

doi: 10.12029/gc20220527001

牛新生, 刘喜方, 吕苑苑, 伍倩. 2023. 西藏当雄错流域热泉成因机制及其对盐湖成矿物质(Li-Rb-Cs)的供给[J]. 中国地质, 50(4): 1163–1175.
Niu Xinsheng, Liu Xifang, Lü Yuanyuan, Wu Qian. 2023. Origin mechanism of thermal springs and their supply of minerals to the salt lake(Li-Rb-Cs) in the Tangqung Co watershed of Tibet[J]. Geology in China, 50(4): 1163–1175(in Chinese with English abstract).

西藏当雄错流域热泉成因机制及其对盐湖成矿物质 (Li-Rb-Cs)的供给

牛新生^{1,2}, 刘喜方^{1,2}, 吕苑苑^{1,2}, 伍倩^{1,2}

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 自然资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037)

摘要:【研究目的】西藏当雄错地区位于当惹雍错—许如错裂谷的北部, 区内的曲热白玛和扎日取生等地分布有多处热水活动, 由于泉水向当雄错盐湖供给了 Li 和 B 物质, 因此对其水化学特征和成因研究具有十分重要的科学意义。【研究方法】采集了 6 件泉水样品并进行化学组分和稳定同位素分析, 计算了泉水的主要化学系数和矿物饱和指数, 对泉水的化学组分进行了聚类分析。【研究结果】结果表明, 曲热白玛泉水富集元素 Li、B、Rb、Cs 等元素。泉水受大气降水和雪水补给, 具有浅循环特征。曲热白玛泉水具有较长的径流路径和更强烈的水岩相互作用, 泉水中的 HCO₃⁻主要来自碳酸盐岩和岩浆活动产生的 CO₂。SiO₂温标计算的热储温度相对可靠, 曲热白玛样品的热储温度为 123.33~128.22℃。【结论】当雄错地区的热水活动受控于南北向的当惹雍错—许如错裂谷, 受地壳深部的局部熔融层影响, 热水与硅酸盐矿物发生了水岩作用, 携带了 Li、Rb、Cs 等微量元素, 在混入地表冷水后, 还与二叠系、白垩系的碳酸盐岩发生了水岩作用, 沿区内的活动断裂上升至地表最终汇入当雄错湖水。这一现象表明, 西藏部分富 Li、Rb 盐湖的成矿物质来源可能与广泛的南北向裂谷活动有关, 这些裂谷不仅提供了盐湖聚集成矿的地理空间, 同时也提供了沟通深部物源和地表空间的通道。

关键词:热泉; 地热; 矿物质; Li-Rb-Cs; 地球化学; 当惹雍错—许如错裂谷; 当雄错; 矿产勘查工程; 西藏

创新点:当雄错的热泉活动是由受惹雍错—许如错裂谷控制的; 热泉是当惹雍错湖水中 Li 和 Rb 的重要来源; 同样, 西藏一些富含 Li 和 Rb 盐湖的起源可能与广泛的南北裂谷有关。

中图分类号: P314.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)04-1163-13

Origin mechanism of thermal springs and their supply of minerals to the salt lake(Li-Rb-Cs) in the Tangqung Co watershed of Tibet

NIU Xinsheng^{1,2}, LIU Xifang^{1,2}, LÜ Yuanyuan^{1,2}, WU Qian^{1,2}

(1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. MNR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environment, Beijing 100037, China)

收稿日期: 2022-05-27; 改回日期: 2022-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41402076、91962219)、中国地质调查局项目(DD20221913、DD20232096)和基本科研业务费(K1413、KK2210)联合资助。

作者简介: 牛新生, 男, 1980 年生, 博士, 正高级工程师, 盐类矿产地质专业; E-mail: xsh_niu@foxmail.com。

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

[Objective] The Tangqung Co area in Tibet is located in the north of Tangra Yum Co–Xuru Co rift. The presence of geothermal springs in locations like Qurebaima and Zhariqusheng has prompted the need for a comprehensive study of their hydrochemical characteristics and origin, particularly regarding their contribution of Li and Rb substances to the Tangqung Co salt lake. **[Methods]** This study involved the collection and analysis of six spring water samples to determine their chemical composition and stable isotopes. Various chemical coefficients and mineral saturation indices were calculated, and cluster analysis was performed on the chemical components of the springs. **[Results]** The findings reveal that Qurebaima spring waters exhibit enrichments in elements such as Li, B, Rb, and Cs. These springs are influenced by atmospheric rainfall and snowmelt, displaying shallow circulation characteristics. The springs' extended flow path and substantial water–rock interaction contribute to the predominance of HCO_3^- originating from carbonate rocks and CO_2 produced by magmatic activity. Moreover, the calculated thermal reservoir temperature based on SiO_2 geothermometers falls within the range of 123.33 to 128.22°C for Qurebaima samples. **[Conclusions]** Geothermal activity in the Tangqung Co area is governed by the N–S trending Tangra Yum Co–Xuru Co rift valley, wherein the geothermal water acquires Li, Rb, Cs, and other trace elements through interactions with silicate minerals. Additionally, the water–rock interaction extends to the Permian and Cretaceous carbonate rocks, ascending along active faults in the region, and ultimately mixing with water from the Tangqung Co lake. This phenomenon suggests that the formation of Li and Rb–rich salt lakes in Tibet may be associated with extensive N–S rift activities, which not only provide geographic space for the accumulation and mineralization of salt lakes but also act as conduits between deep sources and surface environments.

Key words: hot springs; geothermal; minerals; Li–Rb–Cs; geochemistry; Tangra Yum Co–Xuru Co rift; Tangqung Co; mineral exploration engineering; Tibet

Highlights: The thermal spring activity in the Tangqung Co area is governed by the Tangra Yum Co–Xuru Co rift valley. Thermal springs represent a significant source of Li and Rb in the lake water of Tangqung Co. The formation of certain Li– and Rb–rich salt lakes in Tibet is likely associated with extensive north–south rifts.

About the first author: NIU Xinsheng, male, born in 1980, Ph.D, professor level senior engineer, major in salt mineral exploration; E–mail: xsh_niu@foxmail.com.

Fund support: Supported by the projects of National Natural Science Fund of China (No.41402076, No.91962219), China Geological Survey (No.DD20221913, No.DD20232096) and the Fundamental Research Funds (No.K1413, No.KK2210).

1 引 言

热泉是地热资源的主要表现形式之一,其形成过程和物质来源是地质学家长期关注的焦点问题,关于热泉的研究具有十分重要的经济意义和地质意义。热泉是一种绿色、低碳的清洁能源,还具有一定的旅游价值(马冰等,2021);热泉一般被认为与新构造活动具有密切联系,常常沿活动断裂分布(Minissale,1991),其水温变化能较好地反映地震活动,是理想的临震前兆反应(童迎世等,2002);热泉常携带深部岩石的物质信息,是获取深部矿产信息的理想窗口(张景荣等,1994;王登红等,2007;郭清海和杨晨,2021),同时,也可能在地表形成铯硅华、金等矿床(郑绵平等,1995;李振清等,2006;赵元艺等,2010)。

中国的地热资源丰富。根据国际惯例,热储温

度低于90°C的水热系统称为低温地热系统,介于90~150°C的称为中温地热系统,热储温度超过150°C的水热系统称为高温地热系统(廖志杰等,1999)。中低温地热资源在全国范围内广泛存在,高温地热资源分布相对局限,主要分布在青藏高原及其周缘地区,如西藏、云南西部、四川西部等地区。

西藏是中国地热资源最为发育的省区之一,得到了广泛的研究和关注。沿喜马拉雅山北缘至念青唐古拉山、冈底斯山南缘分布有自西向东的喜马拉雅高温地热带,该带向北,水热活动明显减弱,趋向正常(佟伟等,1978,1982;王鹏等,2016)。西藏地区的水热活动主要分布于该区域,如羊八井、古堆、错地那、塔格架、朗久、查孜、沃卡、察雅等地先后报道有水热活动的分布,这些研究主要围绕水热系统的水化学特征、物质来源和成因机制展开(伍坤宇等,2011;贺咏梅等,2016;许鹏等,2018;罗

绍强等,2020;章旭等,2020;余浩文等,2021;郭清海等,2021;龙登红等,2021;张春潮等,2021)。

西藏的热水活动常与现代盐湖同生并存,其携带的矿物质直接汇集到盐湖中。西藏玛旁雍错和班戈湖周边热泉输入湖中B、Li、K数量,已经分别接近两湖赋存的相关元素资源量(郑绵平等,1989)。扎布耶附近分布大量含Li、B的热成因钙华,表明30 ka B.P.以来区内热水系统曾向盐湖补给大量的Li、B、K、Cs等物质(刘喜方等,2007;郑绵平和刘喜方,2010)。

西藏的水热活动明显受控于区域的近东西向大断裂和局部的一系列南北向断陷裂谷活动(赵平等,2002),如错那一沃卡裂谷带(章旭等,2020)、当雄—羊八井—多庆错活动断裂带(张萌等,2014)以及本文研究区所在的当惹雍错—许如错裂谷等(图1)。

当惹雍错—许如错地堑为一个南北向的新生代裂谷,该裂谷发育中新世晚期,~13 Ma和~6 Ma发生两期活动,并一直活动到全新世(Dewan et al.,2006;曹圣华等,2009),从南至北依次分布有许如错、当惹雍错和当雄错3个现代湖盆(图1a),在最南部的许如错附近分布有查孜热田(罗绍强等,2020),在地堑北部的当雄错湖盆附近,也有水热活动的分布,两者可能具有相同的形成机制和热源,但对于当雄错湖区水热活动的研究少有提及,研究程度较低,此外,当雄错是一个富Li、B的盐湖矿床(伍倩等,2013),区内曲热白玛泉水明显富集Li、B(锥洋冰和郑绵平,2016),泉水活动和当雄错Li、B的富集具有内在的联系,本文旨在探讨该区泉水的水文化学特征及其成因机制,并试图揭示泉水活动与当雄错Li、B物质富集的内在联系。

2 地质背景

研究区位于西藏自治区尼玛县文部乡当雄错盐湖周缘(图2),这里为高寒缺氧地区,平均海拔在4600 m以上,交通较为便利。

当雄错周缘地区出露的地层主要由二叠系、白垩系、古近系和第四系组成。二叠系自下而上分别为拉嘎组(P_{1l})、昂杰组(P_{1a})和下拉组(P_{1x}),为一套碳酸盐浅海陆棚相、浅海台地相沉积。白垩系在区内自下而上分别为多尼组(K_{1d})、郎山组(K_{1l})、竞柱山组(K_{1j}),多尼组为一套三角洲—滨浅,郎山组为一

套碳酸盐浅海台地相沉积,竞柱山组不整合于郎山组之上,为三角洲、滨、浅海相沉积。古近系主要为牛堡组(E_{2-3n}),主要为一套砂、砾、泥岩沉积,不整合于区内竞柱山组之上。

当雄错向南,当惹雍错—许如错裂谷中北部当惹雍错周围有白垩纪花岗岩侵入体分布。区内的水热活动主要分布在研究区南部的曲热白玛和西北部扎日取生附近(图2b)。曲热白玛沟南侧,分布有线性排列的活动热泉及其钙华沉积(图2c),钙华成分以方解石、文石为主,并含有少量硅质沉积物。靠近沟口,热泉活动规模逐渐越大,泉水流量也变大,泉水的温度从10℃升高到53℃。沟中钙华顶部古泉口经铀系法测年为(4.4±0.6)ka B.P.和(4.6±0.5)ka B.P.(郑绵平,2006^①),这意味着沟内水热活动最早在(4.6±0.5)ka B.P.以前已经开始。扎日取生热泉的温度40℃,活动规模相对较小,仅1处泉眼。

3 样品采集和分析

此次研究在曲热白玛沟采集热泉水样品5件,扎日取生泉水采样1件,另有当雄错湖水1件。热泉水的温度和pH值均在现场测定。实验室内,对所采样品全部进行了化学组分的测定分析,Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、B、Si的含量使用等离子光谱仪分析,Cs、Li、Rb的含量测定使用等离子质谱仪(PE300D),Cl⁻、CO₃²⁻、HCO₃⁻、SO₄²⁻采用离子色谱仪测定,所有测试在国家地质实验中心完成。对部分样品进行了氢氧稳定同位素的测定,测试仪器为MAT253,还测定了部分水样的碳同位素,测定工作在中国地质科学院矿产资源研究所完成。

4 热泉水水文化学特征

4.1 泉水化学组分

由热泉水的分析结果(表1)可以看出,当雄错盐湖周围的泉水化学组分各异,曲热白玛热泉水TDS较高,为(4.87~5.44)g/L,扎日取生热泉水TDS较低,仅为0.71g/L。曲热白玛泉水中主要阳离子按浓度大小依次是Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺,阴离子按浓度大小依次为HCO₃⁻、Cl⁻和SO₄²⁻,微量元素中,Li、B、Rb、Cs等元素具有相对较高的含量,Li含量(8.43~9.08)mg/L,B含量(38.3~42.3)mg/L,Rb含量(1.89~2.09)mg/L,Cs含量(1.43~1.66)mg/L。扎日取生泉

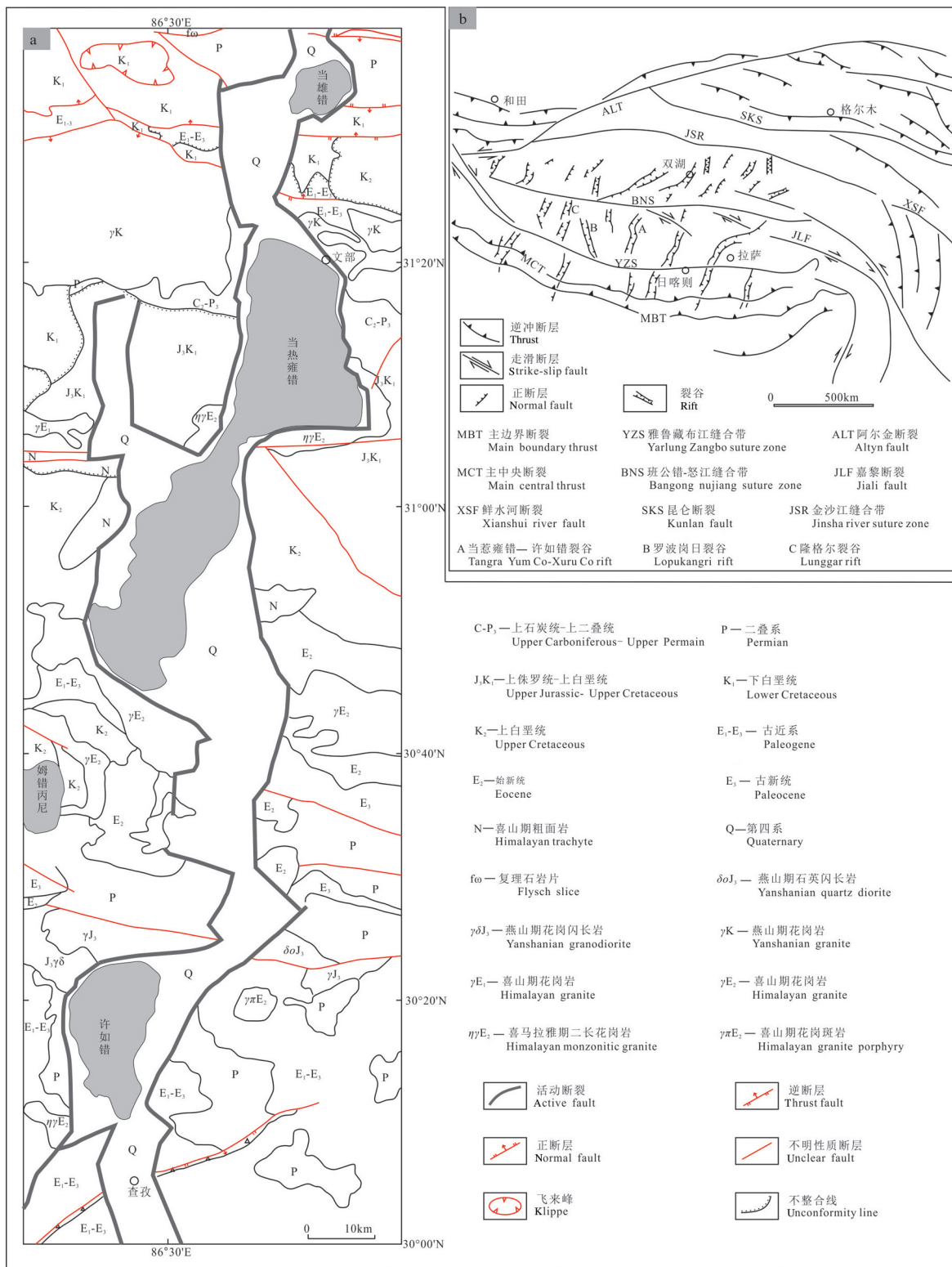


图1 当惹雍错—许如错裂谷构造地质图(a, 据谢国刚等, 2013, 2014修改)及青藏高原新生代裂谷分布图(b, 据李亚林等, 2005修改)

Fig.1 The tectonic map of Tangra Yum Co-Xuru Co rift (a, modified from Xie Guogang et al., 2013, 2014) and sketch map showing the distribution of rifts in Qinghai-Tibet Plateau (b, modified from Li Yalin et al., 2005)

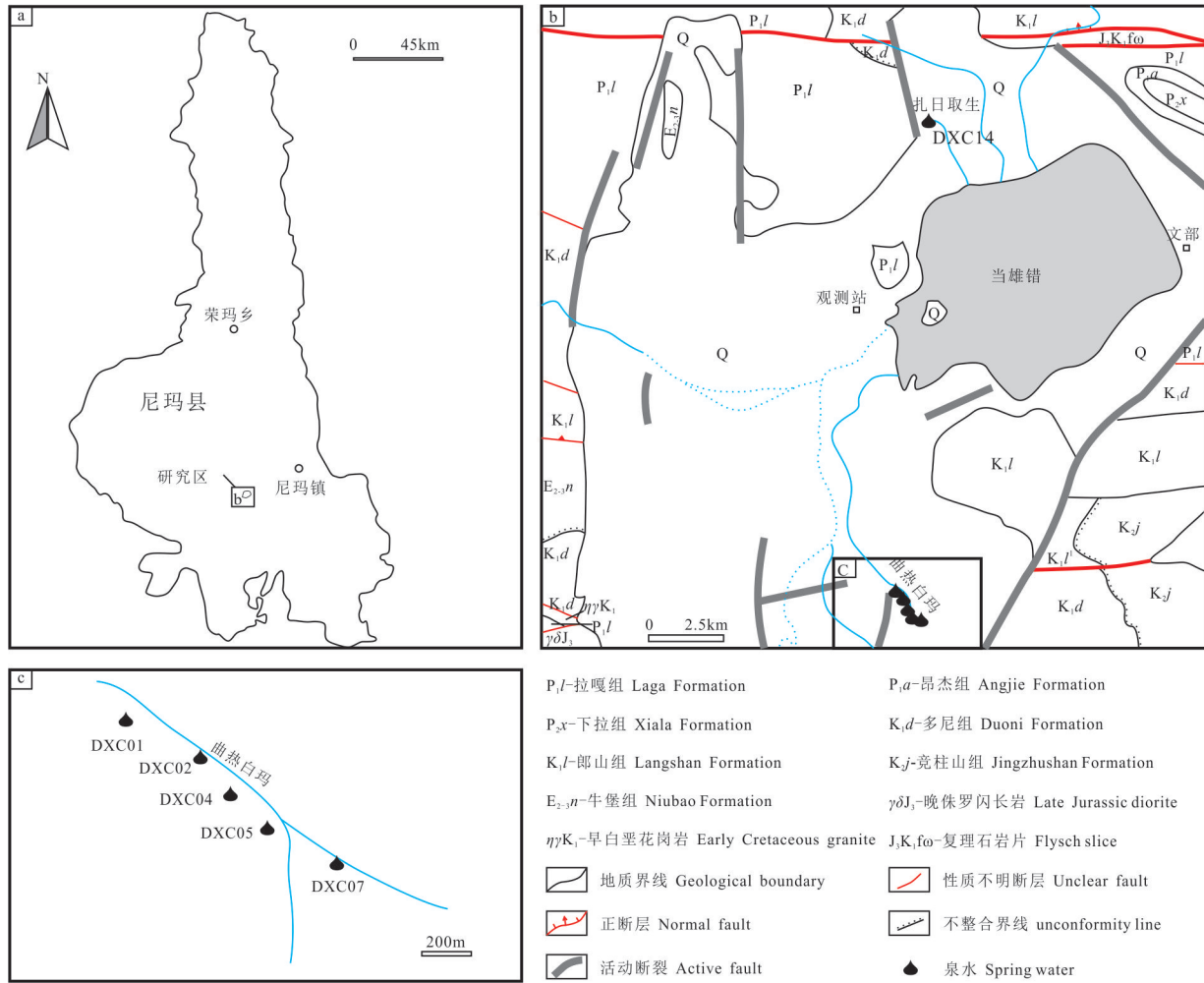


图2 研究区采样点和地质图
Fig.2 Geological sketch map of sampling site in the study area

水的主要阳离子按浓度大小依次为 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ ，阴离子则为 HCO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 Cl^- ，微量元素 Li、B、Rb、Cs 等也较低，分别为 0.75 mg/L、2.37 mg/L、0.14 mg/L 和 0.31 mg/L，pH 为 8。

通过上述分析，可知曲热白玛和扎日取生泉水化学特征各不相同，由水化学 Piper 图(图3)可知两者的水化学类型分别为 $\text{Na}-\text{Cl}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ 和 $\text{Na}-\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4$ 。

根据表1的分析结果计算，按照瓦里亚什科夫的水化学分类方法，当雄错湖水属于碳酸盐型，曲热白玛泉水也属于碳酸盐型，如果采用苏林的水化学分类方法，则当雄错湖水和曲热白玛泉水均属于重碳酸钠型水，泉水和湖水水化学类型的一致表明两者之间可能存在物源联系。

为进一步探讨两者之间的联系，使用溴氯系数

($\text{Br} \cdot 10^3/\text{Cl}$)进行判别。在原始水体的蒸发过程中，Br 和 Cl 的行为是趋于保守的，以海水为例，随着正常海水的蒸发浓缩，直到石盐出现以前，Br/Cl 比值基本不会发生变化，根据伍倩等(2013)对当雄错湖水的蒸发实验，该湖水需要蒸发一段时间后才出现石盐，因此认为现今湖水的溴氯系数仍然可以反映供给水体的物源信息。经计算当雄错湖水的溴氯系数为 2.88，曲热白玛泉水的溴氯系数为 2.55~3.12，平均值为 2.78(表2)，两者相近，暗示湖水和热泉水之间存在着亲缘关系。

研究区天然形成以当雄错湖盆为中心的流域系统，区内所有的泉水和大气降水形成的河流最终都注入到了当雄错湖水中，形成一个封闭的流域系统。除了此次研究的热泉外，区内还有当雄泉群和观测站泉水，但此二处泉水水温、溶解性总固体

表 1 泉水化学组分和水文参数(样品 DL-0 的部分离子含量引自伍倩等, 2013)

Table 1 Chemical constituents and hydrological parameters of spring water samples (Partial ion contents of sample DL-0 modified from Wu Qian et al., 2013)

采样点	曲热白玛	曲热白玛	曲热白玛	曲热白玛	曲热白玛	扎日取生	当雄错
样品号	DXC01	DXC02	DXC04	DXC05	DXC07	DXC14	DL-0
水温/(°C)	53	50	42	15	10	49	
pH	8.5	7.2				8	
Na ⁺ /(g/L)	1.567	1.587	1.58	1.602	1.427	0.095	54.13
K ⁺ /(g/L)	0.179	0.179	0.181	0.186	0.165	0.011	7.31
Ca ²⁺ /(mg/L)	13.7	12	12.3	5.79	12.1	55.8	3
Mg ²⁺ /(mg/L)	9.74	10.5	11.4	10.9	11.2	22.5	86
HCO ₃ ⁻ /(g/L)	1.571	1.573	1.349	1.352	1.194	0.341	0.38
Cl ⁻ /(g/L)	1.027	1.053	1.19	1.207	1.074	0.034	69.45
SO ₄ ²⁻ /(g/L)	0.939	0.931	0.936	0.941	0.887	0.12	5.52
B/(mg/L)	40.7	41.3	41.7	42.3	38.3	2.37	
Br/(mg/L)	3.017	3.287	3.142	3.074	2.834	0.04	200
Li/(mg/L)	8.431	9.08	8.748	8.999	8.447	0.745	300
Rb/(mg/L)	1.98	2.087	1.969	2.061	1.887	0.143	19
Cs/(mg/L)	1.635	1.66	1.561	1.613	1.43	0.313	
Si/(mg/L)	38.9	36.1	37.9	39	39.6	20	
TDS/(g/L)	5.41	5.45	5.36	5.42	4.87	0.71	149.99

(TDS)和Li、B等含量均较低,其他由雨水和雪山融水形成的河流中Li、B等含量也较低(雒洋冰等, 2016),考虑到区内曾发生的曲热白玛沟古钙华所代表的大规模热水活动及其所携带的Li、B等物质都注入到了当雄错湖盆中,且这样的活动最迟发生于(4.6±0.5)ka B.P.之前,因此推断,热泉水中的Li、

B等成矿物质是当雄错湖水中Li、B等元素的重要来源。

4.2 泉水组分成因判别

利用泉水主要组分的水化学系数可以有效判别泉水组分的成因。

γ_{Na}/γ_{Cl} (钠氯系数):钠氯系数是识别盐类组分海相和非海相来源的重要指标,钠氯系数小于1时,一般为海相来源,大于1时,为非海相物源(Vengosh et al., 2002),区内所有泉水的钠氯系数为2.05~4.35(表2),说明Na⁺不仅仅来源于岩盐的溶解,还可能来源于酸性岩浆岩中的硅酸盐矿物钠长石的风化溶解。

$\gamma_{HCO_3^-}/\gamma_{Cl^-}$:在天然水岩系统中,由于氯不形成矿物盐也不被吸附到矿物表面,即使是在高温环境下,水岩相互作用影响也极难影响氯的存在状态,因此氯常用于示踪地下热水及系统中与其有较好相关性的其他物质来源(Arnórsson and Andrésdóttir, 1995)。曲热白玛泉水中的Na⁺与Cl⁻的浓度显著高于扎日取生泉水,说明相对于地表水,地下热水的径流时间更长,循环更深,曲热白玛泉水的 $\gamma_{HCO_3^-}/\gamma_{Cl^-}$ 明显低于扎日取生泉水的 $\gamma_{HCO_3^-}/\gamma_{Cl^-}$ 值(表2),也表明前者具有较长的径流路径和更

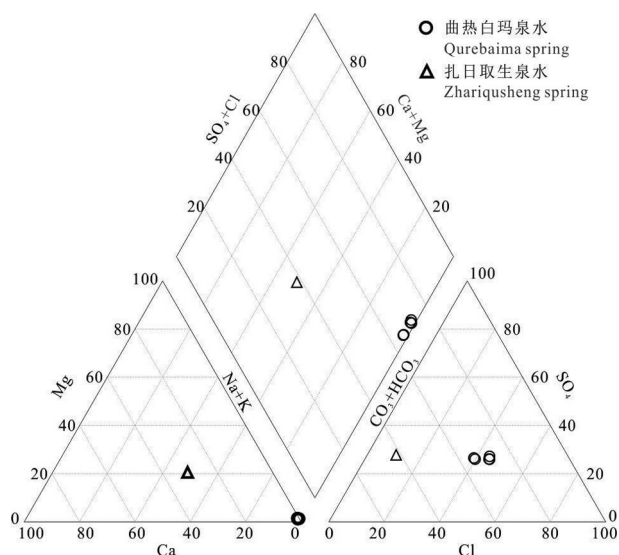


图 3 主要离子的 Piper 三线图
Fig. 3 Piper graph for classification of all the samples

表2 泉水的稳定同位素和化学指数

Table 2 Stable isotope and chemical index of water samples

样品号	$\delta D_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{V-SMOW}/\text{‰}$	$\delta^{13}C_{V-PDB}/\text{‰}$	Br·10 ³ /Cl	γ_{Na}/γ_{Cl}	$\gamma_{HCO_3^-}/\gamma_{Cl^-}$	$(\gamma_{Ca^{2+}}+\gamma_{Mg^{2+}})/\gamma_{HCO_3^-}$
DXC01	-134.00	-16.70	3.7	2.94	2.36	0.89	0.06
DXC02	-133.00	-17.70	-0.5	3.12	2.33	0.87	0.06
DXC04	-133.00	-16.50	1.3	2.64	2.05	0.66	0.07
DXC05	-133.00	-16.50	2.9	2.55	2.05	0.65	0.05
DXC07				2.64	2.05	0.65	0.08
DXC14	-145.00	-18.50		1.21	4.35	5.89	0.83
DL-0				2.88			

强烈的水岩相互作用,暗示曲热白玛泉水的成因不同于扎日取生泉水。

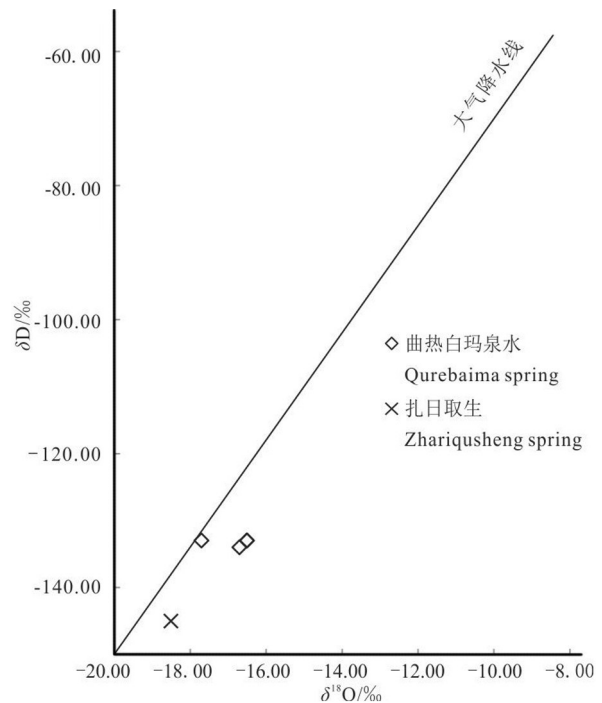
$(\gamma_{Ca^{2+}}+\gamma_{Mg^{2+}})/\gamma_{HCO_3^-}$: HCO_3^- 主要来源于含碳酸盐的沉积岩与变质岩以及铝硅酸盐矿物的风化溶解(张人权等,2011)。如果 HCO_3^- 只是来源于碳酸盐矿物,则 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/\gamma(HCO_3^-)$ 值应趋近于1(李鹤等,2015)。曲热白玛泉水的 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/\gamma(HCO_3^-)$ 值均低于0.1,这表明除了碳酸盐岩, HCO_3^- 还可能有其他来源,如铝硅酸盐矿物及变质岩以及来自于岩浆活动产生的 CO_2 。考虑到曲热白玛泉水中的总溶解无机碳的同位素比值($\delta^{13}C$)为 $-0.5\text{‰}\sim 3.7\text{‰}$ (表2),接近深源 CO_2 的理论分布区域(Frondini et al., 2009),该处泉水可能在地下循环过程中获得了深源 CO_2 。与曲热白玛形成明显对比的是,扎日取生泉水的 $[\gamma(Ca^{2+})+\gamma(Mg^{2+})]/\gamma(HCO_3^-)$ 分别为0.83,接近1(表2),表明该处泉水中 HCO_3^- 主要来源于地层中碳酸盐矿物的溶解。

4.3 泉水补给来源分析

泉水的氢氧同位素D和 ^{18}O 组成可以用来判断水源的补给情况,研究区泉水的氢氧同位素组成见表2。区内泉水 δD 为 $-145\text{‰}\sim -133\text{‰}$, $\delta^{18}O$ 为 $-18.5\text{‰}\sim -16.5\text{‰}$ 。分布于全球大气降水线和西南降水线(贺咏梅等,2016)附近(图4),不存在明显的氧同位素漂移,说明泉水接受大气降水补给,也可能有雪水的渗入补给。

4.4 矿物饱和指数

研究区泉水的矿物饱和指数计算结果见表3。曲热白玛所有样品的硅酸盐矿物(玉髓、石英)饱和指数与方解石、白云石饱和指数(DXC05除外)均大于0,说明此类矿物处于过饱和状态,曲热白玛泉口出露的钙华和硅华也证实了这一点。石英、玉髓的饱和指数随水温的降低而升高,这是由于 SiO_2 类矿

图4 泉水的 $\delta D-\delta^{18}O$ 关系图Fig.4 $\delta D-\delta^{18}O$ relations of spring waters in study region

物的溶解度与温度正相关,当温度升高时,硅酸盐矿物饱和指数随之降低。硬石膏、石膏的饱和指数均小于0,表明此两种矿物处于未饱和状态。样品DXC01泉水中,纤蛇纹石、滑石和海泡石3种热液蚀变典型矿物的饱和指数均大于0,DXC04、05、07泉水中滑石的饱和指数均小于0,推测这些矿物是由富镁类碳酸盐岩受热液蚀变而形成。DXC14的碳酸盐矿物(文石、方解石和白云石)、石英、纤蛇纹石和滑石的饱和指数均大于0,也可能是由于富镁类碳酸盐岩受热液蚀变而形成。

4.5 水化学组分聚类分析

为进一步分析区内泉水的成因,分别对样品进

表3 研究区泉水矿物饱和指数

Table 3 Mineral saturation index of spring water samples in study area

样品编号	文石	方解石	白云石	硬石膏	石膏	玉髓	石英	无定形态SiO ₂	滑石	纤蛇纹石	海泡石
DXC01	1.11	1.36	3.32	-1.91	-1.88	0.01	0.36	-0.8	7.74	3.42	1.13
DXC02	-0.22	0.03	0.68	-2	-1.94	0.07	0.42	-0.75	-0.21	-4.34	-3.85
DXC04	-0.03	0.2	1.02	-2.04	-1.93	0.13	0.51	-0.7	1.32	-2.89	-2.61
DXC05	-0.38	-0.21	0.3	-2.67	-2.26	0.42	0.87	-0.48	0.47	-4.02	-1.99
DXC07	-0.09	0.07	0.45	-2.48	-1.94	0.56	1.03	-0.38	0.46	-4.14	-1.47
DXC14	0.9	1.15	2.57	-1.69	-1.61	-0.2	0.16	-1.02	5.32	1.73	-0.22

行了Q型聚类分析(对样品进行分类)和R型聚类分析(对化学组分)。影响聚类分析结果的因素主要有三个:数据标准化、相似统计量(即距离)的选择、聚类方法的选取。

Q型聚类分析:泉水化学组分的浓度量纲一致,故不必进行数据标准化,距离采取欧式距离,聚类方法选取常用的组间连接。分析结果显示,区内泉水可以分为两类,曲热白玛泉水TDS相对较高的泉水为一类,扎日取生泉水自成一类(图5a),这也表明,两处泉水具有不同的成因。

R型聚类分析:该分析主要是对泉水的各化学组分参数进行分析,由于扎日取生仅有一个样品,故分析范围仅限曲热白玛的泉水样品,分析过程中,没有进行标准化处理,距离采用Pearson相关性方法,聚类方法选取组间连接。分析结果表明,K、B、Na、SO₄具有相对较近的关系,而Li、Rb、Cs等关系较近,与其他元素组分则相距较远(图5b)。这表明,Li、Rb、Cs等微量元素具有相似的成因过程或一致的物质来源。

5 热储温度估算和成因模式

5.1 基于地热温标的热储估算

热储温度通常采用地热温标法,常用的有地热SiO₂温标、阳离子温标、同位素地热温标和气体温标。这些温标的应用范围和适应条件各有不同,本文主要采用SiO₂温标和阳离子温标进行计算,计算结果见表4。

SiO₂温标分为无蒸汽损失温标和最大蒸汽损失温标,该温度代表的是地下含水层中热水的温度(王鹏等,2016)。研究区平均海拔约为4600 m,取样温度达到80℃时约为沸点温度,由于区内样品的温度均低于80℃,因此采用无蒸汽损失温标。曲热白玛样品的热储温度为123.33~128.22℃,扎日取生温泉的热储温度为94.75℃。

Na-K温标适用于水岩反应达到完全平衡状态或水循环时间短的水热系统,适用的最高温度为200℃左右。经计算曲热白玛样品的热储温度为

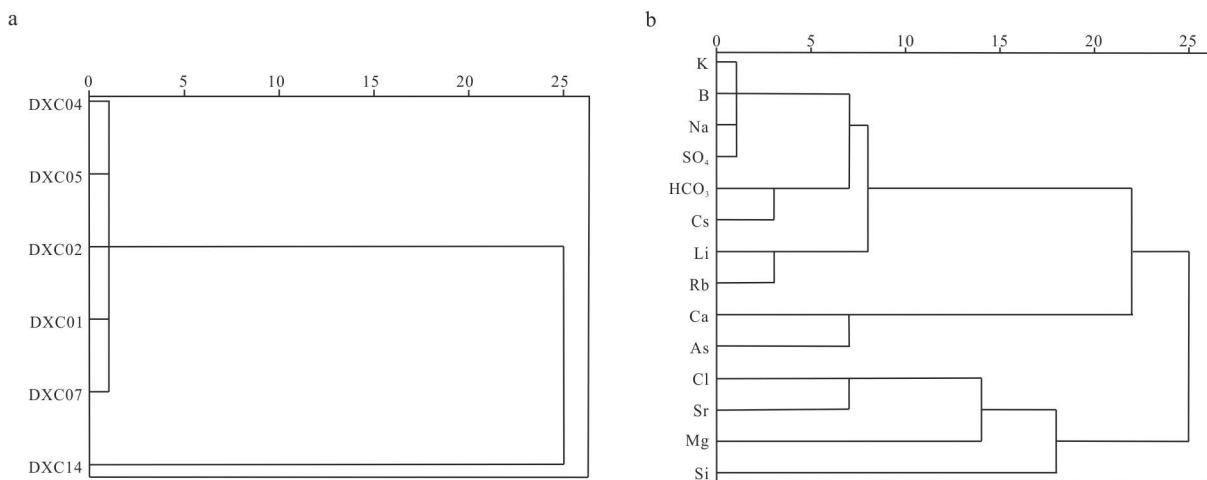


图5 研究区泉水聚类分析图(a-Q型聚类分析;b-R型聚类分析)

Fig.5 Cluster analysis diagram of spring waters (a-Q cluster analysis; b-R cluster analysis)

表4 研究区泉水热储温度计算结果
Table 4 Reservoir temperatures of spring waters in the study area

样品编号	T_{SiO_2}	T_{Na-K}	T_{K-Mg}	$T_{Na-K-Ca}$
DXC01	127.27	243.15	147.54	346.81
DXC02	123.34	242.10	146.23	356.34
DXC04	125.89	243.39	145.19	355.63
DXC05	127.41	244.51	146.91	416.73
DXC07	128.22	244.17	142.33	343.80
DXC14	94.76	247.29	59.97	79.91

注: $T_{SiO_2}=1309/(5.19-\lg S)-273.15$, $T_{Na-K}=1390/(1.75+\lg(Na/K))-273.15$, $T_{K-Mg}=4410/(14.0-\lg(K^2/Mg))$, $T_{Na-K-Ca}=1647/(\lg(Na/K)+\beta\lg(Ca^{1/2}/Na)+2.24)$, β 为校正系数,若 $t>100^\circ\text{C}$ 或者 $\lg(Ca^{1/2}/Na)<0$, β 取1/3,若 $t<100^\circ\text{C}$ 或者 $\lg(Ca^{1/2}/Na)>0$, β 取4/3,公式据 Fournier and Truesdell,1973; Fournier and Potter, 1982; Giggerbach, 1988; Can, 2002。

242.10~244.51 $^\circ\text{C}$,扎日取生的热储温度为247.29 $^\circ\text{C}$,曲热白玛泉水的结果需要进一步验证,而扎日取生的结果明显不合理。

K-Mg温标适用水岩反应达到完全平衡状态的低温系统,计算结果表明曲热白玛样品的热储温度为142.33~147.54 $^\circ\text{C}$,扎日取生的热储温度为59.97 $^\circ\text{C}$,曲热白玛样品的结果明显属于中温系统,显然不合理。

K-Mg-Ca温标适用于低 Ca^{2+} 溶液,且含钙矿物未发生沉淀作用,而区内泉水周围均出现方解石和文石沉积,因此,该温标也不适用于此研究。

此外,王鹏等(2016)在对西藏地区热储的研究过程中,总结了上述四类公式的可靠程度,认为如果 $T_{Na/K}>T_{SiO_2}>T_{Na-K-Ca}$,则 T_{SiO_2} 为最可能的热储温度。如果 $T_{Na-K-Ca}>T_{Na/K}$,则 T_{SiO_2} 为最可能的热储温度,如果 $T_{Na/K}>T_{Na-K-Ca}>T_{SiO_2}>T_{K/Mg}$,则 T_{SiO_2} 为最可能的热储温度,经比较,该经验适用于本研究, SiO_2 温标相对可靠。

为进一步分析评估热储的计算结果和水岩作用平衡情况,绘制了研究区样品Na-K-Mg平衡图(图6)。曲热白玛样品点处于部分平衡区域,靠近未成熟区域边界线,扎日取生样品处于Na-K-Mg平衡图未成熟区域,表明区内样品的水岩作用仍在进行,离子浓度尚未饱和,溶解作用仍在进行,在此情况下,阳离子温标不适宜计算热储,地下热水在上升过程中很可能与浅表冷水发生了混合作用。

5.2 循环深度估算

区内水热系统的形成明显受控于区域内活动

的南北向大断裂,该断裂也是许如错—当惹雍错裂谷的边界断裂,大气降水渗入热储层后受地热增温经断裂带上升至地表形成泉水,假设地下热量随深度的增加遵循正常的地热增温,可以根据地温梯度来估算地下热水的循环深度:

$$Z=G(t_z-t_0)+Z_0$$

G为增温梯度($m/^\circ\text{C}$),西藏地区的地热梯度一般为每100 m深度增加2.5~3.0 $^\circ\text{C}$,地温梯度平均取36.5 $m/^\circ\text{C}$; t_z 为地下热储温度($^\circ\text{C}$),取 SO_2 温标计算值,曲热白玛热储取平均值为126 $^\circ\text{C}$,扎日取生热储取95 $^\circ\text{C}$, t_0 为研究区平均气温,取-4 $^\circ\text{C}$, Z_0 为常温带深度,一般取20 m。

计算可得曲热白玛泉水循环深度为4765 m,扎日取生泉水的循环深度为3633.5 m。

5.3 热泉成因及其与盐湖的关系

Li、Rb和Cs是典型的岩浆期后元素,在岩浆演化过程中,这些元素倾向于在岩浆分异的晚期富集(赵振华,1997;韩吟文等,2003),曲热白玛泉水明显富集Li、Rb、Cs等微量元素,该特征暗示热水系统与岩浆活动具有密切联系,此外,该处泉水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也显示泉水在地下循环时可能获得了深部来源的 CO_2 ,进一步表明泉水的形成与深部的岩浆活动有关,这又涉及到区内水热活动的驱动热机。地球物理研究证明青藏高原地壳中普遍存在1~2个部分熔融层(Brown et al., 1996; Nelson et al., 1996; 魏文博等,1997;叶高峰等,2007),地壳中部存在一定规模的地壳重融型岩浆区和一些由后期构造侵位造成的滴状岩浆囊,区域表现为大范围的热背景(魏文博等,1997),学者倾向于将地壳中的局部熔融层作为藏南地热带的驱动热机(王鹏等,2016;邱楠生等,2022)。

受印度板块和欧亚板块碰撞挤压,形成了青藏高原东西向的大规模压性或压扭性主干断裂带,在此挤压背景下,高原南部发育了南北向的裂谷系(贺日政和高锐,2003;张进江和丁林,2003;王鹏等,2016),多有伴生水热活动,当惹雍错—许如错裂谷即是其一。研究区东西两侧分布有两条S-N向的活动深大断裂(图1,图2),当雄错盐湖区下陷成为湖盆区,接受周围水体的汇集沉淀,同时,受地壳深部的局部熔融层影响,在大约4765 m深处,形成了曲热白玛的热储系统,热水与硅酸盐矿物发生

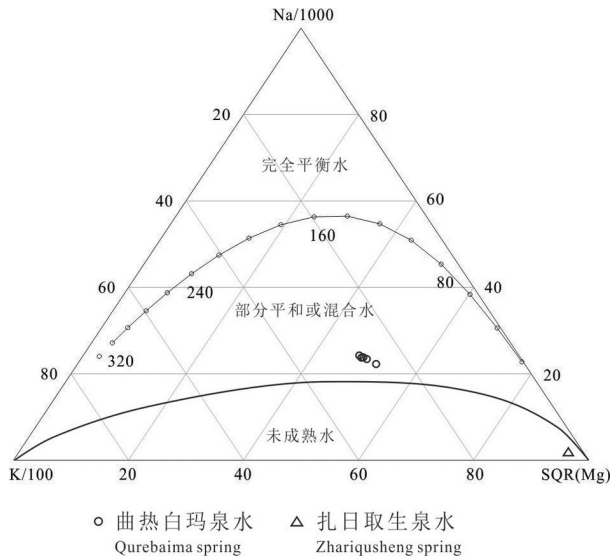


图6 研究区泉水Na-K-Mg三角图

Fig.6 Na-K-Mg giggenbach plot with spring water samples in study area

了水岩作用,携带了来自深部的Li、Rb、Cs等微量元素,在混入地表冷水后,还与二叠系(拉嘎组、昂杰组和下拉组)、白垩系(多尼组、郎山组、竞柱山组)碳酸盐岩发生水岩作用,最后沿区内的活动断裂上升至地表,形成泉水露头。扎日取生泉水的热源相对较浅,主要受热水和碳酸盐岩的水岩作用影响,受硅酸盐矿物影响较小。曲热白玛泉水的热水活动携带了大量Li、Rb、Cs等轻金属物质,最后汇入现代盐湖中,这是本区当雄错盐湖Li、Rb、Cs等物质的重要来源。

在青藏高原,多个富Li、Rb、Cs盐湖周围曾伴有强烈的水热活动,如扎布耶、麻米错等,来自深部的热流体常携带有Li、Rb、Cs等物质(李明礼等, 2015),这些水热活动同样受控于南北向地堑断裂活动,如麻米错位于隆格尔裂谷,扎布耶盐湖位于罗波岗日(Lopukangri)裂谷等(图1)(贺日政和高锐, 2003; 张进江和丁林, 2003; 张佳伟等, 2020; Jonell et al., 2020; 卞爽等, 2021),这些盐湖中富集的Li、Rb、Cs等轻金属元素的来源可能都与南北向的裂谷活动有关。

6 结 论

(1)西藏当雄错地区发育一系列的弱碱性热水活动,曲热白玛泉水TDS相对较高,扎日取生泉水

TDS较低,其中曲热白玛泉水富集微量元素Li、B、Rb、Cs等,泉水的氢氧同位素特征表明,泉水受大气降水补给,热泉水是当雄错盐湖中Li、B等物质的重要来源。

(2)泉水的主要化学指数特征和聚类分析结果表明,当雄错地区发育曲热白玛和扎日取生两个不同水热系统,两者具有不同的成因和演化过程。曲热白玛泉水经历了较长的径流路径和更强烈的水岩相互作用,泉水中的 HCO_3^- 除了可能来自碳酸盐岩,还来源于岩浆活动产生的 CO_2 ,扎日取生泉水的 HCO_3^- 主要来源于地层中碳酸盐矿物的溶解。

(3)Na-K-Mg三角图解分析表明,区内水样为部分成熟水和未成熟水, SiO_2 温标计算的热储温度相对可靠,曲热白玛样品的热储温度为123.33~128.22℃,扎日取生温泉的热储温度为94.75℃。

(4)当雄错地区的热水活动受控于南北向的当惹雍错—许如错地堑,受地壳深部的局部熔融层影响,在大约4765m深的地方,形成了曲热白玛的热储系统,热水与硅酸盐矿物发生了水岩作用,携带了来自深部Li、Rb、Cs等微量元素,扎日取生泉水的热源相对较浅,主要受热水和碳酸盐岩的水岩作用影响,受硅酸盐矿物影响较小。

(5)西藏部分富Li、Rb、Cs盐湖的成矿物质来源可能与南北向裂谷活动有关,这些裂谷不仅提供了盐湖聚集成矿的地理空间,同时也提供了沟通深部物源和地表空间的通道,裂谷活动形成的热泉水携带来自深部的Li、Rb、Cs等物质最终汇入裂谷内的湖盆中。

注释

①郑绵平. 2006. 西藏自治区尼玛县当雄错表面卤水锂矿勘查报告[R].

References

- Arnórsson S, Andrésdóttir A. 1995. Processes controlling the distribution of boron and chlorine in natural waters in Iceland[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20): 4125–4146.
- Bian Shuang, Yu Zhiqian, Gong Junfeng, Yang Rong, Cheng Xiaogan, Lin Xiubin, Chen Hanlin. 2021. Spatiotemporal distribution and geodynamic mechanism of the nearly NS-trending rifts in the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(2): 178–194(in Chinese with English abstract).
- Brown L D, Zhao W J, Nelson K D, Hauck M, Alsdorf D, Ross A,

- Cogan M, Clark M, Liu Xianwen, CheJinke, 1996. Bright spots, structure, and magmatism in southern Tibet from INDEPTH serimic reflection profiling[J]. *Science*, 274: 1688–1690.
- Can. 2002. A new improved Na/K geothermometer by artificial neural networks[J]. *Geothermics*, 31: 751–760.
- Cao Shenghua, Li Dewei, Yu Zhongzhen, Xu Zufeng, Tang Fenglin. 2009. Characteristics and mechanism of the Dangra Yun Co and Xuru Co NS-trending graben in the Gangdese, Tibet[J]. *Earth Science*, 34(6): 914–920 (in Chinese with English abstract).
- Dewane T J, Stockli D F, Hager C, Taylor M, Wallis S R. 2006. Timing of Cenozoic E–W extension in the Tangra Yum Co–Kung Co rift, south-central Tibet[C]//American Geophysical Union Fall Meeting. San Francisco: AGU.
- Fournier R O, Potter R W. 1982. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer[J]. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 11: 3–12.
- Fournier R O, Truesdell A H. 1973. An empirical Na–K–Ca geothermometer for natural waters[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37: 1255–1275.
- Frondini F, Carliro S, Cardellini C, Chiodini G, Morgantini N. 2009. Carbon dioxide degassing and thermal energy release in the Monte Amiata volcanic–geothermal area (Italy) [J]. *Applied Geochemistry*, 24: 860–875.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geothermometers[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 2749–2765.
- Guo Qinghai, Yang Chen. 2021. Tungsten anomaly of the high-temperature hot springs in the Daggyai hydrothermal area, Tibet, China[J]. *Earth Science*, 46(7): 2544–2554 (in Chinese with English abstract).
- Han Yinwen, Ma Zhendong. 2003. *Geochemistry*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 268–301 (in Chinese).
- He Rizheng, Gao Rui. 2003. Some significances of studying north-southern rift in Tibet plateau[J]. *Progress in Geophysics*, 18(1): 35–43 (in Chinese with English abstract).
- He Yongmei, Xun Xiaohui, Xie Ye. 2016. Formed causes and Hydro-geochemistry characteristics hot springs in Tibet Voca[J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 27(4): 66–70 (in Chinese with English abstract).
- Jonell T N, Aitchison Jonathan C, Li Guoqiang, Shulmeister James, Zhou Renjie, Zhang Haixia. 2020. Revisiting growth and decline of late Quaternary mega-lakes across the south-central Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 248: 1–23.
- Li He, Li Jun, Liu Xiaolong, Yang Xi, Zhang Wei, Wang Jie, Niu Yingquan. 2015. Composition characteristics and source analysis of major ions in four small lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China[J]. *Environmental Science*, 36(2): 430–437 (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 spring in Tibet[J]. *Carsologica Sinica*, 34(3): 209–216 (in Chinese with English abstract).
- Li Yalin, Wang Chengshan, Yi Haisheng, Li Yong, Wang Mou. 2005. A discussion on several problems regarding to the Cenozoic grabens in the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geological Review*, 52(5): 493–501.
- Li Zhenqing, Hou Zengqian, Nie Fengjun, Yang Zhusen, Qu Xiaoming, Meng Xiangjin, Zhao Yuanyi. 2006. Enrichment of element cesium during modern geothermal action in Tibet, China[J]. *Acta Geological Sinica*, 80(9): 1457–1464 (in Chinese with English abstract).
- Liao Zhijie, Zhao Ping. 1999. *Yunnan–Tibet geothermal geothermal resources and case histories*[J]. Beijing: Science Press, 153 (in Chinese).
- Liu Xifang, Zheng Mianping, Qi Wen. 2007. Sources of ore-forming materials of the superlarge B and Li deposit in Zabuye salt lake, Tibet, China[J]. *Acta Geological Sinica*, 81(12): 1709–1715 (in Chinese with English abstract).
- Long Denghong, Zhou Xiaolong, Yang Kunguang, Gu Pingyang, Gao Yinghu, Wang Shuming, Chen Guifan. 2021. Research on relationship between the deep structure and geothermal resource distribution in the Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 48(3): 721–731 (in Chinese with English abstract).
- Luo Shaoqiang, Xu Lin, Tang Hua, Xiao Jin, Hu Lin. 2020. Hydrochemical and isotopic characteristics of Chazi geothermal field in Shigatse in Tibet[J]. *Geological Survey of China*, 7(5): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yangbing, Zheng Mianping. 2016. Origin of Boron in the Dangxiong Co salt lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1900–1907 (in Chinese with English abstract).
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. *Geology in China*, 48(6): 1734–1747 (in Chinese with English abstract).
- Minissale A. 1991. Thermal springs in Italy: Their relation to recent tectonics[J]. *Applied Geochemistry*, 6: 201–212.
- Nelson K D, Zhao W J, Brown L D, Che J K, Liu X W, Klemperer S L, Makovsky Y, Meissner R, Mechie J, Kind R, Wenzel F, Ni J, Nabelek J, Leshou C, Tan H D, Wei W B, Jones A G, Booker J, Unsworth M, Kidd W S F, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, Cogan M, Wu C D, Sandvol E, Edwards M. 1996. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: Syn-thesis of project INDEPTH results[J]. *Science*, 274: 1684–1688.
- Qiu Nansheng, Tang Boning, Zhu Chuanqing. 2022. Deep thermal background of hot spring distribution in the Chinese continent[J]. *Acta Geological Sinica*, 96(1): 195–207 (in Chinese with English abstract).
- Tong Wei, Zhang Zhifei, Liao Zhijie, Zhu Meixiang. 1982. Hydrothermal activities occurring in Xizang (Tibetan) plateau and preliminary discussion about the thermal regime within its upper crust[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 25(1): 34–40 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Tong Wei, Zhang Zhifei, Zhang Mingtao, Liao Zhijie, You Maozheng, Zhu Meixiang, Guo Guoying, Liu Shibin. 1978. Himalayan geothermal belt[J]. Peking University Journal (Nature Sciences), 1: 76–89 (in Chinese with English abstract).
- Tong Yingshi, Mao Jixiang, Tong Min. 2002. The forming condition of underground heatflow and its relation to earthquake[J]. South China Journal of Seismology, 22(2): 53–58 (in Chinese with English abstract).
- Vengosh A, Helvacı C, Karamandereci I H. 2002. Geochemical constraints for the origin of thermal waters from western Turkey[J]. Applied Geochemistry, 17: 163–183.
- Wang Denghong, Du Xiaofang, Ying Hanlong. 2007. Geochemistry and significance of modern hot-spring sinters in western Sichuan[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 37(5): 878–883(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).
- Wei Wenbo, Chen Leshou, Tang Handong, Deng Ming, Hu Jiande, Jinsheng. 1997. Features of thermal structure and highly conductive bodies in middle crust beneath central and southern Tibet: According to INDEPTH–MT results[J]. Geoscience, 11(3): 387–392 (in Chinese with English abstract).
- Wu Kunyu, Shen Licheng, Wang Xianggui, Xiao Qiong, Wang Peng. 2011. Study on hydro chemical features of hot springs in Langjiu geothermal field, Tibet, China[J]. Carsologica Sinica, 30(1): 1–8(in Chinese with English abstract).
- Wu Qian, Zheng Mianping, Nie Zhen, Bu Lingzhong. 2013. Scale-up study on potassium extraction from Dangxiongcuo salt lake brine by evaporating ponds[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 29(1): 36–44 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guogang, Zou Aijian, Yuan Jianya. 2013. Geological Survey Report of Bangduo Sheet at Scale 1: 250000 [M]. Beijing: Geological Publishing House, 183–185 (in Chinese).
- Xie Guogang, Zou Aijian, Yuan Jianya. 2014. Geological Survey Report of Cuomai Sheet at Scale 1: 250000[M]. Beijing: Geological publishing house, 183–185 (in Chinese).
- 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).
- Ye Gaofeng, Jin Sheng, Wei Wenbo, Martyn Unsworth. 2007. Research of conductive structure of crust and upper mantle beneath the south-central Tibetan plateau[J]. Earth Science, 32(4): 491–498 (in Chinese with English abstract).
- Yu Haowen, Liu Zhao, Rong Feng, Chen Kang, Nan Dawa, Liu Shijuan, Liu Shaoyun. 2021. Characteristics and source mechanism of geothermal field in Cuona, Tibet[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40(3): 34–44(in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunchao, Li Xiangquan, Ma Jianfei, Fu Changchang, Bai Zhanxue. 2021. Formation model of geothermal water in Chaya of Tibet: Perspective from hydrochemistry and stable isotopes[J]. Geoscience, 35(1), 199–208 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiawei, Li Hanao, Zhang Huiping, Xu Xinyue. 2020. Research progress in Cenozoic N–S striking rifts in Tibetan plateau[J]. Advances in Earth Science, 35(8): 848–862 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jingrong, Lu Jianjun, Wang Wei. 1994. The Shimen hot spring-type As–(Au) deposit, Hunan Province[J]. Geological Review, 40(5): 429–435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinjiang, Ding Lin. 2003. East–west extension in Tibetan plateau and its significance to tectonic evolution[J]. Chinese Journal of Geology, 38(2): 179–189(in Chinese with English abstract).
- 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 (Science & Technology Edition), 41(3): 382–392(in Chinese with English abstract).
- Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, Wan Li, Yu Qingchun. 2011. Fundamentals of Hydrogeology (6th edition) [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 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).
- Zhao Ping, Xie Ejun, Duo Ji, Jin Jian, Hu Xiancai, Du Shaoping, Yao Zhonghua. 2002. Geochemical characteristics of geothermal gases and their geological implications in Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 18(4): 539–550(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuanyi, Zhao Xitao, Ma Zhibang, Deng Jian. 2010. Chronology of the Gulu hot spring cesium deposit in Nagqu, Tibet and its geological significance[J]. Acta Geological Sinica, 84(2): 211–220 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 1997. Principles of Trace Elements Geochemistry[M]. Beijing: Science Press(in Chinese)
- Zheng Mianping, Xiang Jun, Wei Xinjun, Zheng Yuan. 1989. Saline Lakes on the Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau[M]. Beijing: Beijing Scientific and Technical Publishing House, 97–100(in Chinese).
- Zheng Mianping, Liu Xifang. 2010. Hydrochemistry and minerals assemblages of salt lakes in the Qinghai–Tibet plateau, China[J]. Acta Geological Sinica, 84(11): 1585–1600 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Mianping, Wang Qiuxia, Duo Ji, Liu Jie, Pingcuowangjie,

Zhang Suchun. 1995. New Types of Hydrothermal Mineralization: Cesium Sinter Deposit in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-26 (in Chinese with abstract).

附中文参考文献

- 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 杨蓉, 程晓敢, 林秀斌, 陈汉林. 2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. 地质力学学报, 27(2): 178-194.
- 曹圣华, 李德威, 余忠珍, 徐祖丰, 唐峰林. 2009. 西藏冈底斯当惹雍错-许如错南北向地堑的特征及成因[J]. 地球科学, 34(6): 914-920.
- 郭清海, 杨晨. 2021. 西藏搭格架高温热泉中钨的水文地球化学异常[J]. 地球科学, 46(7): 2544-2554.
- 韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 268-301.
- 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, 18(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.
- 李鹤, 李军, 刘小龙, 杨曦, 张伟, 王洁, 牛颖权. 2015. 青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析[J]. 环境科学, 36(2): 430-437.
- 李明礼, 多吉, 王祝, 郭国栋, 姜贞贞, 刘高令. 2015. 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.
- 李亚林, 王成善, 伊海生, 李勇, 王谋. 2005. 青藏高原新生代地堑构造研究中的几个问题的讨论[J]. 地质论评, 50(5): 493-501.
- 李振清, 侯增谦, 聂凤军, 杨竹森, 曲晓明, 孟祥金, 赵元艺. 2006. 西藏地热活动中铯的富集过程探讨[J]. 地质学报, 80(9): 1457-1464.
- 廖志杰, 赵平. 1999. 滇藏地热带——地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社.
- 刘喜方, 郑绵平, 齐文. 2007. 西藏扎布耶盐湖超大型B、Li矿床成矿物质来源[J]. 地质学报, 81(12): 1709-1715.
- 龙登红, 周小龙, 杨坤光, 辜平阳, 高银虎, 王树明, 陈桂凡. 2021. 青藏高原东北缘深部地质构造与地热资源分布关系研究[J]. 中国地质, 48(3): 721-731.
- 罗绍强, 徐琳, 唐华, 肖进, 胡林. 2020. 西藏日喀则市查孜地热田水化学及同位素特征研究[J]. 中国地质调查, 7(5): 10-15.
- 雒洋冰, 郑绵平. 2016. 西藏当雄错盐湖卤水中硼的来源研究[J]. 地质学报, 90(8): 1900-1907.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. 中国地质, 48(6): 1734-1747.
- 邱楠生, 唐博宁, 朱传庆. 2022. 中国大陆地区温泉分布的深部热背景[J]. 地质学报, 96(1): 195-207.
- 佟伟, 张知非, 章铭陶, 廖志杰, 由懋正, 朱梅湘, 过帼颖, 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, 张知非, 廖志杰, 朱梅湘. 1982. 青藏高原的水热活动和上地壳热状态初探[J]. 地球物理学报, 25(1): 34-40.
- 童迎世, 毛际香, 童敏. 2002. 地下热泉的形成条件与地震[J]. 华南地震, 22(2): 53-58.

- 王登红, 付小方, 应汉龙. 2007. 四川西部现代热泉沉积物地球化学特征及意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 37(5): 878-883.
- 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.
- 魏文博, 陈乐寿, 谭捍东, 邓明, 胡建德, 金胜. 1997. 西藏中、南部壳内高导体与热结构特点——INDEPTH-MT提供的证据[J]. 现代地质, 11(3): 387-392.
- 伍坤宇, 沈立成, 王香桂, 肖琼, 王鹏. 2011. 西藏朗久地热田及其温泉水化学特征研究[J]. 中国岩溶, 30(1): 1-8.
- 伍倩, 郑绵平, 卞贞, 卜令忠. 2013. 当雄错盐湖卤水提钾盐田日晒工艺扩大试验研究[J]. 无机化学学报, 29(1): 36-44.
- 谢国刚, 邹爱建, 袁建芽. 2013. 区域地质调查报告: 1:25万邦多区幅[M]. 北京: 地质出版社, 183-185.
- 谢国刚, 邹爱建, 袁建芽. 2014. 区域地质调查报告: 1:25万措麦区幅[M]. 北京: 地质出版社, 189-195.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 张文杰. 2018. 提特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.
- 叶高峰, 金胜, 魏文博, Martyn Unsworth. 2007. 西藏高原中南部地壳与上地幔导电性结构[J]. 地球科学, 32(4): 491-498.
- 余浩文, 刘昭, 荣峰, 陈康, 男达瓦, 刘仕娟, 刘绍赞. 2021. 西藏错那地热田水化学特征与物源机制[J]. 地质科技通报, 40(3): 34-44.
- 张春潮, 李向全, 马剑飞, 付昌昌, 白占学. 2021. 基于水化学及稳定同位素的西藏察雅地下热水成因研究[J]. 现代地质, 35(1): 199-208.
- 张佳伟, 李汉敖, 张会平, 徐心悦. 2020. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展[J]. 地球科学进展, 35(8): 848-862.
- 张进江, 丁林. 2003. 青藏高原东西向伸展及其地质意义[J]. 地质科学, 38(2): 179-189.
- 张景荣, 陆建军, 王蔚. 1994. 论湖南石门神一(金)矿床的古热泉成因[J]. 地质论评, 40(5): 429-435.
- 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), 41(3): 382-392.
- 张人权, 梁杏, 靳孟贵, 万力, 于青春. 2011. 水文地质学基础(第6版)[M]. 北京: 地质出版社.
- 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.
- 赵平, 谢鄂军, 多吉, 金建, 胡先才, 杜少平, 姚中华. 2002. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 18(4): 539-550.
- 赵元艺, 赵希涛, 马志邦, 邓坚. 2010. 西藏谷露热泉型铯矿床年代学及意义[J]. 地质学报, 84(2): 211-220.
- 赵振华. 1997. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社.
- 郑绵平, 向军, 魏新俊, 郑元. 1989. 青藏高原盐湖[M]. 北京: 北京科学技术出版社.
- 郑绵平, 刘喜方. 2010. 青藏高原盐湖湖水化学及其矿物组合特征[J]. 地质学报, 84(11): 1585-1600.
- 郑绵平, 王秋霞, 多吉, 刘杰, 平措汪杰, 张苏春. 1995. 水热成矿新类型—西藏铯硅华矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1-26.