

湖北荆襄磷矿莲花山矿段主井岩溶充水水源识别

徐 思, 于 杨, 廖赔赔, 蔡祖旭, 刘家千琳, 陈彦美

Identification of karst water inflow sources in the main shaft of Lianhuashan, Jingxiang phosphate mine, Hubei Province

XU Si, YU Yang, LIAO Peipei, CAI Zuxu, LIU Jiaqianlin, and CHEN Yanmei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三姑泉域岩溶地下水水化学特征及形成演化机制

Hydrogeochemical characteristics and evolution mechanism of karst groundwater in the catchment area of the Sangu Spring

张春潮, 侯新伟, 李向全, 王振兴, 桂春雷, 左雪峰 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 62-71

岩溶矿区水文地球化学特征及其水源指示意义

Groundwater source identification in carbonate-hosted deposit using hydrogeochemistry, hydrogen and oxygen isotope method

黄荷, 陈植华, 王涛, 罗朝晖, 张亮, 王剑, 项彩娟, 孙帮涛, 王勇 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 19-26

招远金矿区水体中硫同位素特征及其对污染来源的指示

Characteristics of sulfur isotope in water bodies near the Zhaoyuan gold mine area and its indicative function of pollution sources

贾晓岑, 周建伟, 朱恒华, 余露, 张秋霞, 朱越 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 179-188

基于水化学和氢氧同位素的兴隆县地下水演化过程研究

Evolutional processes of groundwater in Xinglong County based on hydrochemistry and hydrogen and oxygen isotopes

杨楠, 苏春利, 曾邯斌, 李志明, 刘文波, 康伟 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 154-162

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18-26

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9-17



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202502032

徐思, 于杨, 廖贻赔, 等. 湖北荆襄磷矿莲花山矿段主井岩溶充水水源识别 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(4): 109-120.
XU Si, YU Yang, LIAO Peipei, et al. Identification of karst water inflow sources in the main shaft of Lianhuashan, Jingxiang phosphate mine, Hubei Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(4): 109-120.

湖北荆襄磷矿莲花山矿段主井岩溶充水水源识别

徐 思^{1,2}, 于 杨^{1,2}, 廖贻赔^{1,3}, 蔡祖旭^{1,3}, 刘家千琳^{1,2}, 陈彦美^{1,2}

(1. 长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 油气地球化学与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430100; 3. 荆门市放马山中磷矿业有限公司, 湖北 荆门 448000)

摘要: 岩溶矿区受岩溶发育的影响, 非均质性强烈, 在延深开采过程中极易出现突涌水现象以及地下水环境污染等问题。莲花山主井施工过程中受涌突水问题的困扰, 施工进度缓慢。在系统整理已有水文地质资料的基础上, 通过对主井及周边水文孔抽水试验前后水化学数据、同位素数据分析并结合高精度野外示踪试验, 查明了主井的充水水源及主要径流途径。结果表明莲花山矿段内 ZK02 钻孔地下水持续受南部磷石膏渣场渗滤液的泄漏补给, 水化学类型为 $\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$; 氢氧同位素显示大气降水为区域地下水的主要充水水源之一, 主井抽水后水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 转变为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$, 反映抽水形成的降落漏斗促使 ZK01 的灯影组岩溶水和 ZK02 的渗滤液污染水共同补给主井; 示踪试验揭示地下水流向为渣场→ZK02→ZK03→主井, 矿段内地下水从南部向东北部径流, 在 F13 断层影响下, 渗滤液沿着张家冲向斜核部至 F09 断层, 并沿着其倾向从主井涌出。研究结果可为主井防治岩溶水害、地下水污染和水资源开发利用管理提供参考依据。

关键词: 莲花山矿段; 岩溶地下水; 水化学特征; 示踪试验; 同位素; 充水水源分析

中图分类号: P641.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)04-0109-12

Identification of karst water inflow sources in the main shaft of Lianhuashan, Jingxiang phosphate mine, Hubei Province

XU Si^{1,2}, YU Yang^{1,2}, LIAO Peipei^{1,3}, CAI Zuxu^{1,3}, LIU Jiaqianlin^{1,2}, CHEN Yanmei^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Jingmen Fangmashan Mid-Phosphorus Mining Co. Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China)

Abstract: Karst mining areas are characterized by pronounced heterogeneity due to extensive karst development, making them particularly susceptible to water inrush and groundwater contamination during deep extension mining. During the construction of the main shaft in Lianhuashan, the construction progress was slow because of being troubled by water inrush problems. This study identified the water-filling sources and main runoff paths of the main shaft by analyzing the hydrochemical data and isotope data before and after the pumping tests of the main shaft and surrounding hydro-holes and combining with high-precision field tracer experiments. The results show that the groundwater in drilling hole ZK02 within the Lianhuashan mining section is continuously replenished by the leakage of leachate from the southern phosphogypsum slag yard, with hydrochemical type of $\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$. The hydrogen and oxygen isotopes show that atmospheric precipitation is one of the main water-filling sources of

收稿日期: 2025-02-10; 修订日期: 2025-04-16

投稿网址: www.swdgcgdz.com

第一作者: 徐思(2003—), 女, 硕士研究生, 主要从事矿区水文地质研究。E-mail: 2023720591@yangtzeu.edu.cn

通讯作者: 陈彦美(1984—), 女, 博士, 副教授, 主要从事地下水灾害与污染防控研究。E-mail: ymchen831219@yangtzeu.edu.cn

regional groundwater. After the main shaft pumping, the hydrochemical type changes from $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Mg} \cdot \text{Ca}$ to $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Mg} \cdot \text{Ca}$, indicating that the drawdown funnel formed by pumping promotes the joint replenishment of the karst water of ZK01 and the leachate-polluted water of ZK02 to the main shaft. The tracer test reveals that the groundwater flow direction is from the slag yard $\rightarrow$ ZK02 $\rightarrow$ ZK03 $\rightarrow$ the main shaft. Regional flow is predominantly from the south, and under the structural influence of the F13 fault, leachate migrates along the Zhangjiachong syncline axis toward the F09 fault, eventually discharging through the main shaft along its dip direction. This study can provide a scientific basis for the prevention and control of karst water hazards, groundwater pollution, and the management of water resource development and utilization in the main shaft.

Keywords: Lianhuashan mining area; karst groundwater; hydrochemical characteristics; tracer experiment; isotope; water-filling sources analysis

我国南方岩溶矿区通常具有岩溶发育强烈、涌水量大,非均质性强等特点^[1-3],因此涌突水问题成为制约矿区安全生产的主要因素之一^[4]。岩溶矿区高度发育的溶蚀裂隙、溶洞、暗河等形成了复杂的地下水网络,而矿区内断裂带、褶皱核部等构造薄弱区可作为良好的导水通道,增加了突涌水风险^[5]。此外,岩溶水系统的开放性,也会导致地表水和污染物极易污染地下水且难以治理^[6-7]。因此,分析矿区地下水充水来源,判断主井区域地下水的充水水源与充水途径,对研究区井巷防治水与地下水污染防控具有重要的实际意义。

现今,充水水源的判别方法愈发成熟,但对于岩溶区径流路径的精细化表征技术仍处于发展阶段。地下水离子组分特征和同位素组分作为地下水的天然标记,携带记录着地下水自补给、径流至排泄过程的信息。水化学特征结合水文地质条件的综合分析法^[8],成为判别矿区充水条件的重要方法和工具,已成功应用到不同矿区研究和其它工程实践中^[9]。如丁正芬^[10]根据水文地质条件预测了老虎洞磷矿的主要充水水源及通道。随着原子吸收光谱法等测试技术的快速发展,微量元素以及同位素的分析技术也得到了广泛应用。于杨等^[11]、Yang等^[12]、王甜甜等^[13]、Qu等^[14]结合水化学数据与氢氧、硫、锶等多种稳定同位素及非稳定同位素表征了不同含水层间水力联系,定性识别矿井水来源。人工示踪试验是岩溶水文地质领域的重要研究手段,广泛运用于识别岩溶含水层结构及径流通道特征^[15],Cen等^[16]、赵一等^[17]通过野外示踪试验分析喀斯特地下水的传输机制和含水层的结构特征。但单独依靠一种方法具有多解性,难以准确查清矿段的充水来源及充水水源。

莲花山磷矿是荆襄磷矿的重要部分,矿产资源储

量大,区域内碳酸盐岩地层分布面积广且岩溶水资源丰富。矿山的长期开采活动和岩溶系统的开放性导致区域地下水极易发生突涌水及污染问题,矿区安全生产遭受到巨大威胁^[18]。相关学者在莲花山及周边矿区开展了广泛的研究工作,涵盖磷矿地质特征、矿床成因以及矿山环境现状等^[19-20],但是对于该矿区矿井充水水源的相关研究工作较少,且主井施工过程中多次发生涌突水事故,严重影响施工进度。因此,本文在莲花山矿区进行地下水采样测试分析及野外示踪试验,结合水化学数据和同位素分析,深入研究了地下水的补给来源、径流方向、径流特征以及抽放水前后水化学变化,对矿区岩溶水害及污染防治具有重要的指导意义。

1 研究区水文地质概况

莲花山矿段位于湖北省钟祥市胡集镇(图1),处于胡集矿区南部,矿段面积约11.89 km²。研究区为大陆性季风气候,冬冷夏热,年平均气温约15℃;年降水分布不均匀,主要集中在6—8月。地势北高南低,海拔高度为122.0~408.4 m。地形为以丘陵为主,兼具山地、岗地和平原的复合地貌。主要山脉延伸方向与构造方向基本一致,为NNW向。莲花山矿段内地表水系不发育,仅有零星季节性溪流。主井附近存在2处地表水体,分别为南部的磷石膏渣场及西南部的莲花山尾矿库。

莲花山矿段内主要出露的地层包括前震旦统崆岭群(Pt_k)、下震旦统陡山沱组(Z_1d)、上震旦统灯影组(Z_2dn)、寒武系和奥陶系($\epsilon - \text{O}$)以及第四系(Q)(图2)。矿段内含水层为灯影组以及陡山沱组下段和上段一至四亚段($\text{Z}_1d_1 - \text{Z}_1d_4$)。灯影组岩性主要为部分夹燧石条带白云岩,节理裂隙发育良好,富水性较强;陡山

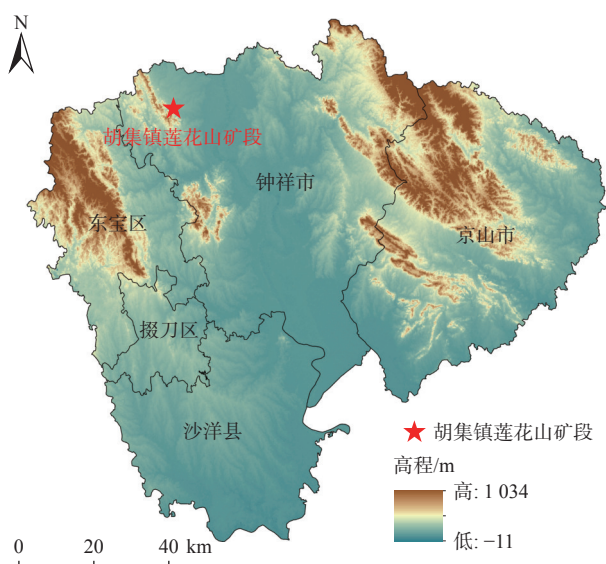


图 1 研究区位置图

Fig. 1 Geographical location of the study area

沱组下段和上段一至四亚段($Z_1d_1-Z_1d_2^{1-4}$)岩性为部分夹硅质、锰质含磷白云岩,节理裂隙较发育,富水性中等。隔水层主要为陡山沱组($Z_1d_2^{5-6}$)顶部的含硅质白云岩。区域内隔水底板为崆岭群的黑云斜长片麻岩,岩体完整且构造裂隙极其不发育。寒武系和奥陶系主要为白云岩、灰岩及泥岩等。第四系为松散砂砾石、黏土沉积物。

主井区域主要的褶皱构造为张家冲向斜与滴水崖背斜,方向为NNW—SSE。矿段内主井主要受到张家冲向斜和F13、F09、F07断层等构造影响。张家冲向斜核部位于主井东部,F07断层位于西部,F09断层位于北部,且F09断层走向为EW,倾向 180° ,在主井施工过程中揭露其断层破碎带。F13断层位于主井南部,其与磷石膏渣场均存在于张家冲向斜核部。矿区内地下岩溶十分发育,溶洞可见率约为92.21%,具有不均一性,结构复杂。天然条件下,研究区南部为地下水的主要补给区,主要排泄区为主井东部和东南部附近出露的泉群。目前开采条件下,周边矿段的同步疏干对莲花山矿段的排泄条件产生影响,致使南北泉点已经干涸,地下水排泄的主要方式由地下水露头形式转换为人工坑道开采。因此,在周边矿段抽水疏干的影响下,形成以开采坑道为中心的地下水流场。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测试

采样点分布如图2所示。2024年2—6月分别在

莲花山矿区采集地下水样品20组(主井2组、ZK01钻孔混合水样3组及灯影组水样3组、ZK03钻孔混合水样3组及灯影组水样3组、ZK02钻孔灯影组水样6组)和渗滤液样品2组(磷石膏渣场1组、莲花山尾矿库1组)。地下水样品均来自钻孔抽水试验的不同抽水阶段(表1)。用便携式多参数水质分析仪(thermo scientific orion star A320)野外现场测定水样pH、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)、电导率(electrical conductivity, EC)等物理化学指标,取样24 h内通过盐酸滴定法确定水样中 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 质量浓度;水样经 $0.45\ \mu\text{m}$ 聚酯纤维滤膜过滤后收集于50 mL采样瓶中,用于测定阳离子含量的水样需要加入浓硝酸酸化至 $\text{pH}<2$ 。氢氧同位素样品使用100 mL棕色PET瓶采集,采集过程中保证水样充满采样瓶且顶部无气泡存在,在水下拧紧瓶盖后用PM996封口膜密封瓶口,防止蒸发作用影响;测定硫同位素的水样使用5 L的聚乙烯塑料水样瓶采集,加入适量饱和 BaCl_2 溶液后经沉淀、过滤、干燥等前处理操作后生成足量 BaSO_4 固体后上机测试。

阴离子采用离子色谱仪(DX-120)测试,精度为 $0.01\ \text{mg/L}$;阳离子采用电感耦合等离子体发射光谱仪(iCAP 7200)测试,测试精度为 $0.001\ \text{mg/L}$;氢氧同位素测试用液态水同位素分析仪(美国LGR, IWA-45EP),测试精度分别为 $\pm 2\%$ 和 $\pm 0.01\%$,以维也纳平均海洋水标准(V-SMOW)为参考标准;硫同位素($\delta^{34}\text{S}$)测试所用仪器为同位素比值质谱仪(DELTAV PLUS),测试精度优于 0.20% 。

2.2 示踪试验方法

示踪剂选择原则为易溶、无毒、背景值低、不受围岩干扰、化学性能稳定、灵敏度高、易检测且成本低。根据研究区岩溶发育的特点,选取荧光增白剂、罗丹明及食盐3种互不干扰的示踪剂进行试验。罗丹明检测限极低($10^{-2}\ \mu\text{g/L}$),且岩溶地下水中天然背景值几乎为0,具有高敏感性;荧光增白剂易溶于水,不易被岩溶管道或裂隙吸附;食盐成本极低且易大量获取,适合短距离示踪试验。2024年4月28日在ZK01钻孔、ZK02钻孔、ZK03钻孔同时分别投放罗丹明1 kg、荧光增白剂1 kg及食盐300 kg,投放点与监测点见图2。使用野外自动化荧光仪(GGUN-FL30型)及Solinst水位电导率三参自动记录仪分别监测荧光增白剂、罗丹明信号值和电导率值。

为了进一步验证水化学及同位素结果并定性

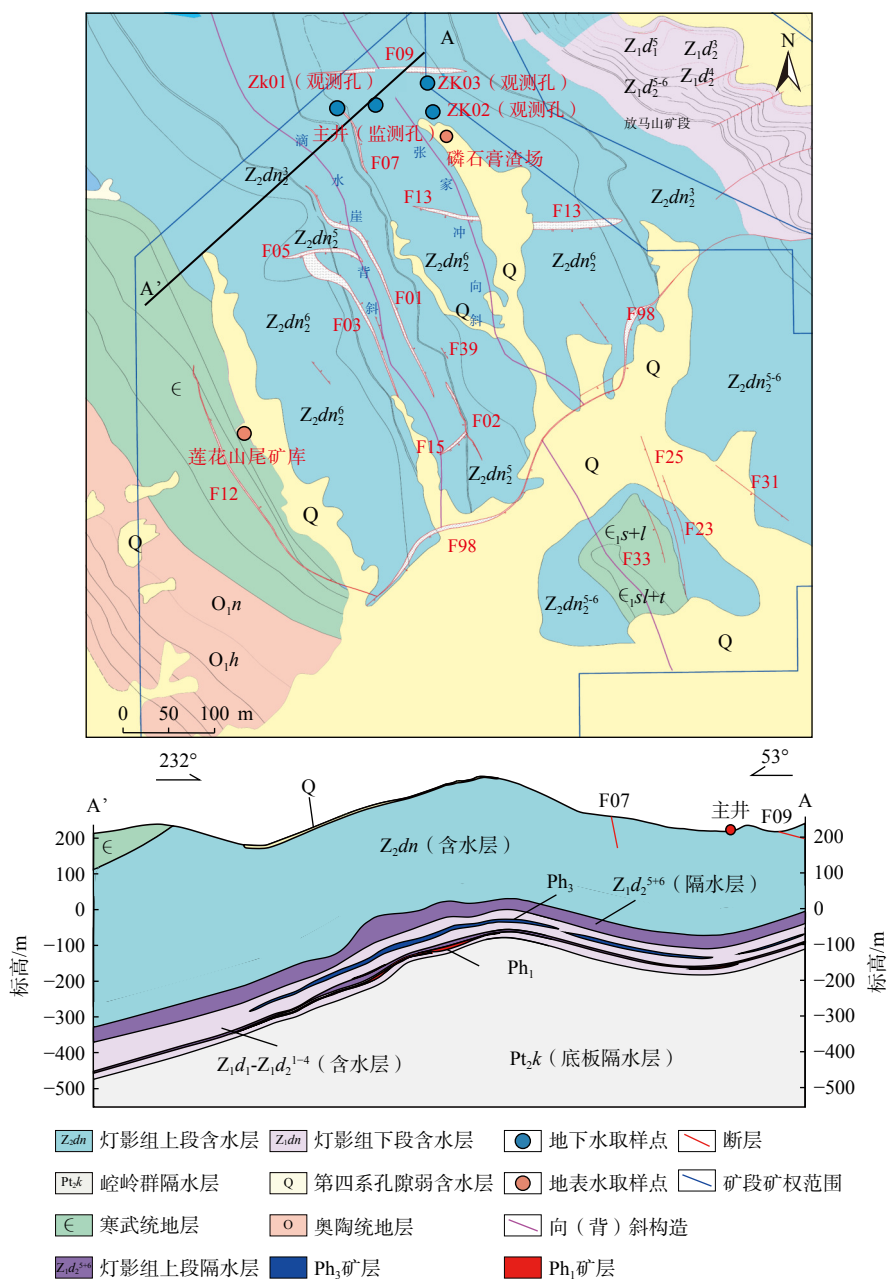


图 2 研究区水文地质略图
Fig. 2 Schematic hydrological map of the study area

分析矿坑充水通道,在主井放水试验期间,利用其周边钻孔进行一组高精度示踪试验。利用 solinst 水位电导率三参自动记录仪(Levellogger5, 水位精度 0.01 m)监测研究区内 3 个监测钻孔水位,放水条件下,区域地下水形成稳定流场,地下水由 SW 向 NE 径流。

2.3 数据分析

室内采用 Mapgis6.7 等绘图软件绘制取样点图,使用 Excel、Origin 等软件对测试数据进行水化学指标数理统计分析,利用 Qtracer2 软件估算径流通道的部分地下水动力学参数。

3 结果

3.1 水化学特征

研究区地下水及地表渗滤液的水化学指标数据结果如表 1 所示。地下水 pH 值在 6.48 ~ 7.24 内变化,均值为 6.97; EC、ORP 以及 TDS 的变化范围分别为 821.5 ~ 3 377.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、3.1 ~ 426.5 mV、407.9 ~ 1 651.0 mg/L。地下水样品中阳离子浓度关系为: $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$, 以 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 为主,分别占阳离子总量的 46.17% 和 44.18%; 阴离子平均浓度关系为: $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{CO}_3^{2-}$,

表 1 研究区样品水化学数据及同位素组成

Table 1 Hydrochemical data and isotopic composition of samples from the study area

样品	点位	类型	pH	TDS/ (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	δD /‰	δ ¹⁸ O /‰	δ ³⁴ S /‰	d /‰
灯影组— 陡山沱组 混合水样	ZK01	抽水前	7.24	371.11	1.12	99.59	5.07	78.02	0.42	4.74	64.63	-50.4	-7.92	3.74	12.96
		抽水中	7.15	420.43	0.85	96.86	4.72	89.93	0.35	5.17	105.045	/	/	/	/
		抽水后	7.20	419.20	0.69	94.45	5.09	75.77	0.41	4.68	106.27	-50.5	-7.93	3.08	13.04
	ZK03	抽水前	7.15	954.60	1.50	171.07	21.23	163.47	0.42	23.89	513.96	-48.0	-7.44	1.11	11.52
		抽水中	7.16	953.27	2.35	163.71	20.02	165.92	0.43	20.73	514.51	—	—	—	—
		抽水后	7.19	853.27	3.48	144.21	17.05	152.90	0.42	16.18	447.35	-48.9	-7.54	1.15	11.42
渗滤液 水样	渣场 尾矿库		2.23	10 919.19	410.39	518.42	232.60	4 586.08	—	169.20	5 930.00	—	—	1.67	—
			6.05	11 667.92	101.38	500.95	1 268.74	318.06	0.03	64.05	9 890.00	—	—	-0.96	—
灯影组 水样	ZK01	抽水前	7.12	407.68	1.30	107.00	4.39	66.40	—	7.97	93.80	-50.6	-7.92	4.33	12.76
		抽水中	7.02	372.20	1.12	80.89	3.92	49.40	0.29	6.33	88.70	—	—	—	—
		抽水后	7.00	375.78	0.70	87.91	4.38	52.70	0.27	5.36	96.0 0	-50.5	-7.95	3.89	13.10
	ZK02 (小流量)	抽水前	6.48	2 814.02	12.90	236.10	67.70	293.01	0.16	35.20	2 090.01	-43.3	-6.17	1.84	6.06
		抽水中	6.55	2 659.25	12.90	226.11	63.11	247.12	0.18	32.70	2 010.02	-43.3	-6.19	/	6.22
		抽水后	6.63	2 563.52	12.70	209.03	60.52	275.05	0.21	65.90	1 860.10	-43.9	-6.32	1.76	6.66
	ZK02 (大流量)	抽水前	6.52	2 735.59	12.20	213.07	61.80	254.02	0.17	32.80	2 080.03	-43.6	-6.23	1.80	6.24
		抽水中	6.54	2 382.13	16.40	186.12	55.60	152.03	0.17	29.20	1 840.12	-43.7	-6.29	—	6.62
		抽水后	6.74	2 158.61	12.30	199.05	56.40	227.00	0.26	28.10	1 550.05	-44.5	-6.44	1.71	7.02
	ZK03	抽水前	6.73	946.34	2.44	153.08	15.60	120.01	0.19	15.00	551.00	-47.9	-7.37	2.03	11.06
		抽水中	6.78	917.44	2.85	152.11	15.70	111.00	0.20	14.40	541.01	—	—	—	—
		抽水后	6.77	919.01	3.47	141.21	15.90	96.50	0.19	15.20	556.03	-48.7	-7.49	1.76	11.22
	主井	抽水前	7.90	444.72	9.12	91.99	8.78	75.77	1.65	14.27	170.88	-50.8	-7.90	3.08	12.40
		抽水后	7.38	684.81	7.70	122.65	12.42	113.52	0.58	14.38	342.41	-49.3	-7.62	1.30	11.66

注:“—”为低于检测值,未检测出具体数据或未检测;“d”为“d-excess值”,代指氘盈余;ZK02钻孔进行2次抽水试验(小流量、大流量)。

以SO₄²⁻和HCO₃⁻为主,分别占阴离子总量的60.23%和38.23%。渗滤液样品(渣场、尾矿库)的pH为2.23,6.05,为强酸性和弱酸性;ORP在146.9~354.6 mV附近波动,为强氧化环境;TDS分别为10 919.19,11 667.92 mg/L;SO₄²⁻占阴离子总含量97%,阳离子中Mg²⁺和Na⁺占主导地位。研究区各岩溶含水层地下水硫酸盐和δ³⁴S特征差异明显。地下水中ZK02钻孔中硫酸盐浓度最高可达2 090.01 mg/L,距离渣场越远,其硫酸盐浓度越低。

3.2 氢氧同位素特征

研究区内不同钻孔地下水的氢氧同位素变化范围较大。主井δD变化范围为-50.8‰~-49.3‰,δ¹⁸O变化范围为-7.9‰~-7.62‰。ZK03钻孔混合水样δD变化范围为-50.8‰~-49.3‰,δ¹⁸O变化范围为-7.9‰~-7.62‰;ZK03钻孔灯影组水样δD变化范围为-47.9‰~-48.7‰,δ¹⁸O变化范围为-7.49‰~-7.37‰。ZK02钻孔富集重同位素,灯影组水样δD变化范围为-44.5‰~-43.3‰,δ¹⁸O变化范围为-6.44‰~-6.17‰。ZK03钻孔混合水样δD变化范围为-50.8‰~-49.3‰,δ¹⁸O变化范围为-7.9‰~-7.62‰;ZK01钻孔灯影组水样δD变化范围为-50.6‰~-50.5‰,δ¹⁸O变化范围为-7.95‰~-7.92‰。

3.3 示踪试验结果

根据2024年4月27日主井监测数据,主井内地下水中罗丹明、荧光增白剂及食盐的质量浓度背景值分别为3,2,650 μg/L。整理示踪试验监测数据,剔除背景值后可以获得示踪剂罗丹明、荧光增白剂以及食盐的浓度变化曲线(图3)。通过Qtracer2软件估算得到各个径流通道的部分地下水动力学参数如表2所示。

由图3可知,投注示踪剂后第104分钟时,监测点最早检测来自ZK03钻孔的食盐,曲线峰值出现在监测后第260分钟,持续时间较长,峰值为466 μg/L。荧光增白剂最早于监测后第325分钟开始监测到,首次峰值出现于监测后第426分钟,延续时间较长,峰值浓度为20.82 μg/L。罗丹明于监测后第1 490分钟后检测到,并出现2个峰值,峰值分别出现于监测后第1 925分钟和第3 005分钟,峰值分别为98.95,62.21 μg/L,且峰型较陡。

4 分析与讨论

4.1 抽水过程中水化学及同位素变化分析

不同采样点间TDS差异性较大,渗滤液样品的TDS远高于地下水样品。尾矿库中的多种选矿废渣

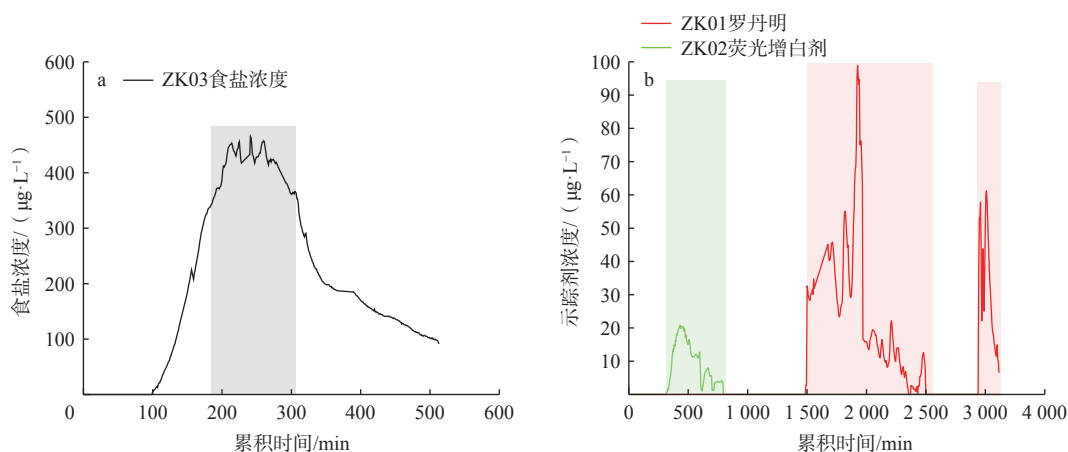


图3 主井监测点示踪剂浓度变化

Fig. 3 Tracer concentration change at main well monitoring site

表2 基于示踪试验求得的部分径流通道参数

Table 2 Calculated flow channel parameters based on tracer tests

参数	N-ZK01	N-ZK02	N-ZK03
投放时间	2024年4月28日	2024年4月28日	2024年4月28日
示踪剂	罗丹明	荧光增白剂	食盐
投放量/kg	1	1	300
平面距离/m	129.87	64.52	46.97
平均流量/(m³·h⁻¹)	90	90	90
初次检测时间/min	1 490	325	104
放水条件下平均流速/(m·d⁻¹)	135.94	170.45	279.49
天然条件下平均流速/(m·d⁻¹)	22.54	31.09	91.23
峰值浓度/(μg·L⁻¹)	98.95	20	832
回收率/%	0.19	0.3	0.43
弥散系数/(m²·s⁻¹)	0.85	0.15	0.42
径流通道储水量/m³	128.97	31.92	16.83
径流通道横截面积/m²	0.66	0.33	0.24
管道平均直径/m	0.92	0.64	0.55
雷诺数	1 447	1 263	1 779
佩克莱数	0.24	0.85	0.36

通过淋滤作用渗透到地下,这是导致尾矿周围 TDS 值偏高的重要因素^[21],所以渗滤液水样具有高 TDS、 SO_4^{2-} 的特征。距离主井越近的钻孔地下水样品的 TDS 越高,其中 ZK02 的 TDS 最高,为 2 814.02 mg/L,而且 ZK02 钻孔的 SO_4^{2-} 含量远超区域内其它钻孔,与渗滤液样品的水化学数据具有一定的相似性。由图 4 可知,主井抽水前水化学类型与 ZK03 钻孔较为接近,抽水后水化学类型向 ZK01 钻孔的样品点靠近。渣场和尾矿库的水化学类型为 $\text{SO}_4\text{—Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{—Na}$;抽水试验后,主井水样地下水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 转变为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$, SO_4^{2-} 含量逐渐增加;ZK01 灯影组水样中水化学类型由 $\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 转变为

$\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$, 离子含量变化较微弱。ZK02 钻孔水化学类型为 $\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型,抽水试验前后水化学类型无变化。抽水后主井 SO_4^{2-} 含量上升且水化学特征离子接近 ZK01 钻孔水样($\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$),表明抽水试验短暂的改变了地下水径流路径。在主井抽水试验过程中形成以主井为中心的降落漏斗,致使 ZK01 钻孔方向的灯影组岩溶水以及 ZK02 钻孔方向的高 SO_4^{2-} 水补给主井。

放水条件下,地下水的流场方向大致为 SE—NW 方向,沿着径流方向地下水的水化学类型逐渐从 $\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型演化为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型及 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型,初步可以看出 SO_4^{2-} 浓度在逐渐下降, HCO_3^-

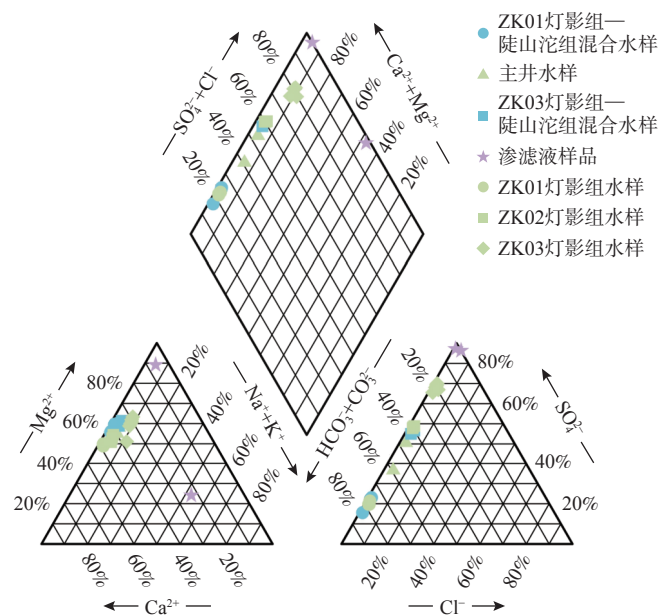


图4 研究区水样 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of water samples in the study area

含量逐步增加。

氢氧同位素是地下水补给来源示踪以及形成演化的重要参数^[22-24]。本研究引用宜昌市的大气降水线: $\delta D = 8.4\delta^{18}O + 15$ 作为当地大气降水线方程(local meteoric water line, LMWL)^[25]。研究区大气降水方程可拟合为 $\delta D = 4.12\delta^{18}O - 17$ ($R^2 = 0.99$), 样品的氢氧同位素拟合线斜率与截距小于全球和当地降雨线, 这是由于降雨过程中的蒸发作用导致雨水氢氧同位素的不平衡分馏^[26]。从图 5(a)可以看出主井水样与 ZK01 钻

孔、ZK03 钻孔水样同位素组成较为接近, 且 δD 、 $\delta^{18}O$ 同位素比值分布在 LMWL 附近, 表明大气降水是 3 个钻孔取样点的主要补给来源之一, 主井放水稳定后水样同位素组成与 ZK03 钻孔更为接近, 且 ZK03 钻孔与主井位置距离最近, 水化学类型以及 TDS 含量也接近。图 5(a)中偏离大气降水线的 ZK02 水样的 δD 和 $\delta^{18}O$ 差异值较大, 且发生了较明显的 $\delta^{18}O$ 正向漂移, 反映该样品在地下水中运移时间更长、水岩作用更强或者其补给来源为蒸发作用较为强烈的混合水源。

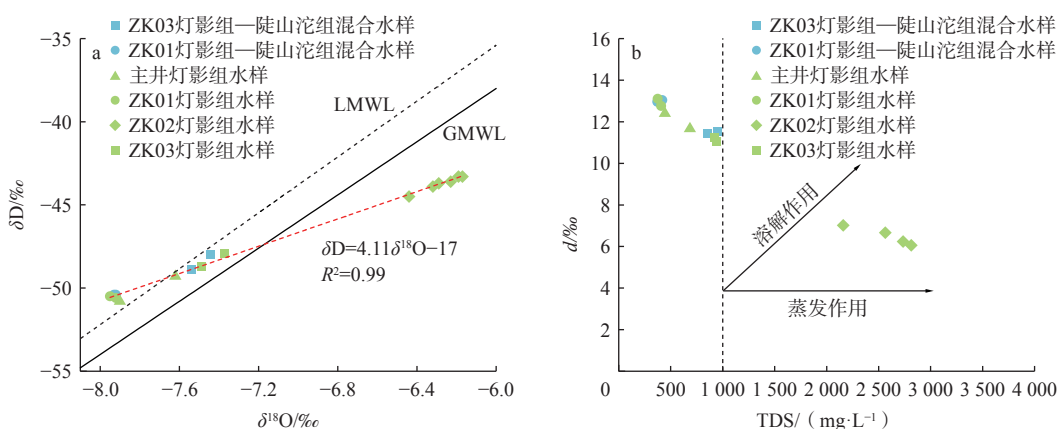


图 5 莲花山矿区 δD - $\delta^{18}O$ 及 TDS- d 关系图

Fig. 5 (a) Distribution characteristics of δD and $\delta^{18}O$ in water samples in the mining zone; (b) Deuterium-excess and TDS distribution of water samples in the mining zone

Dansgaard 提出了“氘盈余(d -excess)”, 可以反映当地和全球大气降水中氢氧同位素的分馏程度^[27]。由表 1 可知在 ZK02 钻孔灯影组水样中, d 平均值小于全球平均值(10‰), 研究区内其余水样 d 值均大于 10‰。 d 与 TDS 之间的相关性可以判别地下水矿化过程。 d 值低而 TDS 高, 指示地下水矿化主要由蒸发作用引起; 而在矿物溶解过程中, d 与 TDS 之间无明显关联。通过分析两者的关系, 可以有效地区分地下水矿化的不同成因机制^[28]。从图 5(b)中可知, 在低 TDS ($< 1000 mg/L$) 条件下, ZK02 灯影组水样 d 值与 TDS 呈负相关, 表明蒸发作用是该部分样品 TDS 升高的主要因素之一, 其余水样的 d 值与 TDS 值无明显线性关系。根据实际情况, 灯影组岩溶水特征氢氧同位素值应偏正, 但实际情况与理论相反, 推断除大气降水外存在其它地表水补给来源。

4.2 地下水中 SO_4^{2-} 来源及 $\delta^{34}S$ 特征分析

天然条件下地下水中 SO_4^{2-} 主要来源包括大气降水、硫化矿物氧化、石膏溶解及地表水中的硫酸盐入渗补给^[29]。水岩作用和不同补给来源的差异性会导致水化学成分的变化, 不同离子之间的比值可以揭示地

下水中硫酸盐的来源。如图 6(a)(b)所示, ZK01 钻孔、ZK03 钻孔和主井的水样均位于碳酸盐岩控制端元, ZK02 钻孔水样位于碳酸盐岩和硅酸盐岩端元之间, 更靠近碳酸盐岩。

图 6(c)显示, 区域内大部分水样点落在岩石风化的控制区域(1:1 线)附近, 说明白云石、方解石和石膏的溶解是该区域内地下水地球化学演化的主要来源; ZK02 钻孔的水样点明显偏离控制区, 分布范围远离 1:1 线, 说明该部分地下水样品中尚有其它来源的 SO_4^{2-} 导致 $N(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ (N 表示为毫克当量浓度) 相对于 $N(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ 过剩。 SO_4^{2-} - Ca^{2+} 的关系通常可以用于判断地下水碳酸盐岩的溶解情况, 如果仅有石膏溶解, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 比值应为 1:1; 若比值为 3:1, 表明存在石膏、方解石和白云石的同时溶解^[30]。图 6(d)显示 ZK01 钻孔的水样位于 3:1 线上, ZK03 钻孔水样位于石膏溶解线略偏右下方, 表明石膏对其 SO_4^{2-} 来源的贡献很大, ZK02 钻孔明显偏离, 说明石膏溶解只占其 SO_4^{2-} 来源的一部分, 更多的为渣场渗滤液渗透补给。主井水样在放水后更接近石膏溶解线, 可知石膏的溶解作用会促进地下水中硫酸盐的溶解。

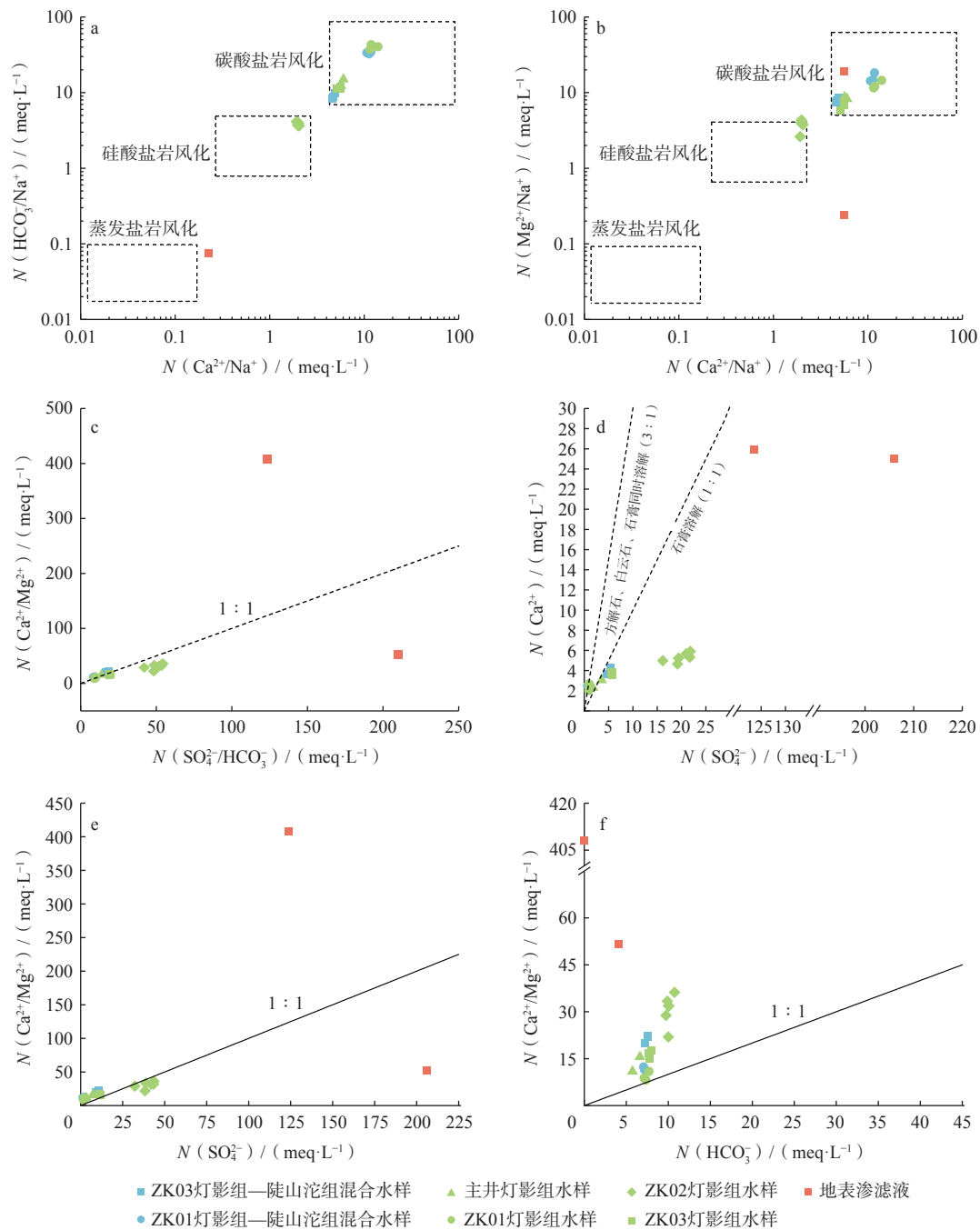


图 6 地下水主要离子关系图

Fig. 6 Major ion relationships in groundwater

利用图 6(e)(f)进一步探究可知,除 ZK02 钻孔及渣场渗滤液外,余下水样 $N(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/N(\text{SO}_4^{2-})$ 值均大于 1 且位于 $N(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/N(\text{HCO}_3^-)=1$ 线附近,说明 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的来源并非为单一的硫酸盐岩矿物溶解,结合图 6(c)说明碳酸盐岩的对水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- 离子浓度的贡献率更为显著。ZK02 钻孔的 $N(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})/N(\text{SO}_4^{2-})$ 小于 1,其原因可能为:(1)矿区开采过程导致原本封闭的地下水环境逐渐变成开放系统,

黄铁矿发生氧化从而导致地下水中 SO_4^{2-} 的含量升高;(2)ZK02 钻孔与渗滤液具有相同的分布规律,可能受到来自渣场渗滤液的补给作用导致 SO_4^{2-} 含量偏高。

图 7(a)显示在抽水试验过程中,不同钻孔的混合水样和灯影组水样的 SO_4^{2-} 浓度具有近似的变化特征,而矿区内钻孔水样 SO_4^{2-} 毫克当量浓度远超背景样品值,表明整个矿段区域内 SO_4^{2-} 毫克当量浓度均较高。ZK01 钻孔抽水后 SO_4^{2-} 毫克当量浓度微量升高,推测

其径流通道和补给来源较为单一,因此接收到渣场渗滤液的补给较少。ZK02 钻孔在大、小流量抽水后 SO_4^{2-} 毫克当量浓度均呈现下降趋势,而 ZK03 钻孔与 ZK02 钻孔连通性较好,在抽水后灯影组水样 SO_4^{2-} 毫克当量浓度略下降,呈现与 ZK02 钻孔一致的趋势,

图 7(b) 显示抽水后主井 $\delta^{34}\text{S}$ 显著下降, ZK01 与 ZK03 钻孔的灯影组水样 $\delta^{34}\text{S}$ 降低幅度相似,而 ZK02 钻孔水样变化微弱,表明其具有不同的 $\delta^{34}\text{S}$ 补给来源。ZK03 钻孔在抽水前后 SO_4^{2-} 浓度及 $\delta^{34}\text{S}$ 变化与主井变化高度一致,且其 $\delta^{34}\text{S}$ 值接近渣场渗滤液 $\delta^{34}\text{S}$ 值。

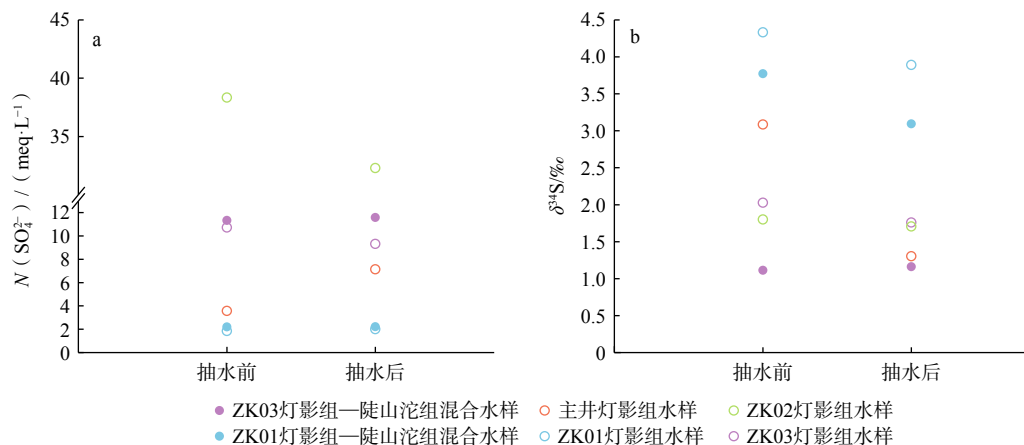


图 7 地下水抽水前后 SO_4^{2-} 与 $\delta^{34}\text{S}$ 变化图

Fig. 7 Variations of SO_4^{2-} and $\delta^{34}\text{S}$ before and after pumping of groundwater

4.3 地下水径流特征分析

通过 Qtracer2 软件估算可知 3 个钻孔中地下水雷诺数均小于 2 500, 佩克莱数均小于 1, 这在一定程度上表征了径流通道中的地下水运动为层流^[31]。根据示踪剂迁移理论, 对流作用与地下水流速直接相关, 而分子扩散在流速较低或渗透性较差的介质中占据主导地位。表 2 显示 ZK01 钻孔的示踪剂流速较小、回收率较低, 因此可知, ZK01 钻孔示踪剂迁移以分子扩散为主, 对流作用较弱; ZK02 钻孔的佩克莱数值接近 1, 表明对流效应增强, 但总体仍为扩散作用, 回收率较低为 0.3%, 可能是荧光增白剂易吸附于有机质充填裂隙或胶体颗粒表面; ZK03 钻孔储水量仅 16.838 m^3 , 但与监测点平面距离近, 示踪剂可能通过多分支裂隙网络分散。

流速大小不同反映了不同通道中地下水运移的差异性^[32]。计算结果显示 3 个投放点天然条件下地下水平均流速分别为 22.54, 31.09, 91.23 m/d 。全球平均岩溶管道流速为 1 872 m/d ^[33-34], 南方岩溶地区地下水管流-溶洞流的流速为 100 ~ 10 000 m/d ^[35]。本研究的地下水最大天然流速为 91.23 m/d 小于南方岩溶地区管道流的最低值 100 m/d , 且研究区内未发现地下暗河, 因此研究区内地下水为非管道流。在野外实地探查时发现过程中发现区域内存在多条导水断裂带连通地下水, 在钻孔测井时 3 个监测孔中多见张开裂隙及较大裂纹, 因此可说明研究区内地下水径流通道主

要为裂隙流、断层带径流及溶洞裂隙复合流。

图 3 显示在放水实验过程中, ZK03 钻孔与主井水力联系最强, 最快接收到示踪剂数据, 且示踪剂拖尾曲线时间较短, 指示 ZK03 与主井间存在径流条件极好的集中径流通道, 曲线峰型呈现“平台”型特征, 表明该区域构造裂隙发育, 裂隙流形成了多个峰值的峰值平台, 且在通道间发育有溶洞, 对示踪剂存在稀释作用。ZK02 曲线峰型为先高后低的多峰曲线, 反映该区域内存在 3 条通道, 峰值高的为主通道, 峰值低的为支流通道; 曲线呈现锯齿状, 表明径流通道中存在溶蚀裂隙。ZK01 钻孔浓度曲线存在 2 个峰, 表明该区域至少存在 2 个径流条件较好的通道呈现锯齿状上升且波动幅度较大, 表明该试验流经区域径流通道主要为岩溶裂隙和断裂破碎带。

3 个钻孔的径流通道储水量为 $\text{ZK01} > \text{ZK02} > \text{ZK03}$, 流速为 $\text{ZK01} < \text{ZK02} < \text{ZK03}$, 水力梯度分别为 0.64, 1.32, 1.22, ZK01 储水量大但是流速较小原因可能是 ZK01 的水力梯度较小, 导致其径流速度慢。而 ZK03 钻孔储水量最小但径流速度最快, 可能是由于在单一局部导水通道中, 水流路径短, 储水量积累少, 但水力梯度集中导致流速较快。

4.4 主井矿井水充水来源辨识

莲花山矿段地处碳酸盐岩广泛分布区, 岩溶管道与构造裂隙高度发育, 构成复杂的地下水网络系统。

区内灯影组白云岩作为主井附近主要裸露地层,因其富水性较强,成为大气降水快速入渗的优先通道。氢氧同位素分析(图 5)显示,主井与 ZK03 钻孔水样氢氧值均紧邻当地大气降雨线,表明大气降水是主井充水的主要补给来源之一。示踪试验表明研究区域内岩溶情况复杂,地下水在岩溶管道和溶洞以及断裂破碎带中运移。结合水文地质结构分析,主井与磷石膏渣场均位于张家冲向斜核部,且渣场中存在的 F13 断层走向为 WE 向,横向切割矿层,导致渣场渗滤液从 F13 渗漏到地下水中,沿着张家冲向斜向 N 径流至 F09 断层时,由于 F09 断层走向为 WE,且倾向为 180°,地下水沿着倾向面径流至主井处涌出。由图 8 可知,因主井其与 ZK03 钻孔连通性较好,而 ZK03 钻孔与 ZK02 钻孔连通性较好,且 ZK02 钻孔 SO_4^{2-} 浓度较高,主井进行抽水后 SO_4^{2-} 浓度显著增加, $\delta^{34}\text{S}$ 接近渣场渗滤液值,张家冲向斜褶皱的导水性良好,因此推断可能混入了磷石膏渣场渗滤液的渗漏补给。此结果验证了示踪试验的径流通道,说明地下水径流方向总体为磷石膏渣场→ZK02→ZK03→主井。

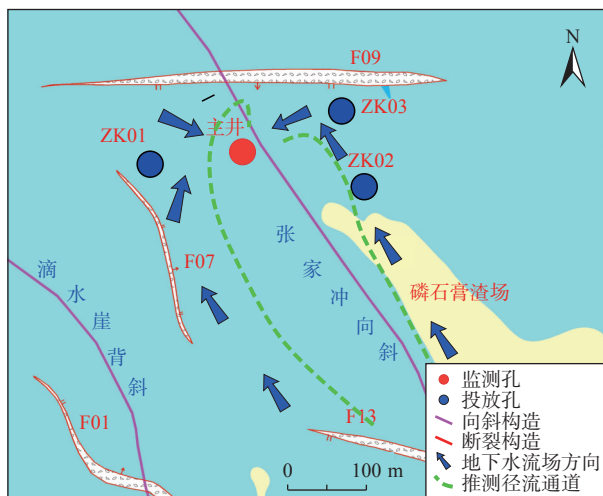


图 8 莲花山示踪试验径流通道图

Fig. 8 Tracer test runoff channel of Lianhuashan

5 结论

(1)渣场和尾矿库的水化学类型为 $\text{SO}_4\text{—Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{—Na}$; ZK01 水样中水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型,表明该钻孔封闭性较好,以水岩作用为主; ZK02 钻孔水化学类型($\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$)与磷石膏渣场渗滤液特征高度相似,抽水前后水化学类型无变化,表明其受渗滤液持续补给;主井抽水后水化学类型由 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 转变为 $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$, SO_4^{2-} 含量显

著增加,反映抽水形成的降落漏斗促使 ZK01 的灯影组岩溶水和 ZK02 的渗滤液污染水共同补给主井。

(2)氢氧同位素和氡盈余分析可知,矿区岩溶地下水主要补给来源为大气降水入渗,且 ZK02 钻孔水样明显偏离当地大气降水线方程,显示出较强的蒸发作用,表明存在地表水补给该钻孔, SO_4^{2-} 和 $\delta^{34}\text{S}$ 分析显示 ZK03 钻孔及 ZK02 钻孔与磷石膏渣场存在水力联系。进一步证实,渣场渗滤液是导致 ZK02 钻孔异常值的主要原因。

(3)示踪结果与水化学数据特征分析相互佐证,表明主井充水以大气降水补给为主,沿着径流方向,渣场渗滤液通过 F13、F09 断层以及向斜核部良好的导水性渗漏补给。ZK03 钻孔作为关键中转节点,连通 ZK02 与主井,加剧污染扩散。地下水流向总体为 SE-NW,沿渣场→ZK02→ZK03→主井方向迁移,证实渣场渗滤液通过张家冲向斜核部污染主井区域。

水化学分析与示踪试验方法的耦合应用克服了单一方法的局限性,优势互补,为研究典型岩溶充水矿区中的矿井水来源以及径流特征提供了有效依据。

参考文献 (References):

- [1] XIA Riyuan. Groundwater resources in karst area in Southern China and sustainable utilization pattern[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2016, 4(4): 301 – 309.
- [2] 李严,王家乐,靳孟贵,等.运用水文时间序列分析识别济南泉域岩溶发育特征[J]. *地球科学*, 2021, 46(7): 2583 – 2593. [LI Yan, WANG Jiale, JIN Menggui, et al. Hydrodynamic characteristics of Jinan karst spring system identified by hydrologic time-series data[J]. *Earth Science*, 2021, 46(7): 2583 – 2593. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王万金,郑明英.典型开放型岩溶地下水系统多重性特征研究[J]. *地下水*, 2023, 45(4): 39 – 42. [WANG Wanjin, ZHENG Mingying. A study on the multiplicity characteristics of typical open karst groundwater systems[J]. *Ground Water*, 2023, 45(4): 39 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈彦美,陈植华,於开炳.南方岩溶金属矿区地下水非均质性及防治水意义:以福建马坑铁矿为例[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 692 – 700. [CHEN Yanmei, CHEN Zhihua, YU Kaibing. Heterogeneity and water prevention of karst water system in metal mine areas in southern China: A case study of Makeng Iron Mine, Fujian Province[J]. *Earth Science*, 2016, 41(4): 692 – 700. (in

- Chinese with English abstract)]
- [5] 丁建丽. 矿井水文地质特征及突水机理浅析 [J]. [中国井矿盐](#), 2023, 54(3): 17 – 19. [DING Jianli. An analysis of mine hydrogeologic characteristics and water-surge mechanism[J]. [China Well Mine Salt](#), 2023, 54(3): 17 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 刘再华, 袁道先. 中国典型表层岩溶系统的地球化学动态特征及其环境意义 [J]. [地质论评](#), 2000, 46(3): 324 – 327. [LIU Zaihua, YUAN Daoxian. Features of geochemical variations in typical epikarst systems of China and their environmental significance[J]. [Geological Review](#), 2000, 46(3): 324 – 327. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 乔宇, 康小兵, 眭素刚, 等. 岩溶富水矿山构造破碎带破坏数值模拟及突涌水成因分析 [J]. [中国岩溶](#), 2025. [QIAO Yu, KANG Xiaobing, HUI Sugang, et al. Research on the mechanism of water surge in tectonic fracture zones of karst water-rich mines [J]. [Carsologica Sinica](#), 2025. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 沈建军, 倪月琴. 内蒙古上海庙矿区长城六号矿井水文地质条件及充水因素分析 [J]. [山西能源学院学报](#), 2023, 36(6): 13 – 15. [SHEN Jianjun, NI Yueqin. Analysis of hydrogeological conditions and water filling factors of Changcheng No. 6 mine in Shanghai Miao Mining Area, Inner Mongolia[J]. [Journal of Shanxi Institute of Energy](#), 2023, 36(6): 13 – 15. (in Chinese)]
- [9] 满孝全, 魏久传, 谢道雷, 等. 基于水化学特征分析的突水水源判别方法 [J]. [中国科技论文](#), 2021, 16(1): 76 – 81. [MAN Xiaoquan, WEI Jiuchuan, XIE Daolei, et al. Identification method of water inrush source based on analysis of hydrochemical characteristics[J]. [China Sciencepaper](#), 2021, 16(1): 76 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 丁正芬. 浅析老虎洞磷矿矿床充水因素 [J]. [当代化工研究](#), 2018(3): 40 – 41. [DING Zhengfen. Analysis on the water filling factors of the tiger cave phosphate ore deposit[J]. [Modern Chemical Research](#), 2018(3): 40 – 41. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 于杨, 金晓文, 徐思, 等. 延深开采影响下典型岩溶充水矿区水化学特征及涌水来源研究 [J]. [中国岩溶](#), 2024, 43(5): 1020 – 1033. [YU Yang, JIN Xiaowen, XU Si, et al. Study on the water chemical characteristics and water inflow sources of typical karst water-filled mining areas under the influence of extended mining[J]. [Carsologica Sinica](#), 2024, 43(5): 1020 – 1033. (in Chinese with English abstract)]
- [12] YANG Yonggang, GUO Tingting, JIAO Wentao. Destruction processes of mining on water environment in the mining area combining isotopic and hydrochemical tracer[J]. [Environmental Pollution](#), 2018, 237: 356 – 365.
- [13] 王甜甜, 方刚, 张溪彧, 等. 基于水化学和氢氧同位素特征的敏东一矿水源定性定量研究 [J]. [煤矿安全](#), 2024, 55(10): 190 – 197. [WANG Tiantian, FANG Gang, ZHANG Xiyu, et al. Qualitative and quantitative study of water source in Mindong No. 1 Mine based on water chemistry and hydrogen and oxygen isotopes characteristics[J]. [Safety in Coal Mines](#), 2024, 55(10): 190 – 197. (in Chinese with English abstract)]
- [14] QU Shen, WANG Guangcai, SHI Zheming, et al. Using stable isotopes (δD , $\delta^{18}O$, $\delta^{34}S$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$) to identify sources of water in abandoned mines in the Fengfeng coal mining district, northern China[J]. [Hydrogeology Journal](#), 2018, 26(5): 1443 – 1453.
- [15] 吕全标, 胡晓农, 曹建华, 等. 基于钻孔抽水试验和示踪试验的岩溶地区含水层结构研究 [J]. [中国岩溶](#), 2017, 36(5): 727 – 735. [LYU Quanbiao, HU Xiaonong, CAO Jianhua, et al. Aquifer structure of karst areas derived from borehole pumping and tracer tests[J]. [Carsologica Sinica](#), 2017, 36(5): 727 – 735. (in Chinese with English abstract)]
- [16] CEN Xinyu, XU Mo, QI Jihong, et al. Characterization of karst conduits by tracer tests for an artificial recharge scheme[J]. [Hydrogeology Journal](#), 2021, 29(7): 2381 – 2396.
- [17] 赵一, 李衍青, 覃星铭, 等. 南洞地下河岩溶管道展布及结构特征的示踪试验解析 [J]. [中国岩溶](#), 2017, 36(2): 226 – 233. [ZHAO Yi, LI Yanqing, QIN Xingming, et al. Tracer tests on distribution and structural characteristics of karst channels in Nandong underground river drainage[J]. [Carsologica Sinica](#), 2017, 36(2): 226 – 233. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 范祖金, 魏兴, 周育琳, 等. 三峡库区城市浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义 [J]. [环境科学学报](#), 2023, 43(6): 258 – 269. [FAN Zujin, WEI Xing, ZHOU Yulin, et al. Hydrochemical and hydrogen-oxygen stable isotope characteristics of urban shallow groundwater in Three Gorges Reservoir Area and indicative significance[J]. [Acta Scientiae Circumstantiae](#), 2023, 43(6): 258 – 269. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 王莹. 大峪口磷矿矿山环境现状与治理对策 [J]. [化工矿产地质](#), 2019, 41(3): 176 – 180. [WANG Ying. The status quo and countermeasures of mining environment in Dayukou phosphate mine[J]. [Geology of](#)

- Chemical Minerals, 2019, 41(3): 176 – 180. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 罗迪柯. 湖北荆襄磷矿地球化学特征及其矿床成因研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011. [LUO Dike. Research on geochemistry characteristics and cause of formation of jingxiang phosphorus deposit in Hubei, China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [21] LIU Yu, XIE Xianming, WANG Song, et al. Hydrogeochemical evolution of groundwater impacted by acid mine drainage (AMD) from polymetallic mining areas (South China)[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2023, 259: 104254.
- [22] REN Xiaofei, LI Peiyue, HE Xiaodong, et al. Tracing the sources and evaporation fate of surface water and groundwater using stable isotopes of hydrogen and oxygen[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 931: 172708.
- [23] 廖驾, 朱振华, 彭毅, 等. 湘西北地区岩溶地下水水化学与氧同位素特征分析 [J]. *中国岩溶*, 2023, 42(3): 425 – 435. [LIAO Jia, ZHU Zhenhua, PENG Yi, et al. Analysis on D/¹⁸O and hydrochemical characteristics of Karst groundwater in northwestern Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 425 – 435. (in Chinese with English abstract)]
- [24] SREEDEVI P D, SREEKANTH P D, REDDY D V. Recharge environment and hydrogeochemical processes of groundwater in a crystalline aquifer in South India[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(6): 4839 – 4856.
- [25] 赵家成, 魏宝华, 肖尚斌. 湖北宜昌地区大气降水中的稳定同位素特征 [J]. *热带地理*, 2009, 29(6): 526 – 531. [ZHAO Jiacheng, WEI Baohua, XIAO Shangbin. Stable isotopic characteristics of atmospheric precipitation from Yichang, Hubei[J]. *Tropical Geography*, 2009, 29(6): 526 – 531. (in Chinese with English abstract)]
- [26] LI Yihan, DUVERT C, XU Peng, et al. Contrasting origins of spring water in a ‘water tower’ of Northeast Asia: Evidence from stable isotopes and tritium[J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 652: 132661.
- [27] MU Dawei, LI Peiyue, DE BAETS B, et al. A multi-perspective exploration of the salinization mechanisms of groundwater in the Guanzhong Basin, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2024, 957: 177421.
- [28] LIU Kai, QIAO Xiaojuan, LI Baoling, et al. Characteristics of deuterium excess parameters for geothermal water in Beijing[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 1 – 10.
- [29] SUN Jing, TANG Changyuan, WU Pan, et al. Hydrogen and oxygen isotopic composition of karst waters with and without acid mine drainage: impacts at a SW China coalfield[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 487: 123 – 129.
- [30] ZHANG Jie, JIN Menggui, CAO Mingda, et al. Sources and behaviors of dissolved sulfate in the Jinan karst spring catchment in northern China identified by using environmental stable isotopes and a Bayesian isotope-mixing model[J]. *Applied Geochemistry*, 2021, 134: 105109.
- [31] 林云, 唐敦泽, 武亚遵, 等. 许家沟泉域岩溶地下水硫同位素特征及硫酸盐来源解析 [J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(10): 158 – 165. [LIN Yun, TANG Dunze, WU Yazun, et al. Sulfur isotope characteristics of karst groundwater in Xujiagou spring area and its sources[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(10): 158 – 165. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王泽君, 周宏, 齐凌轩, 等. 岩溶水系统结构和水文响应机制的定量识别方法: 以三峡鱼迷岩溶水系统为例 [J]. *地球科学*, 2020, 45(12): 4512 – 4523. [WANG Zejun, ZHOU Hong, QI Lingxuan, et al. Method for Characterizing Structure and Hydrological Response in Karst Water Systems: A Case Study in Y-M System in Three Gorges Area[J]. *Ground Water*, 2020, 45(12): 4512 – 4523. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 韦栋文, 王文海. 地下水示踪试验中穿透曲线的解析——以平果县平南赤泥堆场地下岩溶系统为例 [J]. *地下水*, 2024, 46(2): 9 – 12. [WEI Dongwen, WANG Wenhai. Analysis of break through curve in groundwater tracer test: Taking the underground karst system of Pingnan red mud yard in Pingguo County as an example[J]. *Ground Water*, 2024, 46(2): 9 – 12. (in Chinese with English abstract)]
- [34] PEELY A B, MOHAMMADI Z, RAEISI E. Breakthrough curves of dye tracing tests in karst aquifers: Review of effective parameters based on synthetic modeling and field data[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126604.
- [35] 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 等. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 2018. [ZHANG Renquan, LIANG Xing, QI Menggui, et al. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]