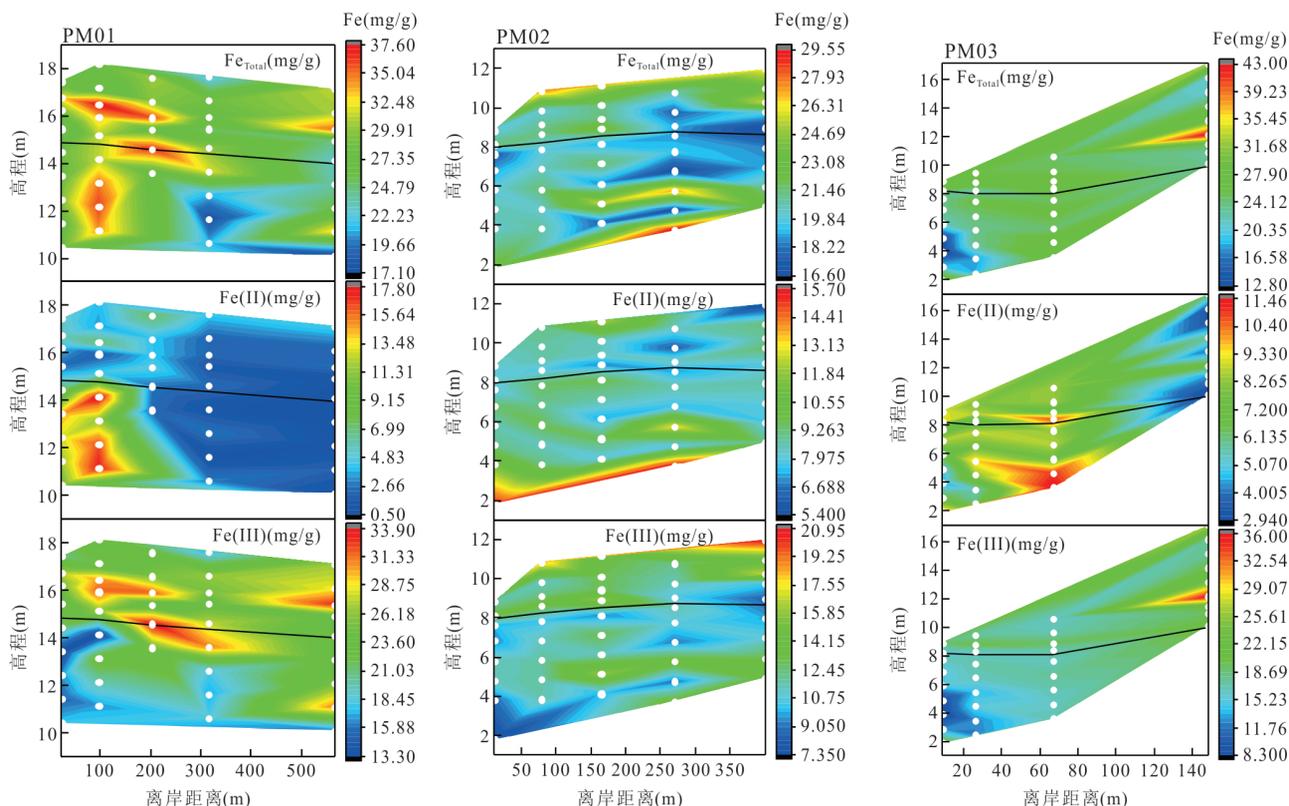
3 个不同特点的剖面沉积物的 Fe_{Total} 、Fe(II)及 Fe(III)含量的分布特征如图 2 所示.

河水和地下水的流向是由两种水的高程差决定的,分析该区域的地下水位及河水水位可知,PM01 主要为河水补给地下水;PM02 的交互作用主要受大坝的影响,以地下水排泄河水为主,剖面上地势较平坦,水力交换较平稳;PM03 受到大坝及引江济汉工程的共同影响,且剖面上的高差较大,地下水排泄河水的水力交换强于 PM02. 如图所示,PM01 中地下水位线之上主要累积 Fe(III),此处出现 Fe(III)最高浓度为 33.90 mg/g;Fe(II)在离河较近的地下水位线以下区域出现 Fe(II)最高浓度为 17.80 mg/g.PM02 的 Fe(III)聚集在远离河岸的地方,Fe(III)最高浓度 20.95 mg/g;离河较近水位线最下层为 Fe(II)的聚集区域,Fe(II)最高浓度为 15.70 mg/g.PM03 在远离河岸的地下水位上层区域出现 Fe(III)的累积,Fe(III)最高浓度 36.00 mg/g;

表 1 相关功能基因引物条件

Table 1 Primers of related functional genes

基因	(英文名)	引物	碱基组成(5'-3')	退火温度 (°C)	引物浓度 (nmol/L)
16S rRNA		F	CCTACGGGAGGCAGCAG	59	250
		R	TTACCGCGGCTGCTGGCAC		
红育菌属	<i>Rhodospirillum</i> spp.	F	CGATTGGAGCGCCGATAT	57	750
		R	CCAGTTGACATCGTTTAGGG		
地杆菌科	<i>Geobacteraceae</i> spp.	F	AAGCGTTGTTCCGAWTTAT	57	750
		R	GGTATGGCTGGATCAGGC		
厌氧粘细菌	<i>Anaeromyxobacter</i> spp.	F	GCAACGCCCGTGTGT	57	750
		R	TCCCTCGCGACAGTGCTT		
披毛菌属	<i>Gallionella</i> spp.	F	ATATCGGAACATATCCGGAAGT	57	750
		R	GGTATGGCTGGATCAGGC		
FMN 还原酶	FMN Reductase	F	CGCACGACATCACGAACA	57	500
		R	GCATGCAGGTAGGCGAACA		

图2 交互带中 Fe_{Total} 、 $Fe(II)$ 及 $Fe(III)$ 的空间分布特征Fig. 2 Spatial distribution characteristics of Fe_{Total} , $Fe(II)$ and $Fe(III)$ in the interaction zone

黑色线为地下水位线,空心圆为采样位置

$Fe(II)$ 在靠近河岸的地下水位上层区域线附近聚集,此区 $Fe(II)$ 的最高浓度 11.46 mg/g .该分布规律与2019年9月的结果一致(Lu *et al.*, 2022).由于 $Fe(II)$ 比 $Fe(III)$ 更容易随水流迁移, $Fe(II)/Fe(III)$ 的氧化还原转化可能会进一步影响 Fe 形态的分布,因此铁的分布和转化与河岸带的水动力过程密切相关(Lueder *et al.*, 2020).在本研究区铁的分布特征人有详细的研究,铁的分布特征与兴隆大坝造成的沉积过程和水动力过程有关,其上游以河水补给地下水为主,导致富铁的微小颗粒沉积,富氧的河水与溶解性有机质侵入含水层,有机质大量分解形成的 CO_2 造成碳酸盐结合态 $Fe(II)$ 聚积;下游以地下水排泄河水为主,造成微小颗粒侵蚀流失,以细砂为主,因此 $Fe(II)$ 聚积在较深的部位(Lu *et al.*, 2022).

2.2 交互带中铁循环功能微生物的分布特征

4种代表性的铁循环微生物16S rRNA的相对丰度的结果如图3所示.铁循环微生物(ICB)在坝上游PM01主要分布在地下水位线下近河岸的区域,在坝下的PM02和PM03剖面上主要聚集在靠近河岸区域中地下水位线的周围.在PM01中,铁氧

化菌 *Gallionella* spp. 主要分布在剖面中较深的位置,在地下水位线最靠近河岸带处的基因表达量最高;铁还原功能微生物 *Anaeromyxobacter* spp. 与 *Geobacter* spp. 分布情况与 *Gallionella* spp. 类似,在最靠近河岸的深处基因表达量最高; *Rhodospirillum rubrum* spp. 在剖面上分布较广泛,在地下水位线以上靠近河岸带处基因表达量较高.在PM02中, *Gallionella* spp. 主要分布在地下水位线附近; *Anaeromyxobacter* spp. 在剖面上分布较为均匀; *Geobacter* spp. 在剖面近河岸带地下水位较深的区域表达量较高; *Rhodospirillum rubrum* spp. 主要集中在最靠近河岸的地下水位线附近处.在PM03中,4种微生物的分布较为集中, *Gallionella* spp. 聚集在靠近河岸的地下水位线附近; *Anaeromyxobacter* spp. 在靠近河岸的最深处基因表达量最高; *Geobacter* spp. 聚集在两个位置,最靠近河岸的地表处以及剖面中部的最深处; *Rhodospirillum rubrum* spp. 主要分布在近河岸的地表处.有研究通过野外示踪实验、室内吸附实验和数值模拟发现,地表水与地下水交互的过程会使得沉积物中微生物含量增加(Harvey and Fuller, 1998),并且由于大坝的影响,该区域内水力交换的特点为流道长度短

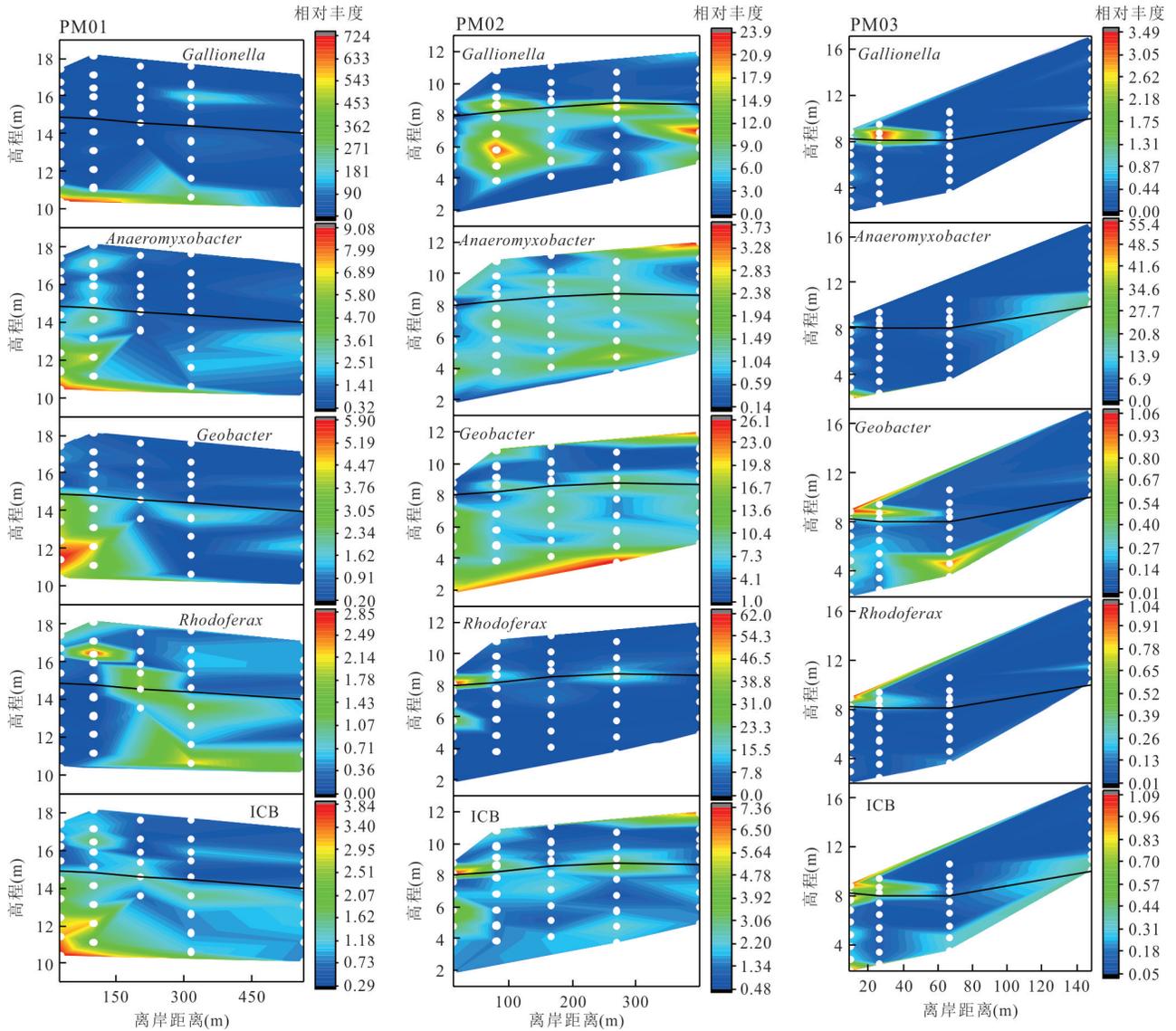


图3 交互带中四株代表性铁循环微生物功能基因的空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution characteristics of functional genes of four representative iron-circulating microorganisms in the interaction zone

ICB为4种铁循环微生物的总丰度;黑色线为地下水位线,空心圆为采样位置

及流速大(Li *et al.*, 2023),因此在3个剖面中铁循环功能微生物多数聚集在最靠近河岸带的交互区域。

为了探究不同交互环境铁循环功能微生物的空间分布特征的根本原因,结合不同菌株的特性与河水地下水的动态补排过程,综合分析了铁循环微生物在3个剖面的分布特征的差异.研究发现了两个较明显的差异:其一铁还原功能微生物 *Rhodoferrax* spp. 不同于其他两种铁还原功能微生物的分布特征,它不仅分布于地下水位线下部的厌氧环境中,还常富集在水位线附近,这可能是 *Rhodoferrax* spp. 不仅可以在厌氧环境中还原铁,还可以在微氧

环境中自生长的原因(Kato and Ohkuma, 2021). 其二是铁氧化菌 *Gallionella* spp. 在3个剖面的分布特征有明显不同 *Gallionella* spp. 在PM01中聚集靠近河岸带的较深层的沉积物中,在PM02分布在整个剖面上的地下水位线附近,在PM03中菌株聚集在靠近河岸的地下水位线附近.其原因可能与河水与地下水动态补排方向及交互通量有关:在PM01上主要河水补给地下水,河水中较高的溶解氧会使剖面中氧气浓度增高,但该区域的河流入侵只会到达部分区(Lu *et al.*, 2022),研究表明 *Gallionella* spp. 趋向于在低氧浓度生存(Eggerichs *et al.*, 2014),因 *Gallionella* spp. 倾向于地下水位线下的

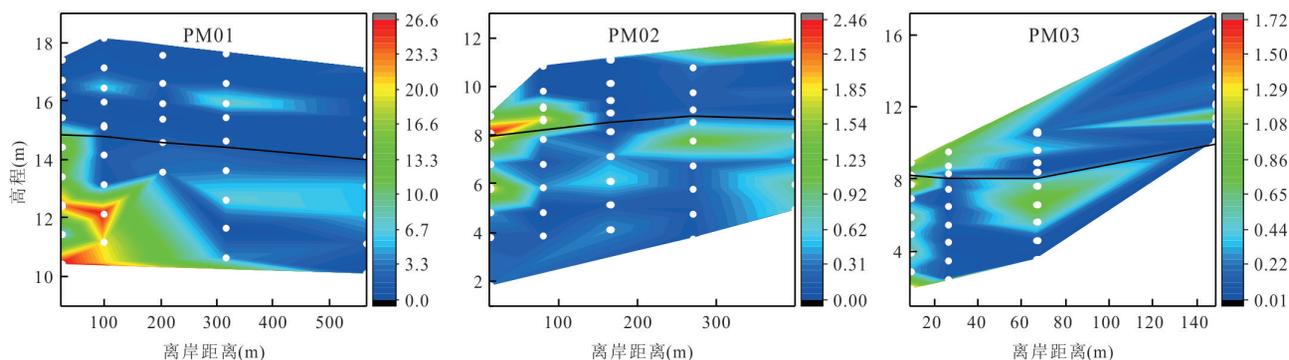


图4 交互带中FMN还原酶基因空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of FMN reductase gene in the interaction zone

黑色线为地下水位线,空心圆为采样位置

氧气浓度较低的环境;在PM02中主要是地下水往河水排泄,地下水的氧化还原条件相对稳定,并且该剖面地势较平坦,水力交换的流速较平稳,因此菌株分布在整个剖面地下水位线附近的微氧环境中;在PM03中河水地下水交互比较频繁,该时段主要是地下水往河水排泄,由于地势高差较大,因此地下水向河水排泄通量较大,即使在河水补给地下水时,河水难以到达3~4处,该剖面上铁循环微生物大多聚集靠近河岸带的区域,因此 *Gallionella* spp. 在菌株聚集在靠近河岸带的地下水位线附近的微氧区域。

2.3 交互带中FMN还原酶基因的分布特征

通过 *q*PCR 定量分析了FMN还原酶基因在3个剖面上的相对丰度,结果如图4所示。在PM01中,FMN还原酶在近河岸带地下水位线下部区域的基因表达量最高;在PM02中,FMN还原酶在近河岸处的地下水位线附近的基因表达量最高;在PM03中,FMN还原分布较广泛,主要分布在在河岸的附近以及地下水位线周围。

2.4 不同价态铁含量-铁循环功能微生物-FMN还原酶基因的分布相关性

对交互带3个剖面中的 Fe_{Total} 、 $Fe(II)$ 及 $Fe(III)$ 的含量、铁循环功能微生物及FMN还原酶基因的相对丰度分别进行相关性分析,结果如图5所示。3个剖面中, Fe_{Total} 与铁循环微生物和FMN还原酶基因丰度均不存在显著的相关性,而 $Fe(II)$ 及 $Fe(III)$ 与铁循环微生物和FMN还原酶基因丰度存在显著的相关性,该相关性在坝上游的PM01中强于在坝下的PM02和PM03中,说明在实际的交互带环境中铁的转化受铁循环微生物及其分泌的FMN还原酶调控,且坝下河水—地下水的频繁交

互对铁循环微生物的分布及其铁转化功能有很强的扰动。3个剖面中,铁循环微生物总丰度ICB与FMN还原酶基因呈现出极显著的正相关性,说明FMN还原酶基因能够指示铁循环微生物的总丰度。其中,铁氧化菌 *Gallionella* spp.、铁还原菌 *Anaeromyxobacter* spp. 和 *Geobacter* spp. 在PM01中与FMN还原酶存在极显著的正相关,铁还原菌 *Rhodospirillum rubrum* spp. 则在坝下的PM02和PM03剖面中与FMN还原酶呈现显著的正相关。这些结果表明,虽然在河水—地下水交互带不同区域铁的氧化和还原功能微生物随交互环境而变化,但铁循环微生物的总丰度与FMN还原酶基因之间一直呈现极显著的正相关性。因此,FMN还原酶基因可以作为河水—地下水交互带铁循环的微生物指示物。

3 结论与展望

为了验证FMN还原酶基因作为交互带铁循环微生物指示物的可行性,本研究选择3个不同交互环境剖面,采集了剖面上的沉积物样品,测定沉积物中 Fe_{Total} 、 $Fe(II)$ 和 $Fe(III)$ 的含量及代表性铁循环微生物和FMN还原酶基因的相对丰度,分析在剖面上的二维分布特性,并探究了三者分布特征的相关性。研究表明:(1)3个剖面均在离河较近的地下水位线以下区域聚积 $Fe(II)$,而 $Fe(III)$ 主要聚集在地下水位线上或离河较远的区域;(2)铁循环微生物主要分布在坝上游PM01的地下水位线下近河岸的区域,在坝下的PM02和PM03剖面上主要分布在靠近河岸区域中地下水位线的周围,不同的铁氧化还原菌聚集的区域不同;(3)FMN还原酶聚集在靠近河岸带的地下水位线下部区域或水位线周围;(4)3个剖面中, $Fe(II)$ 及 $Fe(III)$ 与铁循环微生

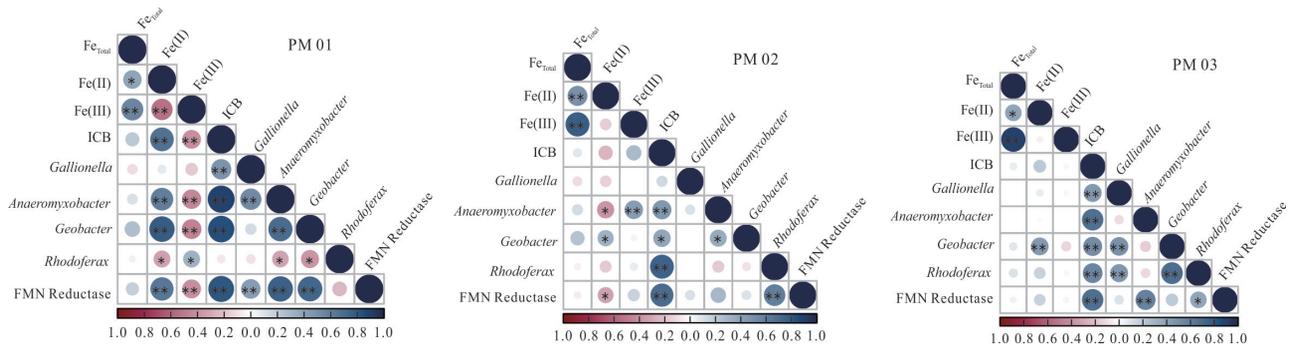


图5 交互带中 Fe 浓度、各铁循环微生物丰度及 FMN 还原酶基因丰度之间的相关系数

Fig. 5 Correlation coefficients between Fe concentrations, the abundance of iron cycle microorganisms, and the abundance of FMN reductase genes in the interaction zone

**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著; *表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著

物和 FMN 还原酶基因丰度存在显著的相关性,铁循环微生物总丰度 ICB 与 FMN 还原酶呈现出极显著的正相关性,其中,铁氧化菌 *Gallionella* spp.、铁还原菌 *Anaeromyxobacter* spp. 和 *Geobacter* spp. 在坝上游河水补给地下水为主的 PM01 中与 FMN 还原酶存在极显著的正相关,铁还原菌 *Rhodoferrax* spp. 则在坝下以地下水排泄河水为主且河水—地下水频繁交互的 PM02 和 PM03 剖面中与 FMN 还原酶呈现显著的正相关。

本研究阐明了交互带中不同价态 Fe 含量、铁循环功能微生物与 FMN 还原酶的空间分布特征,建立了三者之间的相互关系,并表明该关系受河水—地下水交互作用的调控. 该研究结果为河水—地下水交互带中铁的价态分布及其代表性铁循环功能微生物之间的关系提供了有力的野外证据,验证了 FMN 还原酶作为铁循环微生物指示物的可行性. 河水—地下水交互带是地球关键带中重要的氧化—还原界面,是铁的生物地球化学大循环及其驱动的元素与污染物转化的关键区域. 因此,本研究结果对于进一步研究地球关键带的铁循环及污染物的环境归趋具有重要的科学意义。

References

Brutinel, E. D., Gralnick, J. A., 2012. Shuttling Happens: Soluble Flavin Mediators of Extracellular Electron Transfer in *Shewanella*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 93(1): 41–48. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3653-0>

Cao, Y.R., Li, M.J., Mao, S.J., et al., 2021. Distribution of Nitrogen and Water Chemistry in River–Groundwater Interaction Zone in the Lower Reaches of Han River.

Earth and Environment, 49(5): 463–471(in Chinese with English abstract).

Eggerichs, T., Opel, O., Otte, T., et al., 2014. Interdependencies between Biotic and Abiotic Ferrous Iron Oxidation and Influence of pH, Oxygen and Ferric Iron Deposits. *Geomicrobiology Journal*, 31(6): 461–472. <https://doi.org/10.1080/01490451.2013.870620>

Engelhardt, I., Barth, J. A. C., Bol, R., et al., 2014. Quantification of Long-Term Wastewater Fluxes at the Surface Water/Groundwater-Interface: An Integrative Model Perspective Using Stable Isotopes and Acesulfame. *Science of the Total Environment*, 466: 16–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.092>

Gandy, C. J., Smith, J. W. N., Jarvis, A. P., 2007. Attenuation of Mining-Derived Pollutants in the Hyporheic Zone: A Review. *Science of the Total Environment*, 373(2/3): 435–446. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.11.004>

Guo, W.Q., Song, J.X., Liu, Q., et al., 2018. Influence of Hyporheic Water Exchange on Quality of Sediment Pore Water for the Juehe River in Winter. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(5): 1957–1967(in Chinese with English abstract).

Harvey, J. W., Fuller, C. C., 1998. Effect of Enhanced Manganese Oxidation in the Hyporheic Zone on Basin-Scale Geochemical Mass Balance. *Water Resources Research*, 34(4): 623–636. <https://doi.org/10.1029/97wr03606>

Hlavica, P., 2015. Mechanistic Basis of Electron Transfer to Cytochromes P450 by Natural Redox Partners and Artificial Donor Constructs. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 851: 247–297. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16009-2_10

Hou, Q. X., Zhang, Q., Huang, G. X., et al., 2020. Elevat-

- ed Manganese Concentrations in Shallow Groundwater of Various Aquifers in a Rapidly Urbanized Delta, South China. *Science of the Total Environment*, 701: 134777. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134777>
- Kasahara, T., Hill, A. R., 2007. Lateral Hyporheic Zone Chemistry in an Artificially Constructed Gravel Bar and a Re-Meandered Stream Channel, Southern Ontario, Canada. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 43(5): 1257—1269. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00108.x>
- Kato, S., Ohkuma, M., 2021. A Single Bacterium Capable of Oxidation and Reduction of Iron at Circumneutral pH. *Microbiology Spectrum*, 9(1): e0016121. <https://doi.org/10.1128/Spectrum.00161-21>
- Krause, S., Hannah, D. M., Fleckenstein, J. H., et al., 2011. Inter-Disciplinary Perspectives on Processes in the Hyporheic Zone. *Ecohydrology*, 4(4): 481—499. <https://doi.org/10.1002/eco.176>
- Lan, K., Liang, X., Li, J., 2020. Hydrochemical Characteristics of Groundwater of the Hanjiang Zone in the Jianghan Plain. *Safety and Environmental Engineering*, 27(5): 1—9, 16(in Chinese with English abstract).
- Lee, J. H., Fredrickson, J. K., Kukkadapu, R. K., et al., 2012. Microbial Reductive Transformation of Phyllosilicate Fe(III) and U(VI) in Fluvial Subsurface Sediments. *Environmental Science & Technology*, 46(7): 3721—3730. <https://doi.org/10.1021/es204528m>
- Li, Y. C., Yu, S., Strong, J., et al., 2012. Are the Biogeochemical Cycles of Carbon, Nitrogen, Sulfur, and Phosphorus Driven by the “FeIII-FeII Redox Wheel” in Dynamic Redox Environments? *Journal of Soils and Sediments*, 12(5): 683—693. <https://doi.org/10.1007/s11368-012-0507-z>
- Li, Y. M., Wen, Z., Schneidewind, U., et al., 2023. Effects of a Large-Scale Dam Structure on Upstream and Downstream Lateral Hyporheic Exchange and Residence Time Distributions: The Xinglong Water Conservancy Dam, China. *Journal of Hydrology*, 625: 130073. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130073>
- Liu, S. N., Chui, T. F. M., 2019. Numerical Modelling to Evaluate the Nitrogen Removal Rate in Hyporheic Zone and Its Implications for Stream Management. *Hydrological Processes*, 33(24): 3084—3097. <https://doi.org/10.1002/hyp.13548>
- Lu, Y. X., Zhang, P., Liu, H., et al., 2022. Effect of Dam on Iron Species Distribution and Transformation in Riparian Zones. *Journal of Hydrology*, 610: 127869. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127869>
- Lueder, U., Maisch, M., Laufer, K., et al., 2020. Influence of Physical Perturbation on Fe(II) Supply in Coastal Marine Sediments. *Environmental Science & Technology*, 54(6): 3209—3218. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06278>
- Ma, A. L., Huang, Y., Mao, S. J., et al., 2023. “Mn(II) Curtain” in the Riparian Sediment at the Lower Reaches of the Hanjiang River, China. *Journal of Hydrology*, 625: 130047. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130047>
- Ma, A. L., Liu, H., Mao, S. J., et al., 2022. Distribution Characteristics of Dissolved Manganese in the Lateral Hyporheic Zone between River and Groundwater in the Lower Reaches of the Han River. *Earth Science*, 47(2): 729—741(in Chinese with English abstract).
- Ma, T., Shen, S., Deng, Y. M., et al., 2020. Theoretical Approaches of Survey on Earth’s Critical Zone in Basin: An Example from Jiangnan Plain, Central Yangtze River. *Earth Science*, 45(12): 4498—4511(in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. J., Ren, G. P., Qiu, Y. R., et al., 2022. Electricity Generation from Geobacter Sulfurreducens Biofilm and Its Sensing Application. *Scientia Sinica (Technologica)*, 52(11): 1669—1678(in Chinese).
- Maazouzi, C., Galassi, D., Claret, C., et al., 2017. Do Benthic Invertebrates Use Hyporheic Refuges during Stream-bed Drying? A Manipulative Field Experiment in Nested Hyporheic Flowpaths. *Ecohydrology*, 10(6): e1865. <https://doi.org/10.1002/eco.1865>
- Marsili, E., Baron, D. B., Shikhare, I. D., et al., 2008. Shewanella Secretes Flavins That Mediate Extracellular Electron Transfer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(10): 3968—3973. <https://doi.org/10.1073/pnas.0710525105>
- Melton, E. D., Swanner, E. D., Behrens, S., et al., 2014. The Interplay of Microbially Mediated and Abiotic Reactions in the Biogeochemical Fe Cycle. *Nature Reviews Microbiology*, 12(12): 797—808. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3347>
- Mendoza-Sanchez, I., Phanikumar, M. S., Niu, J., et al., 2013. Quantifying Wetland-Aquifer Interactions in a Humid Subtropical Climate Region: An Integrated Approach. *Journal of Hydrology*, 498: 237—253. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.022>
- Sackett, J. D., Shope, C. L., Bruckner, J. C., et al., 2019. Microbial Community Structure and Metabolic Potential

- of the Hyporheic Zone of a Large Mid-Stream Channel Bar. *Geomicrobiology Journal*, 36(9): 765–776. <https://doi.org/10.1080/01490451.2019.1621964>
- Stegen, J. C., Johnson, T., Fredrickson, J. K., et al., 2018. Influences of Organic Carbon Speciation on Hyporheic Corridor Biogeochemistry and Microbial Ecology. *Nature Communications*, 9(1): 585. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-02922-9>
- Su, X.S., Shi, Y.K., Dong, W.H., et al., 2019. Review on Biogeochemical Characteristics of Hyporheic Zone. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 41(3): 337–351 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Jia, R., Li, L. N., et al., 2020. Community Structure of Anaeromyxobacter in Fe(III) Reducing Enriched Cultures of Paddy Soils. *Journal of Soils and Sediments*, 20(3): 1621–1631. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02529-7>
- Wu, X.C., 2022. Iron-Phosphorus Interaction Mechanism in Groundwater-Lake Interaction Zone of East Dongting Lake (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z.C., Liu, H., Mao, S.J., et al., 2023. Distribution Characteristics of Microbial Communities in River-Groundwater Interaction Zone and Main Environmental Factors. *Earth Science*, 48(10): 3832–3843(in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 曹意茹, 李民敬, 毛胜军, 等, 2021. 汉江下游河水—地下水交互带中地下水水化学和氮分布特征. *地球与环境*, 49(5): 463–471.
- 郭伟强, 宋进喜, 刘琪, 等, 2018. 漓河冬季潜流带水交换对沉积物间隙水水质的影响. *环境科学学报*, 38(5): 1957–1967.
- 蓝坤, 梁杏, 李静, 2020. 江汉平原汉江带地下水水化学特征分析. *安全与环境工程*, 27(5): 1–9, 16.
- 马奥兰, 刘慧, 毛胜军, 等, 2022. 汉江下游河水—地下水侧向交互带中溶解态锰的分布特征. *地球科学*, 47(2): 729–741.
- 马腾, 沈帅, 邓娅敏, 等, 2020. 流域地球关键带调查理论方法: 以长江中游江汉平原为例. *地球科学*, 45(12): 4498–4511.
- 马雍基, 任国平, 仇英儒, 等, 2022. 地杆菌生物膜表面拖曳生电效应及其传感应用. *中国科学: 技术科学*, 52(11): 1669–1678.
- 苏小四, 师亚坤, 董维红, 等, 2019. 潜流带生物地球化学特征研究进展. *地球科学与环境学报*, 41(3): 337–351.
- 武显仓, 2022. 东洞庭湖地下水—湖水交互带中铁—磷相互作用机制(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 朱子超, 刘慧, 毛胜军, 等, 2023. 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. *地球科学*, 48(10): 3832–3843.