



移动阅读

周鹏, 孙明露, 张云辉, 等, 2023. 藏南隆子县模麓温泉群水文地球化学特征及成因机制研究[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 322–339. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04003)

ZHOU P, SUN M L, ZHANG Y H, et al., 2023. Hydrogeochemical Characteristics and Genetic Mechanism of the Molu Geothermal Springs in the Longzi County, Southern Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 322–339. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04003](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04003)

藏南隆子县模麓温泉群水文地球化学特征及成因机制研究

周 鹏¹, 孙明露^{2*}, 张云辉³, 荣 峰¹, 达 娃¹, 万忠焱¹, 刘恭喜¹, 彭清华⁴, 胡华山⁴,
旦 增⁴, 刘振峰⁴

(1. 西藏自治区地勘局地热地质大队, 西藏 拉萨 850000; 2. 西藏大学, 西藏 拉萨 850000; 3. 西南交通大学, 四川 成都 611756; 4. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 611732)

摘要: 藏南地区地热资源丰富, 是喜马拉雅地热带的重要组成部分, 有望成为新的地热资源开发靶区。本文以藏南桑日-错那活动构造带内模麓温泉群为研究对象, 以水化学和氢氧氟同位素为研究方法, 分析模麓温泉群的水岩作用、热储温度、补给来源及径流时间, 揭示了地热水的成因机制。模麓地热水 pH 在 6.6~7.2 之间, TDS 为 1 908 mg/L~2 326 mg/L, 水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主。地热水中主要阴阳离子来源于硅酸盐矿物的溶解和少量地球深部物质。利用硅-焓方程法和硅-焓图解法计算的初始热储温度为 198℃~256℃, 冷水混入比例为 68%~85%。此外, 对地热水中的 Li、B、F 等微量元素分析得出, 研究区温泉水中微量组分除来自水-岩作用外, 应该还与深部流体的混入有关, 且该地区的氢氧同位素特征表明地下水补给主要来源于大气降水, 补给高程为 5 652 m~5 664 m, 模麓地热水中的氟含量 < 0.5 TU, 表明其地热水为老水, 有更长的径流时间, 为水-岩作用提供了充足的时间, 而宿麦郎曲河水为新水, 补给径流时间短。研究区地热水与围岩遮拉组砂板岩发生水-岩作用, 进行离子交换作用, 在地下水运移过程中加热形成地热水, 最终在有利构造部位出露形成温泉群。本次研究初步揭示了藏南模麓温泉的成因机制, 可为藏南地热资源开发利用提供理论参考。

关键词: 模麓温泉; 水文地球化学; 热储温度; 补给来源; 成因机制

中图分类号: P314

文献标识码: A

Hydrogeochemical Characteristics and Genetic Mechanism of the Molu Geothermal Springs in the Longzi County, Southern Tibet

ZHOU Peng¹, SUN Minglu^{2*}, ZHANG Yunhui³, RONG Feng¹, DA Wa¹, WAN Zhongyan¹, LIU Gongxi¹,
PENG Qinghua⁴, HU Huashan⁴, DAN Zeng⁴, LIU Zhenfeng⁴

(1. Geothermal and Geological Party, Tibet Bureau of Mineral Resource Exploration and Development, Lhasa 850000, China; 2. Tibet University, Lhasa 850000, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 4. Civil-Military Integrated Geological Survey Center of China Geological Survey, Chengdu 611732, China)

Abstract: The geothermal resources in southern Tibet are abundant, being an important part of the Himalayan Geothermal Belt, is expected to become a new prospective area for geothermal resource development. In this paper, we analyzed the water-rock

收稿日期: 2022-01-09; 改回日期: 2023-03-07; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 唐渊

作者简介: 周鹏 (1987—), 男, 工程师, 从事地热地质调查研究。E-mail: 626501717@qq.com

通讯作者: 孙明露 (1996—), 女, 硕士, 主要从事地热成因研究。E-mail: smlu0530@163.com

资助项目: 国家自然科学基金 (42072313, 42102334)、中国地质调查局项目 (ZD20220418)、西藏自治区找矿专项基金项目 (GZFCG2022-7078)

interaction, geothermal reservoir temperature, recharge source and runoff time of the geothermal springs in the active tectonic zone of the Sangri-Cuona in southern Tibet, and then revealed the genesis mechanism of geothermal water by hydrochemistry and hydrogen-oxygen-tritium isotopes. The pH values of the Molu geothermal water ranged from 6.6 to 7.2, and the TDS values were 1 908 mg/L to 2 326 mg/L. The hydrochemical types were mainly $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ and $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ types. The main anions and cations in geothermal water were originated from the weathering of silicate minerals and minor deep materials. The initial geothermal reservoir temperatures calculated using the silica-enthalpy equation method and silica-enthalpy diagramming method were $198^\circ\text{C}\sim 256^\circ\text{C}$, and the cold water mixing percentages were 68%~85%. In addition, the analysis of Li, B, F and other trace elements in geothermal water showed that the trace components in geothermal water in the study area were not only from water-rock interaction, but also related to the mixing of deep thermal fluids in geothermal water. The hydrogen and oxygen isotope characteristics of the area show that the groundwater recharge was mainly from atmospheric precipitation, the recharge elevation is 5 652 m~5 664 m, and the tritium content in the geothermal water in the foot of the model was less than 0.5TU, indicated that the geothermal water was old water. It showed that there was a longer runoff time, which provided sufficient time for water-rock interaction, while the Sumai Langqu River water was fresh water and the runoff time was short. The geothermal water in the study area had water-rock interaction in the diabase rocks of the Zhela Formation, and ion exchange was carried out. In the process of groundwater migration, geothermal water formed by heating and then exposed as geothermal springs in beneficial structural positions. This study preliminarily reveals the genetic mechanism of geothermal waters in southern Tibet, which can provide theoretical reference for the development and utilization of geothermal resources in southern Tibet.

Key words: Molu geothermal spring; Hydrogeochemistry; Geothermal reservoir temperature; Recharge source; Genetic mechanism

0 引言

随着人口的增长、工业化的加速和生活水平的提高,能源短缺一直是全世界面临的严峻问题(Guo et al., 2017; Chang et al., 2021)。因此,近几十年来世界各地掀起了可再生能源开发利用的热潮(Wang et al., 2021; Erbaş and Bozdağ, 2022)。地热能与水能、太阳能、风能等其它可再生能源对比,具有清洁、环保、用途多样的特点,且不易受季节、昼夜及气候变化等因素的影响,开发利用更为稳定,并且能源利用效率更高,将为实现“碳达峰、碳中和”目标做出重要贡献(Zhang and Hu, 2018; Moraga et al., 2022; Muther et al., 2022)。

地热能开发利用的关键前提是探明地热资源的成因机制。目前水文地球化学、地球物理勘查和数值模拟等方法均被用来分析地热资源的成因机制(郭镜和夏时斌, 2022; Gudala et al., 2022; Pérez-Zárate et al., 2022; Zhou et al., 2022)。其中,水文地球化学分析在地热资源的成因机制研究中扮演着重要角色。水化学组分可以判定地热水的水化学类型和水岩作用过程,地球化学地热温标(阳离子、二氧化硅和硅-焓模型等)是估算地热储层温度的有效手段,氡氧(D-O)同位素分析能够追溯地热水

的补给来源和区域,氦同位素则是分析地热水在深部滞留时间的重要方法(Cheng et al., 2022; Luo et al., 2022; 李义曼等, 2022; 隋丽媛等, 2022)。

我国地热资源种类多样、储量丰富,高温地热资源主要集中在西藏、川西和台湾等地区(郭清海, 2020; 王贵玲和蔺文静, 2020; 邱楠生等, 2022)。其中西藏地热资源储量十分可观,已知温泉显示区(点)677处,高温地热资源居全国之首,开发利用潜力巨大,数十年来西藏地热资源持续吸引学者们对其开展研究(王贵玲等, 2017)。目前西藏地热资源主要集中于羊八井和古堆地热区,其物质来源、热储温度和成因机制被学者们广泛研究,取得了丰硕的成果(许鹏等, 2018; Guo et al., 2019; Li et al., 2022a; Su and Tan, 2022; Wang et al., 2022; 胡志华等, 2022; 王迎春等, 2022; 薛帅等, 2022)。近年来,在西藏隆子县模麓地区发现了许多天然露头的温泉,本研究根据《西藏地热》中的温度分类标准:冷泉(水温 $<34^\circ\text{C}$),低温泉(水温 $=37^\circ\text{C}$),热泉(水温 $37^\circ\text{C}\sim 42^\circ\text{C}$),高温泉(水温 $>42^\circ\text{C}$)(佟伟等, 2000),认为模麓温泉(出露温度约 $33^\circ\text{C}\sim 76^\circ\text{C}$)属于中-高温地热资源。研究区位于古堆地热区以南,同属南北向桑日-错那活动构造带,具有可观的地热开发利用前景。然而,迄今模麓温泉群的成因机制相关

研究较少,其热储岩性、热储温度和补给来源等关键信息仍不明朗,亟需开展针对性研究。

因此,本文研究以藏南隆子县模麓温泉群为研究对象,在模麓温泉群出露区域和宿麦郎曲上游采集了9个地热水和1个河水样品,进行水文地球化学和氡氧氡(D-O-T)同位素分析,阐明其水-岩相互作用、热储温度、补给来源和滞留时间等,进而揭示模麓温泉群的成因机制,以期为藏南隆子县地热资源的勘探、开发和利用提供参考依据。

1 区域地质背景

隆子县(91°53'~93°06'E, 28°07'~28°52'N)位于西藏自治区山南市(胡智文, 2021),藏南地区位于地中海-喜马拉雅地热带,分布有较为强烈的地热活动区域(蒙晖仁等, 2023),年降雨量在150~300 mm,年平均气温5℃~6℃(许鹏等, 2018),该区属于高原半干旱大陆性季风气候(多吉卫色等, 2022年)。研究区南部主要山峰位于喜马拉雅山脉大“弧形”处,海拔5000 m以上,冰碛可见,终年积雪。模麓温泉群位于青藏高原南部,大地构造位置属拉轨岗日被动陆缘盆地,该构造单元总体以远陆带沉积的不对称褶皱、冲断以及花岗岩穹窿构造为特征(曹华文等, 2022),为地热的形成提供了非常有利的背景条件。青藏高原自第四纪以来受南北向强烈的挤压作用,构造和岩浆活动极为频繁,产生了一系列近南北向的张裂或张扭性的活动构造带。在这众多的活动构造带中,最东侧延伸长、规模宏大的,即是著名的桑日-错那活动构造带(图1a; 喻晓等, 2023; Cao et al., 2022)。该南北向构造带横穿西瓦里克构造带、喜马拉雅地体及雅鲁藏布江构造带,是青藏高原大规模隆起伸展运动的伴生产物,在西藏境内南北长约210 km,最宽处达18 km(吴中海等, 2008)。该构造带包含了3个相互独立的近南北向或北北东向的半地堑式、地堑式盆地,从南向北依次是错那-拿日雍错地堑、邛多江地堑和沃卡地堑(李光明等, 2020; 董国臣等, 2021)。模麓温泉群即位于桑日-错那活动构造带内,现代地热活动十分强烈,该构造带分布有古堆热田、错那热田及多个温泉显示区,古泉华等地热活动遗迹亦到处可见。模麓温泉及周缘出露地层主要为中侏罗统遮拉组(J₂z)及第四系沉积,其中遮

拉组主要为砂板岩,第四系主要以砾石、砂、黏土为主(卿成实等, 2023)。发育脉幅不等的辉绿岩脉,顺层侵入于遮拉组地层中(马子宁等, 2022)。总体构造格架呈近东西向展布,发育近东西和南北向断裂构造,共同控制着区内地层展布及岩浆热液活动。模麓温泉水热活动十分强烈,主要沿宿麦郎曲两侧分布,东西出露长度超2 km,南北宽度多在0.2 km~0.4 km之间,最宽处可达0.5 km。显示区内发育多处泉口,温度最高为76℃,与《西藏温泉志》温泉中的LZLM01(68℃)、和LZLM02(64℃)相比较,总流量达400 m³/d(佟伟等, 2000)。水热蚀变现象主要表现为钙质泉华、高岭土化,零星可见少量硅质泉华分布,地表可见明显的盐霜。

2 样品采集及分析测试方法

本研究于2022年8月共采集水样10件(图1b),其中宿麦郎曲上游河水样1件,编号为HS1;地热水水样9件,编号为RQ1~RQ9。在现场使用德国Multi3630IDS便携式多参数水质仪对温度(T)、酸碱度(pH)、溶解总固体(TDS)、电导率(EC)和溶解氧等进行初步测定。全部水样品先使用0.45μm过滤膜过滤,将550毫升高密度聚乙烯瓶在现场清洗三次后收集并蜡封样品。随后将水质综合分析样品送至西藏自治区地勘局中心实验室进行检测分析,同位素分析样品送至自然资源部地下水矿泉水及环境监测中心测试。样品中的主要阳离子(K⁺、Na⁺、Ca²⁺和Mg²⁺)和主要阴离子(F⁻、Cl⁻、SO₄²⁻和HCO₃⁻)及微量元素(B、Li、Sr)通过Thermo Icap6300 Duo电感耦合等离子体发射光谱仪、NexION 300X电感耦合等离子体质谱仪、AFS-830原子荧光光谱仪、ICS-1000离子色谱仪等进行测定,主要阳离子和阴离子之间的电荷平衡误差低于±10%。氢、氧同位素(δD-δ¹⁸O)通过L2130i水同位素分析仪在温度25℃,湿度50%条件下进行检测,结果以维也纳标准平均海洋水(VSMOW)作为标准,采用传统的δ(‰)表示法,δD和δ¹⁸O的分析精度分别为±0.6‰和±0.2‰;氡同位素通过Quantulus 1220超低本底液体闪烁谱仪进行检测,测试精度σ≤0.6TU,1TU相当于0.11919±0.00021(Bq/kg)。测试结果详见附表1*,阴阳离子测试结果根据离子电荷平衡原理进行误差分析,样品分析

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

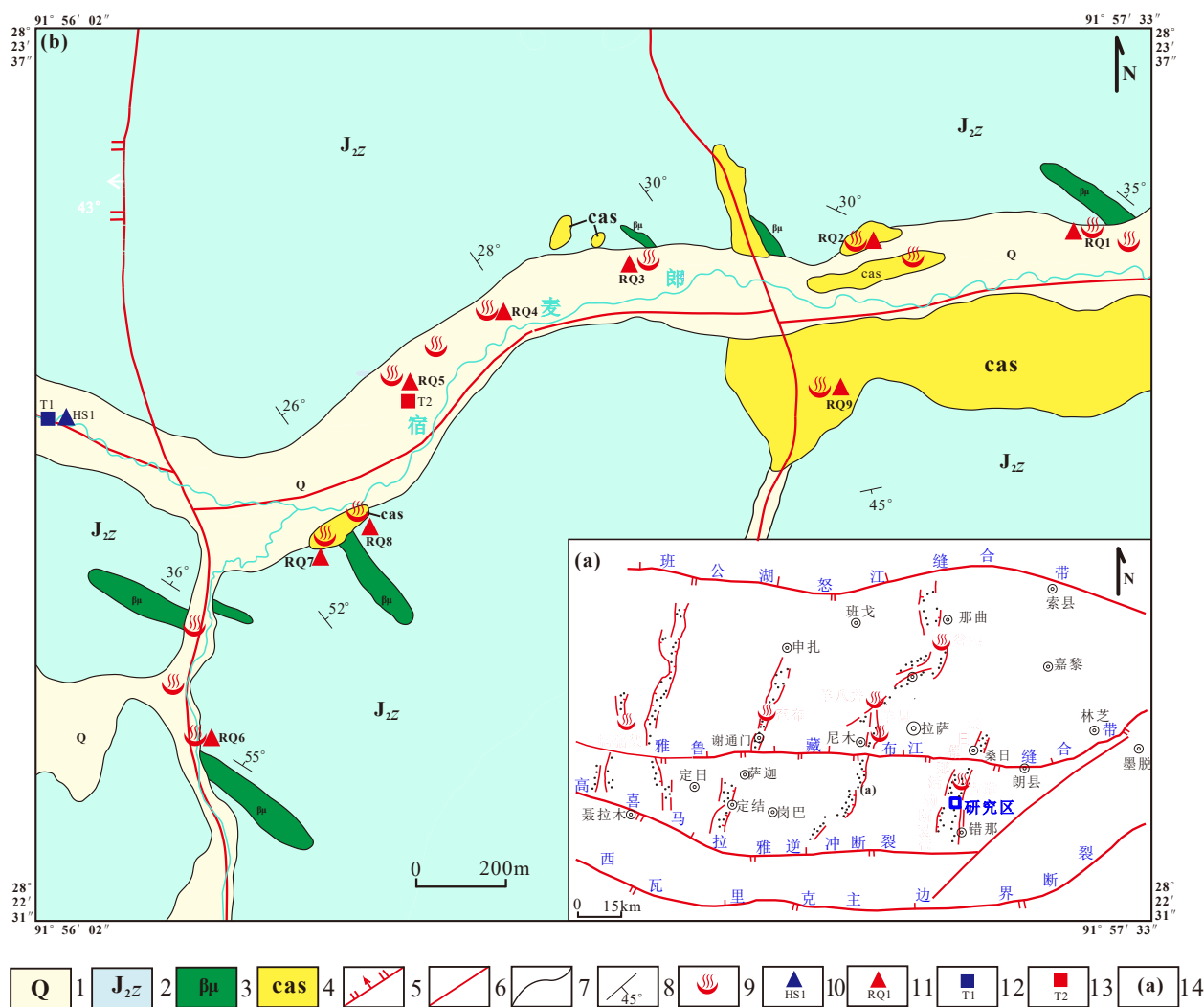


图1 研究区大地构造位置(a)和地质简图及采样点分布图(b)

Fig. 1 Regional tectonic position of the study area(a) and Geological map and sampling point distribution map(b)

误差均小于 $\pm 5\%$,说明本次研究中水化学分析结果可靠。

3 实验结果

研究区河水和温泉水样品的化学参数测试结果见附表 1*, 并对这些样品绘制了 Schoeller 图(图 2a 和 b)显示了水样物理化学参数的变化范围。模麓温泉水的 pH 值在 6.6~7.2 之间, 平均值为 6.9, 属中性水。可溶性总固体(TDS)含量在 1908~2 326 mg/L 之间, 平均为 2 132 mg/L, 为微咸水。阳离子以 Na^+ 为主(图 2a), 其次为 Ca^{2+} 离子, 其它阳离子为 Mg^{+} 离子和 K^{+} 离子, 其含量较低; 阴离子以

HCO₃⁻为主, 次为 Cl⁻和 SO₄²⁻, 不含 CO₃²⁻。其中阳离子 Na⁺含量在 334.6~430.9 mg/L(平均值为 374.9 mg/L); Ca²⁺含量在 59.6~173.1 mg/L(平均为 122.2 mg/L); Mg²⁺含量在 7.92~33.9mg/L(平均为 16.3 mg/L); K⁺含量在 39.8~55.3 mg/L(平均为 47.3 mg/L); 阴离子中 HCO₃⁻含量在 652.5~1 150 mg/L(平均为 882.4 mg/L); Cl⁻含量在 255.4~299.5 mg/L(平均为 274.3 mg/L)。宿麦郎曲上游河水 pH 为 8.3, 为弱碱性水; 可溶性总固体含量 290 mg/L, 为淡水。在常量组分中, 阳离子以 Ca²⁺为主, 次为 Mg²⁺和 Na⁺, K⁺含量极少, 而阴离子则以 HCO₃⁻为主, 次为 SO₄²⁻、CO₃²⁻, Cl⁻含量非常低。根据舒卡列夫

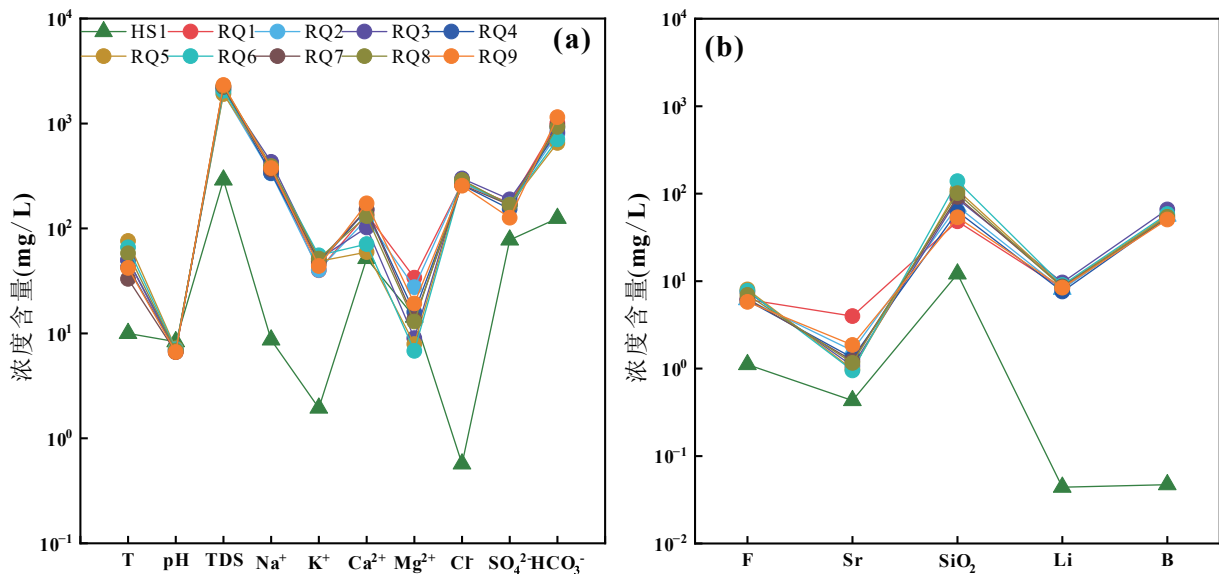


图2 模麓地区地热水组分的 Schoeller 图; (a) 物理化学参数与常量组分; (b) 微量组分

Fig. 2 Schoeller diagram of geothermal waters components in Molu area; (a) Physical and chemical parameters and constant components; (b) Trace components

分类法命名, 宿麦郎曲上游河水水化学类型为 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ 。从图 2a 可以看出, 研究区温泉水中的 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 与 HCO_3^- 含量高于地表水中的含量, 表明主要离子的浓度越高, 热水的 TDS 值越高, 表明热水在深部滞留时间越长, 并发生了一定程度的水-岩相互作用 (Alçiçek et al., 2018)。

地热水中常富含较高浓度的 B、F、Li、Sr、 SiO_2 等特征组分。本次研究测试地热水和河水中的微量组分含量 (图 2b)。在地热水中, 微量组分含量排序为 $\text{SiO}_2 > \text{B} > \text{Li} > \text{F} > \text{Sr}$, 平均浓度依次为 84.9、55.9、8.6、6.8 和 1.6 mg/L, 其中 SiO_2 浓度为 48.3~138.6 mg/L (平均值为 84.9 mg/L); B 浓度为 50.6~66 mg/L (平均值为 55.9 mg/L); Li 浓度为 7.6~9.6 mg/L (平均值为 8.5 mg/L); F 浓度为 5.8~8 mg/L (平均值为 6.7 mg/L); Sr 浓度为 1~4 mg/L (平均值为 1.6 mg/L)。从图 2b 也可以看出, 研究区中的 B、F、Li、Sr、 SiO_2 均高于河水中的含量, 表明模麓温泉热水发生了强烈的水-岩相互作用。此外, 模麓温泉热水和河水中各个水样的化学类型和组分变化趋势一致, 与区域含水岩组和水-岩作用类型相似有关。

附表 1 显示模麓温泉地下热水的 δD 值为 -143‰ ~ -142.9‰ , 平均值为 -143.0‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -17.2‰ ~ -16.2‰ , 平均值为 -16.7‰ 。研究区河水的 δD 值为 -121‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -16.3‰ 。河水和地热

水的 ^3H 同位素测试结果分别为 $4.6 \pm 0.6 \text{ TU}$ 和 $<0.5 \text{ TU}$ 。模麓温泉热水和相邻河水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值差别较大, 考虑到 δD 的高程效应, 反映了模麓温泉热水和相邻河水不同的补给来源。同时二者的 ^3H 同位素测试结果相差结果较大, 说明其分别经历了截然不同的径流过程, 本文将在讨论章节中对其展开分析。

Piper 三线图 (Piper, 1944) 可以直观反映水化学溶质中离子的相对含量和分布特征, 常用于分析水化学成分的演化规律, 判识水化学形成与演化的控制因素。本次将模麓地热水样、河水水样和羊八井 (YBJZK4001)、古堆地热田 (GDZK203) 进行水化学特征对比分析。从 Piper 三线图 (图 3) 可以看出, 模麓地热水为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型, 河水的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{Ca} \cdot \text{Mg}$ (图 3)。羊八井 ZK4001 为 $\text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型, 古堆 ZK203 为 $\text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 \cdot \text{Na}$ 型。综上所述, 根据地热水水化学类型和地热地质条件, 可以推测出研究区地热水的水化学类型与羊八井和古堆类似, 以 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型为主, 可能是与深部地热流体有紧密关系的热水, 进而可以递推出模麓地热水的演变过程, 其初始热水的水化学类型可能为 $\text{Cl} \cdot \text{Na}$ 型, 由于水岩相互作用及地表冷水混合等因素使得其出露地表后水化学类型变为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} \cdot \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型 (王迎春等, 2022)。

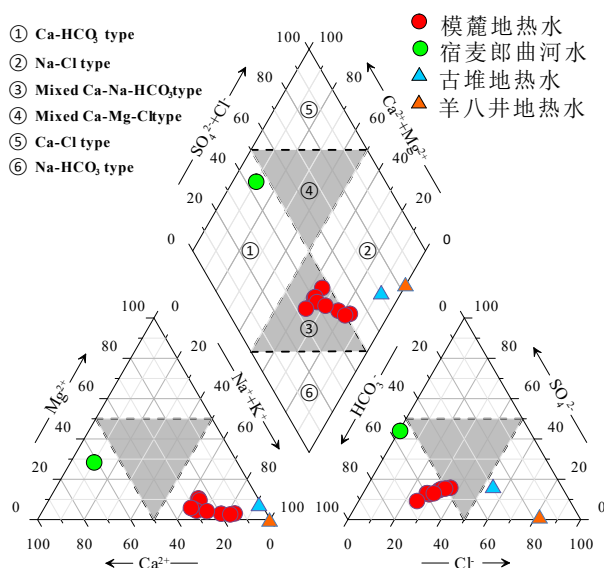


图3 模麓地区地热水的 Piper 三线图(羊八井和古堆地热水井数据引自刘昭, 2014 和王思琪, 2017)

Fig.3 Piper triangle diagram of geothermal waters in Molu area (The data of Yangbajing and Gudui geothermal wells are cited from Liu, 2014) and Wang, 2017)

4 讨论

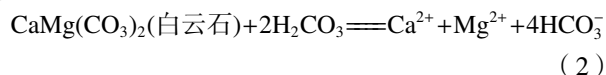
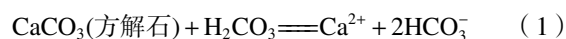
4.1 离子来源分析

在自然的水-岩系统中, Cl 离子难以形成矿物盐和被吸附到矿物表面, 即使是在高温环境下, 水-岩相互作用也极难影响 Cl 离子的存在状态, 因此 Cl 离子常用于间接判断深部流体特征及水化学演化过程(Arnórsson and Andrésdóttir, 1995)。在本次研究当中, Cl 离子浓度与其它离子浓度之间的关系如图4所示。古堆地热水和羊八井地热水通常在模麓地热水的附近或高于模麓地热水样品, 而冷水样品集中在零附近, 没有太大的线性趋势。据观察, 模麓地热水与羊八井地热水和古堆地热水中的 Cl 含量与 K、Li、B 和 F 存在较好的相关性 ($R^2=0.953\ 97$ 、 $0.965\ 59$ 、 $0.972\ 65$ 、 $0.980\ 23$ 、 $0.967\ 12$ 、 $0.926\ 71$ 和 $0.952\ 25$ 、 $0.963\ 12$)(图4b, d, f 和 f), 说明有相似物质来源, 除了来自矿物溶解还混入部分地球深部物质(赵平等, 1998; 张薇等, 2021)。尽管模麓地热水与羊八井和古堆地热水的 Na 和 SiO_2 含量与 Cl 离子浓度之间存在线性关系(图4a 和 c), 但其平方回归系数(分别为 $0.785\ 68$ 和 $0.704\ 03$)明显低于 K、Li、B 和 F, 这反映出 Na 和 SiO_2 也是模麓地热水的特征成分(Wang and Zheng, 2019)。相比之下模麓地热水和羊八井地热水中的 Cl 含量与

SiO_2 的相关系数大于 0.95, 具有较好的相关性。

地热水在深部运移过程中、补径排过程中和循环过程中, 经历了比地下冷水更长时间和更长距离的循环, 所以发生了更为充分的水岩作用。为了进一步分析水岩作用的主要类型, 绘制了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 以及 HCO_3^- 的相关比值端元图(Liu et al., 2020)。常见的水岩作用形式有硅酸盐风化、蒸发矿物以及碳酸盐溶解(许继影等, 2021)。如图5所示, 水样点分布在硅酸盐和蒸发矿物区域, 说明硅酸盐风化溶解是水岩作用的主要类型。

水体中主要离子比值, 可以表示不同类型岩石风化对水化学组分的影响(严宇鹏等, 2022)。如图6所示, $\text{Cl}/(\text{Na}^++\text{K}^+)$ 比值靠近 Na^++K^+ 一侧, 说明 Cl 不足以平衡 Na^+ 和 K^+ , 剩余部分的 Na^+ 和 K^+ 可能来自岩石风化溶解, 如硅酸盐类矿物(钠、钾长石等)。此外 Ca、Mg 和 HCO_3^- 与 Cl 的比组图中呈分散分布(图4g~i), 不具有明显的相关性。因此, 表明了控制这些组分浓度的不仅是来源, 也有离子交换作用, 吸附作用, 溶解沉淀作用等等。当 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 和 $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 的摩尔比等于 0.5, 这些离子归因于方解石和白云石的溶解(公式(1)和(2))(Li et al., 2020)。



$(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 的摩尔比低于 0.5。低 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的富集归因于硅酸盐溶解的离子交换(Li et al., 2020), 图6b 可以看出, 所有的点靠近 $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$ 轴, 还需要有 Na^+ 、 K^+ 等阳离子来平衡阴离子, 说明硅酸盐矿物风化是控制该区水化学的一个重要因素(张涛等, 2017)。 (Na^++K^+) 与 HCO_3^- 的摩尔比大约为 1:1(图6c; Fan et al., 2019)。

这些结果表明, 水化学成分可能主要受硅酸盐矿物的溶解控制。通过矿物相平衡分析, 根据地热水估计硅酸盐矿物的风化(Helgeson, 1969; Shvartsev et al., 2018)。根据 Garrels 和 Christ 的方法(Garrels and Christ, 1965)基于固相中的 Al 是保守的, 绘制了 100°C 和 200°C 下的 $\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系统和 $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系统的热力学活性图(图7)。模麓水样点主要位于钠云母稳定区, 表明 Na^+ 主要受钠云母矿物的溶解平衡影响(图7a)。 K^+ 主要受白云母溶解平衡影响(图7b)。因此, 模麓地热水中的 Na^+ 和 K^+ 的高浓度是由于硅酸盐矿

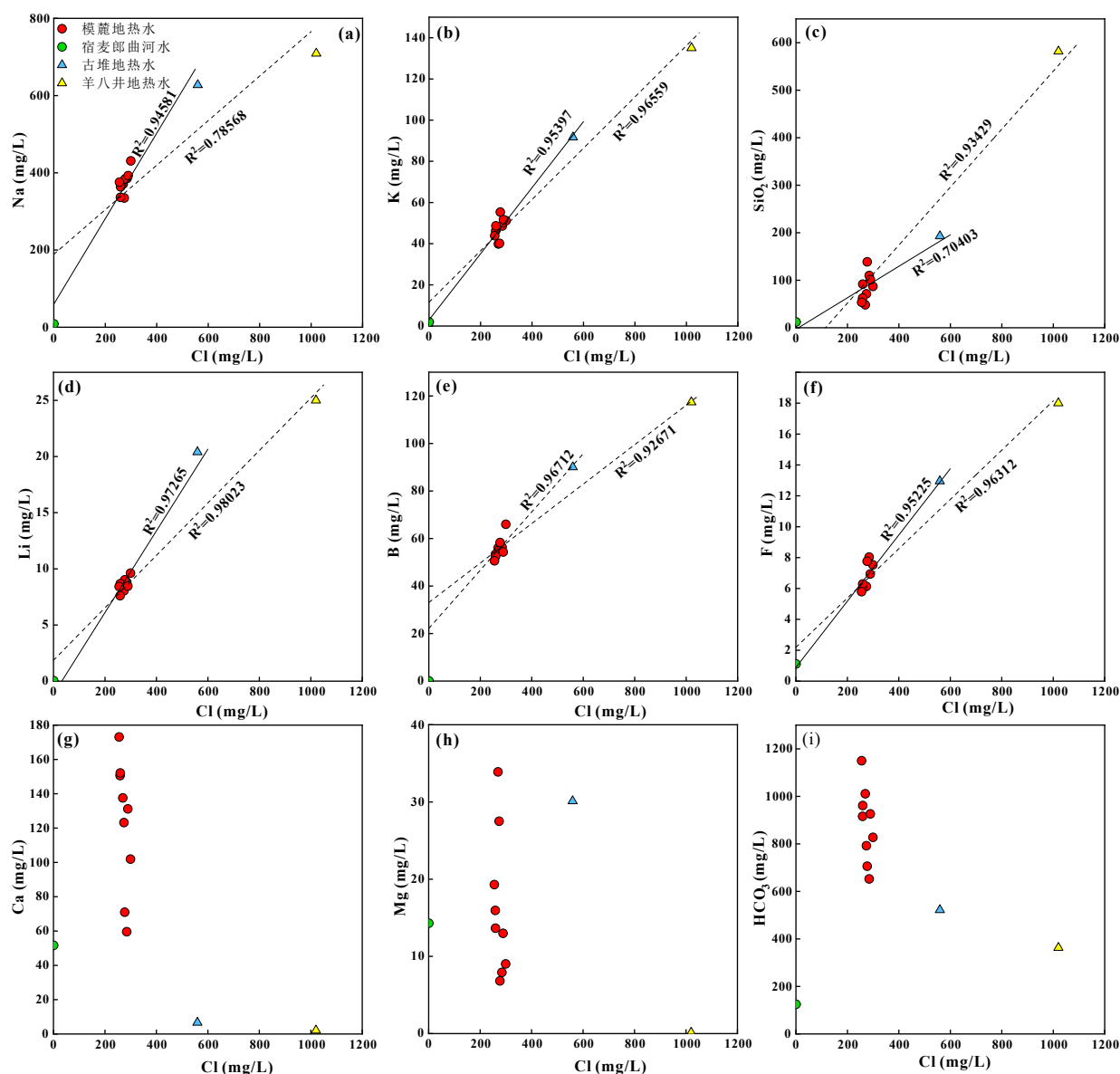


图4 模麓地区地热水主要元素和氯含量关系图 (羊八井和古堆地热井数据引自刘昭, 2014 和王思琪, 2017)

Fig. 4 Relationship between main elements and chlorine content of geothermal water in Molu area (The data of Yangbajing and Gudui geothermal wells are cited from Liu Z (2014) and Wang S Q (2017))

物(包括钠长石、白云母)的溶解提供。

阳离子交换是地下水化学的主要过程。 $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-)$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 之间的关系可有效的检查地下水和相应含水层之间的离子交换情况(Ren et al., 2021)。水样点均落在斜率为-1的直线附近(附图 6d), 表明地下水存在阳离子交换(Hao et al., 2020)。另一方面, choro-alkaline 指数也可以揭示离子交换作用(Ma et al., 2020)。

$$\text{CAI-I} = (\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)) / \text{Cl}^- \quad (3)$$

$$\text{CAI-II} = (\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-) \quad (4)$$

综上所述, 水中 Ca、Mg、 HCO_3^- 和 Sr 与 Cl 的不具有明显的相关性(图 6e), 说明它们不具有相似的离子来源, 控制这些组分浓度的不仅是来源, 也有离子交换作用, 吸附作用和溶解沉淀作用。而 K、F、B 和 Li 与 Cl 存在较好的相关性, 且由于水样点位于桑日-错那活动构造带, 进而形成了良好的通道, 说明它们可能来源于深部物质。

4.2 深部热储特征分析

4.2.1 水-岩矿物平衡判断

使用地热温标的基本前提是地热温标中某种

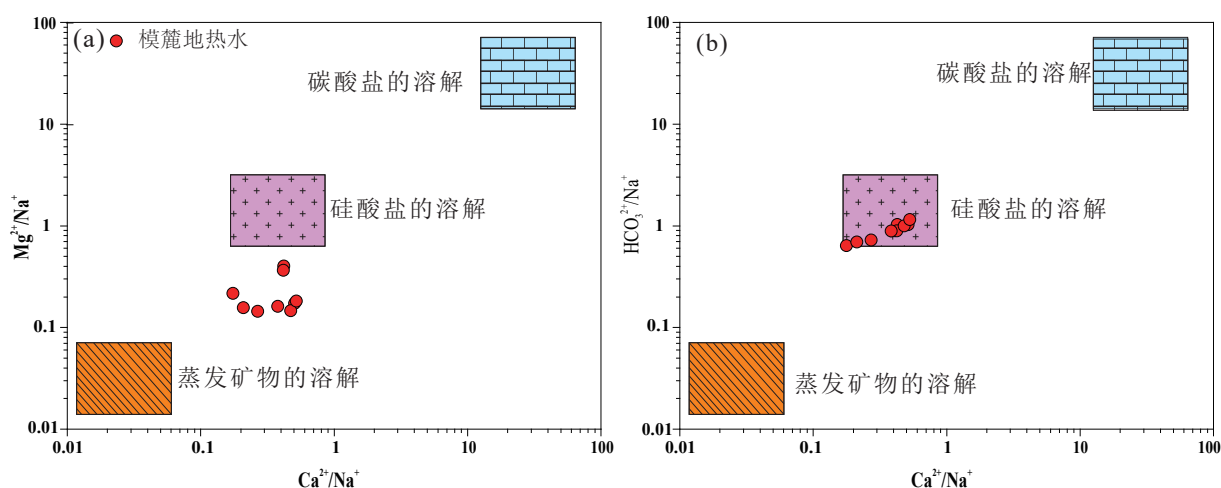
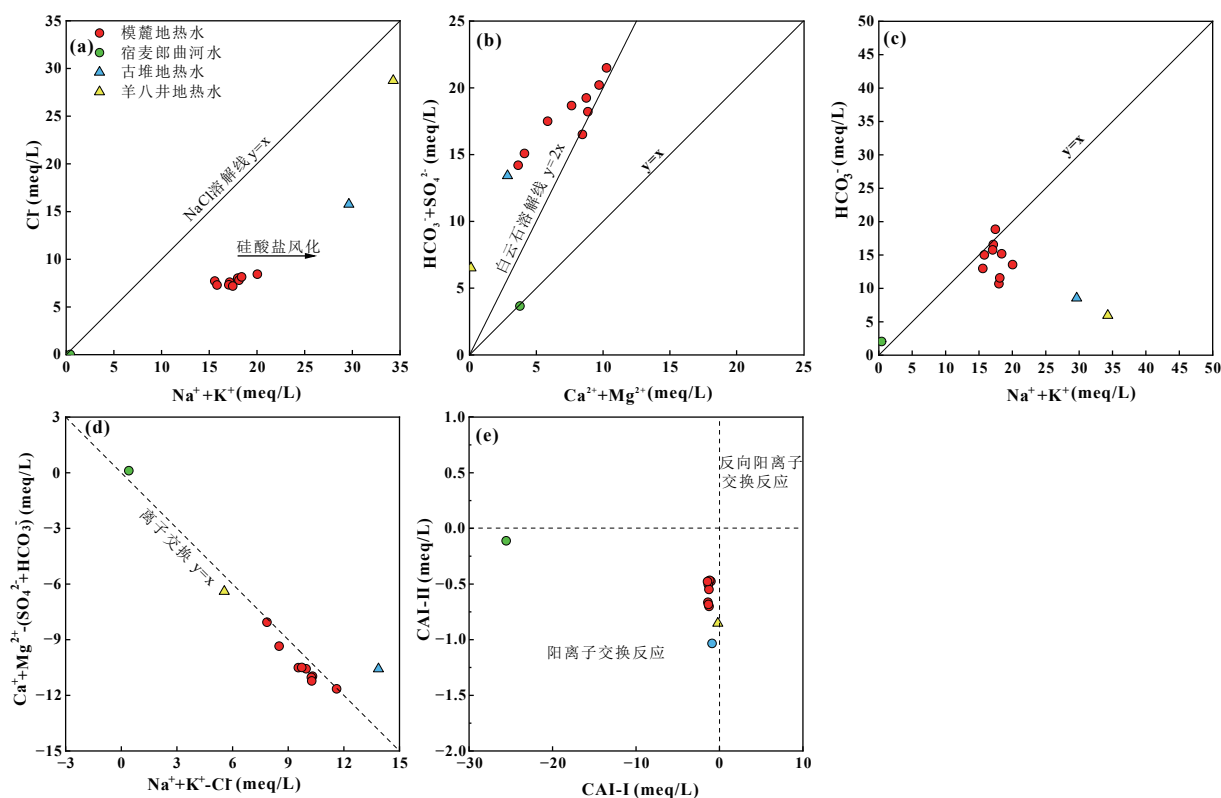
图5 模麓地区地热水的 Ca/Na vs. Mg/Na (a) 和 Ca/Na vs. HCO_3/Na (b) 比值图Fig. 5 Ratio diagram of geothermal water Ca/Na vs. Mg/Na (a) and Ca/Na vs. HCO_3/Na (b) in Molu area

图6 模麓地区地热水离子组合摩尔比值关系图(羊八井和古堆地热井数据引自刘昭, 2014 和王思琪, 2017)

Fig. 6 Molar ratio diagram of geothermal water ion combination in Molu area (The data of the Yangbajing and Gudui geothermal wells are cited from Liu, 2014) and Wang SQ (2017))

物质和热储中的矿物达到平衡。有时地热水化学成分在上升过程中随温度降低而发生变化,与浅层冷水发生混合,导致地热水化学成分的水-岩再平衡作用。因此有必要检验地下热水和矿物的平衡状态,以分析地热温标的可靠性。

Na-K-Mg 三角图解法(Giggenbach, 1988)用来判断地热水水-岩作用的平衡状态和区别不同平衡状态的水样。通过研究区 Na-K-Mg 三角图(图 8a)判断研究区地下热水平衡状态,得到模麓温泉属于“未成熟水”。研究区的地热水样几乎都沿着同

一等温线分布,这表明它们可能来自同一种深源地热流体,与地表附近的冷水混合(Wang et al., 2021)。而羊八井 ZK4001 地热水落在部分成熟区(Zheng et al., 2018),表明模麓受到浅层冷水混合作用比羊八井 ZK4001 地热水要强烈。会在使用阳离子地温标法(如 Na-K、Na-K-Ca 和 K-Mg)时存在一定的偏差。因此,本文不宜采用阳离子温标法计算,需要运用其他地热温标计算研究区地热水的热储温度。

4.2.2 矿物饱和指数分析

矿物饱和指数是表示对地下水对某种特定矿物的饱和程度,可以用来计算地下水在不同控制条件下的矿物饱和指数,常用 SI 表示。计算公式如下:

$$SI = \lg(IAP)/K \quad (5)$$

式中: IAP 为矿物-水的反应活度, K 为矿物-水的反应平衡常数。

当 $SI > 0$ 时,溶液中矿物处于过饱和状态,多余的矿物将会沉淀析出;当 $SI < 0$ 时,溶液中矿物处于不饱和状态,多余的矿物将会继续溶解;当 $SI = 0$ 时,溶液中矿物处于平衡状态,矿物溶解和沉淀到达平衡。

本文利用美国地质调查局开发的水文地球化学模拟软件 PHREEQC 计算出模麓温泉地下热水

矿物饱和指数(附表 2*)。结果表明,玉髓矿物的饱和指数范围为 $-0.3 \sim 0.32$ (平均值为 0.032),玉髓处于轻度过饱和状态;方解石、白云和石英处于过饱和状态($SI > 0$),而石膏和岩盐则处于溶解未饱和状态,利用这些矿物计算出的热储温度容易偏低,不适合在研究区应用,故选取石英 SiO_2 地热温标适合计算研究区地热水的热储温度。

4.2.3 地热水的热储温度计算

(1) SiO_2 地热温标

SiO_2 地热温标是基于不同 SiO_2 矿物(主要是石英、玉髓)在水中的溶解度,作为储层温度的函数来计算地热水的热储温度。石英地温计适用于 150°C 及以上高温的储层,而当地热水达到 180°C 以下的平衡时,玉髓地温计产生的结果较准确(Li et al., 2020)。在研究区地热水中主要矿物 SI 值计算结果中, SiO_2 矿物中的石英和玉髓矿物基本处于平衡状态。计算结果(附表 3*)显示使用石英温标计算得到的模麓温泉热储温度为 $100 \sim 157^\circ\text{C}$ (无蒸汽损失)和 $101 \sim 149^\circ\text{C}$ (最大蒸汽损失)。 $\lg(K^2/Mg)$ 与 $\lg(SiO_2)$ 比值图可以指示地热流体中的二氧化硅种类(Giggenbach and Glover, 1992),如图 8b 所示,全部水样点均落在石英和玉髓线上方,表明石

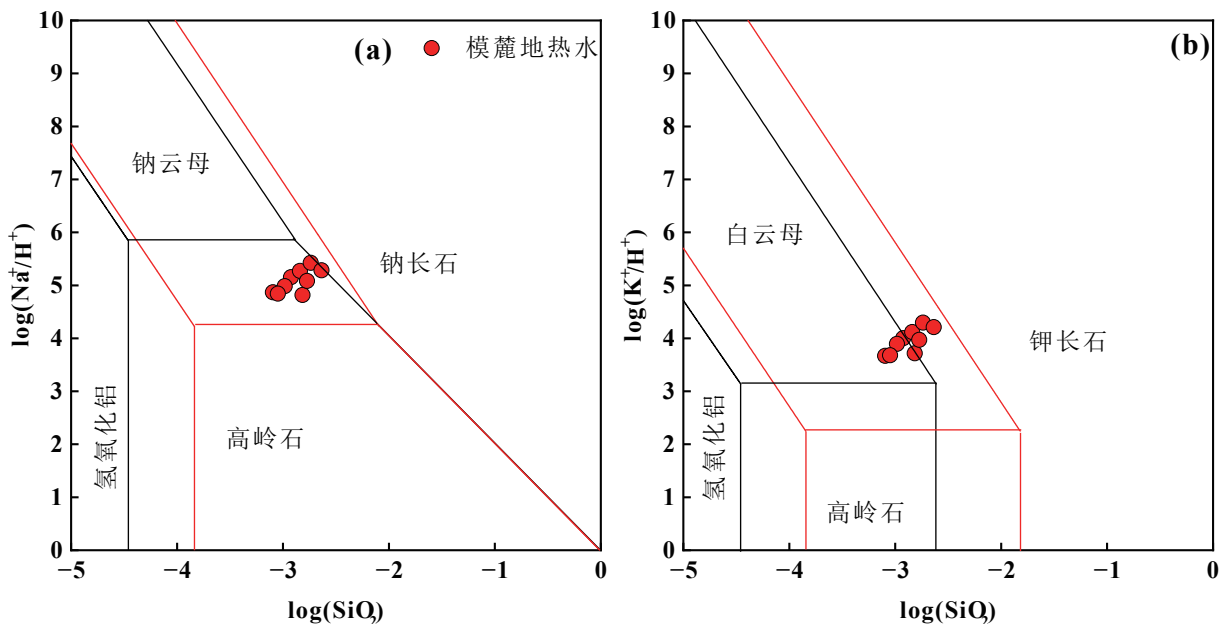


图 7 在 100°C (黑线) 和 200°C (红线) 下 (a) $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 系统和 (b) $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ 系统的稳定性图
Fig. 7 Stability plots for (a) $K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ system; (b) $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ system at 100°C (black line) and 200°C (red line)

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

英和玉髓是控制研究区热储层中常见的二氧化硅类型。而玉髓地温计计算的热储温度为 70~132℃ (无蒸汽损失), 其中 RQ1 和 RQ9 有几个地热样品的热储温度为 70℃ 和 75℃, 均低于最高出露温度 RQ5(76℃)(附表 3*), 加上 SiO₂ 矿物中仅有石英矿物的 SI 值均大于 0, 而玉髓中 RQ1、RQ5 和 RQ9 矿物的 SI 值均小于 0(附表 3*), 因此本次研究选用石英地热温标更加准确。

(2) 硅-焓混合模型

模麓温泉水样位于未成熟水区域, 地下热水在循环过程中可能与浅层冷水混合(Wang et al., 2021)。由于热水在向上流动期间, 有可能容易受到浅部冷水混合的影响, 使地热水中的 SiO₂ 含量减低, 导致热储温度的计算结果产生误差。利用硅-焓方程和硅-焓图解的方法消除冷水的份额, 从而估算出较为准确的地热水的初始温度(即热储温度)。

根据 Fournier 等建立的硅-焓混合模型, 结合地热水的温度、焓值和 SiO₂ 含量之间对应的数值关系(附表 4*)来估算冷水混合比例和初始热储温度(Fournier, 1977)。本次计算采用的地表冷水为宿麦郎曲河水水样(HS1), 温度为 10℃, SiO₂ 含量为 12.06 mg/L。

$$H_c X + H_h (1 - X) = H_s \quad (6)$$

$$\text{SiO}_{2c} X + \text{SiO}_{2h} (1 - X) = \text{SiO}_{2s} \quad (7)$$

上式(6)和(7)中: H_c 为冷水焓值(J/g); H_h 为深部热水的初焓(J/g); H_s 为温泉热水焓; SiO_{2c} 为冷水的 SiO₂ 含量(mg/L); SiO_{2h} 为深部热水的初始 SiO₂ 含量(mg/L); X 为冷水混合比例。

硅-焓图解法是将研究区温泉与冷水的硅焓值投影到硅-焓曲线中, 其中 A 点为冷水投影, 本文将宿麦郎曲河水水样作为冷水; 再根据泉水焓和 SiO₂ 含量投下点 B, 延长线 A 和 B 点投入 C 点, 即可得到初始温度和热水比例(AB / AC)(Li et al., 2020)。图 9 和图 10a 为绘制的研究区的硅-焓方程法图和硅-焓图解法图。

由附表 5*可知, 研究区除 RQ6 和 RQ7 之外的水样点, 其余水样点(图 9 和图 10a)都可以通过硅-焓方程法图和硅-焓图解法图得到交点温度。而水样点 RQ1 热储层温度为 161℃~164℃, 明显低于 RQ2~RQ9 点位热储层温度, 推测可能由于水样点 RQ1 距离其余点位较远, 可能来自于浅部热储, 并且发生了一定比例的冷水混合。模麓温泉剩余水样点(RQ2~RQ9)通过硅-焓方程法计算得到的热储温度为 198℃~248℃, 冷水混合比例为 69%~85%; 通过硅-焓图解法计算得到的热储温度为 203℃~

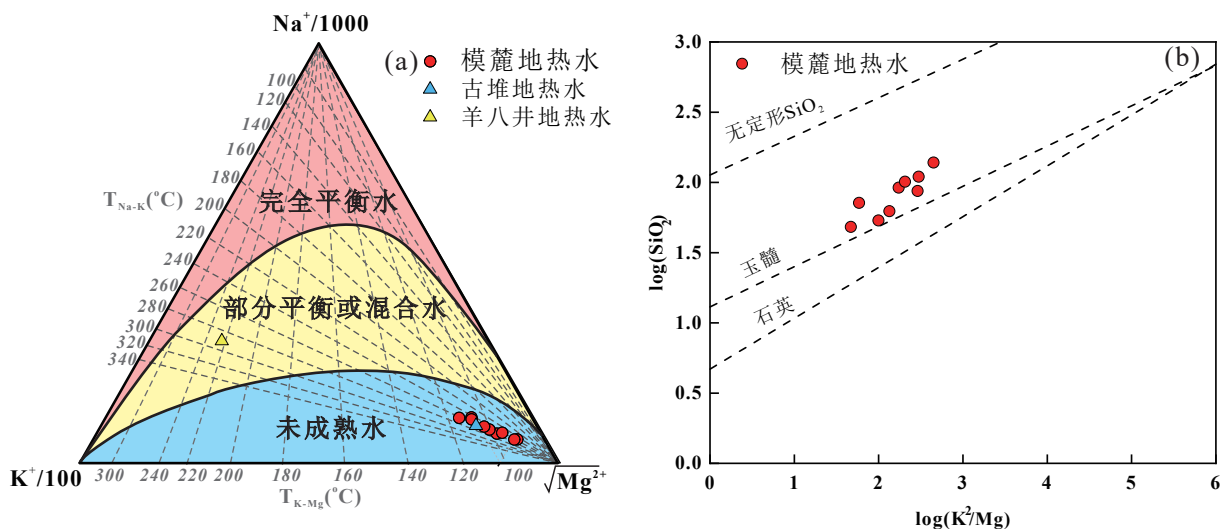


图 8 (a) 模麓地区地热水 Na-K-Mg 三角图 (Giggenbach, 1988) (地热井数据引自刘昭 (2014) 和王思琪 (2017)) (b) SiO₂ 溶解判别图羊八井和古堆

Fig. 8 (a) Na-K-Mg triangle diagram of geothermal water (Giggenbach, 1988) (The data of Yangbajing and Gudui geothermal wells are cited from Liu Z (2014) and Wang S Q (2017)) (b) SiO₂ dissolution discrimination diagram in Mulu area

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

256 ℃, 冷水混合比例为 68%~85%。而模麓温泉的 RQ6 和 RQ7 点位由硅-焓方程法图和硅-焓图解法均无法得到热储的估算值, 图 9f, g 中曲线均无交点, 可能由于热储温度过高, 冷水混入比例过大(赵佳怡等, 2019)。同时存在测定的温泉和水化学性质资料不准确, 导致其在硅-焓混合模型图中没有形成交点, 进一步影响到了热储温度的计算。

4.3 补给来源分析

氢氧稳定同位素是自然界水体中天然的示踪剂, 不同来源的水体具有不同的同位素组成特征, 利用水体中稳定同位素变化以示踪水循环转化特征, 分析地下水的补给来源与循环模式, 揭示地下水的形成环境(Bakari et al., 2013)。地热水和地表

水相差较大, 说明大气降水在入渗地下后被加热升温形成地热水的过程中, 同位素成分发生了显著的变化。Craig(1961)通过研究发现, 大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 值之间存在密切相关的线性关系, 被称为大气降水线, 并提出了全球平均大气降水的线性方程为 $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961)。近年来, 科研学者根据大气降水同位素分布特征, 获得了拉萨及雅鲁藏布江中下游地球雨水方程(宁爱凤等, 2000; 王军等, 2000), 与全球大气降水线接近。为进一步通过环境同位素的特征, 研究模麓地热水循环运动规律, 本文选取羊八井 ZK4001 和古堆 ZK203 的同位素数据并进行 δD - $\delta^{18}O$ 关系分析。结果显示, 在 δD - $\delta^{18}O$ 关系图上(图 10b), 模麓热水和河水样品均位

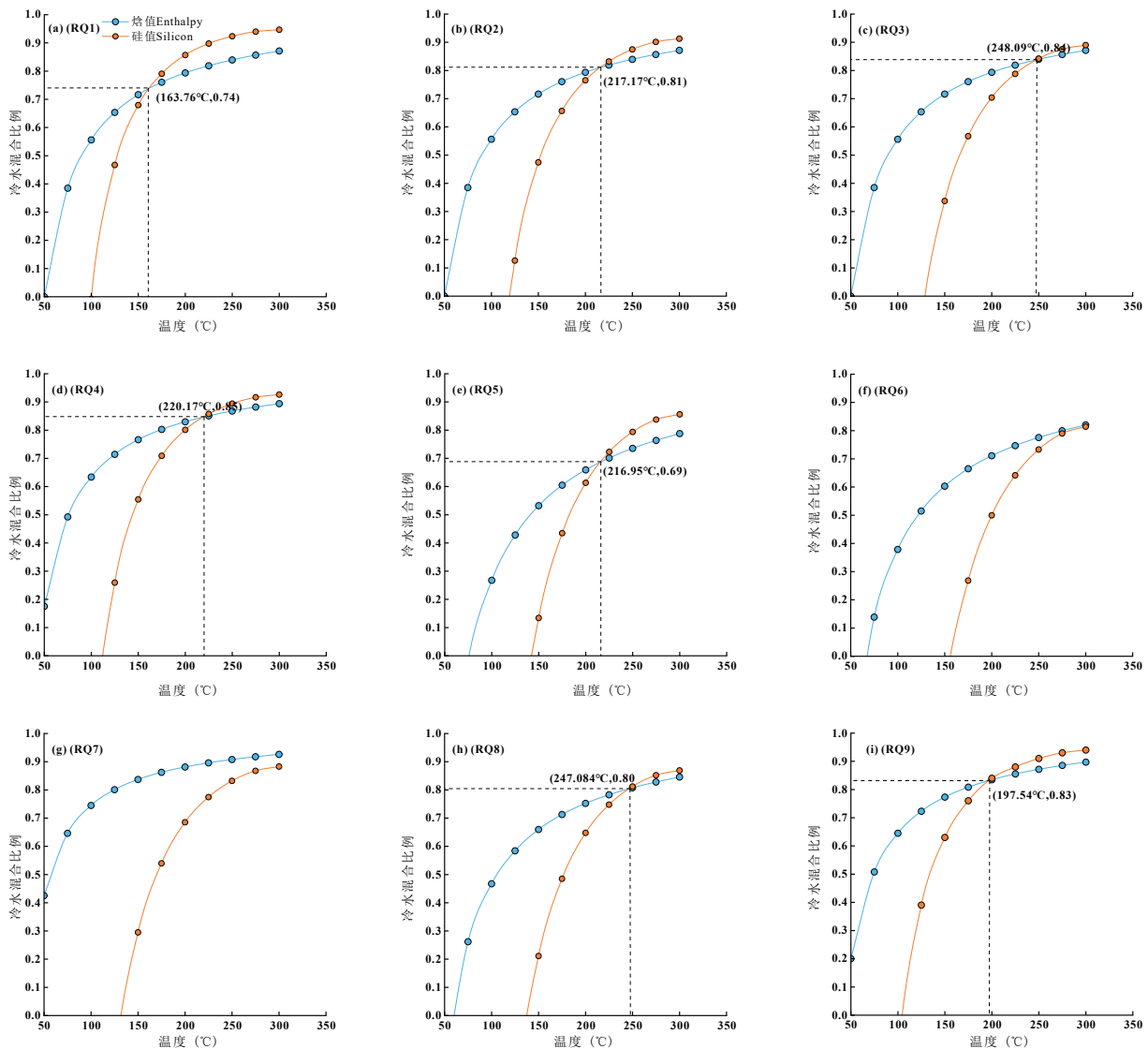


图9 模麓地区地热水硅-焓方程法图

Fig. 9 Silicon enthalpy equation method diagram of geothermal waters in Molu area

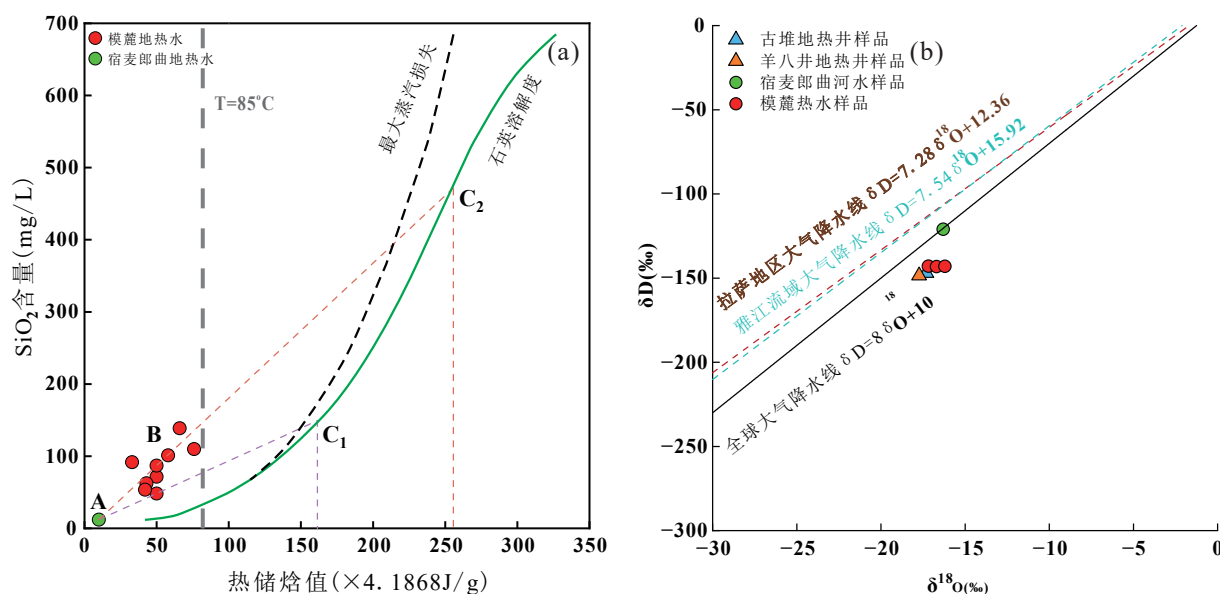


图 10 (a) 模麓地区地热水的硅-焓图解法图 (b) δD - $\delta^{18}O$ 同位素关系图 (羊八井和古堆地热井数据引自刘昭 (2014) 和王思琪 (2017))

Fig. 10 (a) Silicon enthalpy diagram of geothermal water (b) δD - $\delta^{18}O$ isotope diagram in Molu area (The data of Yangbajing and Gudui geothermal wells are cited from Liu Z (2014) and Wang S Q (2017))

于雨水线的右边,表明主要来源于大气降水补给。而且模麓热水与羊八井和古堆类似(Guo et al., 2009, Wang and Zheng, 2019),均显示了不同程度的“氧漂移”现象,说明地下热水在上升过程中水岩作用明显,并发生了较显著的氧同位素交换作用。研究认为(卫克勤等, 1983),“氧漂移”可作为地热系统深部温度的一个定性指标,模麓与羊八井等高温地热系统有相似的现象,暗示深部具有高温流体的特征。由于主要的造岩矿物不含或含有极少的氟,故地热水中氢同位素基本不会受到水岩相互作用的影响,会出现氦盈余($d = \delta D - 8\delta^{18}O$) (Jeelani et al., 2015)的现象,可以用来衡量地热水“氧漂移”的程度(Dansgaard, 1964)。在本研究区域中, d 值介于-13.4~-5.46。根据 d 值定义(苏艳等, 2007),研究区 d 值最小达到-13.4,说明大多数地下水是由降水补给的(Ayadi et al., 2018)。图 10b 可以看出 $\delta^{18}O$ 比较偏右,除了由于部分补给为大气降水外,说明研究区的深部热储较高。同时也说明了地下水在含水层中滞留时间较长,所经历的水岩相互作用强烈。

本次研究分别采用河水样品 HS1(δD 值为 -121.0‰, 高程 4 810 m),以我国西南部 δD 同位素

梯度值为高程梯度,利用下式(8)计算地热水补给高程:

$$H = \frac{D - D_0}{\text{grad } D} + H_0 \quad (8)$$

式中: H 为补给区高程(m), D 为地热水 δD (‰ V-SMOW), D_0 为地表水 δD (‰ V-SMOW), $\text{grad } D$ 为我国西南部 δD 同位素高程梯度(-2.6‰/100 m) (Yu et al., 1984), H_0 为地表水高程(m)。计算结果如附表 6 所示,模麓温泉热水的补给高程范围为 5 652 m~5 664 m。

4.4 地下水年龄分析

氚(³H)可用于地下水年龄的测定,对于研究地热系统中地下水起源、形成时代具有重要的意义(Gil-Márquez et al., 2020)。考虑受水动力条件和不同补给来源的地下水流的汇聚,水样是多种来源的混合物,同时由于核试验的终止,大气降水中氚浓度已经接近天然水平,故本文采用氚定性估算年龄。(顾慰祖等, 2011)等根据我国雨水氚分布情况,对地下水氚数据做了定性年龄判断:<1TU 为老水(1953 年前补给),1~3TU 为老水新水混入(0~10 年),3~10 TU 为新水(0~10 年内补给),10~20TU 显示仍残留一些核爆 ³H, >20TU 以 20 世纪 60 年

代补给为主。本次对模麓地热水及宿麦郎曲河水进行氟分析,结果显示地热水氟含量 $<0.5\text{ TU}$,河水氟含量为 $4.6\pm 0.6\text{ TU}$ 。说明模麓地热水为老水,是1953年以前补给的,显示有更长的径流时间,为水岩作用提供了充足的时间。而宿麦郎曲河水为新水,补给径流时间短。

4.5 模麓温泉成因概念模型

模麓温泉地热水位于东西向构造与近南北向构造之交汇附近部位(图1),根据研究区域的地质背景、结构、水文地质数据、热储特征、水样品和氢氧同位素特征等数据,提出了以下成因概念模型,如图11所示。

通过该地区的水文地质简图以及前人的研究分析可知,模麓温泉及周缘出露地层主要为中侏罗统遮拉组(J_{2z})及第四系沉积,其中侏罗统遮拉组岩性为砂板岩发育、第四系沉积物主要以砾石、砂、黏土为主,为地热水的赋存提供了良好的盖层。D-O同位素表明地热系统主要由大气降水补给。降水渗入地下后,地下水沿岩石裂隙、断层等渗入地下进行循环。渗流的水在循环过程中流经了中侏

罗统遮拉组的砂板岩硅酸盐储层,形成了 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}$ 型为主的水化学类型。地热水中的主要离子 Na^+ 、 K^+ 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 是来自岩石风化和硅酸盐矿物的溶解和离子交换。部分熔融体是古堆地热田与羊八井地热田的热量来源(谭捍东等,2004;魏文博等,2009)。模麓和古堆地热显示区同属错那-沃卡地热带,表明也有相似的地热系统热量来源(王思琪,2017)。强烈的新构造运动形成了区内多条断裂,进而形成了热源的良好传递通道。大气降水沿着断层和裂隙体系下渗,并沿破碎带、裂隙构造向下运移和循环,随着循环深度的增加,不断与周围岩石发生化学反应,受到深部局部熔融体和地温梯度增温,形成地下热水。研究区深层热储温度为 $198\sim 256^\circ\text{C}$,混合前未发生蒸汽分离。最后在温压差的影响下,地热水在断裂破碎带发育部位以温泉群的形式出露,与浅表 $68\%\sim 85\%$ 比例的冷水混合。

5 结论

(1)模麓地热水 pH 值在 6.6~7.2 之间,可溶性

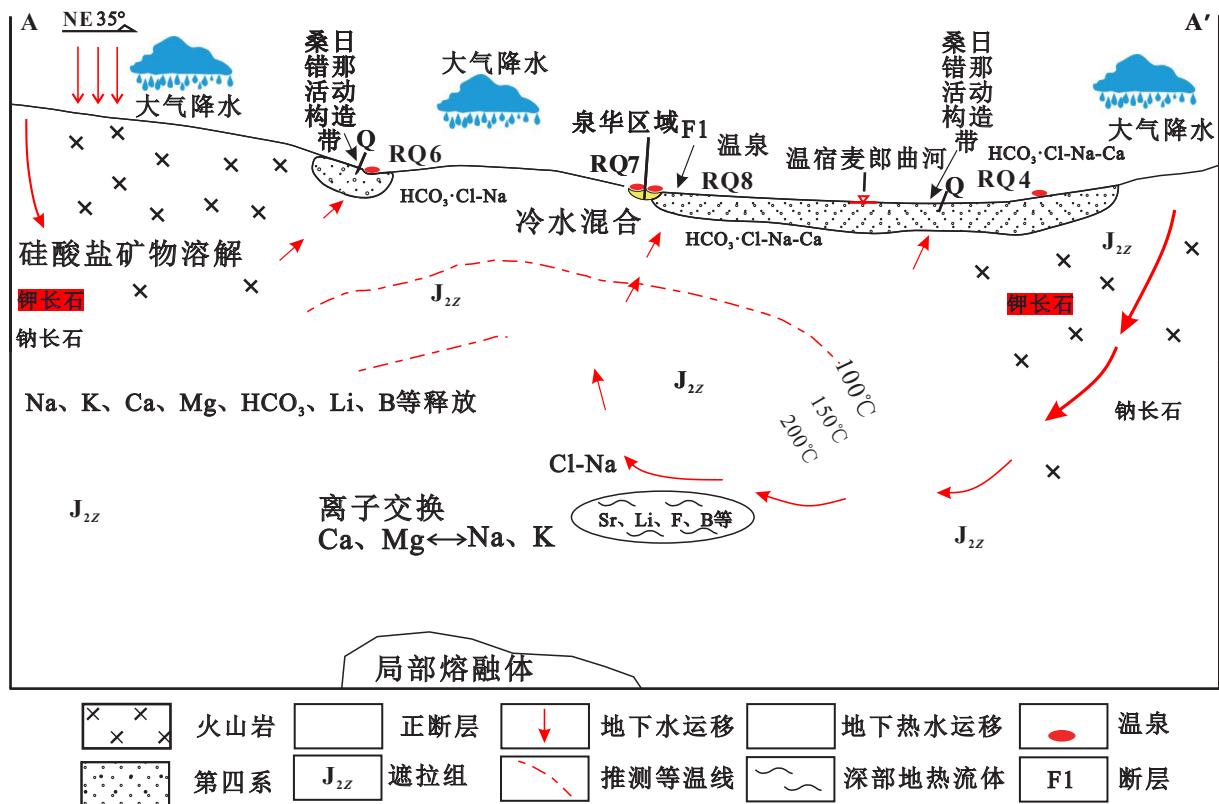


图 11 模麓温泉成因模型

Fig. 11 Genetic model of the Molu geothermal spring

总固体含量在 1908~2 326 mg/L 之间。阳离子以 Na^+ 为主, 其次为 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 K^+ 含量较低; 阴离子以 HCO_3^- 为主, 次为 Cl^- 和 SO_4^{2-} , 不含 CO_3^{2-} 。水化学类型较丰富, 为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}$ 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。地热水中富含 B、F、Li、Sr、 SiO_2 等特征组分, 与 Cl 离子相关性分析表明, 模麓地热水在强烈的水-岩作用下, 不仅溶滤围岩成分, 可能还有深部物质的加入。

(2) 水-岩相互作用是控制着地热水化学组成的主要因素, 包括大部分硅酸盐和部分蒸发岩的风化以及阳离子交换, 其中地热水的主要离子组成是由水岩与硅酸盐矿物的相互作用。

(3) 利用硅-焓混合模型估算研究区地热水中混入前初始热水的热储温度分别为 198~248 °C (硅-焓方程法)、203~256 °C (硅-焓图解法) 和冷水混合比例分别为 69~85% (硅-焓方程法)、68~85% (硅-焓图解法)。

(4) 模麓温泉的氢氧同位素表明地下热水来源于大气降水, 补给高程范围为 5 652~5 664 m, 有较显著的“氧漂移”现象, 说明地下热水在上升过程中水岩作用明显, 发生了较为显著的氧同位素交换作用。氡同位素特征显示, 模麓地热水为老水, 是 1953 年以前补给的, 显示有较长的径流时间, 为水岩作用提供了充足的时间。

(5) 结合地质资料及水文地球化学和热储特征分析认为, 研究区热储主要为中侏罗统遮拉组砂板岩与第四系地层中的构造裂隙及第四系的松散孔隙。研究区深层热储温度为 198~256 °C, 冷水混合比例 68~85%。在该处大气降水的入渗是地下水的主要补给来源, 裂隙较发育, 地形陡峭, 切割强烈为地下水的入渗提供了依据。地下水在基岩裂隙向下运移过程中, 不断与周围岩石发生作用, 最后受地温的影响在下部形成地热水。

致谢: 感谢多吉院士、曾庆高教授级高级工程师在野外调查及论文成文过程中给予的悉心指导和帮助, 感谢匿名审稿专家的指导。

References

- Alçiçek H, Bülbül A, Brogi A, et al., 2018. Origin, evolution and geothermometry of thermal waters in the Gölemezli Geothermal Field, Denizli Basin (SW Anatolia, Turkey) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 349: 1–30.
- 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.
- Ayadi R, Trabelsi R, Zouari K, et al., 2018. Hydrogeological and hydrochemical investigation of groundwater using environmental isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C) and chemical tracers: a case study of the intermediate aquifer, Sfax, southeastern Tunisia[J]. *Hydrogeology Journal*, 26 (4): 983–1007.
- Bakari S S, Aagaard P, Vogt R D, et al., 2013. Strontium isotopes as tracers for quantifying mixing of groundwater in the alluvial plain of a coastal watershed, south-eastern Tanzania[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 1–14.
- Cao H W, Pei Q M, Santosh M, et al., 2022. Himalayan leucogranites: A review of geochemical and isotopic characteristics, timing of formation, genesis, and rare metal mineralization[J]. *Earth-Science Reviews*, 234: 104229.
- Cao H W, Li G M, Zhang L K, et al., 2022. Genesis of Himalayan Leucogranite and its potentiality of rare-metal mineralization[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (2): 189–211.
- Chang X W, Xu M, Jiang L W, et al., 2021. Hydrogeochemical Characteristics and Formation of Low-Temperature Geothermal Waters in Mangbang-Longling Area of Western Yunnan, China[J]. *Journal of Chemistry*, 2021: 1–13.
- Cheng Y, Pang Z, Kong Y, et al., 2022. Imaging the heat source of the Kangding high-temperature geothermal system on the Xianshuihe fault by magnetotelluric survey[J]. *Geothermics*, 102: 102386.
- Dansgaard W., 1964. Stable isotopes in precipitation[J]. *Tellus*, 16 (4): 436–468.
- Dong G C, Mo X X, Zhao Z D, et al., A response of volcanic rocks to the India-Asia continental collision: A case study on Linzong volcanic rocks in Linzhou, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 41 (2): 332–339.
- Duo J W S, Suo L C R, Ping C L J, et al., 2023. Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Soil Selenium in Longzi County, Tibet Autonomous Region[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 42 (1): 177–191 (in Chinese with English abstract).
- Erbaş H A, Bozdağ A., 2022. Hydrogeochemical characteristics and evaluation of the geothermal fluids in the Gazlıgöl geothermal field (Afyonkarahisar), Western Anatolia, Turkey[J]. *Geothermics*, 105: 102543.
- Fan Y F, Pang Z H, Liao D W, et al., 2019. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of Geothermal Water from the Ganzhi Geothermal Field, Eastern Tibetan Plateau[J]. *Water*, 11 (8): 1631.
- Fournier R O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for
- Alçiçek H, Bülbül A, Brogi A, et al., 2018. Origin, evolution and geothermometry of thermal waters in the Gölemezli Geothermal Field, Denizli Basin (SW Anatolia, Turkey) [J]. *Journal of Volcanology*

- geothermal systems[J]. *Geothermics*, 5 (1-4) : 41 – 50 .
- Garrels R M, Christ C L, 1965. Solutions, minerals and equilibria[M]. Harper and Row, New York, 1965. 1–450.
- Giggenbach W F, 1988. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52 (12) : 2749 – 2765 .
- Giggenbach W F, Glover R B, 1992. Tectonic regime and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the rotorua geothermal field, New Zealand[J]. *Geothermics*, 21 (1-2) : 121 – 140 .
- Gil-Márquez J M, Sültenfuß J, Andreo B, et al., 2020. Groundwater dating tools (^3H , ^3He , ^4He , CFC-12, SF_6) coupled with hydrochemistry to evaluate the hydrogeological functioning of complex evaporite-karst settings[J]. *Journal of Hydrology*, 580: 124263 .
- Gu W Z, Pang Z H, Wang Q J, 2011. Isotopic Hydrology[M]. Beijing: Science Press.
- Gudala M, Govindarajan S K, Yan B, et al., 2022. Numerical investigations of the PUGA geothermal reservoir with multistage hydraulic fractures and well patterns using fully coupled thermo-hydro-geomechanical modeling[J]. *Energy*, 253: 124173 .
- Guo Q H, Pang Z H, Wang Y C, et al., 2017. Fluid geochemistry and geothermometry applications of the Kangding high-temperature geothermal system in eastern Himalayas[J]. *Applied Geochemistry*, 81: 63 – 75 .
- Guo Q H, Planer-Friedrich B, Liu M L, et al., 2019. Magmatic fluid input explaining the geochemical anomaly of very high arsenic in some southern Tibetan geothermal waters[J]. *Chemical Geology*, 513: 32 – 43 .
- Guo Q H, Wang Y C, Liu W, 2009. O, H, and Sr isotope evidences of mixing processes in two geothermal fluid reservoirs at Yangbajing, Tibet, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 59 (7) : 1589 – 1597 .
- Guo J, Xia S B, 2022. Spatial carrier of geothermal system in eastern Sichuan fold zone—interconnected fault system: A case study of geothermal well in Moujia Town, Guang'an, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (4) : 642 – 652 (in Chinese with English abstract).
- Guo Q H. 2020. Magma-heated geothermal systems and hydrogeochemical evidence of their occurrence [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (12) : 3544 – 3554.
- Hao C M, Zhang W, Gui H R., 2020. Hydrogeochemistry characteristic contrasts between low- and high-antimony in shallow drinkable groundwater at the largest antimony mine in hunan province, China[J]. *Applied Geochemistry*, 117: 104584 .
- Helgeson H C, Garrels, R M, MacKenzie, F T., 1969. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions-II. Applications[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33 (4) : 455 – 481 .
- Hu Z W, Chen J X, Zhao Z F, et al., 2021. Analysis of Land Use Diversification and Its Aggregation in Longzi County[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 50 (3) : 164 – 170 (in Chinese with English abstract).
- Hu Z H, Gao H L, Wan H P, et al., 2022. Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing Geothermal Field, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 68 (1) : 359 – 374 (in Chinese with English abstract).
- Jeelani G, Kumar U S, Bhat N A, et al., 2015. Variation of $\delta^{18}\text{O}$, δD and ^3H in karst springs of south Kashmir, western Himalayas (India) [J]. *Hydrological Processes*, 29 (4) : 522 – 530 .
- Li J X, Wang X Y, Ruan C X, et al., 2022a. Enrichment mechanisms of lithium for the geothermal springs in the southern Tibet, China[J]. *Journal of Hydrology*, 612: 128022 .
- Li X, Huang X, Liao X, et al., 2020. Hydrogeochemical Characteristics and Conceptual Model of the Geothermal Waters in the Xianshuihe Fault Zone, Southwestern China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (2) : 500 – 514 .
- Li G M, Zhang L G, Wu J Y, et al., 2020. Reestablishment and scientific significance of the Ocean plate geology in the Southern Tibet Plateau, China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (1) : 1 – 14 (in Chinese with English abstract).
- Li Y M, Chen K, Tian J, et al., 2022. REE characteristics and their influencing factors of the geothermal water in Tangkeng geothermal field, Fengshun, Guangdong Province[J]. *Geological Review*, 68 (3) : 993 – 1005 (in Chinese with English abstract).
- Liu J T, Gao Z J, Wang Z Y, et al., 2020. Hydrogeochemical processes and suitability assessment of groundwater in the Jiaodong Peninsula, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192 (6) : 384 .
- Liu Z, 2014. The forming mechanism of typical high-temperature geothermal systems in Nimu–Naqu geothermal belt, Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences.
- Luo J, Li Y M, Tian J, et al., 2022. Geochemistry of geothermal fluid with implications on circulation and evolution in Fengshun-Tangkeng geothermal field, South China[J]. *Geothermics*, 100: 102323 .
- Ma J, Sun L H, Chen S G, et al., 2020. Hydrochemical Characteristics and Water Quality Assessment of Surface Water and Groundwater in Agriculture Demonstration Base, Jiagou District, Northern Anhui Province, China[J]. *Nature Environment and Pollution Technology*, 19 (4) : 1713 – 1721 .
- Ma Z N, Han Z P, Li Y L, et al., 2022. Exhumation history of the Kampa dome in the southern Tibet: Evidence from low-temperature

- thermochronology [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (2) : 300 – 309.
- Moraga J, Duzgun H S, Cavur M, et al., 2022. The Geothermal Artificial Intelligence for geothermal exploration[J]. *Renewable Energy*, 192: 134 – 149.
- Muther T, Syed F I, Lancaster A T, et al., 2022. Geothermal 4.0: AI-enabled geothermal reservoir development- current status, potentials, limitations, and ways forward[J]. *Geothermics*, 100: 102348.
- Ning A F, Yin G, Liu T C, 2000. Characteristics of Isotope Distribution of Atmospheric Precipitation in the Lsha River Area[J]. *Jmineral Petrol*, 20 (3) : 95 – 95 (in Chinese with English abstract).
- Pérez-Zárate D, Prol-Ledesma R M, Rodríguez-Díaz A A, et al., 2022. Soil gas flux, hydrogeochemistry and multicomponent geothermometry of thermal springs in the La Escalera geothermal prospect, Mexico[J]. *Applied Geochemistry*, 139: 105256.
- Piper A M, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses[J]. *Transactions-American Geophysical Union*, 25 (6) : 914 – 923.
- Qing C S, Zhang Z, Zhang L K, et al., 2023. The element zonation characteristics of No. X V ore body in Zhaxikang lead-zinc polymetallic deposit, Tibet[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (1) : 130 – 144 (in Chinese with English abstract).
- Qiu N S, Tang B N, Zhu C Q, 2022. Deep thermal background of hot spring distribution in the Chinese continent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96 (1) : 195 – 207 (in Chinese with English abstract).
- Ren X F, Li P Y, He X D, et al., 2021. Hydrogeochemical Processes Affecting Groundwater Chemistry in the Central Part of the Guanzhong Basin, China[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 80 (1) : 74 – 91.
- Shvartsev S L, Sun Z, Borzenko S V, et al., 2018. Geochemistry of the thermal waters in Jiangxi Province, China[J]. *Applied Geochemistry*, 96: 113 – 130.
- Su J B, Tan H B, 2022. The genesis of Rare-alkali metal enrichment in the geothermal anomalies controlled by faults and magma along the northern Yadong-Gulu rift[J]. *Ore Geology Reviews*, 147: 104987.
- Su Y, Ma Z Y, Liu F, et al., 2007. Deuterium excess parameter features study on thermal groundwater of Xi 'an and Xianyang[J]. *Coal Geology & Exploration*, 35 (3) : 39 – 42.
- Sui L Y, Zhou X, Li Z, et al., 2022. Hydrochemical and isotopic characteristics and genesis of hot springs in the Chuhe fault zone, Anhui[J]. *Geological Review*, 68 (3) : 981 – 992 (in Chinese with English abstract).
- Tan H D, Wei W B, Martyn U, et al., 2014. Crustal electrical conductivity structure beneath the Yarlung Zangbo Jiang suture in the southern Xizang plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 47 (4) : 685 – 690.
- Tong W, Zhang M T, Zhang Z F, et al., 2000. Geothermals Beneath Xizang (Tibetan) Plateau[M]. Beijing: science press.
- Tong W, Liao Z J, Wen S B, et al., 2000. Thermal Spring in Tibet[M]. Beijing: science press.
- Wang C G, Zheng M P, 2019. Hydrochemical Characteristics and Evolution of Hot Fluids in the Gudui Geothermal Field in Comei County, Himalayas[J]. *Geothermics*, 81: 243 – 258.
- Wang G L, Lin W J, 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (7) : 1923 – 1937 (in Chinese with English abstract).
- Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al., 2017. Evaluation of Geothermal Resources Potential in China[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 38 (4) : 449 – 450 (in Chinese with English abstract).
- Wang J, Liu T C, Yin G, 2000. Characteristics of Isotope Distribution in Precipitation in The Middle-Lower Reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Earth and Environment*, 28 (1) : 63 – 67 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, 2017. Hydrogeochemical Processes and Genesis Machenism of High-temperature Geothermal System in Gudui, Tibet[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Wang Y C, Gu H Y, Li D, et al., 2021. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of geothermal fluid in the Zhaxikang geothermal field in Cuona County, southern Tibet[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80 (11) : 415.
- Wang Y C, Zhou J L, Li L, et al., 2022. Geothermal geological conditions in the Yangbajing geothermal field and its enlightenment to the exploration of supercritical geothermal resources[J]. *Natural Gas Industry*, 42 (4) : 35 – 45 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Li L, Wen H, et al., 2022. Geochemical evidence for the nonexistence of supercritical geothermal fluids at the Yangbajing geothermal field, southern Tibet[J]. *Journal of Hydrology*, 604: 127243.
- Wei W B, Jin S, Ye G F, et al., 2009. Conductivity structure and rheological property of lithosphere in Southern Tibet inferred from super-broadband magmeto tulleric sounding[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 39 (11) : 1591 – 1606 (in Chinese with English abstract).
- Wei K Q, Lin R F, Wang Z X, 1983. Hydrogen and Oxygen Stable Isotopic Composition and Hydrogen and Tritium Content of Waters from Yangbajain Geothermal Area, Xizang, China[J]. *Geochemica*, 12 (4) : 338 – 346 (in Chinese with English abstract).
- Xu J Y, Gui H R, Ge C G, et al., 2021. Hydrogeochemical Characteristics and Source Identification of Deep Geothermal Water in Qingdong Coal Mine, HuaiBei, Anhui Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 29 (4) : 1037 – 1047 (in Chinese with English abstract).
- Xu P, Tan H B, Zhang Y F, et al., 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).
- Xue S, Lu Z W, Li W H, et al., 2022. Electrical resistivity structure beneath the central Cona Oiga rift, southern Tibet, and its implications for regional dynamics[J]. *Earth Science Frontiers*, 29 (2) : 393 – 401 (in Chinese with English abstract).
- Yan Y P, Niu F X, Liu J, et al., 2022. Hydrochemical characteristics and sources of the upper Yarlung Zangbo River in summer[J]. *China Environmental Science*, 42 (2) : 815 – 825 (in Chinese with English abstract).
- Yu X, Lv X B, Cao H W, 2023. Geochemistry and detrital zircon U–Pb geochronology of the Jurassic Ridang Formation in the southern Tibet and its tectonic implications[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 1 – 18.
- Yu J S, Zhang H B, Yu F J, et al., 1984. Oxygen and Hydrogen Isotopic Compositions of Meteoric Waters in the Eastern Part of Xizang[J]. *Geochemistry*, 3 (2) : 93 – 101.
- Zhao P, Jin J, Zhang H Z, et al., 1998. Chemical composition of thermal water in the Yangbajin geothermal field, Tibet[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 33 (1) : 62 – 73.
- Zhang T, Cai W T, Li L Z, et al., 2017. Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin[J]. *Environmental Science*, 38 (11) : 4537 – 4545 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W, Wang G L, Zhao J Y, et al., 2021. Geochemical Characteristics of Medium-high Temperature Geothermal Fluids in West Sichuan and Their Geological Implications[J]. *Geoscience*, 35 (1) : 188 – 198 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X B, Hu Q H, 2018. Development of Geothermal Resources in China: A Review[J]. *Journal of Earth Science*, (2) : 452 – 467.
- Zhao J Y, Zhang W, Zhang H X, et al., 2019. Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 46 (4) : 81 – 89 (in Chinese with English abstract).
- Zheng X H, Duan C Y, Xia B, et al., 2018. Hydrogeochemical Modeling of the Shallow Thermal Water Evolution in Yangbajin Geothermal Field, Tibet[J]. *Journal of Earth Science*, 30 (4) : 870 – 878.
- Zhou R, Zhou X C, Li Y, et al., 2022. Hydrogeochemical and Isotopic Characteristics of the Hot Springs in the Litang Fault Zone, Southeast Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Water*, 14 (9) : 1496.
- Meng H R, Cao R, Chen D F, et al., 2023. Types, Distribution Characteristics, and Exploration Direction of Hydrothermal Alteration in Gudui Geothermal Field, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44 (1) : 156 – 168 (in Chinese with English abstract).
- Wu Z H, Zhang Y S, Hu D G, et al., 2008. Quaternary Normal Faulting and Its Dynamic Mechanism of the Cona-Nariyong Co Graben in South-Eastern Tibet[J]. *Quaternary Sciences*, 28 (2) : 232 – 242 (in Chinese with English abstract).
- Craig H, 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 133 (346) : 1702 – 1703.

附中文参考文献

- 曹华文, 李光明, 张林奎, 等, 2022. 喜马拉雅淡色花岗岩成因与稀有金属成矿潜力[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (2) : 189 – 211.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等, 2021. 大陆碰撞过程的火山岩响应: 以西藏林周林子宗火山岩为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 41 (2) : 332 – 339.
- 多吉卫色, 索朗次仁, 平措朗杰, 等, 2023. 西藏自治区隆子县土壤晒地球化学特征及影响因素[J]. *岩矿测试*, 42 (1) : 177 – 191.
- 顾慰祖, 庞忠和, 王全九, 2011. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社.
- 郭锦, 夏时斌, 2022. 川东褶皱带地热系统的空间载体——相互连通的断裂系统: 以四川广安牟家镇地热井为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (4) : 642 – 652.
- 郭清海, 2020. 岩浆热源型地热系统及其水文地球化学判据[J]. *地质学报*, 94 (12) : 3544 – 3554.
- 胡智文, 陈俊旭, 赵志芳, 等, 2021. 隆子县土地利用多样化及其聚集度分析[J]. *西部林业科学*, 50 (3) : 164 – 170.
- 胡志华, 高洪雷, 万汉平, 等, 2022. 西藏羊八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J]. *地质论评*, 68 (1) : 359 – 374.
- 李光明, 张林奎, 吴建阳, 等, 2020. 青藏高原南部洋板块地质重建及科学意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (1) : 1 – 14.
- 李义曼, 陈凯, 天娇, 等, 2022. 广东丰顺汤坑地热田热水中稀土元素特征及其影响因素[J]. *地质论评*, 68 (3) : 993 – 1005.
- 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]. 北京: 中国地质科学院.
- 马子宁, 韩中鹏, 李亚林, 等, 2022. 西藏南部康巴穹隆剥露历史分析: 来自低温热年代学的证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (2) : 300 – 309.
- 宁爱凤, 尹观, 刘天仇, 2000. 拉萨河地区的大气降水同位素分布特征[J]. *矿物岩石*, 20 (3) : 95 – 95.
- 卿成实, 张志, 张林奎, 等, 2023. 西藏隆子县扎西康铅锌多金属矿床X V号矿体元素分带特征研究[J]. *沉积与特提斯地质*, 43 (1) : 130 – 144.
- 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.
- 苏艳, 马致远, 刘方, 等, 2007. 西安咸阳地下水热氡过量参数研

- 究[J]. 煤田地质与勘察, 35(3): 39-41.
- 隋丽媛, 周训, 李状, 等, 2022. 安徽滁河断裂带温泉的水化学和同位素特征及成因分析[J]. 地质论评, 68(3): 981-992.
- 谭捍东, 魏文博, Martyn Unsworth, 等, 2004. 青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, 47(4): 685-690.
- 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等, 2000. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社.
- 佟伟, 廖志杰, 刘时彬, 等, 2000. 西藏温泉志[M]. 北京: 科学出版社.
- 王贵玲, 蔺文静, 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 94(7): 1923-1937.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等, 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(4): 449-450.
- 王军, 刘天仇, 尹观, 2000. 西藏雅鲁藏布江中、下游地区大气降水同位素分布特征[J]. 地质地球化学, 28(1): 63-67.
- 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(北京).
- 王迎春, 周金林, 李亮, 等, 2022. 羊八井地热田地热地质条件及其对超临界地热资源勘探的启示[J]. 天然气工业, 42(4): 35-45.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等, 2009. 藏南岩石圈导电性结构与流变性: 超宽频带大地电磁测深研究结果[J]. 中国科学, 39(11): 1591-1606.
- 卫克勤, 林瑞芬, 王志祥, 1983. 西藏羊八井地热水的氢、氧稳定同位素组成及氡含量[J]. 地球化学, 12(4): 338-346.
- 许继影, 桂和荣, 葛春贵, 等, 2021. 淮北青东煤矿深层地热水的水文地球化学特征与水源识别[J]. 工程地质学报, 29(4): 1037-1047.
- 许鹏, 谭红兵, 张燕飞, 等, 2018. 特提斯喜马拉雅带地热化学特征与物源机制[J]. 中国地质, 45(6): 1142-1154.
- 薛帅, 卢占武, 李文辉, 等, 2022. 青藏高原错那-沃卡裂谷中部电性结构及其动力学意义[J]. 地学前缘, 29(2): 393-401.
- 严宇鹏, 牛凤霞, 刘佳, 等, 2022. 雅鲁藏布江上游夏季水化学特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 42(2): 815-825.
- 喻晓, 吕新彪, 曹华文, 2023. 藏南下侏罗统日当组地球化学和碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及构造意义[J]. 沉积与特提斯地质, 1-18.
- 赵平, 金建, 张海政, 等, 1998. 西藏羊八井地热田热水的化学组成[J]. 地质科学, 33(1): 62-73.
- 张涛, 蔡五田, 李颖智, 等, 2017. 尼洋河流域水化学特征及其控制因素[J]. 环境科学, 38(11): 4537-4545.
- 张薇, 王贵玲, 赵佳怡, 等, 2021. 四川西部中高温地热流体地球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 35(1): 188-198.
- 赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 等, 2019. 四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因[J]. 水文地质工程地质, 46(4): 81-89.
- 蒙晖仁, 曹锐, 陈德凡, 等, 2023. 西藏古堆地热田水热蚀变类型、分布特征及对勘探方向的启示[J]. 地球学报, 44(1): 156-168.
- 吴中海, 张永双, 胡道功, 等, 2008. 西藏错那-拿日雍错地堑的第四纪正断层作用及其形成机制探讨[J]. 第四纪研究, 28(2): 232-242.