

袁建飞, 刘慧中, 邓国仕, 等. 广安市铜锣山背斜三叠纪岩溶热储结构特征及热水成因研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 623-635.

DOI: 10.11932/karst20220410

广安市铜锣山背斜三叠纪岩溶热储结构特征及热水成因研究

袁建飞, 刘慧中, 邓国仕, 李明辉

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081)

摘要: 为探讨广安市铜锣山背斜三叠纪岩溶热储特征、地热水水化学与同位素组成、热储温度及地热水循环机理, 采用地热钻探、水化学与同位素取样测试、热水溶质组分图解分析等手段和方法, 开展了地热水成因的研究工作。结果表明: 研究区三叠纪碳酸盐岩热储结构相对完整, 热储盖层、热储层和热储下部隔水层形成独立的地热水地质单元。岩溶地热水水化学类型主要为 $\text{SO}_4\text{-Ca-Mg}$ 和 $\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型, 富含 F、Sr、Li、B 和 SiO_2 物质, 其水源补给为大气降水, 补给区位于铜锣山以北的大巴山一带, 深部地热水补给高程大于 1 100 m, 补给区年均温度为 9 °C。热储温度为 56~76 °C, 热水循环深度为 2 013~3 030 m。地热水在循环过程中, 主要发生碳酸盐岩和蒸发岩溶解、冷热水混合过程, 且冷水混入比例大于 80%。结合区域地热地质条件, 构建了研究区地热水成因概念模型。

关键词: 铜锣山背斜; 岩溶热储结构; 地热水成因; 水文地球化学; 广安市

中图分类号: P641.3 文献标识码: A

文章编号: 1001-4810 (2022) 04-0623-13 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



0 引言

地热资源因其储量丰富、对环境污染小、运营成本低等优势而备受世界各国青睐, 世界上许多国家都在积极研究与开发地热资源^[1-9]。我国地热资源丰富, 出露温泉 2 334 处, 地热开采井 5 818 眼^[1], 主要集中在具有地表热显示的中、高温地热田(如西藏羊八井、羊易地热田, 云南腾冲地热田, 川西康定和巴塘地热田)和具有较高热流背景和赋热潜力巨大的干热岩区(如青海贵德盆地)^[10-14]。然而, 这类地热田和干热岩区主要分布在局部特殊区域, 其开发和利用程度受到区域位置和技术条件(压裂、换热、储能)限制。相比之下, 岩溶地热资源因其具有水量大、

开采利用后易于尾水回灌, 热储破坏小等优点逐步受到地方政府重视^[15-16]。

川东褶皱山区岩溶地热资源丰富, 主要赋热储层为三叠系雷口坡组与嘉陵江组碳酸盐岩地层^[17-19]。近年来, 众多学者对该区地热露头显示明显和地热开采程度较高的重庆市开展了地热系统的科学研究, 并在典型背斜构造区(南温泉背斜、温塘峡背斜、铜锣山背斜等)开展了地热系统成因、地热水水化学元素含量和同位素组成、单一地热开采区块多井水流干扰数值模拟、主要溶质物源信息及地热开采规划与保护等方面的研究, 并取得一系列研究成果^[17, 20-22]。然而, 对于地表热显示较差或者缺乏热显示的广安地区, 地热研究工作较少, 研究程度不高^[18, 23]。

资助项目: 中国地质调查局项目《西南诸河澜沧江流域水文地质与水资源调查》(DD20211381); 《四川广安资源环境综合地质调查》(DD20190524);

中国地质调查局成都地质调查中心科技基金《川西高原高温地热流体特征组分的水文地球化学研究》(KJ201867)

第一作者简介: 袁建飞(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事水文地质、地热地质和水文地球化学方面的研究工作。E-mail: jianfeiyuan@163.com。

收稿日期: 2022-03-18

本文基于前人资料的综合分析研究,结合广安市铜锣山背斜近两年来成功实施的地热勘探试验井的勘探资料,从岩溶热储结构、热水水文地球化学特征、热储温度及成因机理等角度开展分析研究,以剖析本区铜锣山背斜岩溶热水赋存条件和成热机理,进而丰富川东褶皱带中段岩溶热储系统理论,支撑该区地热清洁能源勘查与开发利用。

1 研究区概况

1.1 构造与地层

研究区位于广安市东部铜锣山地区,属四川盆地东北部的川东平行岭谷地貌,以低山和丘陵为主。区内构造属川东褶皱带,并以铜锣山背斜为主。该背斜总体走向 NE-SW,至南部折成 SN 走向,因此成一弯弧突向西部。其北西翼倾角较缓($30^{\circ}\sim 40^{\circ}$),南东翼较陡($70^{\circ}\sim 85^{\circ}$),轴部宽而倾斜缓,呈不对称箱型。区内出露地层主要为三叠系、侏罗系和第四系地层。其中,三叠系地层包括上统须家河组(T_{xj})、中统雷口坡组(T_l)、下统嘉陵江组(T_j)和飞仙关组(T_f),且除须家河组岩性为砂岩、泥岩、页岩夹煤层外,其余地层岩性为碳酸盐岩或碳酸盐岩夹碎屑岩地层,并

分布于背斜核部及两翼近核部地区;侏罗系地层包括中统新田沟组(J_x)、中下统自流井组(J_zl)和下统珍珠冲组(J_z)地层,其岩性主要为砂岩、泥岩、页岩地层,主要分布于背斜两翼地区;第四系地层岩性主要为冲洪积物和残坡积物,分布于河流阶地与背斜槽谷地区(图 1)。

1.2 水文地质条件

1.2.1 地下水类型

研究区地下水类型依据赋存条件、水动力学特征及含水介质组合状况,可分为松散岩类孔隙水、碎屑岩类孔隙裂隙水和碳酸盐岩类裂隙溶洞水三类。区内与地热相关的地下水类型为碳酸盐岩类裂隙溶洞水,主要分布于三叠系中、下统碳酸盐岩地层的裂隙、溶隙、溶蚀孔洞及破碎带中。结合区内岩溶水的埋藏深度、径流条件、水化学、温度场特征及出露方式,划分为浅层岩溶水和深层岩溶热水两个系统(图 1b)。其中,浅层岩溶水埋深较浅,水温与常温接近,多出露于河谷底板或地势低洼处,具有“分散补给、统一径流和集中排泄”的特点。深层岩溶水埋深介于 500~2 000 m,其补给途径长,循环深度大,多为

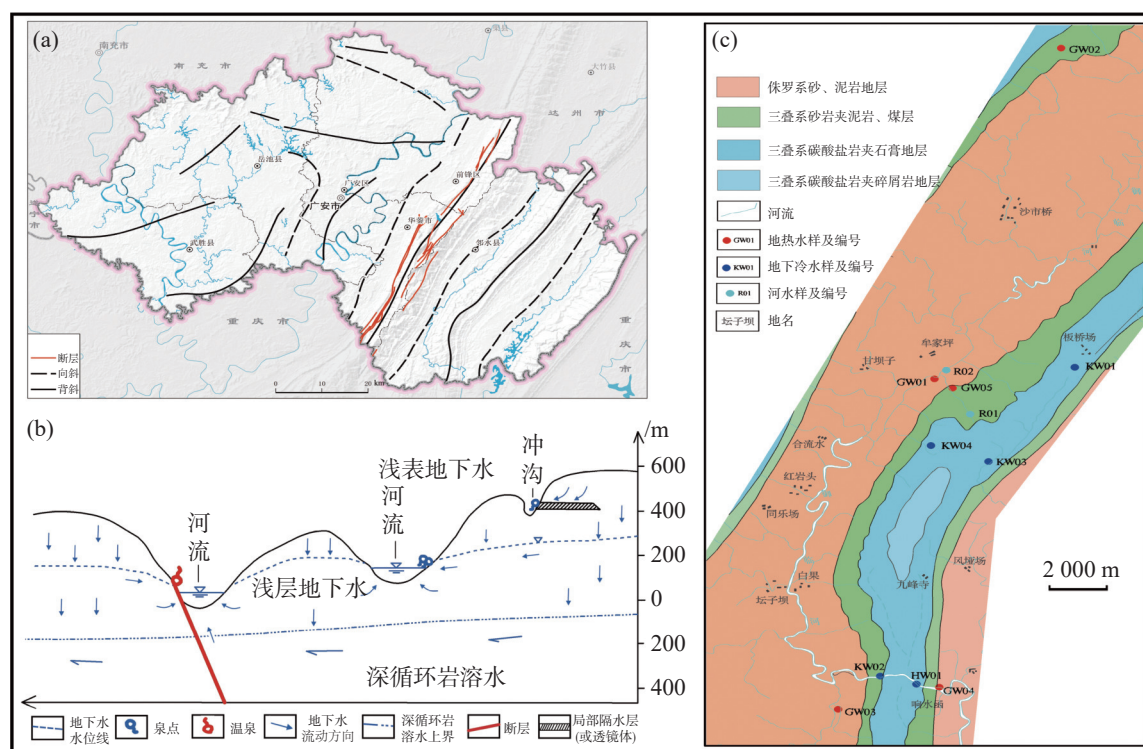


图 1 研究区地质构造、简易水文地质剖面及采样点分布简图

Fig. 1 Simplified map of geological structures, hydrogeological profiles, and sampling locations in the study area

26~45℃温热水,且多以人工钻探形式揭露。

1.2.2 岩溶发育特征

结合区域水文地质填图成果,分析得到研究区岩溶发育特点主要有^[24]:可溶岩发育具有顺层性,区内落水洞、暗河及岩溶漏斗其延伸方向与岩层走向基本相同;灰岩、白云岩及泥质灰岩等岩石结构存在差异,溶蚀程度及岩溶发育不均匀。地表岩溶形态有岩溶槽谷、岩溶洼地、落水洞、漏斗及天窗等;地下岩溶形态包括暗河、溶洞和溶隙等。暗河多顺背斜轴向发育,溶洞则受层理、节理、裂隙及岩性等不同因素控制,洞口形态多样化,且出露于深切沟谷两岸陡壁之上,多为干溶洞。溶孔、溶隙主要是岩体节理裂隙轻微的溶蚀改造而形成的小规模缝隙,其发育程度、规模和连通性影响深部地热水储层空间。据广安铜锣山背斜西翼成功实施的两口深部地热钻井测井、录井及抽(放)水试验,钻井钻入三叠系雷口坡组和嘉陵江组三、四段灰岩地层时,钻时加快,涌水情况明显,物探测井报告显示该段溶隙、裂隙发育,孔隙度平均为5.63%,渗透率平均为 $0.183 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[24]。

2 研究方法

2.1 地热钻探

中国地质调查局成都地质调查中心于2019年和2020年分别在广安市铜锣山背斜西翼刘家沟村和桂花村实施了井深为2 503 m和1 709 m的地热勘探试验井(图2)。其中,刘家沟地热井开孔地层为侏罗系自流井组,终孔地层为二叠系长兴组;桂花村地热井开孔地层为侏罗系新村组,终孔地层为三叠系嘉陵江组。两口地热井终孔后井口水温和水量分别为42℃和 $16\,000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,42℃和 $1\,500 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。结合上述两口地热勘探试验井钻探成果,梳理分析广安市铜锣山背斜岩溶热储结构特征(详见岩溶热储特征部分内容)。

2.2 水化学和同位素样品采样与测试

为了分析广安市铜锣山背斜岩溶地热水水文地球化学特征,研究地热水成因,分别于2019年11月和2020年12月采集水样共计11组(图1),开展水样阴、阳离子和氢氧同位素测试工作。取样时,所有

水样经 $0.45 \mu\text{m}$ 微孔滤膜进行抽滤,并分成三份,其中一份加入优级纯硝酸至pH小于2,用于阳离子测试;另外两份原样分别用于阴离子和氢氧同位素(δD 和 $\delta^{18}\text{O}$)测试。

水样常规参数如水温、pH和总溶解性固体(TDS)等指标现场采用已校准的便携式水质分析仪(Thermo, 520M-01 model)测定。碱度(以 HCO_3^- 计)当日采用盐酸(浓度 $0.05 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$)滴定,其他化学指标在水样采集后2周内进行测试。阴(SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 、 NO_3^-)、阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、B、Sr、Si、Li)、 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均在中国地质大学(武汉)地质调查研究院测定,所有分析水样化学组分平行样误差均在5%以内, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 测试误差分别小于0.5‰和0.1‰。样品测试结果见表1。

3 岩溶热储特征

研究区热储层主要为三叠系雷口坡组和嘉陵江组碳酸盐岩地层;热储盖层为侏罗系红色碎屑岩地层和三叠系须家河组碎屑岩地层;热储下部隔水岩层为三叠系飞仙关组碎屑岩夹碳酸盐岩地层(图2)。局部地区,受隐伏断裂影响,深部热水沿断裂带上升与地下冷水混合后可能赋存于须家河组砂岩地层,致使须家河组成为热储层,如广安邻水县刘家沟地热井在须家河地层揭露水温为37℃地层水^[18]。

3.1 热储层

存储并运移地热水的含水岩组(层)称之为热储层。结合研究区已实施的两口地热井录井和测井资料,分析区内岩溶热储层为三叠系下统嘉陵江组第四和第三段,次要热储层为三叠系嘉陵江组第一、二段和雷口坡组。据研究区地热地质填图资料,区内嘉陵江组及雷口坡组碳酸盐岩出露区,溶洞、落水洞、溶沟及溶槽发育^[24]。因实施的两口地热井未采集岩芯,仅开展岩屑编录,故借助钻探简易水文地质记录、物探录井及钻井实效分析岩溶热储岩溶发育情况。刘家沟地热井钻探水文地质资料显示:井段深度841~857 m、998~1 052 m地层较破碎,岩溶较发育,钻时较快,具有明显的水层特征。测井成果图显示地层渗透性好,含水特征明显^[23]。桂花村地热井钻探水文地质、测井成果和水文试验显示:该井主要含水层埋藏深度分布于1 307~1 516 m,对应嘉陵江组

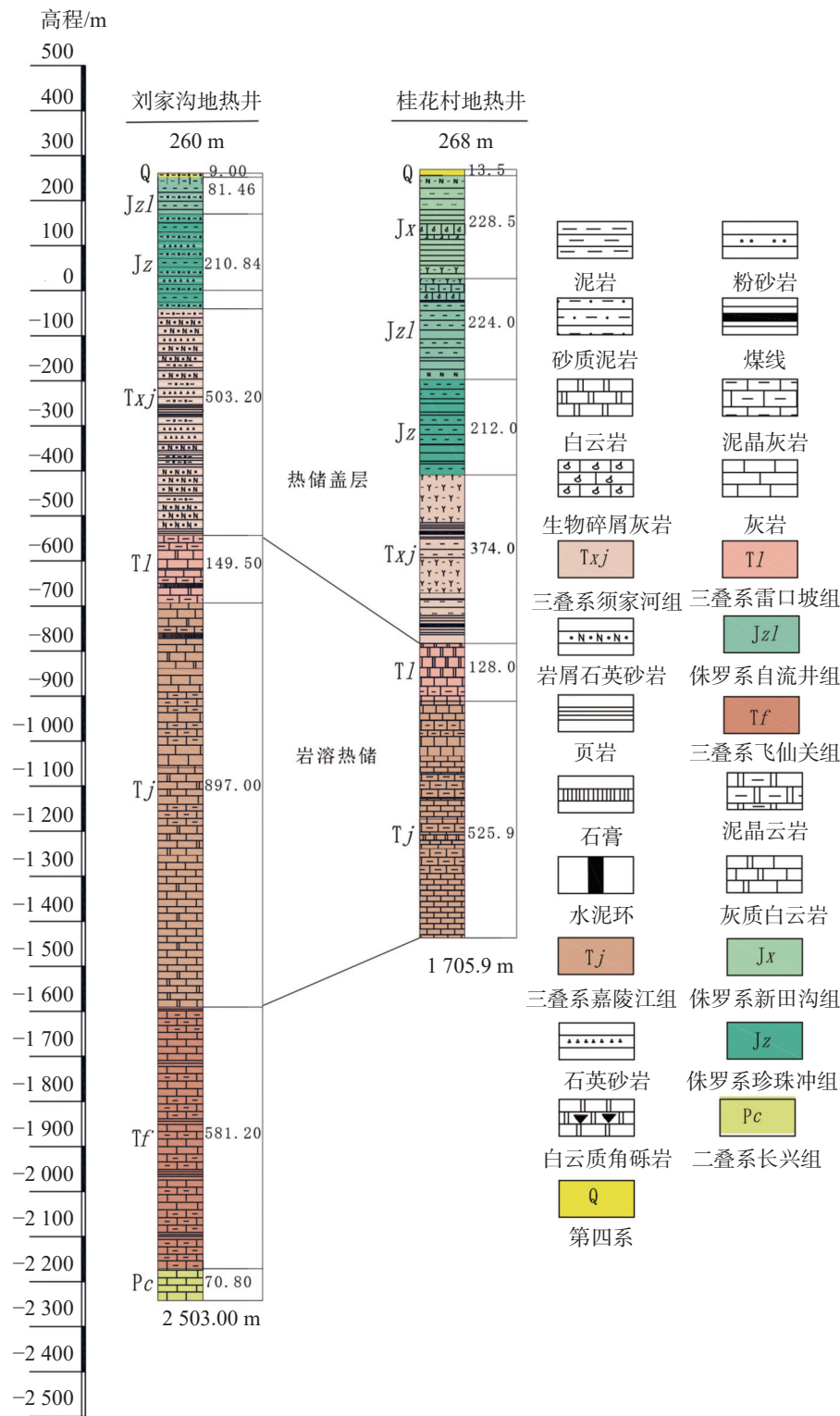


图 2 广安市铜锣山背斜刘家沟地热井和桂花村地热井柱状图

Fig. 2 Histogram of geothermal wells of Liujiagou and Guihua village in the Tongluo mountain anticline of Guang'an City

第三段地层,其渗透性较好,裂隙和溶隙较发育。

3.2 热储盖层

覆于热储层之上,具有相对隔水、隔热与保温性质的地层称之为热储盖层。区内热储盖层主要有两

层,第一盖层为三叠系须家河组砂岩、泥岩及煤层地层,已有地热钻井揭露其钻井厚度为 374~503 m;第二盖层为侏罗系砂岩和泥岩地层,其钻井厚度数百至千米以上。完整的第一和第二热储盖层有效地阻

表 1 铜锣山背斜水样的物理—化学和同位素组分分析结果

Table 1 Physical-chemical and isotopic compositions of water samples in the Tongluo mountain anticline																					
编号	类型	水温	pH	TDS	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Sr	SiO ₂	Li	B	δD	δ ¹⁸ O	补给 高程	补给区 温度
GW01	地热井	42	7.20	3242	208.00	18.30	2091.00	2.68	12.80	28.60	678.00	177.00	3.00	12.80	26.32	0.27	0.72	-64.53	-9.58	1251	9
GW02	地热井	29	7.16	3064	223.00	12.00	2004.00	—	9.65	18.20	609.00	157.00	2.95	13.40	24.85	0.02	0.13	-62.94	-9.61	1198	10
GW03	地热井	42	7.06	3230	208.00	20.90	2067.00	—	12.80	33.80	702.00	156.00	2.40	12.20	26.47	0.24	0.63	-64.38	-9.52	1246	9
GW04	地热井	26	7.24	1002	335.00	2.80	401.00	—	2.28	4.32	186.00	48.20	0.96	4.70	15.23	0.03	0.02	-50.32	-8.14	777	14
HW01 ^a	温泉	30	7.33	1800	265.00	264.00	858.00	—	94.60	100.00	293.00	70.64	—	12.05	—	—	0.86	-50.1	-8.18	770	14
HW02 ^b	温泉	45	7.12	1680	183.00	34.00	1643.00	0.56	30.12	28.75	578.00	120.32	12.46	12.11	—	—	—	-59.5	-8.84	1083	11
GW05	浅孔	26	7.33	1733	198.00	1.38	1044.00	—	3.59	2.53	388.00	72.70	1.84	8.44	16.39	0.06	0.19	-56.05	-8.53	968	12
KW01	岩溶泉	18	7.76	317	349.50	7.49	38.30	37.63	4.69	5.67	102.81	28.72	0.26	0.12	9.69	0.00	0.04	-44.76	-7.24	592	16
KW02	岩溶泉	18	6.74	232	333.40	1.08	44.40	1.13	1.03	2.24	89.10	28.60	0.17	0.37	11.04	—	0.02	-44.15	-7.20	572	16
KW03	暗河	16	7.13	455	298.00	2.50	22.50	12.34	1.64	1.47	100.00	7.68	0.13	0.44	7.54	0.00	0.00	-43.29	-7.33	543	16
KW04	暗河	17	7.29	450	281.00	2.50	28.20	11.59	1.61	2.70	98.70	8.77	0.10	1.80	7.85	0.00	0.01	-44.38	-7.52	579	16
R01	河水	18	6.24	140	186.10	2.16	33.50	1.37	2.47	2.84	49.10	14.50	0.11	0.14	10.01	—	0.02	-41.09	-7.33	—	—
R02	河水	18	6.74	121	109.80	6.92	38.30	7.94	3.31	8.94	40.50	6.42	0.07	0.43	12.41	—	0.03	-40.74	-6.93	—	—

注：水温 and 补给区温度单位为℃；pH无量纲；δD和δ¹⁸O单位为‰；补给高程单位为m；化学组分单位为mg·L⁻¹；“—”为未检出或未分析；a引自[25]，b引自[26]等文献数据。

表 2 铜锣山背斜地热水热储温标计算结果

Table 2 Calculated results of geothermal reservoirs of the Tongluo mountain anticline							
编号	t	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄		
GW01	42	74	78	75	76		
GW02	29	72	76	73	74		
GW03	42	74	79	75	76		
GW04	26	54	60	53	56		
GW05	26	56	62	56	58		

注：为地热井或泉口水温；T₁=1 309/(5.19- $\lg$ SiO₂)-273.15，为无蒸汽损失的石英温度计算式；T₂=1 522/(5.75- $\lg$ SiO₂)-273.15，为最大蒸汽损失的石英温度计算式；T₃=-44.119+0.244 69S-1.741 4×10⁻⁴×S²+79.3051gS，为改进的玉髓温标计算式；T₄为T₁、T₂和T₃的平均值；上述温度单位为℃。

止热储层中热能的散失,保障热储层的热水温度。

3.3 热储下部隔水岩层

区内热储下部隔水层主要由三叠系飞仙关组碎屑岩夹碳酸盐岩组成。刘家沟地热钻井揭露其岩性为紫红、暗紫色泥岩与深灰、灰色泥质灰岩夹黑灰色页岩,钻井厚度为 581 m。飞仙关组隔水层中泥岩、页岩孔隙度低、渗透率小,热导率低,可有效阻止地热水向深部运移,能起到很好的隔热保温作用。

3.4 控热构造

广安市铜锣山背斜三叠纪碳酸盐岩热储构造相对较完整,热储盖层、热储层,热储下部隔水层形成相对独立的地热水文地质单元。热储层中地热水主要埋藏在背斜构造的翼部地区,已实施地热钻孔揭露其埋深 700~1 500 m。在部分区段,如邻水县牟家镇刘家沟村一带,因隐伏断层影响,热储层中地热水沿断裂破碎带上升可分别赋存于侏罗系砂岩和三叠系须家河组砂岩地层,揭露热水温度介于 34~37 ℃^[24]。

4 岩溶热水化学和同位素特征

4.1 水化学特征

根据水样水化学组分测试结果,绘制研究区水

样的 Piper 三线图见图 3。区内地热水采自温泉、浅孔和地热井,浅孔深度 50 m,地热井井深 1 000~2 503 m。地热水 pH 为 7.06~7.33, TDS 值为 1 002~3 242 mg·L⁻¹,水化学类型主要为 SO₄-Ca·Mg 和 SO₄-Ca 型。地下冷水和河水水化学类型主要为 HCO₃-Ca·Mg 型,其 pH 和 TDS 值分别介于 6.74~7.76 和 281~349.51 mg·L⁻¹, 6.24~6.74 和 120.9~139.5 mg·L⁻¹。地热水较地下冷水和河水具有较高的水温、TDS、SO₄²⁻、Ca²⁺、Mg²⁺、F、Sr、Li、B 和 SiO₂ 值。

通过对研究区水文地质条件和地热井热储结构的分析和研究,确定区内地下冷水和地热水主要赋存于三叠系碳酸盐岩含水层中,该套地层以灰岩、白云岩及局部石膏夹层为主,地下冷水和热水径流过程中,水与围岩矿物的水岩相互作用为地下水中优势离子 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和 SO₄²⁻的主要来源。(Ca+Mg) vs. (HCO₃+SO₄)、TDS vs. (Na⁺/(Na⁺+Ca⁺)) 和 TDS vs. (Cl⁻/(Cl⁻+HCO₃⁻)) 关系图(图 4,图 5)亦佐证上述结论。此外,区内地热水属于深循环、长径流的地下水系统,较高的温度、较充足的水岩作用时间致使含 F、Sr、Li、B 和 SiO₂ 物质的矿物溶解,形成地热水中上述组分较浅层地下冷水较高的浓度值。

4.2 同位素特征

由表 1 和图 6 可知:广安市铜锣山背斜地热水

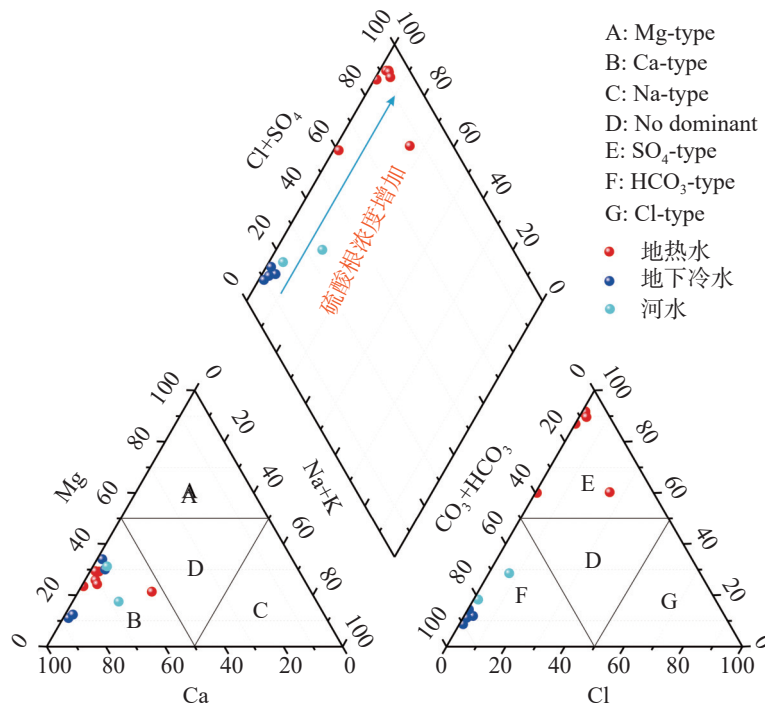


图 3 研究区水样 Piper 三线图

Fig. 3 Piper diagram of water samples in the study area

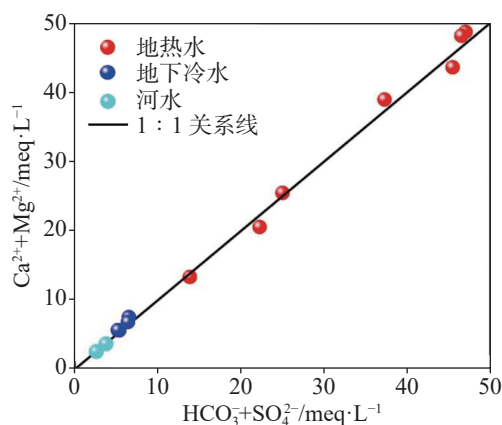
图4 研究区水样 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ vs. $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 关系图

Fig. 4 Plot of $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ vs. $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ for water samples in the study area

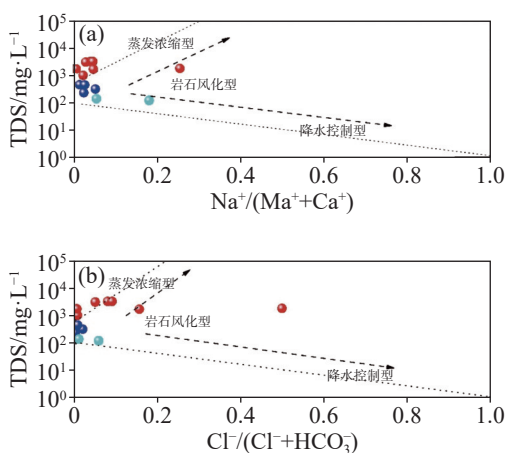


图5 研究区水样 TDS vs. $(\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}))$ (a) 和 TDS vs. $(\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-))$ (b) 关系图 (图例同前)

Fig. 5 Plots of TDS vs. $(\text{Na}^+ / (\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}))$ (a), and TDS vs. $(\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-))$ (b) for water samples in the study area

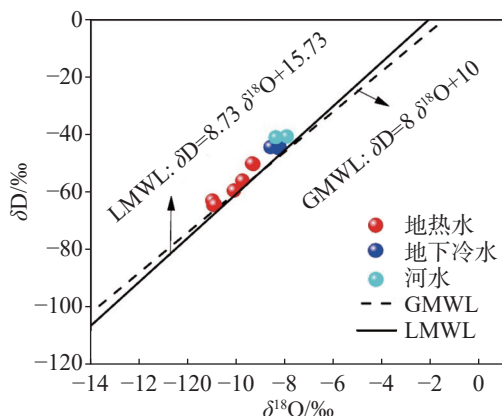
图6 研究区水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 6 δD - $\delta^{18}\text{O}$ diagram for water samples in the study area

的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-64.53\text{‰} \sim -50.10\text{‰}$ 和 $-9.61\text{‰} \sim -8.14\text{‰}$, 地下冷水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-44.76\text{‰} \sim$

-43.29‰ 和 $-7.53\text{‰} \sim -7.20\text{‰}$, 河水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-41.09\text{‰} \sim -40.74\text{‰}$ 和 $-7.33\text{‰} \sim -6.93\text{‰}$ 。地热水较地下冷水和河水富集轻的氧和氢同位素, 且河水较地下冷水略微富集重的氧和氢同位素, 说明地热水补给高程较高, 循环深度较大, 径流过程中水岩相互作用较充分。此外, 研究区水样的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图 (图6) 显示区内地表水、地下水和地热水均位于全球大气降水曲线和地方大气降水曲线附近, 表明其补给水源主要是大气降水。此外, 从图6还可知地热水与地下冷水处于一条连线的两端, 部分热水点靠近地下冷水水样品, 推测地热水径流排泄地表过程中, 可能受到地下冷水混入的影响, 这在重庆地区地热的研究中已得到证实^[27]。广安市铜锣山地区岩溶地下冷水和热水均赋存于三叠系嘉陵江和雷口坡碳酸盐岩地层, 该套地层浅层岩溶冷水系统与深部热水系统具有较好的水力联系, 而地热水在排泄区域因地形或断层影响, 浅部冷水易混入地热水中^[18, 23-24]。

5 热储温度估算

热储温度在划分地热资源成因机制、评价地热资源潜力和决策地热资源开发利用方式等工作中均具有重要地位, 常用的热储温标包括阳离子温标和二氧化硅温标^[28-29]。上述温度计的工作原理是在一定温度下, 热储流体与围岩介质矿物达到化学平衡, 且流体运移至地表的降温过程中, 仍然能够保持该平衡^[30]。因此, 在进行热储温度估算之前, 需要对地热水的水—岩平衡状态进行判断。K-Na-Mg 三角图常用于判断热水与围岩矿物的平衡状态 (图7)。铜锣山背斜地热水处于未成熟水区域, 因此不适宜采用阳离子温标计算。二氧化硅温标是利用地热水中二氧化硅的含量与温度的关系来计算热储温度, 普遍适用于中-低温热储温度 (小于 150℃) 的计算^[29]。综上考虑, 采用地热水中二氧化硅含量计算了铜锣山背斜三叠系岩溶热储的温度, 计算结果见表2。

表2结果表明: 采用石英温标计算得到铜锣山背斜岩溶热储温度介于 $54\text{℃} \sim 79\text{℃}$, 而采用玉髓温标计算的热储温度为 $53\text{℃} \sim 75\text{℃}$, 两者计算结果相近, 均高于地热水露头温度 ($26\text{℃} \sim 42\text{℃}$)。本文采用石英和玉髓温标的平均值作为铜锣山背斜地热水热储温度, 其值为 $56\text{℃} \sim 76\text{℃}$, 这与井内钻孔测温结果相近, 表明

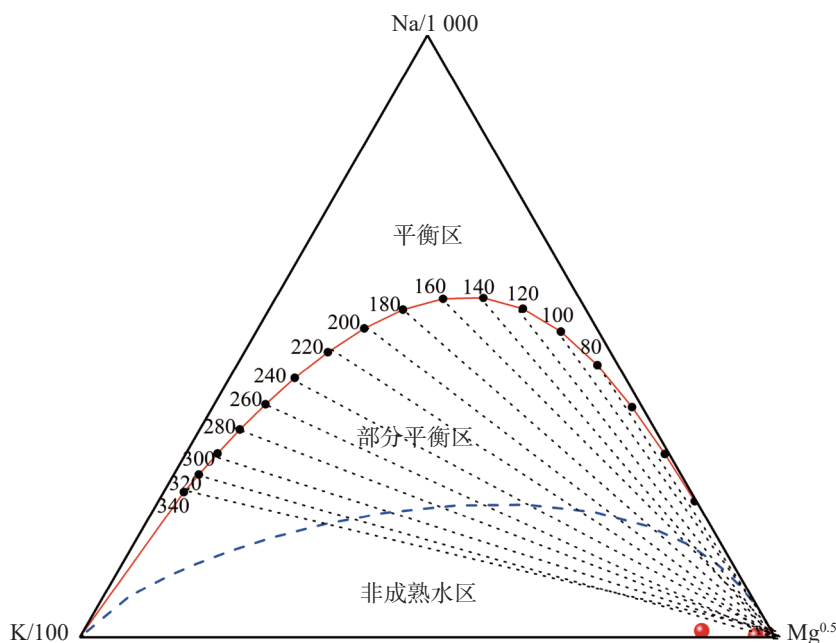


图7 研究区地热水 Na/1000-K/100-Mg^{0.5} 三角图

Fig. 7 Ternary diagram of Na/1000-K/100-Mg^{0.5} for geothermal water in the study area

铜锣山背斜岩溶热储系统属于低温地热系统。

6 岩溶热水循环特征

6.1 补给特征

内陆型大气降水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 值具有随地形高程升高而降低的高程效应,其常用于推算地下水补给高程及补给区的温度。然而,地下水在运移过程中往往存在氧同位素漂移现象,导致利用 $\delta^{18}O$ 值估算的高程存在较大的偏差,因此多采用 δD 值来计算补给高程。计算公式如下^[31]:

$$\delta D = -0.03H - 27 \quad (1)$$

$$\delta D = 3T - 92 \quad (2)$$

式中: H 为地下水补给高程(m); T 为补给区的年均温度($^{\circ}C$)。

通过计算得到铜锣山背斜地热水的补给高程为 770~1 251 m, 补给区年均温度为 9~14 $^{\circ}C$ 。其中, 深层热水(GW01 和 GW03)的补给高程均大于 1 100 m, 补给区年均温度为 9 $^{\circ}C$; 地下冷水的补给高程为 543~592 m, 补给区年均温度为 16 $^{\circ}C$ 。结合铜锣山地区地形及气象特征, 推测深层热水补给区位于铜锣山以北的大巴山一带, 地热水具有自北东往南西作纵向径流的特点。漆继红^[25] 和罗云菊^[32] 等学者在对重庆地热水补给区及径流途径的研究中, 亦认为

铜锣山背斜内地热水具有纵向远距离的补给特征, 补给区位于大巴山一带, 水平距离达到 220 km。

6.2 径流特征

研究区地热水接收大气降水、表层冷水补给后, 沿碳酸盐岩裂隙、溶隙、断裂破碎带通道下渗循环径流。地热水的循环深度可用下式计算:

$$D = D_0 + (T - T_0)/g \quad (3)$$

式中: D 为地热水循环深度(m); D_0 为恒温带深度(m), 本文取值 30 m; T 为热储温度($^{\circ}C$), 采用二氧化硅温标计算值; T 为研究区多年平均气温($^{\circ}C$), 本文取 16 $^{\circ}C$; g 为地温梯度($^{\circ}C \cdot (100 \text{ m})^{-1}$), 结合地热钻探测温结果本文取值 2 $^{\circ}C \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ ^[24]。

经计算, 铜锣山背斜地热水循环深度为 2 013~3 030 m, 平均值为 2 620 m。

6.3 排泄特征

铜锣山背斜地热水在横向或斜向侵蚀切割背斜的河流峡谷的地形低洼地段碳酸盐岩地层裸露区, 以天然温泉的形式出露地表, 如邻水县御临镇响水鹵村温泉。在背斜两翼打深井开采地下热水, 则成为地下热水的人工排泄点, 如邻水县牟家镇刘家沟温泉、御临镇小南海温泉和子中乡桂花村温泉。地热水在天然或人工钻孔揭露地表之前, 存在与浅层冷水发生混合的可能性, 这会导致地热水被冷水冷

却而具有不同的化学组分。混合模型常被用于估算热泉或钻孔温泉冷热水混合比例,在一定程度上也能够指示热水组分的原始温度,可以辅助分析热储温度^[27, 33-34]。

根据地下热水和冷水的焓值和 SiO₂ 含量,通过下述方程式求解热泉或钻孔温泉中冷水的混入比例:

$$H_c X_1 + H_T (1 - X_1) = H_s \tag{4}$$
$$SiO_{2c} X_2 + SiO_{2T} (1 - X_2) = SiO_{2s} \tag{5}$$

式中: X(X₁ 和 X₂)为冷水混入比例; H_c、H_s、H_T 分别为冷水、温泉和深部热水的焓值; SiO_{2c}、SiO_{2s} 和 SiO_{2T} 分别为冷水、温泉和深部热水中二氧化硅含量。

本次分析中,冷水的焓值和二氧化硅含量取值分别为 16 j·g⁻¹ 和 7.54 mg·L⁻¹(水样 KW03), 温泉焓值和二氧化硅含量取值选自表 1, 深部热水的焓值和二氧化硅含量取值来自表 3。计算不同温度下对应的 X₁ 和 X₂ 值,绘制处 X₁ 和 X₂ 与温度的关系图,得到两条曲线,其交点就是估算的热水初始温度和冷水混入比例(图 8)。

研究区地热水中冷水混入比例较大,绝大多数深层地热井(GW01 和 GW03)冷水混入比例达 80%, 浅层地热井(GW02)或坑道温水(GW05)中冷水混入比例超过 90%。然而,深层地热井 GW04(井深 1 980 m)热水中冷水混入比例高达 93%,其主要原因是成

表 3 深部热水温度、焓值和 SiO₂ 含量^[34]
Table 3 Values of temperature, enthalpy and SiO₂ in deep thermal water

温度/ ℃	焓值/ J·g ⁻¹	SiO ₂ / mg·L ⁻¹	温度/ ℃	焓值/ J·g ⁻¹	SiO ₂ / mg·L ⁻¹	温度/ ℃	焓值/ J·g ⁻¹	SiO ₂ / mg·L ⁻¹
50	50.0	13.5	150	151.0	125.0	250	259.2	486.0
75	75.0	26.6	175	177.0	185.0	275	289.0	614.0
100	100.1	48.0	200	203.6	265.0	300	321.0	692.0
125	125.1	80.0	225	230.9	365.0			

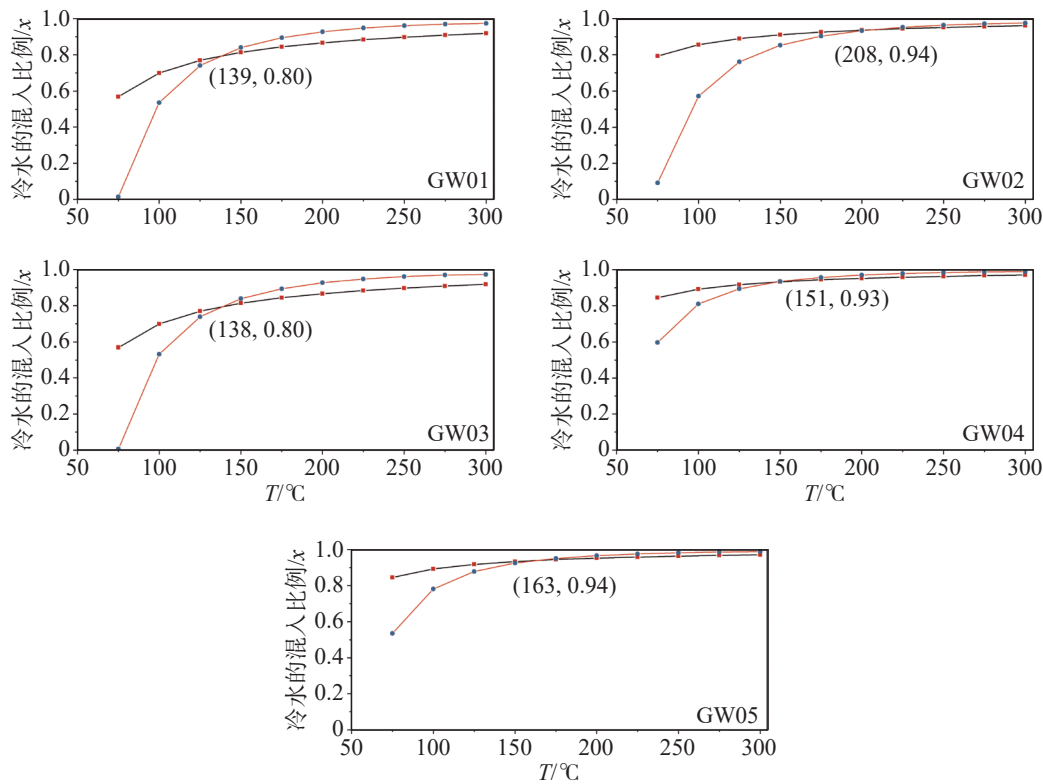


图 8 广安铜锣山背斜地热水中冷水混入比例与温度的关系图
Fig. 8 Relationship of water temperatures and mixing ratios of cold groundwater for geothermal groundwater in the Tongluo mountain anticline in Guang'an City

井过程中浅层冷水与深部热水未分隔,两者混合严重,井口水温仅为 26 ℃,低于附近天然温泉的温度(30 ℃)。

此外,采用地热水中二氧化硅和热焓值混合模型推算的热储温度介于 138~208 ℃,远高于采用二氧化硅温标法计算的热储温度,与钻孔测温结果也相差较远,这主要是因为研究区地热水属于未达到平衡的水,且冷热水混合过程对热储计算影响较大,混合模型不适宜估算低温岩溶热水系统热储温度。

7 岩溶地热水成因机制

结合区域地热地质条件、地热钻井录井和测井

结果、水文地球化学和同位素分析成果、化学温标计热储温度计算结果,综合研究得出广安市铜锣山背斜地热水成因机制:大气降水在背斜核部三叠系雷口坡组和嘉陵江组碳酸盐岩裸露区(补给高程 770~1 251 m)沿岩溶洼地、落水洞、溶坑等汇流区入渗补给,向背斜翼部经历深循环(循环深度 2 013~3 030 m)获得大地热流值的加热和岩石热交换,热储温度为 56~76 ℃,并发生水岩相互作用(碳酸盐岩和蒸发岩类矿物溶解)和冷热水混合过程(冷水混入比例 80% 以上),于背斜轴部和翼部合适地形区段以天然温泉(响水凼温泉)和地热钻井(刘家沟地热井、桂花村地热井)的形式出露地表。区内地热水成因概念模型图 9。

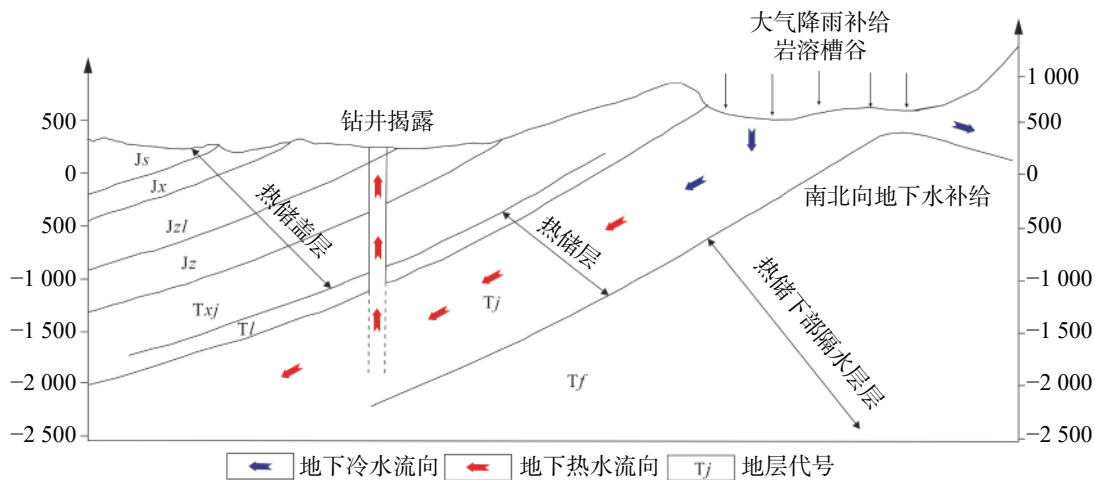


图 9 研究区地热水成因概念模型图

Fig. 9 Conceptual diagram of the genetic model for geotherm groundwater in the study area

8 结 论

(1)广安市铜锣山背斜三叠系碳酸盐岩热储构造相对完整,热储盖层、热储层和热储下部隔水层形成独立的地热水文地质单元。已实施地热钻孔揭露地热水埋深 700~1500 m,热水温度 26~42 ℃,日出水量 1 500~16 000 m³。局部区域受隐伏断裂影响,三叠系须家河组砂岩亦可成为热储层,热水日出水量可达 3 000 m³ 以上;

(2)研究区地热水水化学类型主要为 SO₄-Ca·Mg 和 SO₄-Ca 型,而地下冷水和河水水化学类型主要为 HCO₃-Ca·Mg 型。水文地质条件、地热钻探成果和水样水化学组分关系图综合分析认为:水与围岩矿物的水岩相互作用为地下水中优势离子 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻和 SO₄²⁻的主要来源,且较高的温度、较

充足的水岩作用时间致使含 F、Sr、Li、B 和 SiO₂ 物质的矿物溶解,形成地热水独特的微量组分信息;

(3)采用二氧化硅温标计算获得研究区碳酸盐岩热储温度介于 56~76 ℃,属于低温地热系统;

(4)氢氧同位素分析结果表明地热水补给水源主要是大气降水,其补给高程大于 1 100 m,补给区年均温度为 9 ℃,地热水上升排泄过程中发生冷水混合作用,冷水混合比例大于 80%;

(5)结合区域地热地质条件、地热钻井录井和测井结果、水文地球化学和同位素分析结果、化学温度计热储温度计算结果,总结得出广安市铜锣山背斜地热水的成因机制。

参考文献

[1] 王贵玲,张薇,梁继运,蔺文静,刘志明,王婉丽.中国地热资源

- 潜力评价[J]. *地球学报*, 2017, 38(4): 449-459.
- WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Wiyun, LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2017, 38(4): 449-459.
- [2] 庞忠和, 黄少鹏, 胡圣标, 赵平, 何丽娟. 中国地热研究的进展与展望(1995-2014)[J]. *地质科学*, 2014, 49(3): 719-727.
- PANG Zhonghe, HUANG Shaopeng, HU Shengbiao, ZHAO Ping, HE Lijuan. Geothermal studies in China: Progress and prospects (1995-2014)[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(3): 719-727.
- [3] Amatyakul P, Rung-Arunwan T, Siripunvaraporn W. A pilot magnetotelluric survey for geothermal exploration in Mae Chan region, northern Thailand[J]. *Geothermics*, 2015, 55: 31-38.
- [4] Baba A, Şaroğlu F, Akkuş I, Özel N, Yeşilnacar Mİ, Nalbantçılar MT, et al. Geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in the southeastern region of Turkey[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 255-271.
- [5] Caudron C, Bernard A, Murphy S, Inguaggiato S, Gunawan H. Volcano-hydrothermal system and activity of Sirung volcano (Pantar Island, Indonesia)[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2018, 357: 186-199.
- [6] DeRoin N, McNutt SR, Thompson G. Duration-amplitude relationships of volcanic tremor and earthquake swarms preceding and during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 292: 56-69.
- [7] Guo Q, Wang Y. Geochemistry of hot springs in the Tengchong hydrothermal areas, Southwestern China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2012, 215: 61-73.
- [8] Rezaei A, Rezaei M, Porkhial S. The hydrogeochemistry and geothermometry of the thermal waters in the Mouil Graben, Sabalan volcano, NW Iran[J]. *Geothermics*, 2019, 78: 9-27.
- [9] Zhao R, Shan X, Wu C, Yi J, Hao G, Wang P. Formation and evolution of the Changbaishan volcanic geothermal system in a convergent plate boundary back-arc region constrained by boron isotope and gas data[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 188-202.
- [10] Guo Q. Hydrogeochemistry of high-temperature geothermal systems in China: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(10): 1887-1898.
- [11] Li J, Sagoe G, Yang G, Liu D, Li Y. The application of geochemistry to bicarbonate thermal springs with high reservoir temperature: A case study of the Batang geothermal field, western Sichuan Province, China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2019, 371: 20-31.
- [12] Liu M, Guo Q, Zhang C, Zhu M, Li J. Sulfur Isotope Geochemistry Indicating the Source of Dissolved Sulfate in Gonghe Geothermal Waters, Northwestern China[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2017, 17: 157-160.
- [13] Tian J, Pang Z, Guo Q, Wang Y, Li J, Huang T, et al. Geochemistry of geothermal fluids with implications on the sources of water and heat recharge to the Rekeng high-temperature geothermal system in the Eastern Himalayan Syntax[J]. *Geothermics*, 2018, 74: 92-105.
- [14] Yuan J, Guo Q, Wang Y. Geochemical behaviors of boron and its isotopes in aqueous environment of the Yangbajing and Yangyi geothermal fields, Tibet, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 140: 11-22.
- [15] 庞忠和, 庞菊梅, 孔彦龙, 郭世炎, 王树芳, 黄永辉, 罗霁, 胡圣标. 大型岩溶热储识别方法与规模化可持续开采技术[J]. *科技促进发展*, 2020, 16(3-4): 299-306.
- PANG Zhonghe, PANG Jumei, KONG Yanlong, GUO Shiyan, WANG Shufang, HUANG Yonghui, LUO Qi, HU Shengbiao. Large-scale karst thermal storage identification method and large-scale sustainable mining technology[J]. *Science and Technology for Development*, 2020, 16(3-4): 299-306.
- [16] 康凤新, 隋海波, 郑婷婷. 山前岩溶热储聚热与富水机理: 以济南北岩溶热储为例[J]. *地球学报*, 2020, 94(5): 1606-1624.
- KANG Fengxin, SUI Haibo, ZHENG Tingting. Heat accumulation and water enrichment mechanism of piedmont karstic geothermal reservoirs: a case study of northern Jinan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(5): 1606-1624.
- [17] Yang P, Luo D, Hong A, Ham B, et al. Hydrogeochemistry and geothermometry of the carbonate-evaporite aquifers controlled by deep-seated faults using major ions and environmental isotopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124116.
- [18] 李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜. 四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 36-46.
- LI Minghui, YUAN Jianfei, HUANG Congjun, LIU Huizhong, GUO Jing. A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2020, 47(6): 36-46.
- [19] 杨华云, 徐静. 重庆都市圈地热资源评价及开发利用方向[J]. *中国水运(学术版)*, 2006, (8): 217-218.
- YANG Huayun, XU Jing. Evaluation and development of deep geothermal water geothermal resources in Chongqing Metropolitan area [J]. *China Water Transport (Academic Version)*, 2006, (8): 217-218.
- [20] Xiao Q, Jiang Y, Shen L, Yuan D. Origin of calcium sulfate-type water in the Triassic carbonate thermal water system in Chongqing, China: A chemical and isotopic reconnaissance[J]. *Applied Geochemistry*, 2018, 89: 49-58.
- [21] 吕玉香, 蒋晶, 杨平恒, 谢斌, 胡伟. 地热井井间干扰模拟研究: 以重庆观音峡背斜东翼为例[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(2): 94-104.

- LYU Yuxiang, JIANG Jing, YANG Pingheng, XIE Bin, HU Wei. Simulation of interwell interference in geothermal well-take the east wing of Guangyingxia anticline in Chongqing as an example[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(2): 94-104.
- [22] 李东升, 刘东升. 重庆地热水资源热储构造与径流补给[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(4): 372-6.
- LI Dongsheng, LIU Dongsheng. Geothermal reservoir structure and runoff flow recharge of geothermal water resources in Chongqing City[J]. *Journal of Hohai University (Natural Science)*, 2011, 39(4): 372-6.
- [23] 袁建飞, 刘慧中, 李明辉, 黄丛俊, 杜德伟, 郭镜. 广安铜锣山地热勘探试验井地热地质成果及意义[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(1): 83-92.
- YUAN Jianfei, LIU Huizhong, LI Minghui, HUANG Congjun, DU Dewai, GUO Jing. Geothermal geological achievements and significance of the geothermal exploration well in Tongluo Mountain, Guangan City [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(1): 83-92.
- [24] 中国地质调查局成都地质调查中心. 广安市水文地质调查及地热资源勘查[R]. 成都: 中国地质调查局成都地质调查中心, 2020: 15-30.
- Chengdu Center of China Geological Survey. Hydrogeological survey and geothermal resources exploration of Guangan City [R]. Chengdu: Chengdu Center of China Geological Survey, 2020: 15-30.
- [25] 漆继红, 许模, 杨华云, 王迪, 赵红梅. 川东铜锣山背斜-南温泉背斜温泉水力联系分析[J]. *人民长江*, 2011, 42(11): 5-9.
- QI Jihong, XU Mo, YANG Huayun, WANG Di, ZHAO Hongmei. Analysis on hydraulic connection of hot springs of Tongluo Mountain anticline to South hot spring anticline in eastern Sichuan Province[J]. *Yangtze River*, 2011, 42(11): 5-9.
- [26] 肖琼, 沈立成, 袁道先, 杨雷, 陈展图, 汪智军. 利用 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ 示踪重庆都市圈地下水热水循环过程[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(5): 87-92.
- XIAO Qiong, SHEN Licheng, YUAN Daoxian, YANG Lei, CHEN Zhantuo, WANG Zhijun. Using $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{34}\text{S}$ isotopic techniques to trace the recycling process of hot springs in Chongqing metropolitan[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(5): 87-92.
- [27] 余琴, 杨平恒, 王长江, 李国, 张宇, 张媚, 谢正兰. 重庆市统景温泉水化学特征及混合作用[J]. *中国岩溶*, 2017, 36(1): 59-66.
- YU Qin, YANG Pingheng, WANG Changjiang, LI Guo, ZHANG Yu, ZHANG Mei, XIE Zhenglan. Hydrochemical characteristics and mixing effect in Tongjing hot springs of Chongqing[J]. *Carsologica Sinica*, 2017, 36(1): 59-66.
- [28] 余浩文, 刘昭, 荣峰, 陈康, 男达瓦, 刘仕娟, 刘绍赞. 西藏错那地热田水化学特征与物源机制[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(3): 34-44.
- YU Haowen, LIU Zhao, RONG Feng, CHEN Kang, NAN Dawa, LIU Shijuan, LIU Shaoyun. Characteristics and source mechanism of geothermal field in Cuona, Tibet[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(3): 34-44.
- [29] 袁建飞, 邓国仕, 徐芬, 唐业旗, 李鹏岳. 川西南喜德热田地下水水文地球化学特征[J]. *现代地质*, 2017, 31(1): 200-208.
- YUAN Jianfei, DENG Guoshi, XU Fen, TANG Yeqi, LI Pengyue. Hydrogeochemical characteristics of groundwater in the Xide geothermal field, Southwest Sichuan, China[J]. *Geoscience*, 2017, 31(1): 200-208.
- [30] 张娟, 张海庆, 黄丹, 王心义. 基于水化学特征的深部岩溶地热水循环机制研究[J]. *河南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(6): 741-745.
- ZHANG Juan, ZHANG Haiqing, HUANG Dan, WANG Xinyi. Study on circulation mechanism of geothermal water in deep karst based on water chemical characteristics[J]. *Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science)*, 2010, 29(6): 741-745.
- [31] Yang Pingheng, Cheng Qun, Xie Shiyu, Wang Jianli, Chang Longran, Yu Qin, Zhan Zhaojun, Chen Feng. Hydrogeochemistry and geothermometry of deep thermal water in the carbonate formation in the main urban area of Chongqing, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 549: 50-61.
- [32] 罗云菊, 刘东燕, 许模. 重庆地下热水径流特征研究[J]. *地球与环境*, 2006(1): 49-54.
- LUO Yunju, LIU Dongyan, XU Mo. Study on the geothermal water runoff in Chongqing[J]. *Earth and Environment*, 2006(1): 49-54.
- [33] 潘明, 郝彦珍, 吕勇, 李波. 云南昌宁橄榄河热泉水化学特征及复合成因机制研究[J]. *中国岩溶*, 2021, 40(2): 281-289.
- PAN Ming, HAO Yanzhen, LV Yong, LI Po. Hydrochemical characteristics and composite genesis of a geothermal spring in Ganlanhe, Changning, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 281-289.
- [34] 徐刚, 伍坤宇, 王鹏, 陈永东, 李兴彦, 胡林, 刘子畅, 李海. 藏北温泉盆地地热田水文地球化学特征研究[J]. *中国岩溶*, 2020, 39(3): 299-310.
- XU Gang, WU Kunyu, WANG Peng, CHEN Yongdong, LI Xingyan, HU Lin, LIU Zichang, LI Hai. Hydrogeochemical characteristics of the geothermal field in Wenquan basin, northern Tibet [J]. *Carsologica Sinica*, 2020, 39(3): 299-310.

Structural characteristics of Triassic carbonate geothermal reservoir and genesis of thermal water in the Tongluo mountain anticline of Guang'an City, China

YUAN Jianfei, LIU Huizhong, DENG Guoshi, LI Minghui

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610081, China)

Abstract There are abundant geothermal resources at low-medium temperature in the fold mountain areas of eastern Sichuan, and the main geothermal reservoirs are Leikoupo and Jialingjiang formations. Generally, karst geothermal reservoirs have the advantages of large water volume, easy reinjection of tail water after exploitation, and less damage to geothermal reservoirs. Recently, a great breakthrough in geothermal exploration of the Tongluo mountain anticline in fold mountain areas of eastern Sichuan has been achieved. Two deep geothermal wells with a depth of more than 1,700 m have been consecutively drilled to obtain karst geothermal resources with high development and utilization value. However, although good results have been obtained in terms of geothermal exploration, there are relatively few studies on the characteristics of geothermal reservoirs and the mechanism of geothermal water circulation.

In the study on structure characteristics of Triassic karst geothermal reservoir, geothermal water chemistry and stable isotope composition, geothermal reservoir temperature, and mechanism of geothermal water circulation, methods including geothermal drilling, hydro-geochemistry, diagram analysis of thermal water components, and geothermometer assessment are used to analyze the occurrence condition of karst geothermal water and genetic model in this study area. Results show that the geothermal reservoir structure in the study area is relatively intact, and the cap layer of thermal reservoir, the thermal reservoir, and the lower water barrier layer are formed as independent geothermal hydrogeological units. Karst geothermal water is mainly $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ and $\text{SO}_4\text{-Ca}$ types and rich in contents of F, Sr, Li, B, and SiO_2 . The oxygen and hydrogen isotope analysis indicates that karst geothermal water is of meteoric origin, and the recharge area is located in the Daba mountainous area to the north of Tongluo mountain. The elevation of deep geothermal water recharge is more than 1,100 m; the average annual temperature of the recharge area is 9°C ; the horizontal distance reaches 220 km. According to the SiO_2 geo-thermometer, the karst geothermal reservoir temperature is $56\text{-}76^\circ\text{C}$; the circulation depth of geothermal water is 2,013-3,030 m, and the karst geothermal water is immature. Moreover, the dissolution of carbonate and evaporite and the mixing of cold groundwater are major hydro-geochemical processes in the geothermal water circulation path, and the mixing ratio of cold groundwater is higher than 0.8. Based on the results of geothermal geology, geothermal drilling, hydro-geochemistry, and environment isotopes, the genesis mechanism of geothermal water in this area is summarized as follows, groundwater receives water recharge from rainwater through karst depressions, sink, and pit of the Leikoupo and Jialingjiang formations in the anticline core region, heated by geothermal gradient and hot rock during the deep circulation of the anticline wing. During water circulation, major hydro-geochemical processes are water-rock interaction and thermal-cold water mixing. After then, karst geothermal water occurs along the anticline axis and wing region in forms of hot springs and geothermal wells. This study not only enriches the theory of the karst geothermal reservoirs system in the fold mountainous areas of eastern Sichuan but also provides a scientific basis for the exploration and exploitation of deep karst geothermal resources in this area.

Key words Tongluo mountain anticline, the structure of karst geothermal reservoir, geothermal water genesis, hydrogeochemistry, Guang'an City

(编辑 张玲 杨杨)