

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2024.01.009

郴州市许家洞地区地热资源特征及资源量评价

何阳¹, 杨贵花^{1*}, 李雪宇¹, 周进², 谭佳良¹, 刘声凯², 景营利²,
熊雄¹, 刘一鸣¹, 范毅¹, 陈帅奇¹

HE Yang¹, YANG Gui-Hua^{1*}, LI Xue-Yu¹, ZHOU Jin², TAN Jia-Liang¹, LIU Sheng-Kai², JING Ying-Li²,
XIONG Xiong¹, LIU Yi-Ming¹, FAN Yi¹, Chen Shuai-Qi¹

1. 湖南省地质调查所, 湖南长沙 410116; 2. 湖南省水文地质环境地质调查监测所, 湖南长沙 410129

1. Geological Survey Institute of Hunan Province, Changsha 410116, Hunan, China; 2. Survey and Monitoring Institute of
Hydrogeology and Environmental Geology of Hunan Province, Changsha 410129, Hunan, China

摘要:为查明郴州市地下热水资源的特征及储量, 本文选取许家洞地区两个典型地热田, 通过地热地质调查、水质测试等方法调查了研究区的地质条件、地热流体场特征、地下热水水化学类型。基于上述研究开展了许家洞地区地热资源储量的分析评价。研究表明: (1) 区内地下热水受断裂构造控制, 是入渗地下水沿着断裂构造在深部循环过程中吸收隐伏岩体中的热能形成的; (2) 地下热水水化学类型主要为HCO₃-Ca型、HCO₃-Ca·Na型或HCO₃·SO₄-Ca·Mg型, 为低温、无色透明的弱碱性水; (3) 热水的主要补给来源为大气降水, 水分入渗后主要沿区内发育的北东向断裂构造(F₂₄、F₇、F₂₅、F₈)运移到一定深度, 地下水逐渐增温变成地下热水, 在断裂交汇处沿着不均匀发育的岩溶裂隙系统向上运移, 以温泉形式出露于地表; (4) 研究区地下热水每年可提供热能约3.23×10⁸ MJ, 每年可节约标准煤资源约1.18×10⁴ t。该研究成果对郴州市地热资源的合理开发利用具有重要指导意义。

关键词: 地下热水; 流场特征; 水化学特征; 地热资源量计算; 地热资源评价

中图分类号: P641.1

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2024)01-0133-10

He Y, Yang G H, Li X Y, Zhou J, TAN J L, Liu S K, Jing J L, Xiong X, Liu Y M, Fan Y and Chen S Q. 2024. Evaluation of Characteristics and Reserves of Geothermal Resources in the Xujiadong Area, Chenzhou City. *South China Geology*, 40(1):133-142.

Abstract: In order to find out the characteristics and reserves of geothermal water resources in Chenzhou City, two typical geothermal fields in the Xujiadong area were selected, and their geological conditions, characteristics of geothermal fluid field, and hydro-chemical types of geothermal water were also investigated by means of geothermal geological survey and water quality test. Based on the above research, an analysis and evaluation of geothermal resource reserves in this study area was conducted. The results show that: (1) The geothermal water is controlled by fault structure and is formed by the infiltrated groundwater absorbing heat energy from buried rock mass during deep circulation along fault structure. (2) The main hydro-chemical types are HCO₃-Ca type, HCO₃-Ca·Na type or HCO₃·SO₄-Ca·Mg type, and the geothermal water is low-temperature, colorless and transparent weakly alkaline water. (3) The main supply source of geothermal water is atmospheric precipitation. After water infiltration, it migrated to a certain depth along the developed NE fault struc-

收稿日期: 2023-11-17; 修回日期: 2024-2-1

基金项目: 湖南省自然资源厅项目(20230174DZ; 20200308)

第一作者: 何阳(1988—), 男, 高级工程师, 从事城市地质调查方面的研究, E-mail: heyang556@163.com

通讯作者: 杨贵花(1966—), 女, 高级工程师, 从事矿区(水文)地质、地下水等方面的研究, E-mail: 2207279435@qq.com

ture (F_{24} , F_7 , F_{25} , F_8), and during this process, it absorbed heat energy and gradually warms to form hot water. Afterwards it migrated upwards along the unevenly developed karst fissure system at faults intersection, and finally emerged on the surface as hot springs. (4) The geothermal water can provide about 3.23×10^8 MJ of thermal energy annually in this research area, which can save about 1.18×10^4 t of standard coal resources per year. The research results are important for guiding the rational development and utilization of geothermal resources in Chenzhou City.

Key words: geothermal water; flow field characteristics; water chemical characteristics; calculation of geothermal resources; evaluation of geothermal resources

地热资源作为一种可再生清洁能源,具有分布广泛、储量丰富、易于利用等特点(牛兆轩等,2022;尹政等,2023),近年来愈发受到世界各国的关注与开发利用(Guo Q et al., 2017; Karimi et al., 2017)。在全球“碳中和”战略背景下,开发利用地热资源,对减少碳排放和优化能源结构具有重要的现实意义(李金玺等,2023)。目前,我国地热资源研究取得了丰硕成果,高温地热研究主要集中在青藏(Liu F et al., 2020; 赵振等, 2021; 胡志华等, 2022)、川滇(屈丽丽等, 2011; 卞跃跃和赵丹, 2018)及新疆西部(史杰等, 2022)等地区。我国多个地区中低温地热勘查研究工作卓有成效(何欣和马悦, 2019; 刘润川等, 2021),其研究内容主要包括地热资源分布规律、成因机制以及地热储量评价等方面(赵璐等, 2010; 廖海吉等, 2013; 卞跃跃和赵丹, 2018; 刘润川等, 2021)。郴州市作为“中国温泉之乡”(刘敏, 2020),其地热资源储量丰富,前人对该地区地热资源的研究主要集中于地下热水的形成机理(朱天林, 2006)和地热田的热储温度(孙杨艳等, 2020)等方面,而对该地区地下热水水化学类型及追溯地下热水补给来源的研究相对薄弱。分析地下热水的地球化学特征是合理开发利用地热资源的必要条件(Li X et al., 2020)。通过对地热资源储量的计算,综合评价其资源潜力,合理开采利用地热资源能够改善能源结构,降低化石能源的使用,提高绿色可再生能源的比例,减缓温室效应。

本文在前人研究的基础上,通过对地热地质条件勘查和水化学特征分析,基本查明了许家洞地区地下热水的补给来源、地热流体场特征和地下热水水化学类型,计算了该地区的地热资源储量并对其进行了分析评价,旨在为郴州市地热资源的合理开

发利用提供科学指导,也可为相似地质条件地区的地热勘探开发工作提供理论依据。

1 研究区概况

1.1 区域地质条件

许家洞地热勘查区地理位置为 $113^{\circ}00'32.75''$ ~ $113^{\circ}02'49.79''$ E, $25^{\circ}50'39.10''$ ~ $25^{\circ}53'41.89''$ N, 面积 16.8 km^2 。区内属亚热带季风湿润气候区,并有向亚热带、热带气候过渡的特征,四季分明,雨量充沛。据郴州市 1991~2020 年气象资料统计,区内年平均降雨量为 1452.12 mm ,其中 4~9 月的平均降雨量为 972.30 mm ,占全年降雨量的 66.96%,年蒸发量 1260.41 ~ 1831.03 mm ,年平均气温 $17.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均相对湿度 78.92%。

区内出露地层从老到新依次为石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系和第四系更新统。石炭系下统大塘组岩性以砂岩、砾砂岩和粉砂岩为主,中上统壶天群岩性以白云岩为主;二叠系下统包括当冲组和栖霞组,岩性以硅质岩、页岩、灰岩及泥灰岩为主,栖霞组底部以生物碎屑灰岩与壶天群分界,顶部以泥灰岩与当冲组分界,上统斗岭组岩性以砂质、炭质页岩及石英砂岩为主;侏罗系下统分布在矿区外围东南部,岩性为砂岩、页岩及砂质页岩,砂质页岩微层理清晰。白垩系下统分布在矿区外围北东部,以砾砂岩、砂岩、粉砂岩、泥岩为主。第四系更新统上部为亚粘土及亚砂土和耕植土、下部为磨圆度较好的砾层,主要分布于沿郴江一带河流阶地。

研究区位于华南褶皱系赣湘桂粤褶皱带的鸾头岭—烟岗岭复式背斜北段。区内北东向断层(自北西至南东依次主要有 F_{24} 、 F_7 、 F_{25} 、 F_8)对地下水

的形成与分布具有一定的控制作用,局部可见的北西向断层在深部与北东向断层交汇,为地下热能提供了储存场所和运移通道。初步的勘查分析认为,许家洞地区地下热水主要储存于沿F₇、F₂₅断层发育的

碳酸盐岩岩溶裂隙和通道中,局部破碎地段及裂隙为深部热能提供了上升通道,为地下热水的主要控热、控水构造。在北东向和北西向断裂交汇处有多处温泉出露,沿北东向呈带状分布(图1)。

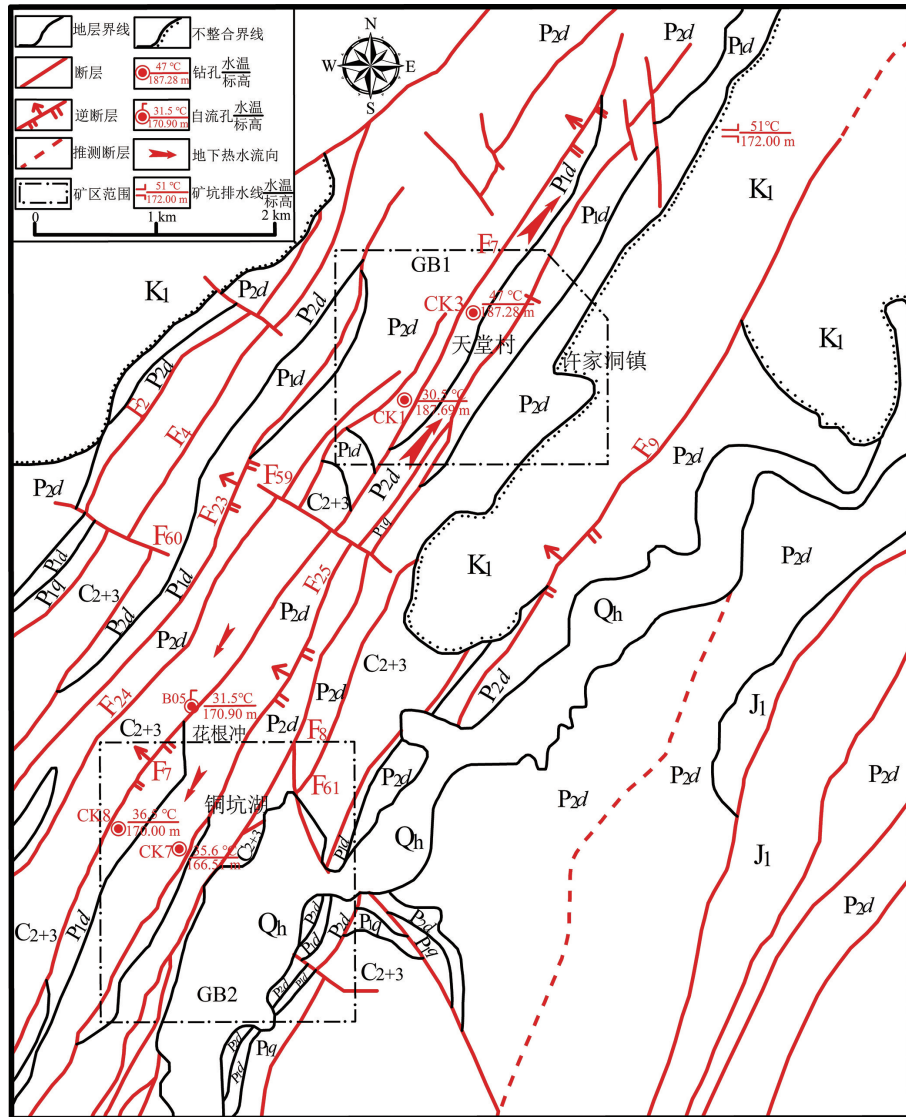


图1 郴州市许家洞地区地下水径流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of geothermal water runoff in Xujiadong area, Chenzhou city

C₂₊₃:石炭系中上统壶天群;P_{1q}:二叠系下统栖霞组;P_{1d}:二叠系下统当冲组;P_{2d}:二叠系上统斗岭组;J₁:侏罗系下统;K₁:白垩系下统;Q_h:第四系更新统;F₂:稠下坪-平头岭断层;F₄:华塘铺-平头岭断层;F₇:大富岭-花根冲逆断层;F₈:保和圩-窑门口断层;F₉:塘元岭-梁家湾逆断层;F₂₃:金银冲-鸡公嘴逆断层;F₂₄:豹冲-蛤蟆石断层;F₂₅:温泉口-窑门口逆断层;F₅₉:范家冲-坳上断层;F₆₀:凤形坳断层;F₆₁:新桥-张家湾断层;GB1:许家洞地热块段;GB2:下涓桥地热块段

根据区内地层组合、岩性特征和地下水赋存条件,将地下水划分为松散岩类孔隙水、红层碎屑岩孔隙裂隙水、基岩裂隙水和碳酸盐岩岩溶水四种类型,不同地下水类型及富水性特征见表1。根据现

场地热钻孔调查,地下热水主要赋存于沿F₇、F₂₅断层发育的灰岩岩溶裂隙和岩溶通道中,在F₇断层上盘的CK3、CK7地热孔,降压试验测得的水温分别为47.0℃和35.6℃。

表1 研究区地下水类型及富水性特征

Table 1 Types and water yield property characteristics of groundwater in the study area

地下水类型	水量级别	含水岩层(组)
松散岩类孔隙水	贫乏	第四系更新统(Q ₄)
红层碎屑岩孔隙裂隙水	贫乏	白垩系下统(K ₁)
基岩裂隙水	贫乏	侏罗系下统(J ₁)、二叠系上统斗岭组(P _{2d})、二叠系下统当冲组(P _{1d})、石炭系下统大塘组(C _{1d})
碳酸盐岩岩溶水	丰富	二叠系下统栖霞组(P _{1q})、石炭系下统大塘组(C _{1d})、石炭系中上统壶天群(C ₂₊₃)

1.2 地热田地质特征

研究区地下热水赋存于沿断层发育的栖霞组和壶天群碳酸盐岩岩溶裂隙和岩溶通道中,局部破碎地段及裂隙为深部热能提供了上升通道。地表大面积出露的斗岭组和当冲组砂岩、页岩、硅质岩起着相对隔水和隔热作用,未破碎的碳酸盐岩同样起着相对隔水、隔热作用。

许家洞地区地热勘查范围包括许家洞和下涓桥两个地热块段。由于两个地热块段构造特征不同,地下热水温度亦有所差别,考虑到未来会分别开发利用,故对两个地热块段(许家洞地热块段和下涓桥地热块段,下文分别简称为GB1和GB2)地下热水资源分别进行分析评价。GB1受F₇断层控制,降压试验测得最高水温达47℃,区内无热水天然露头,属低温地热资源中的温热水;GB2主要受F₂₅断裂构造影响,该断层沿北北东25°方向展布,降压试验测得热水温度为35.6~36.5℃,属低温地热资源中的温水。

2 地热流体流场特征及动态分析

2.1 地热流体流场特征

区内岩溶水补给主要靠大气降水通过漏斗、洼地进行直接补给,在溶洞地下河中等至强烈发育地

区亦受地表水灌入补给,补给面积广、水源充分。地下水沿北东向断层(F₇、F₂₅、F₂₄、F₈)往深部渗透补给地下热水,在径流途中,各断层间纵横交错的裂隙系统为地下热水的相互联通提供了良好的条件。在GB1处,位于外围北东侧的711矿自然排水点所测标高为172.00 m,CK1和CK3地热孔同时期的水位标高为187.69 m、187.28 m,整体上,地下热水由南西向北东方向径流;在GB2处,北侧花根冲B05号自流孔水位标高为170.90 m,CK7和CK8地热孔同时期的水位标高为166.51 m、170.00 m,整体上,地下热水由北东向南西方向径流。

2.2 地热流体的动态特征

本次分别选取CK1和CK7地热孔对GB1和GB2地热流体动态特征(水位和水温)进行观测,GB1中地热孔CK1的观测时间为2020年12月~2021年12月;GB2中地热孔CK7的观测时间为2020年2月~2021年2月。其地下热水水位及水温的动态变化分别见图2和图3。

由图2可知:CK1和CK7地热孔水位动态变化具有明显的季节性特征,且与降雨量大小联系密切,最高水位均集中在5~7月份,水位变化均属于基本稳定型。观测期内CK1和CK7地热孔水位标高变化范围分别在187.11~189.22 m和166.40~169.22 m,年变化幅度分别为2.11m和2.82 m。

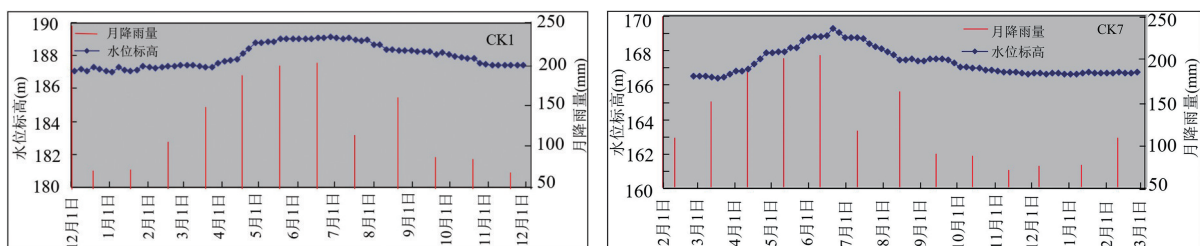


图2 许家洞地区地热孔水位长期观测动态变化曲线

Fig. 2 The long-term observation on dynamic change of geothermal borehole water level in the Xujiadong area

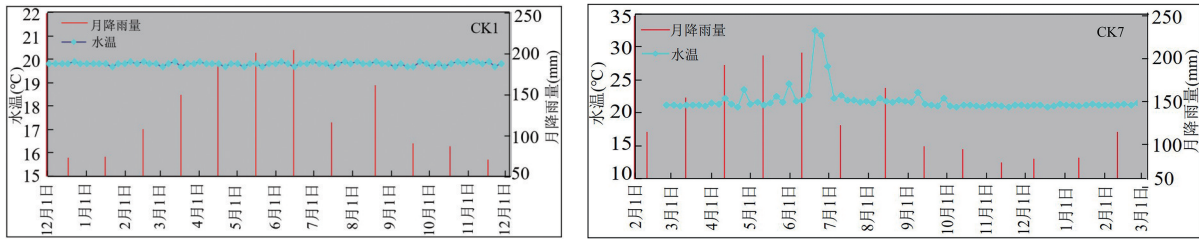


图3 许家洞地区地热孔水温长期观测动态变化曲线

Fig. 3 The long-term observation on dynamic change of geothermal borehole water temperature in the Xujiadong area

根据图3,CK1地热孔的地下热水水温无明显变化,浮动范围为 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是因为该地热孔地下热水静水位埋深较深,水温主要受地温控制;而CK7地热孔的地下水位埋深较CK1地热孔大约浅20 m,其水温的明显波动与龙女温泉(距CK7西约800 m)开采井的长时间抽水有关。

3 地热流体化学特征与质量评价

3.1 水化学特征

本次对GB1中CK1、CK3地热孔和GB2中CK7、CK8地热孔水样进行采集并开展水质测试。所采集的地下热水为低温、无色透明的水。本次研究采集的地下热水样品均在现场用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 滤

膜过滤,并保证水样充满采样瓶以防止空气进入,pH值在野外通过便携式手持pH计测定。水样品化学成分测试在湖南省地质工程勘察院进行, SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 等阴离子含量利用离子色谱法分析, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ 等阳离子含量和其他金属元素分别采用ICP-AES和ICP-MS分析,水化学分析方法符合国家标准《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水检验方法》(中华人民共和国国家卫生健康委员会和国家市场监督管理总局,2022),测试误差控制在3%以内。 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在核工业二二〇研究所利用水同位素分析仪采用波长扫描-光腔衰荡光谱法进行检测,并取3针平均值作为检测结果,测试精度分别为 $\pm 1\%$ 和 $\pm 0.1\%$ 。测试结果见表2。

表2 研究区地下热水水质分析结果

Table 2 Analysis results of geothermal water quality in the study area

分析项目	CK1	CK3	CK7	CK8	分析项目	CK1	CK3	CK7	CK8		
阳离子	K^+	1.46	2.77	1.22	1.67	阴离子	Cl^-	1.73	2.58	2.39	1.35
	Na^+	2.65	3.69	10.64	1.31		SO_4^{2-}	15.01	37.23	24.80	13.67
	Ca^{2+}	56.16	81.68	67.90	66.22		HCO_3^-	82.63	59.89	76.44	80.52
	Mg^{2+}	20.79	18.21	15.48	17.31		NO_2^-	0.01	0.03	0.02	0.01
	Fe^{3+}	0.03	0.01	0.01	0.01		NO_3^-	0.01	0.03	0.01	0.05
	Fe^{2+}	<0.01	0.02	0.07	0.02		F^-	0.21	0.30	0.33	0.39
	NH_4^+	0.04	0.04	0.26	0.33		PO_4^{3-}	0.84	/	7.29	3.35
物化性质	总硬度	227.21	280.33	202.50	237.91	单项分析	Se	0.03	<0.01	<0.01	<0.01
	总碱度	197.6	/	184.07	193.16		Li	<0.01	0.01	<0.01	0.01
	矿化度	382.83	454.31	425.56	395.74		Sr	0.47	1.32	0.68	0.72
	游离 CO_2	4.63	1.24	8.69	5.79		Zn	0.01	0.02	<0.01	<0.01
	耗氧量	1.09	0.96	2.12	1.35		H_2SiO_3	29.58	40.89	26.89	26.94
	pH	7.91	7.71	7.76	7.58		总 α	0.11	0.19	0.084	0.24
同位素	δD	-41.30	-25.21	-47.20	-44.90	总 β	0.12	0.13	0.083	0.14	
	$\delta^{18}\text{O}$	-4.40	0.60	-7.71	-8.70	^{226}Ra	0.01	0.02	0.01	0.01	

注: δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 单位为‰,总 α 、总 β 、 ^{226}Ra 单位为Bq/L,剩余分析项目单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;四个地热孔所测水样结果均 $<0.01\text{ }\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的分析项目未在表中列出。

研究区地下热水中阳离子主要包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 和 K^+ ,其含量分别为 56.16~81.68 mg/L、15.48~20.79 mg/L、1.31~10.64 mg/L 和 1.22~2.77 mg/L;主要阴离子 HCO_3^- 为 59.89~82.63 mg/L、 SO_4^{2-} 为 15.01~37.23 mg/L、 Cl^- 为 1.35~2.58 mg/L; pH 为 7.58~7.91,呈弱碱性。根据总硬度和矿化度指标(王大纯等,1986;尹恒等,2012),结合表2可知,GB1 和 GB2 地下热水的矿化度分别为 382.83~454.31 mg/L 和 395.74~425.55 mg/L,均为淡水;总硬度分别为 227.21~280.33 mg/L 和 202.50~237.91 mg/L,均为微硬水。不同来源的水具有不同的氢、氧同位素特征(刘凯等,2017),通常大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 -160.00‰ ~ -30.00‰ 和 -17.00‰ ~ $+5.00\text{‰}$,且 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 之间通常呈线性变化(张焱焱等,2024)。GB1 和 GB2 地下热水的 δD 值分别为 -41.30‰ ~ -25.21‰ 和 -47.20‰ ~ -44.90‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -4.40‰ ~ $+0.60\text{‰}$ 和 -8.70‰ ~ -7.71‰ ,在研究区地下热水样品的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图4)上可以看出,许家洞地区地下热水的数据点均落在全球大气降水线附近,表明研究区地下热水主要由大气降水补给,且发生了水汽再循环。整体分析可知,研究区地下热水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型或 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型。

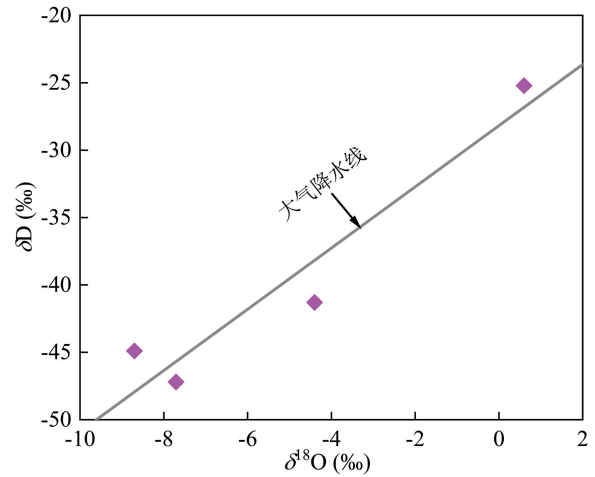


图4 研究区地下热水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 关系图

Fig. 4 Relationship between $\delta^{18}\text{O}$ and δD of geothermal water in the study area

底图据黄豪擎等(2023)

3.2 水化学特征动态分析

为分析许家洞地区地下热水水化学特征的动态变化,在丰水期和枯水期(天堂村CK3地热孔枯水期取样日期为2020年11月,丰水期取样日期为翌年4月;铜坑湖CK7地热孔枯水期取样日期为2020年2月,丰水期取样日期为同年7月)分别对许家洞CK3和下涓桥CK7地热孔取样进行水质对比分析(表3)。

表3 许家洞地区丰水期、枯水期地下热水水质分析结果

Table 3 Analysis Results of geothermal water quality in wet season and dry season in the Xujiadong area

项目	CK3		CK7		项目	CK3		CK7	
	丰水期	枯水期	丰水期	枯水期		丰水期	枯水期	丰水期	枯水期
K^+	2.86	2.77	2.30	1.33	Cl^-	1.15	5.20	0.89	2.39
Na^+	3.77	3.69	2.80	10.64	SO_4^{2-}	68.64	51.57	46.51	59.80
Ca^{2+}	90.60	81.68	61.53	67.90	HCO_3^-	81.29	97.59	93.33	84.44
Mg^{2+}	11.69	18.21	16.02	15.48	F^-	0.43	0.296	0.28	0.33
Fe^{3+}	0.03	0.01	0.01	0.07	NO_2^-	/	/	0.01	0.01
Fe^{2+}	0.03	0.02	0.01	0.01	NO_3^-	1.62	0.03	/	/
NH_4^+	/	/	0.27	0.26	PO_4^{3-}	/	/	0.45	7.29
Li	<0.01	0.01	0.01	0.01	溶解性总固体	447.30	497.11	405.70	434.20
Sr	1.75	1.32	0.67	0.68	总硬度	274.41	280.30	220.86	202.52
Zn	1.04	0.02	0.01	<0.01	总碱度	/	/	183.16	184.07
H_2SiO_3	44.50	40.88	27.55	26.89	游离 CO_2	9.17	1.24	6.01	8.69
δD	-47.20	-25.20	-43.00	-37.00	耗氧量	0.56	0.96	1.78	2.12
$\delta^{18}\text{O}$	-7.70	-0.61	-6.90	-4.53	pH	7.49	7.71	8.05	7.76

注: δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 单位为‰,pH无量纲,其余分析项目单位均为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;四个地热孔所测水样结果均 $<0.01\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的分析项目未在表中列出。

由表3可知:区内地下热水中各种成分含量随季节变化较小,水质动态变化相对稳定。需要指出的是,CK3地热孔中,丰水期和枯水期测得的Cl⁻离子含量变化略大,Zn元素的分析结果相差约70倍,这是由于丰水期取样时用镀锌管作为抽水管所致。

3.3 地热流体质量评价

3.3.1 地下热水用途评价

GB1和GB2中锶含量分别为0.47~1.32 mg/L和0.68~0.72 mg/L,偏硅酸含量分别为29.58~40.89 mg/L和26.89~26.94 mg/L(表2),根据《食品安全国家标准 饮用天然矿泉水》(中华人民共和国国家卫生健康委员会和国家市场监督管理总局,2018),区内地下水已达到饮用天然矿泉水的界限值(锶 $\geq 0.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,偏硅酸 $\geq 25.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);参考《生活饮用水卫生标准》(国家市场监督管理总局和中国国家标准化管理委员会,2022),初步判断区内地下水可作为生活饮用水,但受勘查程度限制,是否能作为饮用天然矿泉水及生活饮用水开发利用需要对其水质做更全面的检测。区内地下热水中偏硅酸含量大于25 mg/L,依据《天然矿泉水资源地质勘查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2016)进行评价,初步判断区内

地下水可作为理疗矿泉水开发利用。由于区内地下水为温水或温热水,根据《农田灌溉水质标准》(生态环境部和国家市场监督管理总局,2021)和《渔业水质标准》(国家环境保护局,1989),其不宜直接用于农业灌溉及鱼类养殖。

3.3.2 地下水腐蚀性评价

通常,地热流体中Cl⁻、SO₄²⁻、游离CO₂等化学组分具有一定的腐蚀性。根据《地热资源地质勘查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,2010),参照工业腐蚀系数来衡量地热流体(水)的腐蚀性。区内地下热水的pH值为7.49~8.05,呈弱碱性。碱性水腐蚀系数计算公式为:

$$K_k = 1.008[r(\text{Mg}^{2+}) - r(\text{HCO}_3^-)] \quad (1)$$

式中: r 为离子含量(mmol/L)。若腐蚀系数 $K_k > 0$,称为腐蚀性水; $K_k < 0$,且 $K_k + 0.0503\text{Ca}^{2+} > 0$,称为半腐蚀性水; $K_k < 0$,且 $K_k + 0.0503\text{Ca}^{2+} < 0$,称为非腐蚀性水。

由区内地下水腐蚀性评价计算结果(表4)可知:GB1和GB2地下水分别属半腐蚀性水和非腐蚀性水。

表4 区内地下水腐蚀系数计算

Table 4 Calculation of corrosion coefficient of geothermal water in the study area

地热块段	$r(\text{Mg}^{2+})$ (mmol/L)	$r(\text{HCO}_3^-)$ (mmol/L)	Ca ²⁺ 浓度 (mmol/L)	腐蚀性		
				K_k	$K_k + 0.0503\text{Ca}^{2+}$	腐蚀性
GB1	1.499~1.710	3.402~3.948	56.14~81.68	-1.888 ~ -2.266	0.935 ~ 1.848	半腐蚀性
GB2	1.274~1.425	3.678~3.860	3.304~3.388	-2.454 ~ -2.423	-2.252 ~ -2.287	非腐蚀性

4 地热资源量计算及资源潜力评价

4.1 地热储能计算

热储法是目前计算地热资源量较为成熟且应用广泛的方法(何雨江和丁祥,2020),本文选用热储法进行区内地热资源量的计算,公式如下:

$$Q = Q_r + Q_w \quad (2)$$

$$Q_r = Ad\rho_r C_r (1 - \psi)(t_r - t_0) \quad (3)$$

$$Q_w = Q_L \rho_w C_w (t_r - t_0) \quad (4)$$

$$Q_L = A\psi d + ASH \quad (5)$$

式中: Q 为地热资源量; Q_r 为岩石中储存的热量; Q_w 为水中储存的热量; Q_L 为热储中储存的水量; A 为热储面积; d 为热储厚度; ρ_r 为热储岩石密度; C_r 为热储岩石比热容; ψ 为热储岩石孔隙率或裂隙率; t_r 为热储温度; t_0 为当地年平均温度; ρ_w 为地下热水密度; C_w 为水的比热容; S 为导水系数,无量纲; H 为计算起始点以上高度。参照《地

热资源地质勘查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2010)附录C中所列经验值及区内地热资源勘查资料对计算参数取值,各计算参数及结果见表5。由表5可知:GB1和GB2热储层中储存的热量分别为 8.10×10^{16} J和 1.06×10^{16} J。

表5 区内资源储量计算结果表

Table 5 Calculation results of resources reserves in the study area

地热块段	A (km ²)	D (m)	ρ_r (kg/m ³)	C_r [J/(kg·°C)]	ψ (%)	ρ_w (kg/m ³)	C_w [J/(kg·°C)]	t_r (°C)	t_0 (°C)	S	储量($\times 10^{16}$ J)
GB1	3.15	195.02	2700	920	2.45	1000	4180	70	17.8	1×10^{-4}	8.10
GB2	1.67	113.88	2700	920	2.45	1000	4180	40	17.8	1×10^{-4}	1.06

注:仅计算勘查深度内的储量,其深部未计算。

4.2 地下热水可采资源量计算

许家洞地区地下热水动态变化较小,采用单孔可开采量评价法分别计算GB1和GB2内地下热水可开采资源量。由钻孔的可开采量计算结果(表6)可知,GB1和GB2中地热孔的可开采量分别为 $766.11 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $4079.28 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

表6 区内钻孔可开采量计算结果

Table 6 Calculation Results of mining output of Boreholes in the study area

地热块段	地热孔号	S (m)	q [m ³ /(d·m)]	Q (m ³ /d)	Q 合计 (m ³ /d)
GB1	CK1	0.64	784.05	501.79	766.11
	CK3	0.94	281.19	264.32	
GB2	CK7	9.96	264.39	2633.32	4079.28
	CK8	18.66	77.49	1445.96	

注: S 、 q 、 Q 分别为降深值、单位涌水量、钻孔开采量。

4.3 地下热能量计算

根据钻孔可开采热量,区内地下热水可开采热水的热能计算公式如下:

$$W_i = 4.1868Q(t - t_0) \quad (6)$$

式中: W_i 为热功率; Q 为地热流体可开采量; t 为地热流体温度,取抽水时温度; t_0 为当地年平均气温。地热流体年开采累计可利用的热能量按式(7)进行估算:

$$\sum W_i = 86.4DW_i/K \quad (7)$$

式中: $\sum W_i$ 为一年开采累计可利用的热能量; D 为全年开采日数,按每年250天计算; K 为热效率,按燃煤锅炉的热效率0.6计算。

表7给出了区内地热田可采热储能计算结果。由表7可知:GB1和GB2地热块段可采热储量分别为6301 kW和2684 kW(即6.30 MW和2.68 MW),故许家洞地区地下热水可采热储量为8.98 MW,每年可提供约 3.23×10^8 MJ热能,属小型地热田。

根据《地热资源地质勘查规范》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2010)附录F,GB1和GB2地热块段地热利用的年节煤量分别为7741.40 t和4017.05 t,共计约 1.18×10^4 t。

表7 区内地热田可采热储量计算结果

Table 7 The calculation results of recoverable heat reserves in geothermal fields

地热块段	地热孔号	t (°C)	Q (L/s)	W_i (kW)	总计 W_i (kW)	$\sum W_i$ (MJ)	总计 $\sum W_i$ (MJ)
GB1	CK1	30.5	5.81	267	6301	9612000	226836000 ($\approx 2.27 \times 10^8$)
	CK3	47.0	49.36	6034		217224000	
GB2	CK7	35.6	23.94	1784	2684	64228680	96628680 ($\approx 9.66 \times 10^7$)
	CK8	34.6	12.80	900		32400000	

5 结论

研究区热源由隐伏岩体深部热能通过断裂构造(以 F_7 和 F_{25} 为主)上升形成,盖层主要为二叠系斗岭组和当冲组的砂岩、页岩、硅质岩等,栖霞组和壶天群的碳酸盐岩岩溶发育段构成了该地热田的热储层,完整的碳酸盐岩起着相对隔水隔热的作用。

许家洞地区地下热水赋存于碳酸盐岩的岩溶裂隙和通道中,主要补给来源是大气降水。地下水沿断裂构造向深部渗透补给地下热水,当地下水运移到一定深度,由常温地下水变成地下热水后,由于断层两侧岩溶裂隙系统的不均一性,受深部、浅部相对隔水隔热岩层的阻隔,地下热水向上运移,在地表以温泉形式出露。水位和水温的动态观测显示区内水位属基本稳定型,水温在不受外界影响的情况下无明显波动。

区内地下热水为低温、无色透明的弱碱性水,随季节变化不明显。地下热水的阳离子以 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主,其次为 Na^+ 、 K^+ ;阴离子以 HCO_3^- 为主,其次为 SO_4^{2-} 、 Cl^- ;水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型、 $HCO_3-Ca \cdot Na$ 型或 $HCO_3 \cdot SO_4-Ca \cdot Mg$ 型,初步判断区内地下热水可作为理疗热矿水开发利用。地下水中的偏硅酸、锶达到饮用天然矿泉水标准。

许家洞和下湄桥两个地热块段热储层中的热储量分别为 $8.10 \times 10^{16} J$ 和 $1.06 \times 10^{16} J$,可开采量分别为 $766.11 m^3/d$ 和 $4079.28 m^3/d$,地下热水可采热储量分别为 $6300.99 kW$ 和 $2684.13 kW$,每年可分别提供约 $2.27 \times 10^8 MJ$ 和 $9.66 \times 10^7 MJ$ 的热能,每年节约的标准煤资源约 $1.18 \times 10^4 t$ 。这对该地区地热资源的开发利用及生态环境保护具有重要指导意义。

参考文献:

卞跃跃,赵丹.2018.四川康定地热田地下热水成因研究[J].地球学报,39(4):491-497.
国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会.2022.生活饮用水卫生标准:GB5749-2022[S].北京:中国标准出版社.
国家环境保护局.1989.渔业水质标准:GB11607-1989[S].北

京:中国标准出版社.

何欣,马悦.2019.华北板块奥陶系碳酸盐岩热储的水化学特征及其成因机制[J].安全与环境工程,26(3):9-15.
何雨江,丁祥.2020.基于参数辨识的典型区地热资源量研究——以银川平原西部斜坡区为例[J].地质学报,94(7):2131-2138.
胡志华,高洪雷,万汉平,张松,郝伟林,吴儒杰.2022.西藏羊八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J].地质论评,68(1):359-374.
黄豪擎,袁兴成,彭清华,郭游,薛仲凯,巨增,李健,刘振峰,巴桑次仁,孙飞,袁胜.2023.喜马拉雅山南地区地热水和钙华地球化学特征与成因机制[J].沉积与特提斯地质,43(2):340-356.
李金玺,孙东,李智武,曹楠,童馗,廖俊,张正鹏,董建兴,章旭.2023.四川盆地水热型地热资源构造成因模式[J].地质科学,58(2):438-460.
刘润川,任战利,叶汉青,任文波,王琨,淮银超,祁凯.2021.地热资源潜力评价——以鄂尔多斯盆地部分地级市和重点层位为例[J].地质通报,40(4):565-576.
刘敏.2020.郴州市热温泉资源特征及其开发利用布局研究[J].西部探矿工程,32(11):188-191.
刘凯,王珊珊,孙颖,崔文君,朱德莉.2017.北京地区地热资源特征与区划研究[J].中国地质,44(6):1128-1139.
廖海吉,蓝俊康,洪淑娜,闫志为,黄希明.2013.汤水寨温泉带状热储特征及其热储量评价[J].桂林理工大学学报,33(3):449-453.
牛兆轩,牛雪,张林友,张成龙,陈东方.2022.共和盆地恰卜恰地区新近系地下热水化学特征[J].科学技术与工程,22(21):9025-9033.
屈丽丽,徐世光,杨秀梅,嵯传源.2011.怒江跃进桥温泉水化学特征及成因分析[J].科学技术与工程,11(20):4723-4729.
史杰,汪美华,马小军,文章,朱栗佟.2022.新疆塔什库尔干县曲曼地热田地下热水同位素研究[J].地球学报,43(5):645-653.
孙杨艳,刘声凯,景营利.2020.郴州地热田地热温标的选取和热储温度估算[J].资源信息与工程,35(1):36-39.
生态环境部,国家市场监督管理总局.2021.农田灌溉水质标准:GB5084-2021[S].北京:中国标准出版社.
王大纯,张人权,史毅虹,许绍倬.1986.水文地质学基础[M].北京:地质出版社.
尹恒,吴勇,高东东,古广华.2012.德阳市城市规划区地下水化学特征分析[J].地下水,34(1):30-35.
尹政,柳永刚,张旭儒,李玉山,冯嘉兴.2023.张掖盆地地热资源赋

- 存特征及成因分析[J].水文地质工程地质,50(1):168-178.
- 赵璐,邬立,罗湘赣.2010.由地球化学温标推算贵阳市乌当区地热田热储温度[J].工程勘察,(S1):832-836.
- 朱天林.2006.郴州市许家洞地下热水[J].工程勘察,207(10):35-37.
- 张垚垚,刘凯,童珏,何庆成,贺晓龙,贾伍慧,张浩然,王书训.2024.江西吉安钱山地区地热资源特征及热源机制[J].地球学报,45(1):39-52.
- 赵振,秦光雄,罗银飞,晁嘉豪,耿松鹤,张亮.2021.西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险[J].水文地质工程地质,48(5):193-204.
- 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.2018.食品安全国家标准饮用天然矿泉水:GB8537-2018[S].北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.2022.食品安全国家标准饮用天然矿泉水检验方法:GB8538-2022[S].北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.2010.地热资源地质勘查规范:GB/T11615-2010[S].北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2016.天然矿泉水资源地质勘查规范:GB/T13727-2016[S].北京:中国标准出版社.
- Guo Q, Pang Z H, Wang Y C, Tian J. 2017. Fluid geochemistry and geothermometry applications of the Kangding high-temperature geothermal system in eastern Himalayas[J]. Applied Geochemistry, 81: 63-75.
- Karimi S, Mohammadi Z, Samani N. 2017. Geothermometry and circulation depth of groundwater in Semnan thermal springs, Northern Iran[J]. Environmental Earth Sciences, 76(19): 1-24.
- Li X, Huang X, Liao X, Zhang Y H. 2020. Hydrogeochemical Characteristics and Conceptual Model of the Geothermal Waters in the Xianshuihe Fault Zone, Southwestern China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 17(2): 500-514 .
- Liu F, Wang G L, Zhang W, Yue C, Tao L B. 2020. Using TOUGH2 numerical simulation to analyse the geothermal formation in Guide basin, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 8(4): 328-337.