

doi: 10.12029/gc20200608

章旭,郝红兵,刘康林,毛武林,肖尧,张文. 2020. 西藏沃卡地堑地下热水水文地球化学特征及其形成机制[J]. 中国地质, 47(6): 1702-1714.
Zhang Xu, Hao Hongbing, Liu Kanglin, Mao Wulin, Xiao Yao, Zhang Wen. 2020. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Oiga Graben Geothermal Waters System in Tibet[J]. Geology in China, 47(6):1702-1714(in Chinese with English abstract).

西藏沃卡地堑地下热水水文地球化学特征 及其形成机制

章旭¹, 郝红兵¹, 刘康林¹, 毛武林¹, 肖尧¹, 张文²

(1. 四川省地质矿产勘查开发局成都水文地质工程地质中心, 四川 成都 610081;
2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要:通过沃卡地堑盆地地下热水水文地球化学特征研究,进行热储温度、补给高程计算,建立沃卡地堑地下热水系统中—高温地热概念模型。结果表明,沃卡温泉为中偏碱性水,溶解性总固体较低,水化学类型主要为SO₄-Na型、SO₄·Cl-Na型、HCO₃·SO₄-Na型。热水水文地球化学特征表明,沃卡盆地地下热水系统具有大气降水补给、浅循环地下水的特征,热水以深部熔融体为热源,受控于沃卡半隐伏控热断裂构造,但受裂隙潜水或地表冷水的混合作用,其Na-K-Mg平衡图表现为部分平衡或混合水。利用混合模型对热储真实温度进行估算,得到热储的温度范围为120~200℃,冷水混入比例为70%~83%。

关键词:沃卡温泉;水文地球化学;形成机制;错那—沃卡裂谷;沃卡地堑;水文地质调查工程;西藏
中图分类号:P314.1;P641.1 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2020)06-1702-13

Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Oiga Graben geothermal waters system in Tibet

ZHANG Xu¹, HAO Hongbing¹, LIU Kanglin¹, MAO Wulin¹, XIAO Yao¹, ZHANG Wen²

(1. Chengdu Center of Hydrogeology & Engineering Geology, Sichuan Bureau of Geology & Mineral Exploration & Development, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu 611734, Sichuan, China)

Abstract: Based on the study of hot water hydrogeochemical characteristics of the Oiga Graben Geothermal Waters, the authors carried out hot water heat storage temperature and recharge elevation calculation, and established the Oiga Thermal Spring medium—high temperature geothermal concept model. The results show that the Oiga hot spring is of medium—alkaline water with low TDS, and the water chemical types are mainly SO₄-Na type, SO₄-Cl-Na type and HCO₃-SO₄-Na type. The hydrogeochemical characteristics of hot water indicate that the Oiga Springs are characterized by atmospheric rainfall recharge and shallow circulation groundwater in shallow geothermal systems. The hot water is heated by deep melting body and controlled by the Oiga semi—

收稿日期:2019-09-15;改回日期:2020-03-20

基金项目:中国地质调查局地质调查专项(121201019000161305)资助。

作者简介:章旭,男,1987年,硕士,工程师,主要从事水文地质环境地质工作;E-mail:497416206@qq.com。

通讯作者:郝红兵,男,1975年,硕士,高级工程师,主要从事水文地质环境地质工作;E-mail:704863847@qq.com。

invisible controlled thermal fracture structure. but it is partially balanced or mixed with water in the Na-K-Mg triangle diagram due to the mixing effect by fissure diving or surface cold water. The mixed model is used to estimate the temperature before the influence of hot water and cold water mixing, the temperature range of the heat storage is 120–200°C, and the cold water mixing ratio is 70%–83%.

Key words: Oiga hot spring; hydrogeochemistry; formation mechanism; Cona–Oiga rift; Oiga Graben; hydrogeological survey engineering; Tibet

About the first author: ZHANG Xu, male, born in 1987, engineer, master, mainly engages in hydrogeology and environmental geology. E-mail: 497416206@qq.com.

About the corresponding author: HAO Hongbing, male, born in 1975, senior engineer, master, mainly engages in hydrogeology and environmental geology. E-mail: 704863847@qq.com.

Fund support: Supported by the Special Geological Survey Project of China Geological Survey (No. 121201019000161305).

1 引言

西藏是中国地热活动尤为强烈的地区之一,在全国现已查明的3000余处水热活动区中,西藏境内就有677处(佟伟等,2000),可供开发的地热显示达342处,绝大部分温度超过80℃。西藏地热具有温度高、类型多、分布广等特点,具罕见水热爆炸的羊八井、国内最大间歇喷泉——搭格架间歇泉、卡乌泉塘沸泥泉等均闻名于世。西藏地热划分为藏北低—中温水区、“三江”上游中—高温热水区及藏南部谷地高—中温水汽区三大区,藏南部谷地高—中温水汽区又以热田出露多、类型全、规模大而出名(佟伟等,1981)。西藏地热的分布严格受活动断裂控制,且与区域大地热流背景关系密切(魏斯禹等,1981)。以藏南部谷地高—中温水汽显示区为例,沿喜马拉雅弧形构造带发育众多总体SN向且由一系列隆起带、断陷带及断裂带组成的活动构造带(干成,1980;贺日政等,2003),形成一系列第四纪断陷盆地,盆地内发育强烈的现代水热活动,即著名的喜马拉雅大型地热带(王鹏等,2016),朗久、搭格架、卡乌、羊八井、古堆等地热田均展布于此。目前,西藏已在羊八井、搭格架、古堆等地热田开展了地热资源调查及研究工作,以羊八井地热研究最为丰富,主要从羊八井地热田的地热地质条件(沈显杰,1984;多吉等,2003)、水文地球化学(赵平等,1998;Guo Qinghai et al,2007,2009)、气体地球化学及地球物理特征(安可士等,1980)等方面,研究了羊八井热储、热源及补径排关系,建立了羊八井高温地热系统概念模型,估算了地热资源量,为西藏地热资源的研究奠定了基础。其他热田中,张萌

(2014)利用混合模型估算了谷露热田热储温度,计算了冷水混合比;王尊波等(2015)认为搭格架热田存在尚未完全冷却的侵入岩体热源;沈立成(2011)提出朗久地热田和搭格架地热田不同的CO₂的脱气机理和CO₂的脱气量计算公式,并计算了CO₂的脱气通量;王思琪(2017)认为埋藏较浅的局部熔融体、高温岩体或热流体为古堆热田良好的热源,而SN向发育的沃卡—古堆—错那深大区域性断裂带为深部热能传递大通道;李明礼(2015)认为日多温泉中高含量的B、Li、Sr主要来源于深部热流体对火山岩地层长时间的强烈溶滤作用。西藏地热研究成果丰富,但多局限于以单体热田为单位,对沿近SN向断裂带展布的地热显示分布规律及特征研究有限且不全面。刘昭(2014)对雅鲁藏布江以北段当雄—羊八井—多庆错SN向发育的活动断裂带高温地热进行了较为系统的研究,提出了带内高温地热系统概念模型,为西藏活动断裂带地热形成机制的系统研究提供了方向。

错那一沃卡裂谷带是藏南裂谷带最东侧的SN向断裂带,由沃卡、邛多江和错那一拿日雍错3个相互独立、断续分布的地堑式盆地组成,盆地内地热显示丰富,分布有西藏第二大地热显示区—古堆热田,有色吾温泉、沃卡地热和日多温泉。沃卡地热显示区位于错那一沃卡裂谷北段的沃卡断堑内,沿增久曲河谷及斜坡均有规模大小、温度不一的地热显示,长度达3 km,其类型有温泉、温水沼泽和放热地面,水温43~68.2℃,属中低温地下水热系统,但张丰述(2008)等在沃卡地堑北段卡乃温泉露头所在河谷施工供水井时于60 m揭露了温度高达80℃的热水,表明沃卡地热区热水受地表冷水混合影响

强烈,具有中高温地热系统开发的潜力。沃卡盆地地区地热地质研究程度低,仅宋凯(2011)、贺咏梅(2016)进行的沃卡温泉水化学、氢氧同位素特征研究,但对沃卡温泉与活动断裂控制成因模式的研究较为薄弱,其热储、热源等尚不清楚,开发价值及潜力难以评判,造成了沃卡温泉仅作为洗浴功用的单一开发模式。因此,开展沃卡地热系统成因机制研究,可为沃卡盆地地热资源潜力的精准评估提供科学指导,对推动沃卡地热的可持续开发利用,促进山南地区地热经济发展和“精准扶贫”工程建设,具有重要的现实意义。

本研究在搜集已有研究成果基础上,通过地热地质调查、温泉水化学及同位素分析,对沃卡地热区温泉水文地球化学特征、热储温度、地下冷水混合比等进行系统研究,建立沃卡地热区中—高温地热系统概念模式,对完善错那一沃卡断裂带地热形成机制,继而丰富西藏中高温地热系统的成因机理具有重要的理论意义。

2 研究区概况

2.1 自然地理

研究区位于西藏山南市桑日县增期乡以南,距离桑日县城40 km,区内有桑日县—墨竹工卡县X302县道,交通便利。研究区属高山河谷地貌,河谷宽缓,发育冰碛台地及丘陵地貌;岸坡陡峭,地形坡度30°~50°,高差1000~1500 m。区内气候属于高原温带季风半湿润气候区,年平均气温6.4~8.2℃,年平均降水量500~600 mm,主要集中在5—9月,占全年降雨量的89%以上。降雨具年变化差异大、降雨期集中特征。

沃卡断陷盆地地下热水系统,为沿沃卡地堑盆地内增久曲河谷分布的众多温泉的统称,其现有地热显示22处,总流量大于20 L/s(表1)。根据地下水出露特征、开发利用现状,可分为卡乃温泉、沃卡温泉和阿玛卡温泉。此外,沿断陷盆地南侧雅鲁藏布江两岸出露有沃卡河口微温泉、竹磨沙热泉(佟伟等,2000),但现已消失。

2.2 地层岩性

沃卡地热显示区沿河谷一带出露第四系全新统冲洪积物(Q_n^{pl}),具有明显的二元结构,上部为浅黄色含亚砂土或含砾亚砂土,下部为杂色卵石、漂石及含泥质卵石。两岸分布有白垩纪—古近纪黑云母二长花岗岩($\eta\gamma\beta K_2$)、花岗闪长岩($\gamma\delta K_1$)、石英闪长岩($\delta\sigma K_1$)等;沿分水岭一带出露侏罗系中下统叶巴组(J_{1-2y}),分为3个岩性段,一段以含火山角砾岩、火山集块岩为特征,二段以中酸性安山岩、英安岩、流纹岩、晶屑岩屑凝灰岩为主,三段由沉凝灰岩、变质砂岩、粉砂岩等组成。沃卡地堑地热地质背景见图1。

2.3 构造条件

沃卡盆地位于西藏南部近NS向发育裂谷——错那一沃卡裂谷的北段,为区域性伸展变形而形成的第四纪活动明显的地堑式断陷盆地,断陷盆地全长约50 km,北至金珠乡一带,南端终止于罗布莎铬铁矿。从区域上看,沃卡地堑南端被倾向南的逆冲断裂带—雅鲁藏布江缝合构造带及北段倾向北的雪拉—日多—帕洛断裂所围限,中间错断了近ES走向发育的莫村韧性断层、些锅断层(吴中海等,2007)。

控制沃卡盆地发育的主边界断裂带为整体呈NNE走向、倾向西侧、长50~60 km的盆地东缘正断

表1 地下热水出露特征

Table 1 Exposure features of underground hot water

温泉名称	流量/(L·s ⁻¹)	温度/°C	可溶性总固体/(mg L ⁻¹)	出露特征
卡乃温泉	>1	53.3	744	位于增久曲右岸I级阶地,高出河床1 m,出露于第四系冲积物中,现沿泉口修砌蓄水池,泉水呈股状沿池底涌出,具弱臭鸡蛋气味
沃卡温泉	>10	25~50.5	345~403	位于增久曲右岸斜坡,呈北东西向展布,长度近700 m,由大小18处露天或放热地面组成,未见有泉华沉积。增久曲右岸河床可见多处温水沼泽,面积300 m×50 m,具大量气泡冒出,水温一般小于25℃。
阿玛卡温泉	3.86	35.7	404	位于增久曲右岸I级阶地,高出河床1 m,出露于第四系洪冲积物中;沿泉口修砌有2个蓄水池,热水呈股状沿池底涌出,具弱臭鸡蛋气味。
沃卡河口微温泉	3	13.3	171	出露于雅江北岸河滩乱石堆上,洪水淹没
竹磨沙热泉	-	55~75.5	-	沿雅鲁藏布江右岸河床分布,出露形式有露天泉塘、喷泉,泉眼连续鼓泡并伴沸腾,泉口具黄、白色沉淀物,硫磺味浓烈,已消失

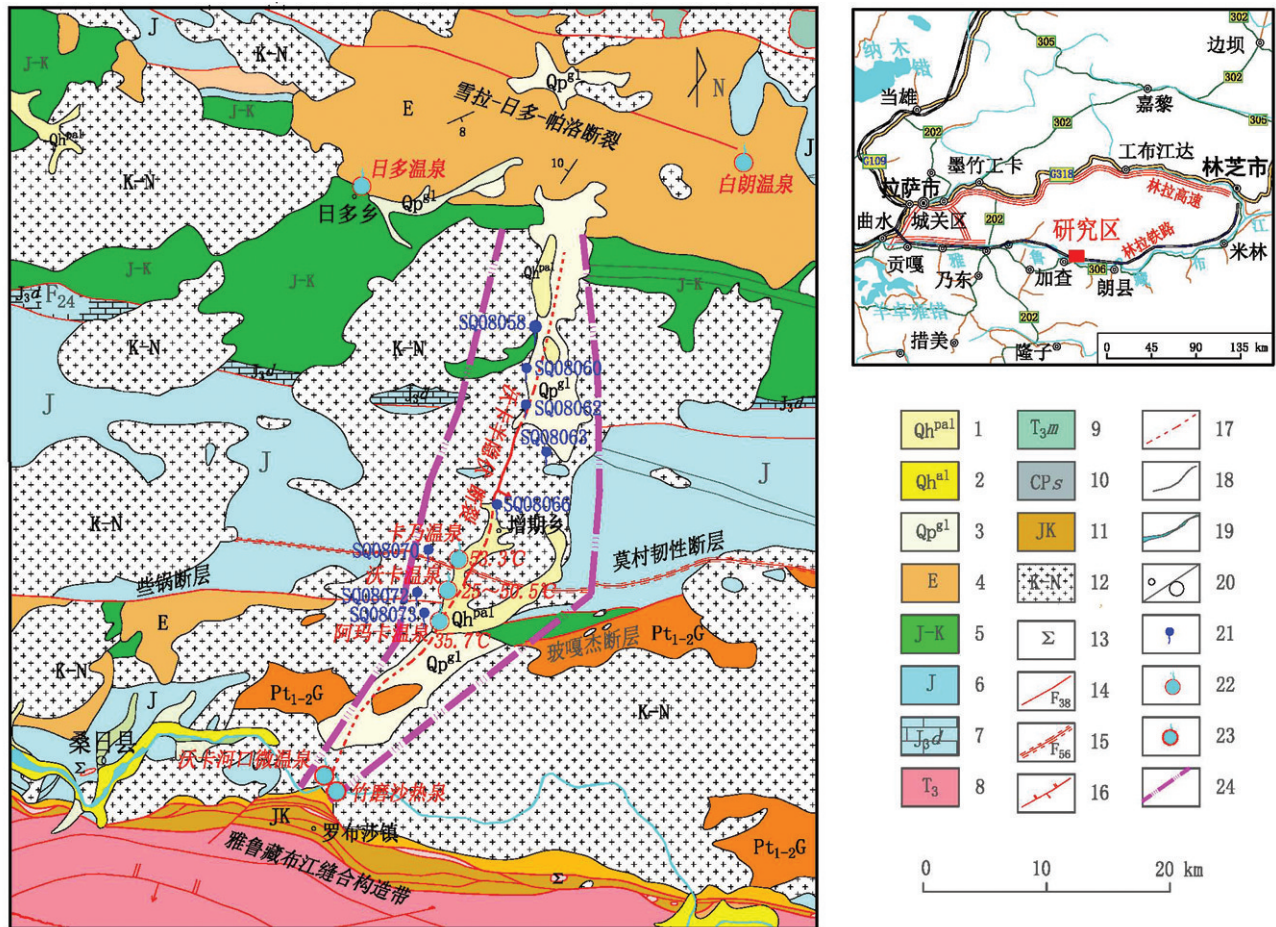


图1 沃卡地堇盆地地质背景图

1—全新世洪冲积物;2—全新世冲积物;3—更新世冰川堆积物;4—古近系火山岩;5—晚侏罗纪—白垩纪;6—侏罗纪火山岩、陆源碎屑岩沉积组合;7—多底沟组灰岩;8—晚三叠世;9—麦隆岗组;10—松多组;11—侏罗纪—白垩纪混杂岩;12—白垩纪—新近纪侵入岩;13—超基性岩块;14—断层及编号;15—韧性剪切带及编号;16—逆断层;17—推测断层;18—地质界线;19—水系;20—乡镇/城市;21—冷泉;22—温泉;23—温泉遗址;24—断堇盆地范围

Fig.1 Geological background map of Oiga Graben basin

1-Holocene alluvial deposits;2-Holocene alluvium;3-Pleistocene glacial deposits;4-Paleogene volcanic rocks;5-Late Jurassic and Cretaceous;6-Sedimentary assemblage of Jurassic volcanic and continental clastic rocks;7-Duodigou Formation limestone;8-Late Triassic;9-Mailonggang Formation;10-Songduo Formation;11-Jurassic-Cretaceous melange;12-Cretaceous-Neogene intrusive rocks;13-Ultrabasic block;14-Fault and its number;15-Ductile shear zone and its number;16-Reverse fault;17-Inferred fault;18-Geological boundary;19-River system;20-Town / City;21-Spring;22-Hot spring;23-Hot spring site;24-Range of fault graben basin

层,同时依据多条高密度物探剖面,沿增久曲河谷存在电阻率小于50 Ω.m的超低阻区域,推测沃卡河谷内发育有隐伏断裂或有热液形式存在(刘健,2018)。同时,沃卡地堇盆地内地震活动频繁,断裂活动速率估算结果表明,该断裂带MIS 6以来的垂直活动速率介于0.4~0.9 mm/a(吴中海等,2008)。在长期地震活动作用下,沃卡地堇盆地形成了东西、南北向交叉发育的构造裂隙网络,为沃卡地堇盆地地下热水系统的发育提供了储存空间和径流通道。

3 样品采集与处理

本次研究水样分别采集于2017年9月、2018年7月野外调查期间。2017年主要采集温泉水样4组,沿沃卡断裂上分布冷泉水样8组;72组氢氧同位素样于两年按流域统一采取,水化学样采样点分布见图1。水样的采集与处理严格按照《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)执行;温泉及冷泉水样均开展全分析测试,由四川省华地新能源环保科技有限公司完成;氢氧同位素分析由四川省

科源工程技术测试中心完成。水化学分析执行《饮用天然矿泉水检验方法》(GB 8538-2016)标准, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定依据《水中氢同位素还原法测定》(DZ/T 0184.19-1997)和《天然水中氧同位素二氧化碳-水平衡法测定》(DZ/T 0184.21-1997)标准。同时,本次工作搜集了笔者研究生期间参与的《林拉铁路长大隧道区域水文地质条件及水热活动研究》项目沃卡河口微温泉水化学数据。

4 温泉水文地球化学特征

4.1 水化学特征

从表2可知,沃卡地热区热水水化学中,阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 为主,阴离子主要为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 次之,可溶性总固体 150.8~744 mg/L, pH 介于 6.5~7.71, 为中偏碱性淡水,水化学类型主要有 SO_4 -Na 型、 SO_4 ·Cl-Na 型、 HCO_3 · SO_4 -Na 型。

断堑盆地内热水与基岩裂隙冷泉水化学特征具极大差异(图2)。盆地内热水富含 H_2S , 而贫 CO_2 , 其水化学类型受 H_2S 影响, 出现了 SO_4 型、 SO_4 ·Cl 型、 HCO_3 · SO_4 型等较复杂的水化学类型, 这与错那-沃卡裂谷带上日多温泉、古堆地热田一致。

据地下热水常量组分 Schoeller 指印图(图3), 热水中各离子均具规律性变化, 揭示盆地内热水来源及形成模式具相似特征, 而以沃卡温泉为典型, 热水具有高 SO_4^{2-} 特征, 这与温泉露头浓烈的硫磺味

吻合,但卡乃温泉、阿玛卡温泉中 SO_4^{2-} 含量偏低, 可能与地表水或浅部裂隙水混合相关。王思琪(2017)、李明礼(2015)认为热水中 SO_4^{2-} 的来源主要为热水溶滤硫酸盐岩而来, 仅少部分为深部流体携带的 H_2S 。因此,沃卡地下热水中较高的 SO_4^{2-} 主要来自安山质、流纹质熔岩等火山碎屑岩为主的叶巴组地层强烈的溶滤作用。

采用 Phreeqc 软件对热水饱和指数计算表明(表3),除玉髓外,方解石和白云石等均处于未饱和状态,反映出地下热水径流途径较短、水岩作用弱。

4.2 同位素特征

根据项目 2017—2018 年集中于桑日县增期乡增久曲流域(沃卡盆地流域)、米林县卧龙镇比扑曲流域及工布江达县、巴宜区等地采集的 67 组天然泉水、2 组大气降水、3 组高山湖水或冰雪融水的氢氧同位素样, 绘制出 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 曲线图(图4)。

结果表明,盆地内热水 $\delta^2\text{H}$ 为 -151.61‰ ~ -158.98‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 为 -19.41‰ ~ -19.75‰ , 分布于全球大气降水方程线附近,说明地下热水主要接受大气降水补给,此外冰雪融水亦会渗入补给。温泉水与冷泉具有相似的氡过量参数 d , 说明热水不存在明显的氧漂移现象,揭示沃卡断堑地下热水系统大气降水补给、浅循环特征(宋美钰等,2018)。

5 热储温度及循环深度计算

5.1 热储温度

(1) 基于地热温标法的热储温度估算

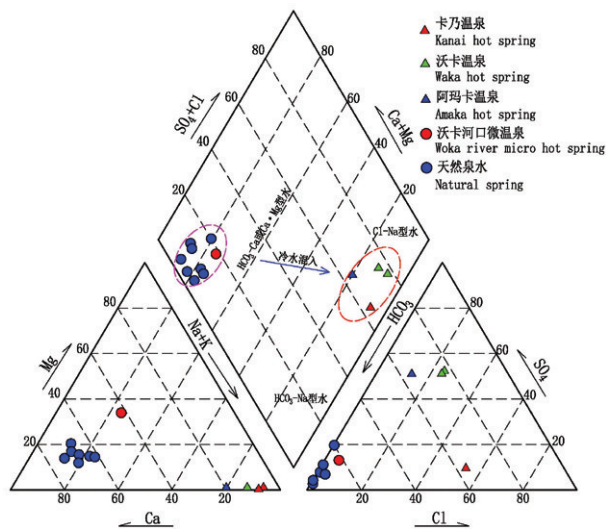


图2 地下热水水化学宏量组分 Piper 图
Fig. 2 Piper diagram of chemical macronutrients in underground hot water

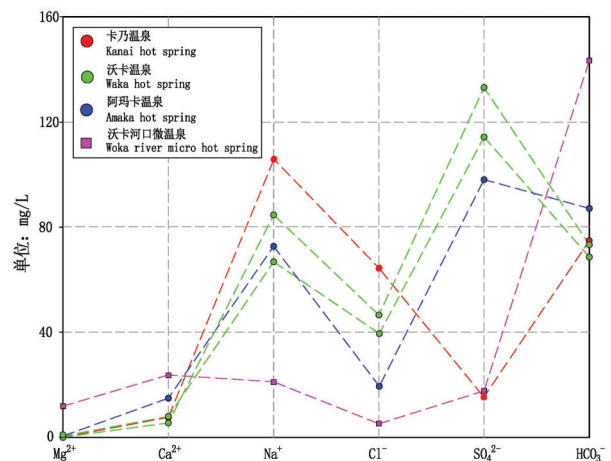


图3 地下热水常量组分特征
Fig. 3 Characteristics of constant components of underground hot water

表2 沃卡地堇出露温泉水文地球化学成果
Table 2 Hydrogeochemical results of Oiga Graben hot spring

名称或编号	卡乃温泉	沃卡温泉		阿玛卡温泉	沃卡河口 微温泉	SQ08058	SQ08060
		①	②				
水温/℃	53.3	50.5	45	35.7	13.3	8.60	5.22
pH(无量纲)	7.63	7.48	7.71	7.57	6.5	7.69	7.72
可溶性总固体/(mg/L)	744	403	345	404	150.8	117.00	105.00
阳离子/ (mg/L)	K ⁺	2.84	2.71	2.27	2.14	5.4	1.26
	Na ⁺	103	81.6	64.3	70.3	15.6	5.09
	Mg ²⁺	0.05	0.06	0.19	0.69	11.6	1.66
	Ca ²⁺	6.05	6.03	7.66	14.7	23.5	15.80
阴离子/ (mg/L)	HCO ₃ ⁻	74.7	73.4	68.5	87.1	143	68.46
	SO ₄ ²⁻	15.3	133	114	97.9	5.4	13.30
	Cl ⁻	64.4	46.2	39.5	19	17.8	<0.15
H ₂ SiO ₃ /(mg/L)	80.7	51.6	-	45.9	-	17.50	10.20
δ ² H/‰	-158.86	-158.98	-156.57	-151.61	-	-124.4	-146.9
δ ¹⁸ O/‰	-19.75	-19.68	-19.7	-19.41	-	-16.69	-18.73
d=δD-8δ ¹⁸ O	-0.86	-1.52	1	3.63	-	9.12	2.94
水化学类型	Cl·SO ₄ -Na	SO ₄ -Na	SO ₄ -Na	SO ₄ ·HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Ca·Mg	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca
名称或编号	SQ08062	SQ08063	SQ08066	SQ08070	SQ08072	SQ08073	
水温/℃	4.24	12.52	11.02	9.45	6.93	14.90	
pH(无量纲)	6.79	7.70	7.68	7.70	7.74	7.07	
可溶性总固体/(mg/L)	104.00	106.00	119.00	104.00	83.00	107.00	
阳离子/ (mg/L)	K ⁺	1.90	1.88	1.36	2.41	0.93	1.22
	Na ⁺	5.59	2.75	7.16	4.80	4.80	4.64
	Mg ²⁺	1.92	2.38	2.28	2.99	2.22	1.66
	Ca ²⁺	14.10	13.00	15.80	20.20	15.70	11.60
阴离子/ (mg/L)	HCO ₃ ⁻	65.30	72.82	74.68	85.89	74.68	67.20
	SO ₄ ²⁻	2.27	1.70	5.45	4.99	1.95	4.73
	Cl ⁻	<0.15	0.37	0.33	2.04	0.16	0.37
H ₂ SiO ₃ /(mg/L)	/	16.90	19.90	14.00	17.30	/	
δD _{SMOW} /‰		-135.8	-147	-142.8	-145.4	-150.3	
δ ¹⁸ O _{SMOW} /‰		-17.19	-18.52	-18.3	-18.25	-18.7	
d=δD-8δ ¹⁸ O		1.72	1.16	3.6	0.6	-0.7	
水化学类型	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	HCO ₃ -Ca	

温泉作为地下热水系统的天然露头,其温度受浅表地下水或地表水的混合常常偏低,不能代表实际热储的温度。因此,通常利用SiO₂温标法、阳离子温标法等定量地球化学温标方法来计算深部热储的温度。由图5可知,卡乃温泉、阿玛卡温泉都落在部分平衡区或混合水区,沃卡温泉落在未成熟水区,表明沃卡断堇盆地地下热水系统中热水与原岩水岩作用并未达到完全平衡,或者热水中混入了较大比例的不平衡状态的冷水(许鹏等,2018),阳离子温标法估算热储温度具有局限性。

SiO₂温标估算的热储温度范围分别为97.86℃~125.56℃和99.14~122.88℃(表4)。由Na-K-Mg平衡图(图5)可知,沃卡温泉4个出露点均落在120~200℃等温线之间,据SiO₂温标估算的热储温

度均低于该范围,表明盆地内地下热水系统中热水在涌出地表过程中受到了浅层裂隙冷水或地表水的混合。

(2) 基于混合模型的热储温度估算

以上分析表明,沃卡盆地内温泉具有与浅部冷水混合特征,可建立混合模型估算深部的真实热储温度。模型方程为:

$$S_c X_1 + S_h (1 - X_1) = S_s \quad (1)$$

$$\rho_{\text{CSiO}_2} X_2 + \rho_{\text{HSiO}_2} X_2 (1 - X_2) = \rho_{\text{SsiO}_2} \quad (2)$$

式中: S_c 为冷水的焓(J/g); S_s 为泉水的终焓(J/g),100℃以下的饱和水焓等于水的摄氏温度数;100℃以上时,温度与饱和水焓的关系可从表5中查出); S_h 为热水初焓(J/g); ρ_{CSiO_2} 为冷水的SiO₂质量浓度(mg/L); ρ_{SsiO_2} 为泉水的SiO₂质量浓度(mg/L); ρ_{HSiO_2}

表3 地下水饱和指数模拟结果
Table 3 Simulation results in the saturation index of underground hot water

矿物相	矿物组分	卡乃温泉	沃卡温泉	阿玛卡温泉
硬石膏(Anhydrite)	CaSO ₄	-3.29	-2.47	-2.37
文石(Aragonite)	CaCO ₃	-0.89	-1.15	-0.77
方解石(Calcite)	CaCO ₃	-0.77	-1.02	-0.63
玉髓(Chalcedony)	SiO ₂	0.37	0.21	0.31
石英(SiO ₂)	SiO ₂	-0.38	-0.55	-0.49
纤蛇纹石(Chrysotile)	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-6.47	-8.15	-5.99
白云岩(Dolomite)	CaMg(CO ₃) ₂	-3.1	-3.58	-2.17
石膏(Gypsum)	CaSO ₄ ·2H ₂ O	-3.28	-2.43	-2.18
石盐(Halite)	NaCl	-6.75	-7	-7.43
岩盐(Sylvite)	KCl	-7.98	-8.14	-8.56
O ₂ (g)	O ₂	-27.95	-29.34	-33.42
CO ₂ (g)	CO ₂	-2.58	-2.46	-2.57

为热水的初始 SiO₂ 质量浓度 (mg/L); X 为冷水混合比例。

根据上述公式,冷水温度取沃卡当地年平均温度 8.2 °C,冷水 SiO₂ 含量取盆地内冷泉平均值。热水初温假定等于 75~300 °C,相应焓值由表 5 可以查出。泉口温度和 SiO₂ 含量根据本次实测值。将各温度的焓和 SiO₂ 的质量浓度分别代入公式(1)、公式(2),求出不同温度下的 X₁ 和 X₂ 值,绘出不同温度下 X 与热水温度的曲线图(图 6),X₁ 和 X₂ 曲线交点即为计算热储温度值。

由图 6 可知,卡乃温泉热储温度为 200 °C,冷水混入比例为 76%;沃卡温泉热储温度为 150 °C,冷水混入比例为 70%;阿玛卡温泉热储温度为 175 °C,冷水混入比例为 83%;由此可见,沃卡断堑盆地地下水系统属于高温热水系统,但受地表冷水混合作用强烈。基于混合模型估算的热储温度与 Na-K-Mg 平衡图上热储温度范围基本一致,能较为真实地反映沃卡地堑盆地地下水系统热储温度值。

5.2 补给高程

大气降水同位素组成具有高程效应,可根据这一特征,利用 δ¹⁸O 同位素值计算温泉的补给高程。计算方程为:

$$H = \frac{\delta_c - \delta_p}{K} \times 100 + h$$

式中,H 为补给区高程,m;h 为取样点高程,m;δ_c 为温泉的 δ¹⁸O 值;δ_p 为大气降水的 δ¹⁸O 值;K 为大气降水 δ¹⁸O 高程梯度(δ/100m)。δ¹⁸O 的梯度值的确

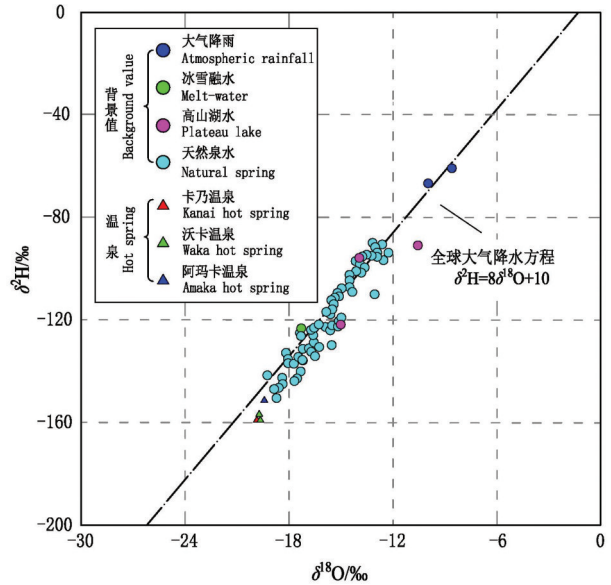


图4 地下热水中 δ²H-δ¹⁸O 关系图
Fig. 4 δ²H-δ¹⁸O plot of the underground hot water

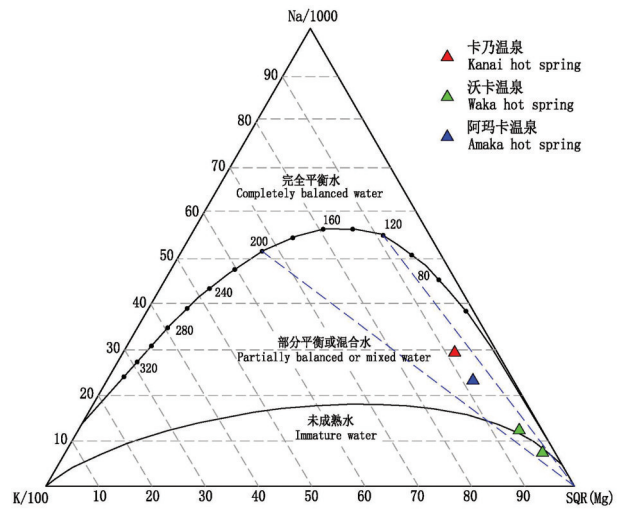


图5 地下热水 Na-K-Mg 平衡图解
Fig. 5 Diagram of Na-K-Mg balance of underground hot water

定:本次沿增久曲由上游至下游选取了 4 个典型冷泉同位素分析结果,将 δ¹⁸O 与泉点出露高程拟合所得曲线为 δ₁₈O = -0.0037H - 107.98, R² = 0.9473,其拟合求取的高度梯度为 0.37‰/100 m,与西藏地区 0.31‰/100 m 的高度梯度较为吻合。高程参照值确定:以真不错湖水作为高程参照点,其 δ¹⁸O = -15.0‰。各温泉的补给高程计算成果见表 6,结果表明,沃卡地堑盆地地下水系统补给高程 5100~

表4 运用地球化学温标计算的热储温度值

Table 4 The temperature of thermal storage calculated by geochemical temperature scale

温泉名称	$T_{\text{水温}}/^\circ\text{C}$	SiO ₂ 温标(无蒸汽损失)	SiO ₂ 温标(最大蒸汽损失)
		$t = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$	$t = \frac{1522}{5.75 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$
卡乃温泉	53.3	125.56	122.88
沃卡温泉①	50.5	103.29	103.83
沃卡温泉②	45	-	-
阿玛卡温泉	35.7	97.86	99.14

表5 热水温度、焓以及 SiO₂质量浓度关系

Table 5 Relationship of water temperature, enthalpy and mass concentration of SiO₂

$t/^\circ\text{C}$	$S/4.1868\text{J/g}$	$\rho_{\text{c SiO}_2}/(\text{mg/L})$
50	50.0	13.5
75	75.0	26.6
100	100.1	48.0
125	125.1	80.0
150	151.0	125.0
175	177.0	185.0
200	203.6	265.0
225	230.9	365.0
250	259.2	486.0
275	289.0	614.0
300	321.0	692.0

5300 m,与区域分布雪山所在高山盆地海拔一致。

6 温泉形成机制讨论

6.1 温泉形成条件分析

6.1.1 热源分析

据已有西藏高温地热系统的研究资料,西藏地热的热源多是壳内局部熔融层的贡献,表现为具有高导和低重力异常(佟伟等,1978;沈显杰等,1990;谭捍东等,2006)。熔融体多呈串珠状排列,并在地表形成具线性展布特征的伸展断层和断陷带,在后期地质历史过程中逐渐形成以串珠状断陷盆地为地貌特征的断裂谷系,往往成为地下热水赋存的优势部位,孕育了尼木、羊八井、谷露等众多地热田。

据错那一墨竹工卡电阻率模型(谭捍东,2004)(图7),沿古堆—雅鲁藏布江缝合带—墨竹工卡县—线上部地壳中存在巨厚的高阻体(IV),在雅鲁藏布江沃卡一带最大埋深达20 km,是冈底斯花岗岩体的反映;而在其下方存在3个较大规模高导体(I、II、III),总体北倾,愈近缝合带产状变陡、深度变深,是雅鲁藏布江缝合带的反映。高导体的发

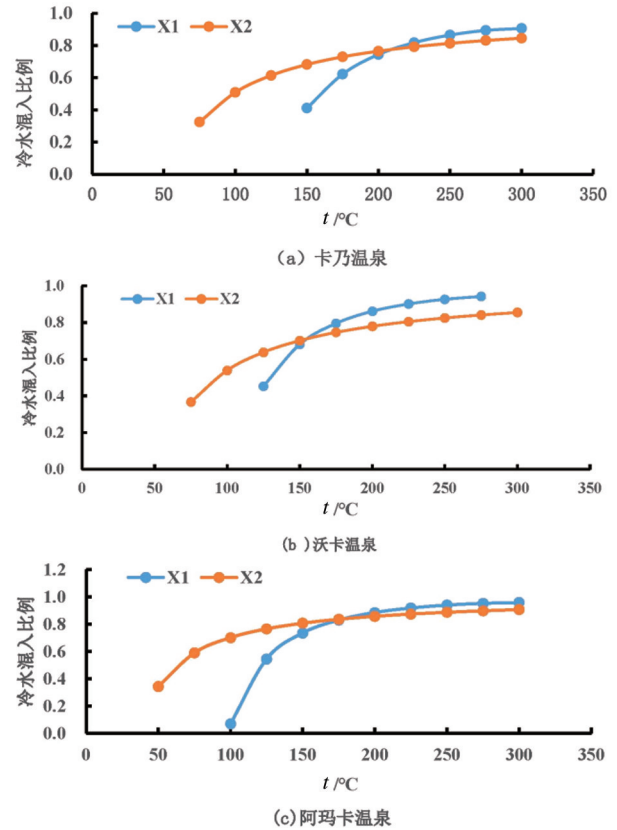


图6 深部热水温度与混入冷水比例图解
X1为基于泉水露头温度计算的冷水混入曲线;X2为基于泉水SiO₂含量计算的冷水混入曲线

Fig. 6 Diagram of the ratio of deep hot water temperature to mixed cold water

X1 is the cold water mixing curve calculated based on the spring outcrop temperature; X2 is the cold water mixing curve calculated based on the spring SiO₂ content

育,可说明在地壳中存在局部熔融体或热流体(张森琦等,2018),这与走向近平行发育的羊八井—当雄—谷露裂谷具有共性。

结合沃卡地堑内出露温泉水文地球化学特征,认为沃卡断堑存在深部局部熔融体,为沃卡地堑盆地地下热水系统提供了良好的热源条件。

表6 沃卡地堑盆地地下热水补给高程
Table 6 Supply elevation of underground hot water

编号	温泉名称	同位素测试值		出露高程 /m	补给高程 /m	备注
		$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$			
1	卡乃温泉	-19.75	-158.9	3927	5210	
2	沃卡温泉	-19.68	-159.0	3913	5178	
3		-19.70	-156.6	3906	5175	
4	阿玛卡温泉	-19.41	-151.6	3896	5086	
5	真不错湖水	-15.00	-121.6	4643		计算基准

6.1.2 运移通道分析

沃卡盆地内纵横交错的断裂系统,为地下热水的形成提供了储存空间和运移通道。从地下热水系统发育构造部位来看,不同方向断裂交汇部位,是地下热水储存、运移、富集,直至排泄的优势部位,为地下热水活动发育强烈区。沃卡地热区主要控热构造可划分为北部热干—松多断裂构造带、中部莫村韧性断层构造带及南部雅鲁藏布江结合带构造带,呈EW向分布,均被近NS向的错那—沃卡断裂错断,组成断裂构造体系,这些构造交点构成了地下热水系统出露的有利位置。尤其是NS向断裂与EW向方向断裂的交汇处,既是热水水源的通道,又是地下热水运移和储存的空间,是地下热水

系统最为活跃的部位,沿增久曲河谷温泉出露带存在宽约300 m的电阻率小于100 $\Omega \cdot \text{m}$ 的低电阻带即为有利的证据(图8)。

沃卡地堑盆地内地震活动频繁,并伴随青藏高原强烈的构造活动呈现同步活跃之势,这种周期性的新构造活动所引起地热活动强度交替,可解释竹磨沙热泉消失的原因。

6.1.3 地热流体来源分析

通过水文地球化学特征分析,盆地内温泉主要为大气降水、冰雪融水补给;热水在补给、径流以及排泄过程中受到水岩作用、冷水混入等影响,呈现出不同的水化学类型,基于混合模型的热储温度估算(黄广寿等,2020),区内温泉均有70%~83%比例不等的冷水混入;温泉氢氧同位素特征表明,区内温泉补给高程5100~5300 m。

6.1.4 热储特征分析

结合温泉水文地球化学特征,根据其热储特征,可将区内地热分为四系孔隙型热储、基岩裂隙型热储两种热储类型。

(1)第四系孔隙热储。根据物探成果,增久曲在沃卡段第四系松散覆盖层厚度50~150 m,其岩性为砂砾石,局部有致密砂层或热水胶结层作为盖

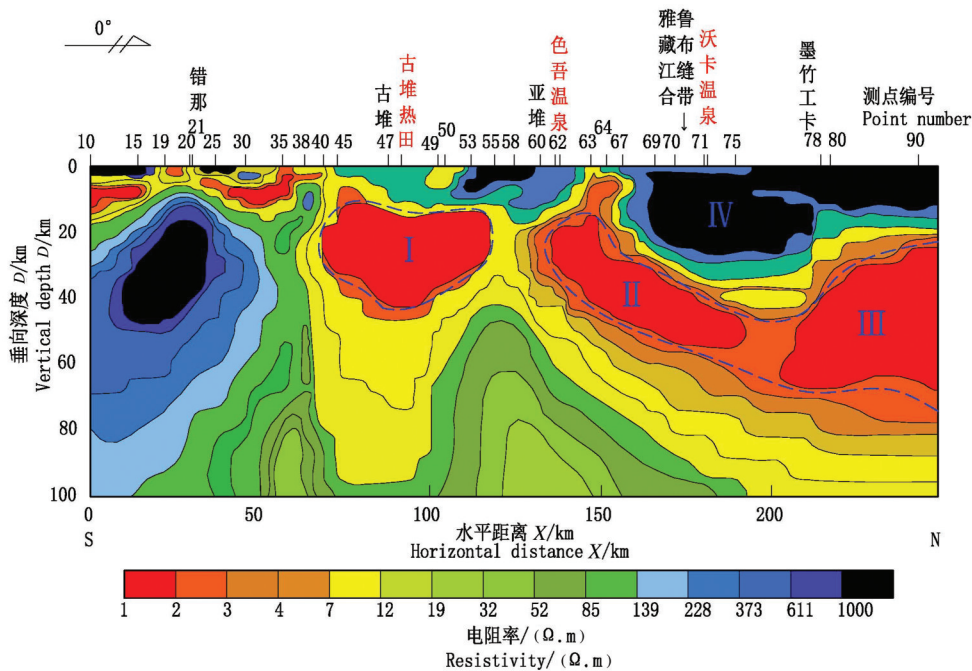


图7 错那—墨竹工卡剖面电阻率模型(据谭捍东等,2004,2006修改)

Fig.7 Resistivity model from 2D CG inversion from Cona to Maizhokunggar(modified from Tan Handong et al., 2004,2006)

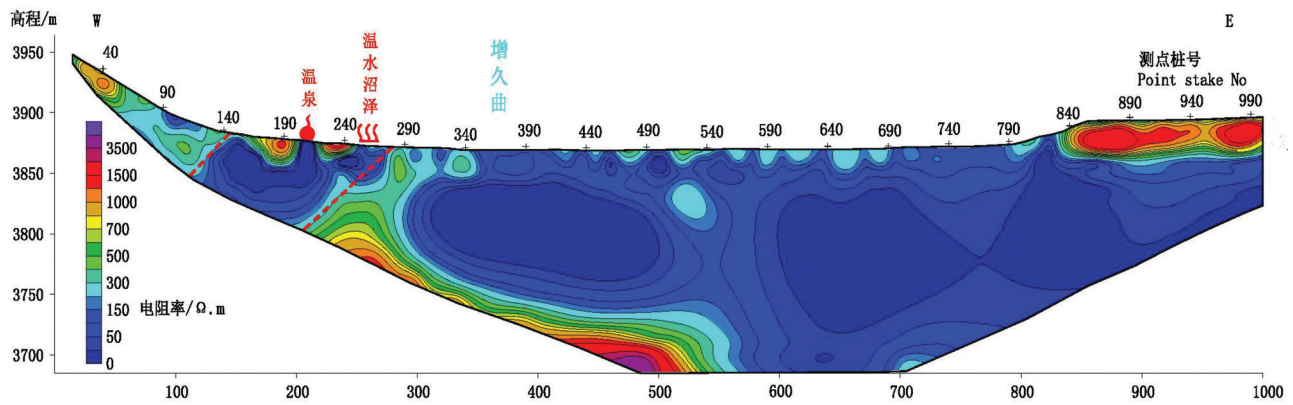


图8 增久曲高密度电法剖面

Fig.8 High density electrical profile in the Zengjiuqu

层,热水在补给、径流过程中,沿河床基底发育的沃卡隐伏断裂或沃卡断堇盆地两侧边界断裂涌出,并在增久曲河谷一带进入具有良好透水性的第四系

松散岩类孔隙中,形成良好的第四系孔隙热储层。

该热储层中地下热水的出露方式主要以温水沼泽为主,沿增久曲出露范围广,但越近地表水受

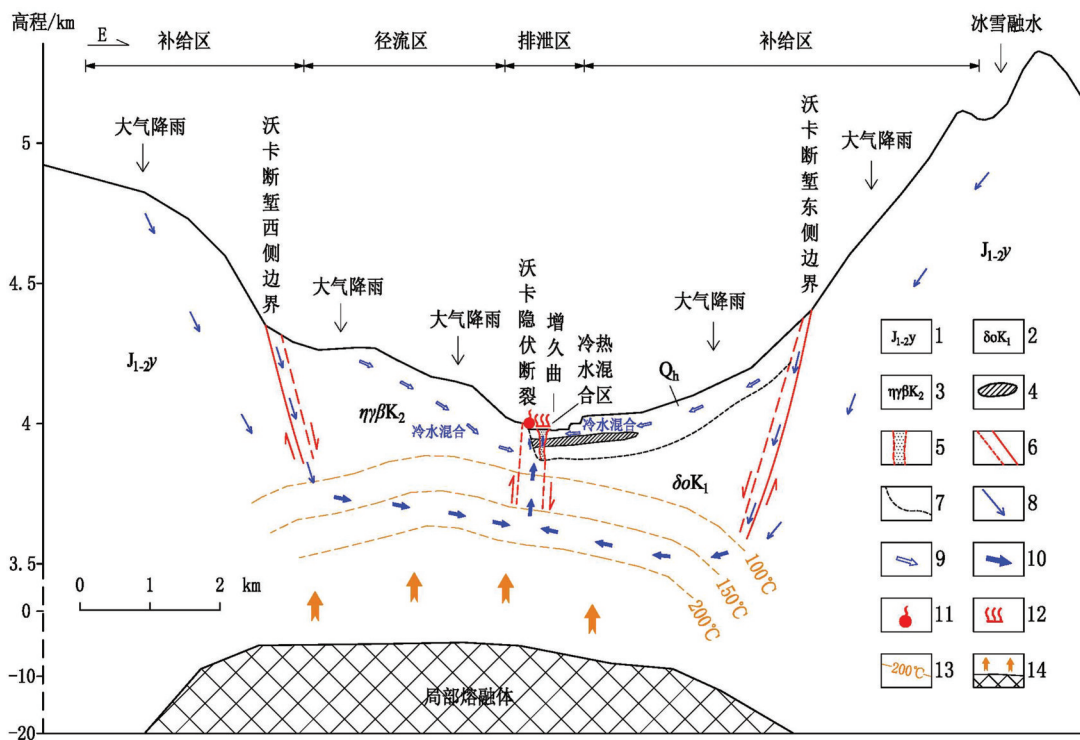


图9 沃卡地堇盆地温泉成因模式图

1—侏罗系中下统叶巴组;2—白垩系下统石英闪长岩;3—白垩系中统二长花岗岩;4—致密砂层盖层;5—第四系热储层通道;6—实测或推测断层;7—地质界线;8—补给冷水及运移方向;9—混合冷水及运移方向;10—热水及流动方向;11—温泉;12—温水沼泽;13—推测温度等值线;14—热源

Fig.9 Origin model of hot spring in Oiga Graben basin

1—Middle lower Jurassic Yeba Formation;2—Lower Cretaceous quartz diorite;3—Middle Cretaceous monzogranite;4—Tight sand cover;5—Channel of Quaternary thermal reservoir;6—Measured or inferred fault;7—Geological boundary;8—Make up cold water and transport direction;9—Mixed cold water and its migration direction;10—Hot water and flow direction;11—Hot spring;12—Warm water swamp;13—Inferred temperature contour;14—Heat source

混合作用明显,温度低,但钻孔可揭露高于天然出露温泉温度的地下热水。

(2)基岩裂隙型热储。该类热储主要分布于增久曲两岸基岩,其含水层为白垩系—古近系花岗岩侵入岩组成,受活动断裂影响,构造裂隙发育,富水性较好。构造裂隙的发育,既是热水运移的优势通道,又是热水储存的极佳空间。沃卡温泉多数泉口均沿花岗岩发育的裂隙流出,为区内地下热水的热储主体。

6.2 温泉概念模型建立

由于欧亚板块持续强烈的板块碰撞活动,在青藏高原形成了强烈而又频繁的构造变形,造就了下地壳深融型岩浆源区和中部的局部低速熔融层,并在上地壳的一定深度内,形成了浅层侵位的岩浆囊和不同深度的局部带状熔融体,为青藏高原地下热水系统的形成提供了必备的热源,因此青藏高原地热资源多属隆起山地对流型(王贵玲等,2017;周训等,2017)。综合西藏地区羊八井、尼木—那曲地热带等众多地热田的研究成果,建立了沃卡地堑盆地内地下热水系统概念模型(图9)。

沃卡地堑盆地两侧大气降水和高山冰雪融水为地下热水主要补给源,经接受补给的冷水沿构造活动发育的断裂不断下渗,经一定深度的局部带状熔融体提供热源加热,形成了地下热水,并伴随着深部气体成分的不断加入,热水开始向上运移,受控于条带状展布的受断裂控制的基岩裂隙型热储,为深部热储控制地下热水;在地下热水沿河谷基底断裂或盆地边界断裂上升过程中,由于浅层裂隙水的混合,其温度降低。在增久曲河谷内,热水沿基岩裂隙热储进入具有良好透水性的第四系松散岩类孔隙含水层中,以致密砂层或热水胶结层为盖层,形成第四系孔隙型浅部热储,在热水上升过程中受地表水的混合,沿河床一带形成温水沼泽。

7 结 论

(1)沃卡地堑盆地地下热水系统属于中—高温地热系统,地热显示主要沿沃卡半隐伏断裂呈带状展布。热水为中偏碱性水,可溶性总固体 150.8 mg/L~744 mg/L,水化学类型主要有 $\text{SO}_4\text{-Na}$ 型、 $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ 型、 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na}$ 型。

(2)热水水文地球化学特征表明,沃卡地下热

水系统具有大气降水补给、浅循环地下水的特征,且受裂隙潜水或地表水的混合作用,热水在 Na-K-Mg 平衡图上处于部分平衡或混合水、未成熟水的范围内。

(3)利用二氧化硅温标对热储温度进行估算,其热储温度 97.86~125.56 °C,热水受浅层裂隙冷水或地表水的混合,估算热储温度偏低。通过建立热储温度混合模型,对热水热储真实温度及混入冷水比例进行估算,结果表明沃卡盆地地下热水真实热储温度范围为 120~200 °C,冷水混入比例为 70%~83%。

(4)基于同位素高程效应特征,计算沃卡地堑盆地地下热水系统补给高程为 5100~5300 m,主要为大气降雨及高山冰雪融水补给。

致谢:感谢冈底斯项目组所有人员在西藏3年野外工作的不懈努力,为西藏地质事业奉献了青春;同时也特别感谢西藏国土资源厅、西藏地热地质大队各位领导和老师对项目开展所给予的支持、指导和关心;在此还要感谢审稿专家和编辑老师对文章提出的修改意见。

References

- An Keshi, Zhang Xigen, He Shichun. 1980. Geochemical characteristics of the Yangbajing geothermal field[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, (1): 14–18(in Chinese with English abstract).
- Duo Ji. 2003. The Basic characteristics of the Yangbajing geothermal field— A typical high temperature geothermal system[J]. *Engineering Sciences*, 5(1):42– 47(in Chinese with English abstract).
- Gan Cheng. 1980. Active faults and structures in Tibet, China[J]. *Geology and Geochemistry*, (3): 46– 52(in Chinese with English abstract).
- Guo Qinghai, Wang Yanxin, Liu Wei. 2007. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166(3): 255–268.
- Guo Qinghai, Wang Yanxin, Liu Wei. 2009. Hydrogeochemistry and environmental impact of geothermal waters from Yangyi of Tibet, China[J]. *Journal of volcanology and geothermal research*, 180(1): 9–20.
- He Rizheng, Gao Rui. 2003. Some significances of studying north-southern rift in Tibet plateau[J]. *Progress in Geophysics*, (1): 35–43 (in Chinese with English abstract).
- He Yongmei, Xun Xiaohui, Xie Ye. 2016. Formed causes and Hydro-geochemistry characteristics of hot springs in Tibet Voca[J].

- Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 27 (4):66–70(in Chinese with English abstract).
- Huang Guangshou, Guo Lili, Huang Kai.2020. Geothermal geological characteristics of five tectonic units in the sedimentary basins of Henan Province[J]. Geology and Resources, 29(02):172–179(in Chinese with English abstract)
- Li Mingli, Duo Ji, Wang Zhu, Wu Guodong, Jiang Zhenzhen, Liu Gaoling.2015. Hydrochemical characteristics and material sources of the Riduo thermal springs in Tibet[J]. Carsologica Sinica, 34 (03): 209–216(in Chinese with English abstract).
- Liu Jian, Shi Jie, Yao Xin, Li Qin, Chang Zhiyong.2018. The control of neo-tectonic activity over geothermal resource in the Taxkorgan Basin on the northeastern margin of the Pamir[J]. Geology in China, 45(4):681–692(in Chinese with English abstract).
- Liu Zhao. 2014. The Forming Mechanism of Typical High-temperature Geothermal Systems in Nimu–Naqu Geothermal Belt, Tibet[D]. Shijiazhuang: Chinese Academy of Geological Sciences (in Chinese with English abstract).
- Shen Licheng, Wu Kunyu, Xiao Qiong, Yuan Daoxian.2011. Carbon dioxide degassing flux from two geothermal fields in Tibet, China[J]. Chinese Science Bulletin, 56(26): 2198–2208(in Chinese with English abstract).
- Shen Xianjie, Wang Zirui.1984. Thermal reservoir model analysis of the Yangbajing geothermal field, XiZang(Tibet) Autonomous Region[J]. Scientia Sinica: Series B, 27(12):1316–1329.
- Shen Xianjie, Zhang Wenren, Yang Shuzhen, Guan Ye, Jin Xu.1990. Heat flow evidence for the differentiated Crust–Mantle thermal structures of the northern and southern terranes of the Qinghai–Tibet plateau [J]. Journal of the Chinese Academy of Geological Sciences, (2):203–214(in Chinese with English abstract).
- Song Meiyu, Liu Jie, Qin Lihong, Yu Yan.2018. Analysis on the hydrochemical characteristics and isotope of geothermal fluid in Tianjin[J]. Geological Survey and Research, 41(2):138–144(in Chinese with English abstract).
- Song Kai. 2012. Formed conditions of hot springs in Tibet Voca and Impact Studies on the Tunnel Project[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).
- Tan Handong, Jiang Mei, Wu Liangshi, Wei Wenbo. 2006. Electrical conductivity structure of the Qinghai–Tibet Plateau and its significance for the study of the lithosphere[J]. Geology in China, (04):906–911(in Chinese with English abstract).
- Tan Handong, Wei Wenbo, Martyn Unsworth, Deng Ming, Jin Sheng, John Booker, Alan Jones.2004. Study on the crustal electrical structure of the Yarlung Zangbo Suture Zone in the southern Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 33(4): 685–690 (in Chinese with English abstract).
- Tong Wei, Liao Zhijie, Liu Shibing Zhang Zhifei, You Maozheng, Zhang Mingtao. 2000.Hot Springs in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 200–202.
- Tong Wei, Zhang Mintao, Zhang Zhifei. 1981. Geothermal in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 88–94.
- Tong Wei, Zhang Zhifei, Zhang Mintao, Liao Zhijie, You Maozheng, Zhu Meixiang, Guo Guoyin, Liu Shibin.1978. The himalayan geothermal belt[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1:76–89(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li jun.2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. Geology in China, 44(6):1074–1085(in Chinese with English abstract).
- Wang Peng, Chen Xiaohong, Shen Licheng, Xiao Qiong, Wu Xiaoqing. 2016. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet[J].Geology in China, 43(4): 1429–1438(in Chinese with English abstract).
- Wang Siqi. 2017. Hydrogeochemical Processes and Genesis Macheinism of High-temperature Geothermal System in Gudui, Tibet[D]. Beijing: China University of Geoscience.
- Wang Zhunbo, Shen Licheng, Liang Zuobing, Jiang Zeli, Liao Yu.2015. Characteristics of hydrochemical composition and stable carbon isotope of natural water in the Daggia geothermal field, Tibet, China[J]. Carsologica Sinica, 34(3): 201–208(in Chinese with English abstract).
- Wei Siyu, Teng Jiwen, Yang Bingping, Hu Zhongyi. 1981. Characteristics of geothermal distribution and geophysical field of in Tibet Plateau[J]. Northwestern Seismological Journal, (4): 17–25 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Zhang Yongshuang, Hu Daogong, Zhao Xitao, Ye Peisheng. 2007. Quaternary normal faulting and its dynamics of the Oiga Graben in South–Eastern Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 81 (10): 1328–1339(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhonghai, Zhang Yongshuang, Hu Daogong, Zhao Xitao, Ye Peisheng. 2008. Late Cenozoic normal faulting of the Qungdo Gyang Graben in the Central Segment of the Cona–OIGA rift, Southeastern Tibet[J]. Journal of Geomechanics, 30(1):144–161(in Chinese with English abstract).
- Xu Peng, Tan Hongbing, Zhang Yanfei, Zhang Wenjie.2018. Geochemical characteristics and source mechanism of geothermal water in Tethys Himalaya belt[J]. Geology in China, 45(6):1142–1154(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengshu, Hou Lifeng, Zhong Dong.2008. Exploration and Evaluation Report on Groundwater Resources in Sangri County, the Yarlung Zangbo, Lhasa River, and Nyang Rivervalleys Basin Arid County of Tibet[R]. 915 Hydrogeology and Engineering Geology Company, Sichuan Geological & Mineral Bureau.
- Zhang Meng, Lin Wenjing, Liu Zhao, Liu Zhiming, Hu Xiancai, Wang Guiling.2014. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Nature Sciences),

- (03): 382-382(in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dulpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha.2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087-1102(in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping, Jin Jian, Zhang Haizheng.1998. Chemical composition of the thermal water in the Yangbajing geothermal field, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geology*, 33(1): 61-72(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xun, Jin Xiaomei, Liang Sihai, Shen Ye, Zhang Hongmei.2017. Monograph on Groundwater Science (The second edition and the color version)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 65-72.
- ### 附中文参考文献
- 安可士, 张锡根, 何世春.1980. 羊八井地热田地球化学特征[J]. *水文地质工程地质*, (1): 14-18.
- 多吉. 2003. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. *中国工程科学*, 5(1): 42-47.
- 干成. 1980. 中国西藏的活动断层和构造[J]. *地质地球化学*, (3): 46-52.
- 贺日政, 高锐.2003. 西藏高原南北向裂谷研究意义[J]. *地球物理学进展*, (1): 35-43.
- 贺咏梅, 荀晓慧, 谢晔.2016. 西藏沃卡温泉水文地球化学特征及成因[J]. *地质灾害与环境*, 27(4): 66-70.
- 黄光寿, 郭丽丽, 黄凯.2020. 河南省沉积盆地五大构造单元地热地质特征[J]. *地质与资源*, 29(02):172-179.
- 李明礼, 多吉, 王祝, 郭国栋, 姜贞贞, 刘高令.2014. 西藏日多温泉水化学特征及其物质来源[J]. *中国岩溶*, 34(3): 209-216.
- 刘健, 史杰, 姚鑫, 李钦, 常志勇.2018. 帕米尔高原东北缘活动构造对塔什库勒干盆地地热控制作用[J]. *中国地质*, 45(4):681-692.
- 刘昭.2014. 西藏尼木—那曲地热带典型高温地热系统形成机理研究[D]. 石家庄: 中国地质科学院.
- 沈立成, 伍坤宇, 肖琼, 袁道先.2011. 西藏地热异常区CO₂脱气研究: 以朗久和塔格架地热区为例[J]. *科学通报*, 56(26): 2198-2208.
- 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 管焯, 金旭.1990. 青藏高原南北地壳幔热结构差异的大地热流证据[J]. *中国地质科学院院报*, (2):203-214.
- 宋美钰, 刘杰, 秦莉红, 于彦.2018. 天津地热流体水化学特征及同位素分析[J]. *地质调查与研究*, 41(02):138-144.
- 宋凯.2012. 西藏沃卡温泉形成条件及对隧道工程影响研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- 谭捍东, 姜枚, 吴良士, 魏文博.2006. 青藏高原电性结构及其对岩石圈研究的意义[J]. *中国地质*, 33(04): 906-911.
- 谭捍东, 魏文博, Martyn Unsworth, 邓明, 金胜, John Booker, Alan Jones.2004. 西藏高原南部雅鲁藏布江缝合带地区地壳电性结构研究[J]. *地球物理学报*, (4): 685-690.
- 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 张知非, 由懋正, 章铭陶等.2000. 西藏温泉志[M]. 北京:科学出版社, 200-202.
- 佟伟, 张知非, 章铭陶, 廖志杰, 由懋正, 朱梅湘, 国帼颖, 刘时彬.1978. 喜马拉雅地热带[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, (1): 76-89.
- 佟伟, 章铭陶, 张知非.1981. 西藏地热[M]. 北京:科学出版社, 88-94.
- 王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡.2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. *中国地质*, 44(6):1074-1085.
- 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 肖琼, 吴孝情.2016. 西藏地热异常区热储温度及其地质环境效应[J]. *中国地质*, 43(4): 1429-1438.
- 王思琪.2017. 西藏古堆高温地热系统水文地球化学过程与形成机理[D]. 北京:中国地质大学.
- 王尊波, 沈立成, 梁作兵, 江泽利, 廖显.2015. 西藏塔格架地热区天然水的水化学组成与稳定碳同位素特征[J]. *中国岩溶*, 34(3): 201-208.
- 魏斯禹, 腾吉文, 杨秉平, 胡忠义.1981. 西藏高原地热活动, 温泉分布与地球物理场特征[J]. *西北地震学报*, (4): 17-25.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 赵希涛, 叶培盛等.2008. 藏南错那—沃卡裂谷的第四纪正断层作用及其特征[J]. *地震地质*, 30(1): 144-161.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 赵希涛, 叶培盛.2007. 西藏桑日县沃卡地堑的第四纪正断层活动及其机制探讨[J]. *地质学报*, 81(10): 1328-1339.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰.2018. 特提斯喜马拉雅带地热水化学特征与物源机制[J]. *中国地质*, 45(6):1142-1154.
- 张丰述, 侯利锋, 钟东.2008. 西藏“一江两河”地区干旱县桑日县地下水资源勘查评价报告[R]. 眉山: 四川省地质矿产勘查开发局九一五水文地质工程地质队.
- 张萌, 蔺文静, 刘昭, 刘志明, 胡先才, 王贵玲.2014. 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)*, (3): 382-392.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎.2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087-1102.
- 赵平, 金建, 张海政.1998. 西藏羊八井地热田热水的化学组成[J]. *地质科学*, 33(1): 61-72.
- 周训, 金晓娟, 梁四海, 沈晔, 张红梅.2017. 地下水科学专论(第2版彩色版)[M]. 北京:地质出版社, 65-72.