

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.11

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

赵佳怡¹, 张 薇¹, 张汉雄¹, 屈泽伟², 李 曼¹, 岳高凡¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 四川省地质工程勘察院, 四川 成都 610072)

摘要: 地下热水的地球化学特征能够揭示深部地热过程。川西巴塘地区地热资源丰富, 但当前研究程度较低。为进一步查明川西地区地热资源赋存状态及热源来源, 揭示热循环机理, 定量评估研究区热储温度、冷水混入比例、热循环深度等, 利用巴塘热坑和巴塘热水塘两处地热田共 20 组温泉水样进行水化学分析和氢氧同位素分析, 进行定量计算, 并分析巴塘地区地下热水的演化过程。结果表明: 巴塘地区地下热水主要为 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型; 水中 Sr^{2+} 、 Li^+ 和 F^- 与 Cl^- 的相关性不佳; 主要受大气降雨补给; 冷水混入比例为 64% ~ 68%, 未混入冷水时深部热储温度为 218 ~ 229 °C, 热储循环深度 4 546.32 ~ 4 777.89 m; Na^+ 、 HCO_3^- 、 SiO_2 浓度在热水循环过程中变化相对较大。说明 Sr^{2+} 、 Li^+ 和 F^- 只来自于水岩作用的矿物溶解, 且该地区地下水补给主要来自于大气降水, 川西地区地热水于围岩发生水岩作用, 进行离子交换, 在完成一系列水化学作用及水岩作用后, 升至地表, 最终形成温泉水。研究成果可为川西巴塘地区地热研究提供数据支撑及理论支持, 同时也为川西整体区域地热研究提供方法借鉴, 为研究区地下水开发利用研究提供参考。

关键词: 水文地球化学; 同位素; 硅-焓模型; 热储温度; 巴塘地热田

中图分类号: P641.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0081-09

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

ZHAO Jiayi¹, ZHANG Wei¹, ZHANG Hanxiong¹, QU Zewei², LI Man¹, YUE Gaofan¹

(1. The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;

2. Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Geochemical characteristics of geothermal water can reveal deep geothermal processes. The Batang area in western Sichuan is taken as an example, where geothermal resources are relatively abundant, but few studies were carried out previously. Based on the existing researches, this paper aims to further identify the occurrence and source of geothermal resources in western Sichuan, reveal the mechanism of thermal cycle, and quantitatively evaluate the temperature of the geothermal reservoirs, the mixing ratio of cold water and depth of thermal cycle in the study area. Hydrochemical analyses and hydrogen and oxygen isotopes of 20 hot spring water samples from two geothermal fields in Batang are used to calculate quantitatively and analyze the evolution process of thermal groundwater in the Batang area. The results show that the thermal groundwater is mainly of $\text{HCO}_3\text{—Na}$ type in the Batang area. F^- , Li^{2+} , As^+ and Cl^- in the hot water have poor correlation, indicating that F^- , Li^{2+} , As^+ only come from the dissolution of minerals in the rocks. The hot water is mainly recharged by atmospheric rainfall. The temperature and depths of geothermal reservoirs before mixture with cold water are obtained by the Si-enthalpy model as 218 ~ 229 °C and 4 546.32 ~ 4 777.89 m and the mixing ratio of cold water

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-10-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41502249); 中国地质科学院基础科研业务费项目(JYYWF20181101)

第一作者: 赵佳怡(1992-), 博士研究生, 主要从事地热学研究。E-mail: zhaojiayi9208@126.com

通讯作者: 张汉雄(1990-), 硕士, 研究实习员, 主要从事地热学研究。E-mail: 444219401@qq.com

ranges from 64% to 68%. The changes in concentrations of Na^+ , HCO_3^- and SiO_2 in the Batang area are relatively large, indicating that the geothermal water only comes from the dissolution of minerals in rocks, including dissolution of calcium feldspar and silicate precipitation. Water-rock interactions and ion exchange occur between the geothermal water and surrounding rocks in western Sichuan. After completing a series of hydrochemical action and water-rock interaction, the hot water rises to the land surface and eventually emerges in the form of hot springs. The above analyses of the characteristics of the geothermal reservoirs can provide data support and theoretical support for the future geothermal research in the Batang area in western Sichuan, and can also provide methodological references for the overall regional geothermal research in western Sichuan, which is of important reference significance for the study of groundwater development and utilization in the study area.

Keywords: hydrogeochemistry; isotopes; Si-enthalpy model; geothermal reservoir temperature; Batang geothermal field

地热资源指可被人类经济利用的地球内部地热能,我国地热资源种类丰富,高温地热资源主要分布在藏南、川西等地区,具有资源储集条件好、储层多、厚度大、分布广等特点^[1]。

自 20 世纪 60、70 年代起,水文地球化学在地下水监测及分析中广泛应用^[2]。水是一种成分复杂的天然溶液,水中溶解组分以多种形式存在,这些组分在水溶液中发生着各种复杂的物理化学作用^[3]。魏亚妮等^[4]利用水文地球化学模拟,深入了解了涪源县地下水化学组分变化。张萌等^[5]通过对西藏谷露高温地热水进行水文地球化学特征分析,得出该地区热水为中偏碱性水,溶解性总固体较高,热储温度在 195 ~ 260 °C。焦杏春^[6]分析了应用水文地球化学与同位素结合的手段研究地下水系统的基本方法,认为此方法可以准确描述地下水系统中各污染物的来源、径流及排泄。郎旭娟等^[7]选用合理的水文地球化学温标计算出贵德盆地扎仓寺地热田地热储层热储温度约为 133 °C,第二热储层热储温度约为 222 °C。袁建飞等^[8]分析了毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征,得到地下水受到的污染源,从而合理开发管理地下水。史杰等^[9]研究了西藏曲曼高温地热水的地热流体化学特征,计算了其热储温度。

四川省西部青藏高原南缘,主要可以分为:炉霍—康定地区、理塘地区和巴塘—乡城地区三个地区。武斌等^[10]利用音频大地电磁测深法,分析川西高原区热储层的分布特点和浅部热水的形成机制,绘制出川西地区地热导储模式图。倪高倩等^[11]结合川西地区水化学类型及离子含量特征等,判断该区域地下水是通过深循环对流传热将深部热能带至地表。罗敏等^[12]从区域地质构造背景出发,发现四川地热水分布主要受构造断裂带及地貌控制。张健等^[13]通过对川西

高温水热活动区研究,得出川西巴塘地区地热水主要由大气降水、地表水沿断裂带裂隙深入,经深循环、地壳热源加热后形成。

通过整理分析前人研究成果,发现目前川西巴塘地区地热相关研究主要处于定性分析阶段,针对巴塘地区地热来源及热循环机理提出了论证,但对该区域内地下热储温度、冷水混入比例、热循环深度等并未进行定量研究。故本文结合前人研究理论基础,对川西巴塘地热田地下热水进行全面的水文地球化学特征分析,利用研究区水化学数据,计算出巴塘地区的热储温度、冷水混入比例、热循环深度等,对地热流体的成因进行了详尽的研究。通过定量研究地热流体的水文地球化学特征及热储资源,不仅可以了解地下水水化学构成及补给来源,还进一步揭示了热循环机理,对川西地区地热资源评价及开发利用有积极意义,同时也为研究区今后地热及水文地质工作提供参考。

1 区域概况

四川省西部位于龙门山、茶坪山、夹金山、贡嘎山、锦屏山以西,属青藏高原的东延部分,平均海拔 3 000 ~ 4 000 m^[10]。地层出露几乎都为三叠系地层,岩性为粉砂岩、砂岩、板岩等。断层发育,构造活动强烈,主要形成鲜水河断裂带、甘孜—理塘断裂带、德格—乡城断裂带、金沙江断裂带以及巴塘断裂^[13]。研究区内存在构造形迹展布方式大致可分为北北西向、北西向、南北向、北东向、东西向及弧形等,其中北北西向和南北向构造形迹构成了研究区内的基本构造格架。

巴塘区块位于茶洛乡茶洛村(图 1),从热坑至热水塘,沿巴曲河两岸呈北东—南西向展布,面积 210 km²,距国道 G318 线以北 9 ~ 30 km,可通过乡村道路到达工作区,该道为林区道路,崎岖不平,路面较

窄,交通条件一般。流经的河流为巴曲河,又称巴塘河、巴楚河、曲戈河,属金沙江一级支流。巴塘区块沟谷中部及下部切割深,山体斜坡地形坡度大;源头一般发育于丘状高原区,沟谷宽缓,地面高差一般小于500 m。区内气温低,区域差异大,极端最低气温达 -12.8°C ,极端最高气温达 37.6°C ,平均为 12.6°C ,降水量小,时空分布不均,降水集中,年平均降雨量为474 mm,昼夜温差大,大陆性气候特点明显。巴塘地区以中生界地层为主且广泛分布,主要出露地层为三叠系,尤其是上三叠统,其次为岩浆岩及新生界地层。可分为三个岩性段,上段(T_3t^3)为砂岩、板岩夹中、基性火山岩及结晶灰岩,厚972~4 832 m;中段(T_3t^2)为灰黑色板岩夹砂质条带、含炭质泥板岩,流纹岩,夹石英质砂岩,厚579~4 852 m;下段(T_3t^1)为变质砂岩、泥板岩,大部分相带有砾岩,局部夹酸性火山岩,厚1 830 m,局部地区与下伏地层不整合接触。

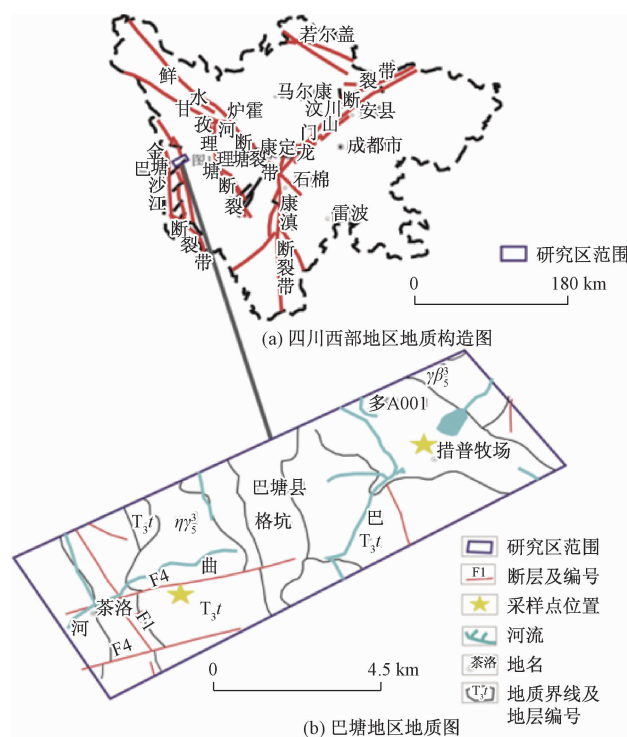


图1 四川西部地区地质构造图(a)和巴塘地区地质图(b)

Fig.1 Geological structure map of the western Sichuan(a) and geological map of the Batang area(b)

2 样品采集与检测

本次在巴塘地区共采集地下热水水样18组,地表冷水水样2组,共20组。其中巴塘热坑地区采集13组温泉水样,巴塘热水塘地区采集5组温泉水样和2组地表湖水及河水样。

采集的样品送与中国地质科学院水文地质环境地质研究所国土资源部地下水科学与工程重点实验室进行水质全分析以及氢氧同位素分析,水质全分析根据中华人民共和国国家标准饮用天然矿泉水检验方法(GB/T8 538-2008)检测,其中阳离子使用的ICP方法进行离子浓度检测,阴离子使用离子色谱分析,阴阳离子平衡误差控制在3%以内。氢氧同位素利用波长扫描—光腔衰荡光谱法在温度 23°C ,湿度50%条件下进行检测。

3 结果分析与讨论

3.1 地热流体化学特征

本次研究区域中,巴塘地区的地下热水pH值为7.49~9.61,均大于7,平均值为8.56,呈弱碱性。巴塘热坑pH为8.77,巴塘热水塘pH为8.35,两者相差较小。

在巴塘地区中,断裂带地区的岩性主要为变质岩和花岗岩,由于水岩作用中的溶滤作用,岩石中的各种长石与地热水反应,导致地热水中的 Na^+ 和 HCO_3^- 浓度相对较大。

由图2可知,CP₀₁和CP₀₅2点的离子浓度与其他点的离子浓度差异较大,TDS含量相对较低,这是由于其为湖水和河水,离子浓度和TDS含量相对较少。巴塘热坑和巴塘热水塘的离子浓度存在相对差异,主要因素是地层岩性不同,热坑主要为变质砂板岩、砂质灰岩和砾岩。热水塘主要为花岗岩,由此导致水—岩作用不同,最终离子浓度也有很大不同。

根据巴塘热坑和巴塘热水塘的地下热水离子组分水样数据分析,绘制了Piper三线图(图3)。巴塘地区主要阳离子为 Na^+ ,个别点的 Ca^{2+} 相对较多, Mg^{2+} 地热流体样品相对较少。阴离子中 HCO_3^- 占很大比重,其次为 Cl^- 和 SO_4^{2-} 。由此可知,巴塘地区中 HCO_3^- —Na为基本地下水化学类型,另外还有部分 HCO_3^- —Ca和 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4$ —Na型,由于 HCO_3^- 的水解程度大于电离程度,因此水溶液一般呈碱性,与之前的pH值对应。巴塘地区离子位置相对分散,说明在同一构造带中的地质构造、热储岩性和径流循环等方式比较相似,但是不同地区的地下岩体温度及压力不同,导致地下热水的水—岩作用以及上升时与浅层冷水发生的混入比例不同,从而使测得的地下水化学组分不同。

相邻地区地下热水样品及相似的化学组分都有比较密切的水力联系,可以从侧面反映地下水径流条件,因此进行地下水水化学相关性分析可以对地下水径流

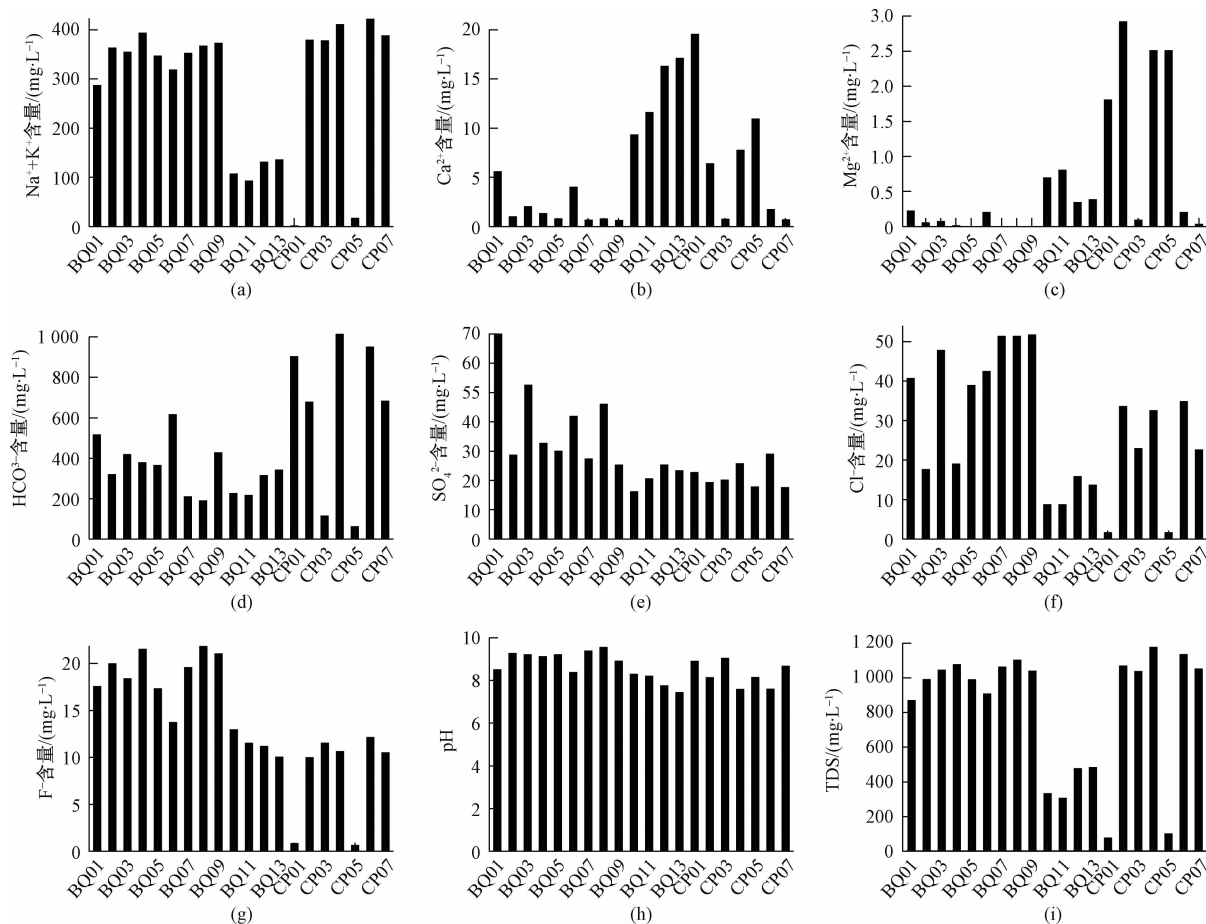


图2 巴塘地区地热水样主要离子组分及 pH 值

Fig.2 Major ion composition and pH values of the geothermal water in the Batang block

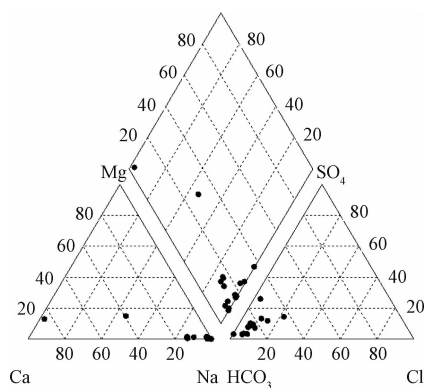


图3 巴塘地区地下水化学 Piper 图

Fig.3 Piper diagram of hydrogeochemistry in the Batang area

循环提供科学支撑。根据前人研究发现,氯既不容易和其他矿物反应,也不易被吸附,存在状态比较稳定,因此可以用氯示踪与其相关性较好的离子^[7],以此分析研究区地下水径流情况。

图4可看到,在巴塘地区,微量元素与氯并无很大相关性。 Na^+ 和 Cl^- 的离子浓度与地下热水的径

流时间长短有关,在巴塘地区中, Na^+ 的浓度很高,说明地下热水径流较长,热循环更深^[14]。巴塘地区的 Sr^{2+} 、 Li^+ 和 F^- 与 Cl^- 的相关性不是很好,说明其只来自于水岩作用的矿物溶解。 HBO_2 是地下热水中非常普遍的化学组分,含硼矿物的溶解和地热流体的径流条件都与硼的形成和迁移富集有着密不可分的关系,地热流体径流强度越大,硼含量越小^[15]。在地下热水中偏硅酸的含量随着温度的升高而升高,巴塘地区偏硅酸含量普遍偏高,主要是由于岩浆岩或变质岩中的硅酸盐通过淋溶风化作用释放,经过较长的地下径流,运移速度较慢,因此更多的偏硅酸溶解到地热水中。

3.2 地下水氢氧稳定同位素特征分析

研究地下水氢氧同位素特征可以判断地下水的起源,确定地下水的补给条件和大气降水与地表水和地下水的联系程度,了解地下水的循环途径。由于D和 ^{18}O 的蒸汽张力比较小,因此其在液相中富集,在气相中贫化,从而导致不同的地下水循环氢氧同位素含量不

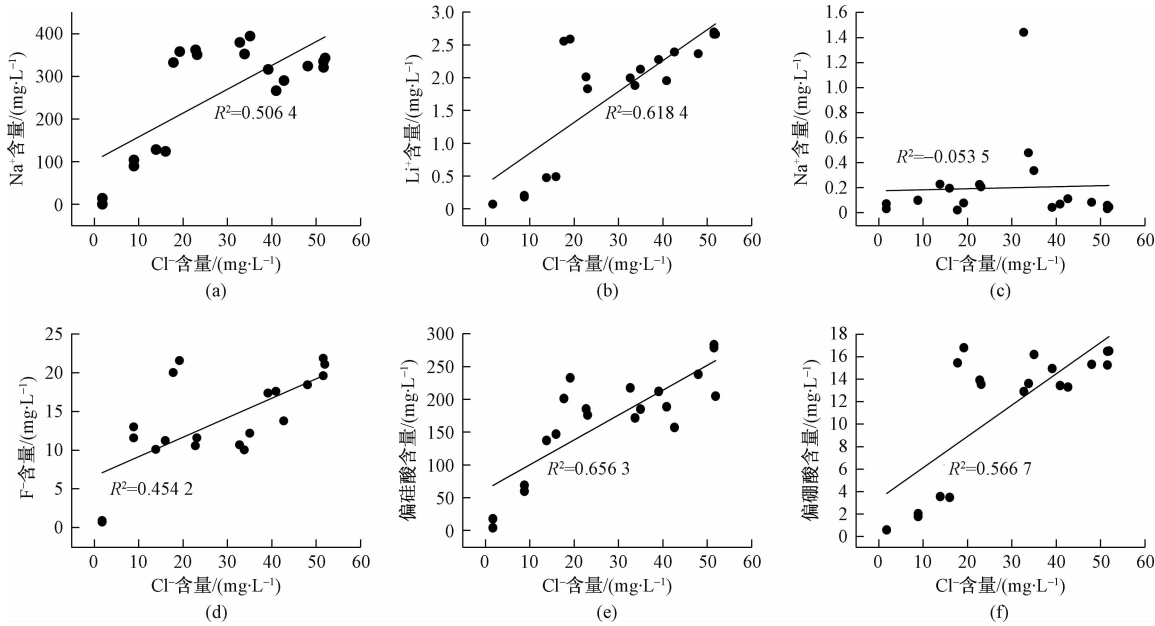


图 4 微量元素与氯含量关系

Fig. 4 Relationship between trace elements and chlorine content

同^[16]。地下水中 δD 的变化值除了少部分混合作用的影响外,主要取决于补给温度及补给高程, $\delta^{18}O$ 的变化主要根据水-岩作用的交换程度和水、岩比值^[11]。氘过量也被称为氘剩余($d = \delta D - 8\delta^{18}O$ ^[17]),是当地大气降水线斜率为 8 时的截距,也是区域水岩氧同位素交换程度的总体反映。地下水体 d 值的演化主要受控于围岩、含氧组分、岩性、含水层封闭条件、水体滞留时间、水体物理化学性质,与补给区 d 值相差愈大,或 d 值愈小,水在含水层中滞留时间愈长,地下水径流速度愈慢, d 值的梯度变化反映了地下水流动方向^[18]。

根据资料显示^[19],我国西南地区大气降水量的氢氧同位素的线性关系为 $\delta D = 7.96\delta^{18}O + 9.52$,与巴塘地区地下热水的氢氧同位素数据和 d 值为 $-5, 0, 5, 10$ 时的系列等值线,见图 5。

由图 5 可以看到, δD 和 $\delta^{18}O$ 基本落在大气降水线附近,与大气降水线吻合,因此可以推断其地下水起源可能是大气降水,但是很多水点已经演化,呈现 $\delta^{18}O$ 漂移。在高温下水-岩反应中,地下热水中的 $\delta^{18}O$ 通常会高于大气降水的补给,发生“氧漂移”现象^[20],且由于水岩作用,高温地下水与含氧矿物发生同位素交换,导致水体中 $\delta^{18}O$ 升高, d 值减小。在本研究区域中, d 值介于 $-2.6 \sim 9.2$,集中分布在 $0 \sim 5$ 。根据 d 值定义^[18],研究区 d 值最小达到 -2.6 ,说明地下水在含水层中滞留时间较长,含氧矿物与含水层中地下热水发生水岩作用, $\delta^{18}O$ 升高,且大部分 $\delta^{18}O$ 比较偏右,除

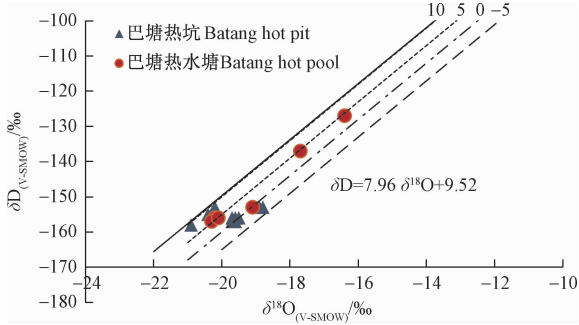


图 5 巴塘地区地下水 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图

Fig. 5 $\delta D-\delta^{18}O$ relation of the water samples in the Batang area

了由于部分补给为冰雪融水外,说明巴塘地区的深部热储温度较高,地下水的径流较长,在地下的滞留循环时间较长,与周围的岩石发生了离子交换,导致 $\delta^{18}O$ 的富集,表现出较强的水岩作用趋势。

4 深部地热过程分析

4.1 热储温度计算

4.1.1 水-岩矿物平衡判断

使用地热温标法判断热储温度的前提是地热温标的某种物质和热储中的矿物达到平衡^[19]。有时由于热储温度过低,与浅层冷水进行混合或者其他一些化学反应的发生,可能导致作为地热温标的化学组分与热储中的矿物不平衡,因此需要检验地下热水和矿物的平衡状态,分析地热温标的使用可靠性。图 6 展

了巴塘地区的地下热水平衡状态,可以发现大部分水样属于部分平衡或混合水,一些属于未成熟水,其中巴塘热水塘水样位于部分平衡或混合水区间,说明其受到了一些浅层冷水混合作用,地热温标法求得的热储温度会有一些偏差。

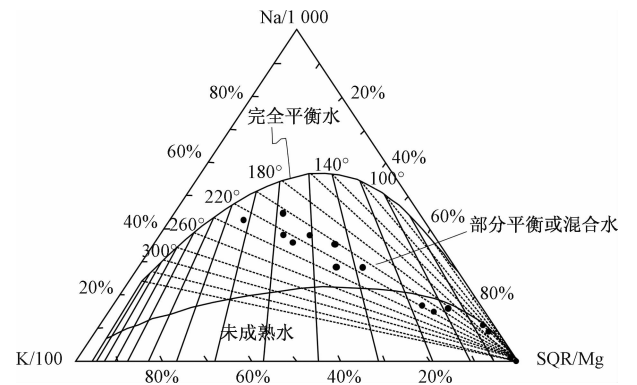


图 6 巴塘地区地下水 Na-K-Mg 三角图

Fig. 6 Na-K-Mg triangle plot of the water samples in the Batang area

4.1.2 地热温标计算热储温度

(1) 多种矿物平衡法

利用 PHREEQC 软件计算各矿物的饱和指数并作平衡状态下的矿物-热液的饱和指数温度图可得到此时地热田的热储温度。由于巴塘热水塘地区地下岩

石主要为砂岩,还含有大量方解石,因此选取方解石、石英、玉髓、钠长石和硬石膏五种矿物进行计算。

由图 7 可以看出,五种矿物中有三个都与 $SI = 0$ 有交点:石英、玉髓和钠长石,其中钠长石趋势线更接近平衡线,因此可以采用钠长石与石英的交点估算热储温度。估算这 5 个点的热储温度分别约为 180 °C、175 °C、182 °C、178 °C 和 192 °C。

(2) 地球化学温标法

本次研究区为川西地区,属隆起山地型地热资源,带状(脉状)热储,因此采用“ SiO_2 温标”、“Na—K 温标”和“Na—K—Ca 温标”计算地热井和温泉的热储温度(表 1)。

表 1 理塘卡辉热储温度

Table 1 Results of temperature of geothermal reservoirs near Kahui storage in Litang

编号	多矿物平衡法/°C	地球化学温标法/°C				$T_{\text{热储}}/^\circ\text{C}$
	$T_{\text{石英}}$	$T_{\text{石英}}$	$T_{\text{玉髓}}$	$T_{\text{Na-K}}$	$T_{\text{Na-K-Ca}}$	
CP02	180	146.40	123.38	178.44	187.57	163.16
CP03	175	147.67	124.75	179.71	208.95	167.22
CP04	182	148.19	125.30	179.98	201.71	167.44
CP05	178	144.57	121.41	177.80	206.96	165.75
CP06	192	168.26	145.43	186.73	192.00	176.88

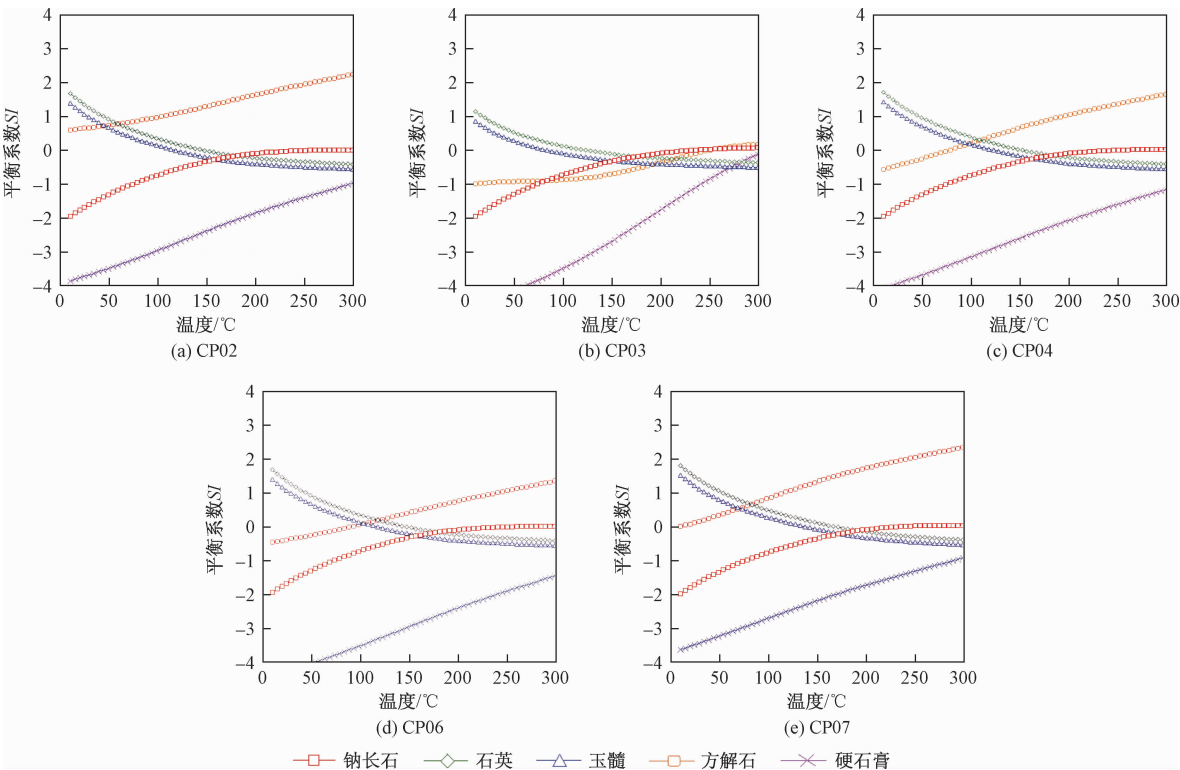


图 7 巴塘热水塘矿物 SI-T 图

Fig. 7 Mineral SI-T diagram of the Batang hot pool

由于本次研究区域的采样点基本处于河谷地带,位于河漫滩上,因此冷水会不同程度地混入地下热水中, SiO_2 浓度、 K^+ 浓度、 Na^+ 浓度、 Mg^{2+} 浓度已被稀释,并且理塘地区位于川西高原的东南缘,属于中高温地热资源。综合实际情况考虑,温标法计算热储温度会偏低。

4.1.3 硅-焓混合模型

巴塘热水塘温泉水样位于部分平衡或混合水区

间,可能有冷水混合,利用硅-焓混合模型及方程^[21]消除冷水混入的影响,分析冷水混入比例以及混入前热储温度。

饱和水焓的含量和 SiO_2 与温度关系见表 2,当温度小于 100°C 时,饱和水焓与温度数值相等。本次计算采用的地表冷水为 CP_{07} 河水水样,温度是 15°C , SiO_2 含量为 14.61 mg/L 。

表 2 温度、焓和 SiO_2 含量关系
Table 2 Relationship among temperature, enthalpy and SiO_2 content

温度/ $^\circ\text{C}$	焓/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{SiO}_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	温度/ $^\circ\text{C}$	焓/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{SiO}_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	温度/ $^\circ\text{C}$	焓/ $(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$\text{SiO}_2/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
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	—	—	—

根据硅-焓模型公式分别作出焓和 SiO_2 含量与温度的函数关系(图 8),其交点即为冷水混入的比例。由图可知, CP_{02} 的冷水混入比例大约为 68%,热储温度约为 229°C ; CP_{03} 混入冷水比例约为 65%,热储温度约为 222°C ; CP_{04} 混入冷水比例约为 65%,热储温

度约为 228°C ; CP_{05} 混入冷水比例约为 64%,热储温度约为 218°C , CP_{06} 点可能由于热储温度过高,冷水混入比例过大,或者采集测量中可能出现的一些误差,导致其在图中没有形成交点,无法计算冷水混入比例及热储温度。

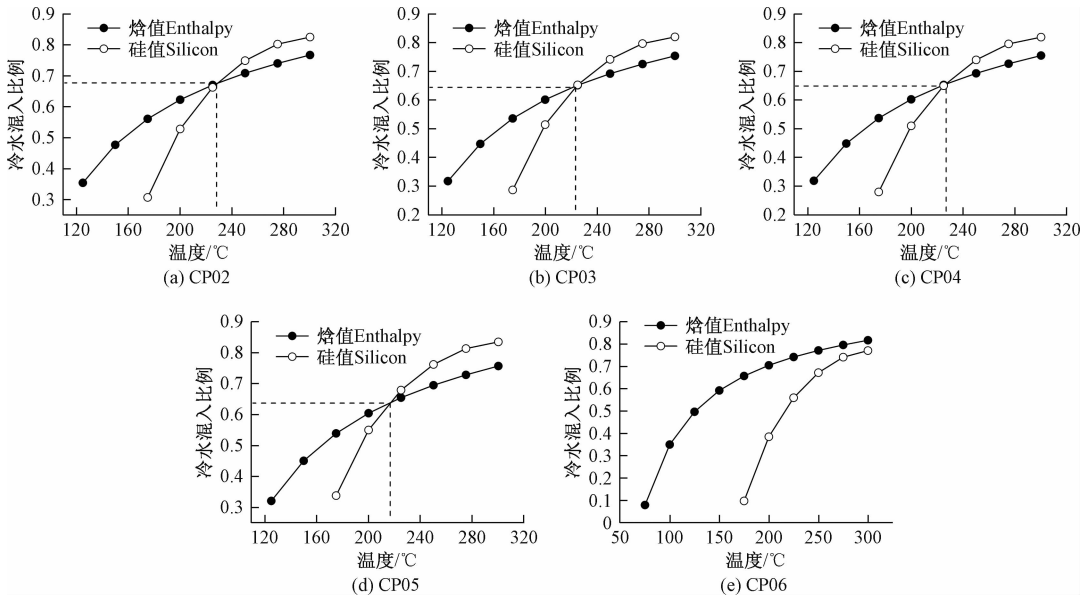


图 8 巴塘热水塘硅-焓模型
Fig.8 Si-enthalpy model of the Batang hot pool

经过硅-焓模型计算的热储温度与地热温标法计算的热储温度相差较大,主要原因是地热水在上升过程中混入了地表冷水,冷水混入地热水后在中部热储层中重新达到相对平衡,采集地下水进行的地热温标计算的是中部储层的温度。通过硅-焓模型消除了冷水混入的影响,计算结果是深部热储温度。然而实际

上利用硅-焓模型计算热储温度也有不确定性,这是因为用此方法得到的热储温度取决于热泉水中 SiO_2 的含量,而地下热水与冷水混合前可能发生扩容从而损失了蒸汽进而导致 SiO_2 含量过高^[22]。但整体看,由于硅-焓模型考虑较为全面, SiO_2 含量较为准确,因此可以作为一个相对可靠的标准进行计算。

4.2 热储热循环深度计算

川西地区属于隆起山地型地热资源,理塘卡辉地区主要受构造和地貌控制^[12]。资料显示,巴塘地区的年平均气温为 3℃,地温梯度为 4.75℃/100 m,恒温带厚度为 20 m^[23]。计算结果见表 3。由于地热水在上升过程中冷水混入导致采取的温泉水样处于不平衡或部分平衡状态,根据地热温标法的热储温度计算的热循环深度是中部热储的热循环深度,经过硅-焓模型校正,此时热储温度计算得到的热循环深度才是深部热储的热循环深度。

表 3 巴塘热水塘热储热循环深度计算结果

Table 3 Calculation of the thermal cycle depth in the Batang hot pool

	温度/℃	热循环深度/m	最终温度/℃	最终热循环深度/m
CP02	163.16	3 391.75	229	4 777.89
CP03	167.22	3 477.18	222	4 630.53
CP04	167.44	3 481.81	228	4 756.84
CP06	165.75	3 446.27	218	4 546.32
CP07	176.88	3 680.72	—	—

5 结论

(1) 川西巴塘地区地下水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型,部分为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Na}$ 型。受淋溶风化作用影响,岩浆岩或变质岩中的硅酸盐释放,偏硅酸溶解到地热水中,导致偏硼酸含量普遍偏高。川西巴塘地区地下水补给来源主要为大气降水,在温度、径流、时间影响下,含氧矿物与高温地下水发生离子交换,出现水体中 $\delta^{18}\text{O}$ 富集现象。

(2) 巴塘地区热储温度 163.16 ~ 176.88℃,热循环深度 3 391.75 ~ 3 680.72 m,冷水混入比例在 64% ~ 68% 之间,未混入冷水时深部热储温度在 218 ~ 229℃ 之间,热储循环深度 4 546.32 ~ 4 777.89 m。地下热水由大气降水经岩石裂隙进入深部,受到不同热源加热成为深部地热水,在向地表循环的过程中,由于径流较长且流速较慢,地热水域围岩发生水岩作用,进行离子交换,在完成一系列水化学作用及水岩作用后,地热水在静水压力和热动力驱动下,升至地表,受到浅层冷水混入,最终形成温泉水。

参考文献:

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-459. [WANG G L, ZHANG W, LIANG J Y, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta
- [2] 沈照理.水文地质学[M].北京:科学出版社,1985. [SHEN Z L. Hydrogeology[M]. Beijing: Science Press,1985. (in Chinese)]
- [3] 钱会,马致远.水文地球化学[M].北京:地质出版社,2005. [QIAN H, MA Z Y. Hydrogeochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. (in Chinese)]
- [4] 魏亚妮,李培月.水文地球化学模拟研究与应用[J].水资源与水工程学报,2010,21(1):58-61. [WEI Y N, LI P Y. Research and application of hydro-geochemical simulation[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(1): 58-61. (in Chinese)]
- [5] 张萌,王贵玲.西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式[J].成都理工大学学报(自然科学版),2014,41(3):382-392. [ZHANG M, WANG G L. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(3): 382-392. (in Chinese)]
- [6] 焦杏春.地下水水质评价与水资源管理:水文地球化学与同位素方法的应用研究进展[J].地质学报,2016,90(9):2476-2489. [JIAO X C. Groundwater quality assessment and groundwater resource management: a review on hydrogeochemical and stable isotope approaches[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(9): 2476-2489. (in Chinese)]
- [7] 郎旭娟,蔺文静,刘志明,等.贵德盆地地下热水水文地球化学特征[J].地球科学,2016,41(10):1723-1734. [LANG X J, LIN W J, LIU Z M, et al. Hydrochemical characteristics of geothermal water in Guide Basin[J]. Earth Science, 2016, 41(10): 1723-1734. (in Chinese)]
- [8] 袁建飞,邓国仕,徐芬,等.毕节市北部岩溶地下水水文地球化学特征[J].水文地质工程地质,2016,43(1):12-21. [YUAN J F, DENG G S, XU F, et al. Hydrogeochemical characteristics of karst groundwater in the northern part of the city of Bijie[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43(1): 12-21. (in Chinese)]
- [9] 史杰,乃尉华,李明,等.新疆曲曼高温地热田水文地球化学特征研究[J].水文地质工程地质,2018,45(3):165-172. [SHI J, NAI W H, LI M, et al. Hydrogeochemical characteristics of high

- temperature geothermalfield of the Quman geothermal field in Xinjiang [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(3): 165 – 172. (in Chinese)]
- [10] 武斌,曹俊兴. 音频大地电磁测深法在川西地热勘查研究中的应用[J]. *工程勘察*, 2011(9): 91 – 94. [WU B, CAO J X. The application of AMT to the study of geothermal exploration in the western Sichuan [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2011(9): 91 – 94. (in Chinese)]
- [11] 倪高倩,张恒,韦玉婷,等. 四川地热流体水文地球化学及同位素特征简析[J]. *新能源进展*, 2016, 4(3): 184 – 194. [NI G Q, ZHANG H, WEI Y T, *et al.* Hydrogeochemical and isotope characteristics of geothermal fluid in Sichuan [J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2016, 4(3): 184 – 194. (in Chinese)]
- [12] 罗敏,任蕊. 四川地热资源类型、分布及成因模式[J]. *四川地质学报*, 2016, 36(1): 47 – 50. [LUO M, REN R. Type, distribution and genesis of geothermal resource in Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2016, 36(1): 47 – 50. (in Chinese)]
- [13] 张健. 川西高温水热活动区的地热学分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(8): 899 – 915. [ZHANG J. Geothermal data analysis at the high-temperature hydrothermal area in Western Sichuan [J]. *Science China: Sciences*, 2017, 47(8): 899 – 915. (in Chinese)]
- [14] 张未. 吉林省长岭县浅层地下水水文地球化学演化规律分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(5): 59 – 63. [ZHANG W. Analysis of evolution law of hydrology and geochemistry of shallow groundwater in Changling county of Jilin Province [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(5): 59 – 63. (in Chinese)]
- [15] 袁建飞. 西藏羊八井高温地热田水环境中硼的迁移和转化研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. [YUAN J F. Transport of boron in the aquatic environment of the Yangbajing Geothermal field, Tibet [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. (in Chinese)]
- [16] 张锡根. 同位素地球化学在地热勘探中的应用[J]. *水文地质工程地质*, 1988(1): 28 – 31. [ZHANG X G. Application of isotopic geochemistry in geothermal exploration [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1988(1): 28 – 31. (in Chinese)]
- [17] Dansgaard. Stable isotopes in precipitation [M]. *Tellus*, 1964: 436 – 438.
- [18] 苏艳,马致远,刘方. 西安咸阳地下热水氡过量参数研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(3): 39 – 41. [SU Y, MA Z Y, LIU F. Deuterium excess parameter features study on thermal groundwater of Xi'an and Xian yang [J]. *Coalgeology & Exploration*, 2007, 35(3): 39 – 41. (in Chinese)]
- [19] 张洪平,刘恩凯,王东升,等. 中国大气降水稳定同位素组成及影响因素[J]. *中国地质科学院水文地质环境地质研究所所刊*, 1991(7): 101 – 109. [ZHANG H P, LIU E K, WANG D S, *et al.* Composition of stable isotopes of precipitation and controlling factors in china. *bull* [J]. *Institute of Hydrogeology and Engineering Geology CAGS*, 1991(7): 101 – 109. (in Chinese)]
- [20] 孙占学,李学礼,史维浚. 江西中低温地下热水的同位素水文地球化学[J]. *华东地质学院学报*, 1992, 15(3): 243 – 248. [SUN Z X, LI X L, SHI W J. Isotopic hydrogeochemistry of mid-low temperature geothermal water in Jiangxi province [J]. *Journal of East China Geological Institute*, 1992, 15(3): 243 – 248. (in Chinese)]
- [21] 王皓,柴蕊. 地热温标在地热系统中的应用研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2009, 26(3): 54 – 58. [WANG H, CHAI R. Application of geothermometers in the geothermal system [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2009, 26(3): 54 – 58. (in Chinese)]
- [22] 佟伟,章铭陶. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1981. [TONG W, ZHANG T M. *Geothermals beneath Xizang(Debit) plateau* [M]. Beijing: Science Press, 1981: 74 – 100. (in Chinese)]
- [23] 曹烈. 致密砂岩天然气成藏动力学研究——以川西坳陷上三叠统须家河组为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2010: 41 – 43. [CAO L. Gas accumulation dynamics of tight sandstone reservoir ——Example from the upper Xujiahe formation in Western Sichuan depression [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2010: 41 – 43. (in Chinese)]

编辑: 张若琳