



移动阅读

黄豪擎, 袁兴成, 彭清华, 等, 2023. 喜马拉雅山南地区地热水和钙华地球化学特征与成因机制[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 340–356. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05004)

HUANG H Q, YUAN X C, PENG Q H, et al., 2023. Geochemical characteristics and genetic mechanism of geothermal water and travertine in the southern Himalayas[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 340–356. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05004](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.05004)

喜马拉雅山南地区地热水和钙华地球化学特征与成因机制

黄豪擎^{1,2}, 袁兴成³, 彭清华^{1,4*}, 郭游¹, 薛仲凯⁵, 旦增¹, 李健¹, 刘振峰¹,
巴桑次仁¹, 孙飞¹, 袁胜¹

(1. 中国地质调查局军民融合地质调查中心, 四川 成都 610036; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756; 4. 成都理工大学能源学院, 四川 成都 610059; 5. 中国地质调查局西安矿产资源调查中心, 陕西 西安 710100)

摘要: 喜马拉雅山南地区拥有丰富的地热资源。开展地热水和钙华成因机制的研究, 有助于了解地热资源特征和古气候变迁信息, 对丰富山南地区地热资源的系统性研究和青藏高原气候环境变化研究均具有重要理论意义。本文以喜马拉雅东段山南地区的邛多江、古堆和曲卓木的三个温泉为研究对象, 通过采集温泉地热水和钙华数据, 综合分析了地热水水-岩作用特征、热储温度估算、补给来源追溯和温泉钙华的成因类型、形成年代、古气候意义等。结果表明: 邛多江温泉的水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$ 型; 古堆日若沸泉的水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$ 型; 古堆茶卡沸泉的水化学类型为 Cl-Na 型; 曲卓木热泉的水化学类型为 $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Ca}$ 型。温泉地热水中的阴阳离子来源主要是硅酸盐岩的溶解以及部分碳酸盐岩和盐岩的溶解。由于温泉地热水均未达到水-岩平衡状态, 利用石英地热温标得出浅部热储温度为 $129\sim 148^\circ\text{C}$, 利用硅-焓图解得出深部热储温度和冷水混合比例为 $181\sim 221^\circ\text{C}$ 和 $58\%\sim 65\%$; 氢氧同位素显示地热水补给高程为 $4\,467\sim 5\,303\text{ m}$ 。在山南地区, 地热水受到高海拔大气降水和冰雪融水的补给, 通过主要断裂构造运移到深部加热并在高温高压下沿着裂隙、节理上升, 然后与浅层冷水混合, 最后沿浅部地表松散破碎带出露形成温泉。温泉钙华 CaO 占比 $43.43\%\sim 56.66\%$, 且显示出轻稀土元素富集的特点; $\delta^{13}\text{C}$ 指示温泉钙华为热成因, 钙华中的碳主要来自于深部碳酸盐岩的变质成因, 仅古堆日若沸泉有部分地幔碳; ^{14}C 测年显示钙华的年龄为 $21\,280\pm 70\sim 43\,500$ 年, Mg/Ca 、 Mg/Sr 比值指示降雨量在 43.50 ka 年由峰值迅速减弱, 并在 $42\text{ ka}\sim 21.28\text{ ka}$ 年期间降雨量又逐渐增强。

关键词: 水文地球化学; 温泉钙华; 热储温度; 氢氧同位素; 碳同位素

中图分类号: P314

文献标识码: A

Geochemical characteristics and genetic mechanism of geothermal water and travertine in the southern Himalayas

HUANG Haoqing^{1,2}, YUAN Xingcheng³, PENG Qinghua^{1,4*}, GUO You¹, XUE Zhongkai⁵, DAN Zeng¹,
LI Jian¹, LIU Zhenfeng¹, BASANG Ciren¹, SUN Fei¹, YUAN Sheng¹

收稿日期: 2023-01-18; 改回日期: 2023-05-03; 责任编辑: 黄春梅; 科学编辑: 崔晓庄

作者简介: 黄豪擎(1993—), 男, 工程师, 主要从事环境地质、能源地质和岩石地球化学研究工作。E-mail: huanghhq999@163.com

通讯作者: 彭清华(1984—), 男, 在职博士, 高级工程师, 主要从事油气地质、地热地质综合地质研究工作。E-mail: 253630136@qq.com

资助项目: 西藏错那-察隅地区地热资源调查评价(DD20211548)、国家自然科学基金(42072313)、四川省重点研发项目(23ZDYF2589)

(1. Civil-Military Integration Center of China Geological Survey, Chengdu 610036, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China; 4. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 5. Xi'an Mineral Resources Survey Center of China Geological Survey, Xi'an 710100, China)

Abstract: The southern Himalayas is rich in geothermal resources. The study of the formation mechanism of geothermal water and travertine is helpful to understand the characteristics of geothermal resources and the information of paleoclimate change. It is of great theoretical significance to enrich the systematic study of geothermal resources in Shannan and the study of climatic and environmental changes in Qinghai-Tibet Plateau. In this study, three hot springs in Qionghuajiang, Gudui and Quzhuomu in Shannan area of eastern Himalayas are taken as the research objects. By collecting the data of hot spring geothermal water and travertine, the characteristics of geothermal water-rock interaction, the estimation of geothermal reservoir temperature of geothermal water, the traceability of geothermal water supply source, the genetic type and formation age of hot spring travertine and the climatic significance of travertine are comprehensively analyzed. The results show that the hydrochemical type of Qionghuajiang hot spring is $\text{HCO}_3\text{-Cl-Na-Ca}$ type; The hydrochemical type of Guduiruo boiling spring is $\text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Ca-Na}$ type. The hydrochemical type of Guduihaka boiling spring is Cl-Na type; The hydrochemical type of Quzhuomu hot spring is $\text{Cl-SO}_4\text{-Na-Ca}$. The source of anions and cations in hot spring geothermal water is mainly the dissolution of silicate rocks and the dissolution of some carbonate rocks and salt rocks. Since the hot spring geothermal water has not reached the water-rock equilibrium state, the shallow thermal reservoir temperature is $129\sim 148^\circ\text{C}$ by using the quartz geothermal temperature scale, and the deep thermal reservoir temperature and cold water mixing ratio are $181\sim 221^\circ\text{C}$ and $58\%\sim 65\%$ by using the silicon-enthalpy diagram. Hydrogen and oxygen isotopes show that the geothermal water supply elevation is $4467\sim 5303$ m. In Shannan area, geothermal water is recharged by high-altitude atmospheric precipitation and ice and snow melt water. It migrates to the deep through the main fault structure to heat and rises along the fissures and joints under high temperature and high pressure. Then it is mixed with shallow cold water, and finally exposed along the shallow surface loose fracture zone to form a hot spring. Hot spring travertine CaO accounts for $43.43\%\sim 56.66\%$, and shows the characteristics of light rare earth element enrichment; the $\delta^{13}\text{C}$ indicates that the hot spring travertine is thermogenic, and the carbon in travertine is mainly derived from the metamorphic origin of deep carbonate rocks, and only part of mantle carbon is found in Guduiruo boiling spring; ^{14}C dating shows that the age of travertine is $21280\pm 70\sim 43500$ years, the ratios of Mg/Ca and Mg/Sr indicate that the rainfall decreased rapidly from the peak in 43.50 ka, and gradually increased from 42 ka to 21.28 ka.

Key words: hydrogeochemistry; hot spring travertine; reservoir temperature; hydrogen and oxygen isotope; carbon isotope

0 引言

近年来地热资源愈发受到世界各地的关注和开发利用(Guo et al., 2017; Karimi et al., 2017),我国高温地热系统主要分布在西藏、云南和四川西部等地区(廖志杰, 1999),西藏作为地中海-喜马拉雅地热带的重要组成部分,拥有丰富的地热资源(Wang et al., 2018)。研究区位处西藏南部山南地区,显示出较高的地温场,发育温泉水温达 83°C ,可见钙华出露(蒙晖仁等, 2023)。

前人研究主要集中在研究区的地热水水化学、形成机理等(Guo et al., 2019; Liu et al., 2019; Wang and Zheng, 2019; 王思琪, 2017; 章旭等, 2020),以及区域上温泉钙华形成的影响因素、C-O 同位素指

示来源、年代学、古气候信息等(牛新生等, 2017; 章旭, 2019; 刘海生等, 2020; 杜磊, 2021)。但在研究区温泉水化学与钙华相结合的成因机制、古气候信息的研究较为薄弱,亟需开展系统性研究,为喜马拉雅山南地区地热资源的开发利用和生态环境保护提供科学指导。

地热资源的开发利用需要分析地热水的地球化学特征,以便了解地热资源特征(Li et al., 2020)。运用 Schöller 图、Piper 三线图展示地热水中常量元素的物理参数变化和识别水化学类型(Piper, 1944; Zhang et al., 2018)。利用吉布斯图描述影响地下水水化学成分的主导因素,并结合离子组合摩尔比值图、锶同位素和矿物饱和指数的分析,综合分析地热水水-岩作用特征和影响因素(Pu et al.,

2012; Singh et al., 2017; Marandi and Shand, 2018; 孙岐发等, 2020; 张云辉等, 2021; Yu et al., 2022)。通过判断地热水平衡状态并结合 SiO_2 温度计和硅-焓图解法估算地热水热储温度, 开展 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素研究追溯地热水补给来源和补给高程(Fournier, 1977; Truesdell and Fournier, 1977; Giggenbach, 1988; Xu et al., 2022; 袁兴成等, 2023)。温泉排出地表过程形成的钙华, 可用于解释局部水文循环中的物质迁移规律, 亦可分析常量、微量元素, 利用碳同位素(^{13}C 和 ^{14}C)确定钙华类型、形成年代和古气候信息解读(Pentecost, 1995; Ford and Pedley, 1996; Andreo et al., 1999; 刘再华等, 2000; 汪智军等, 2018)。

本文以喜马拉雅山南地区邛多江温泉、古堆日若沸泉、古堆茶卡沸泉和曲卓木热泉为研究对象, 利用温泉地热水的水化学物理参数、锶同位素和氢氧同位素以及温泉钙华的成分特征和碳氧同位素特征, 分析探讨地热水水-岩作用特征、热储温度估算、补给来源追溯; 温泉钙华的常量和微量元素特征、类型和形成年代以及指示的气候意义, 对喜马拉雅山南地区地热水和钙华的形成和演化进行较为系统的研究。以期为该地热资源可持续开发和保护提供参考依据, 对丰富藏南地热资源的系统性研究和青藏高原气候环境变化研究具有重要理论意义。

1 研究区概况

自新生代以来, 印度板块和欧亚板块的碰撞引发了青藏高原的隆起。同时, 印度陆壳向青藏高原俯冲, 导致深部地壳发生部分熔融, 并为青藏高原地热资源的形成提供了构造背景和热条件(Tan et al., 2014)。青藏高原构造单元由一系列东西走向的大陆块组成: 松潘-甘孜、羌塘、拉萨、特提斯喜马拉雅、高喜马拉雅和小喜马拉雅(Wang et al., 2020)。青藏高原历经强烈热液活动, 一般被认为是大陆增生的后生产物(Zhang et al., 2015)。研究区(图 1a)温泉大地构造位置属拉轨岗日被动陆缘盆地(曹华文等, 2022), 位处西藏南部南北向裂谷带最东侧的错那-沃卡裂谷中部。该裂谷南起西藏错那县南, 向北经拿日雍错、扎西康矿区、古堆地热田、雅拉香波穹隆等, 包含三个地堑, 由北向南依次为: 沃卡地堑、邛多江地堑、错那-拿日雍错地堑, 它们横切第三纪和 EW 向构造带或逆冲断裂,

堆积了厚度不等的沉积物(王思琪, 2017)。青藏高原几乎所有的地热泉中都广泛沉积了大规模的硅石烧结体或钙华, 尽管现今的地热活动规模较小, 但仍分布着厚而古老的地热沉积阶地(Zheng, 1989; Tan et al., 2018)。

研究区现代气候为典型的大陆高原温带半干旱季风气候, 年均气温 8.2°C ; 年均降水量 408 mm, 主要集中在 6 月至 9 月; 地势北高南低, 平均海拔 4500 m, 热水的沸点为 83°C (王思琪, 2017)。研究区域的地表水相对发育, 出露的温泉均在河流附近(图 1b)。青藏高原南部的基底岩石主要是前寒武纪变质岩(Guynn et al., 2006)。覆盖层序包括古生代至中生代沉积岩, 如页岩、石灰岩和砂岩; 此外, 还出露了中生代岩浆岩(Zhu et al., 2013)。在曲卓木地区, 主要地层单元有: 全新统冲积层、早白垩系砂岩和英安岩、晚侏罗纪石英砂岩和粉砂岩、中侏罗系岩屑砂岩和杏仁玄武岩、早侏罗纪厚层灰岩(董随亮等, 2018)。在古堆地区随着深度的增加, 主要层序单元: 第四系洪水冲积层和第四系硅华、侏罗系日当群、三叠系涅如组和白垩系闪长岩或辉绿岩(廖志杰和赵平, 1999)。在邛多江地区主要出露第四系更新统地层。

2 样品采集与测试方法

于 2022 年 8 月 10—12 日, 在西藏南部的邛多江、古堆和曲卓木地区采样了 5 个温泉地热水和 5 个温泉钙华样品($91^\circ46'\text{N}\sim92^\circ06'\text{N}$ 、 $28^\circ12'\text{E}\sim28^\circ55'\text{E}$)。对于地热水样品, 现场测定使用德国 Multi3630IDS 便携式多参数水质分析仪, 测量了地热水的温度、pH 值和溶解性总固体(TDS)。在采样现场, HCO_3^- 采用格兰氏滴定法测量。水样使用 $0.45\ \mu\text{m}$ 过滤膜过滤, 550 mm 高密度聚乙烯瓶收集水样。取样前, 这些瓶子至少清洗和漂洗三次。在现场工作结束后, 采集的样品送至科荟测试(天津)科技有限公司进行水质全分析和同位素分析。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)分析样品中的主要阳离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}), 而阴离子(Cl^- 和 SO_4^{2-})通过离子色谱法(Dionex ICS-1100)进行分析。对于所有样品, 主要阳离子和阴离子之间的电荷平衡误差低于 $\pm 10\%$ 。氢、氧、锶同位素使用电感耦合等离子体质谱分析仪(ICP-MS)在温度 25°C 、湿度 50% 条件下进行检测。结果以维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)作为标准, 采用传

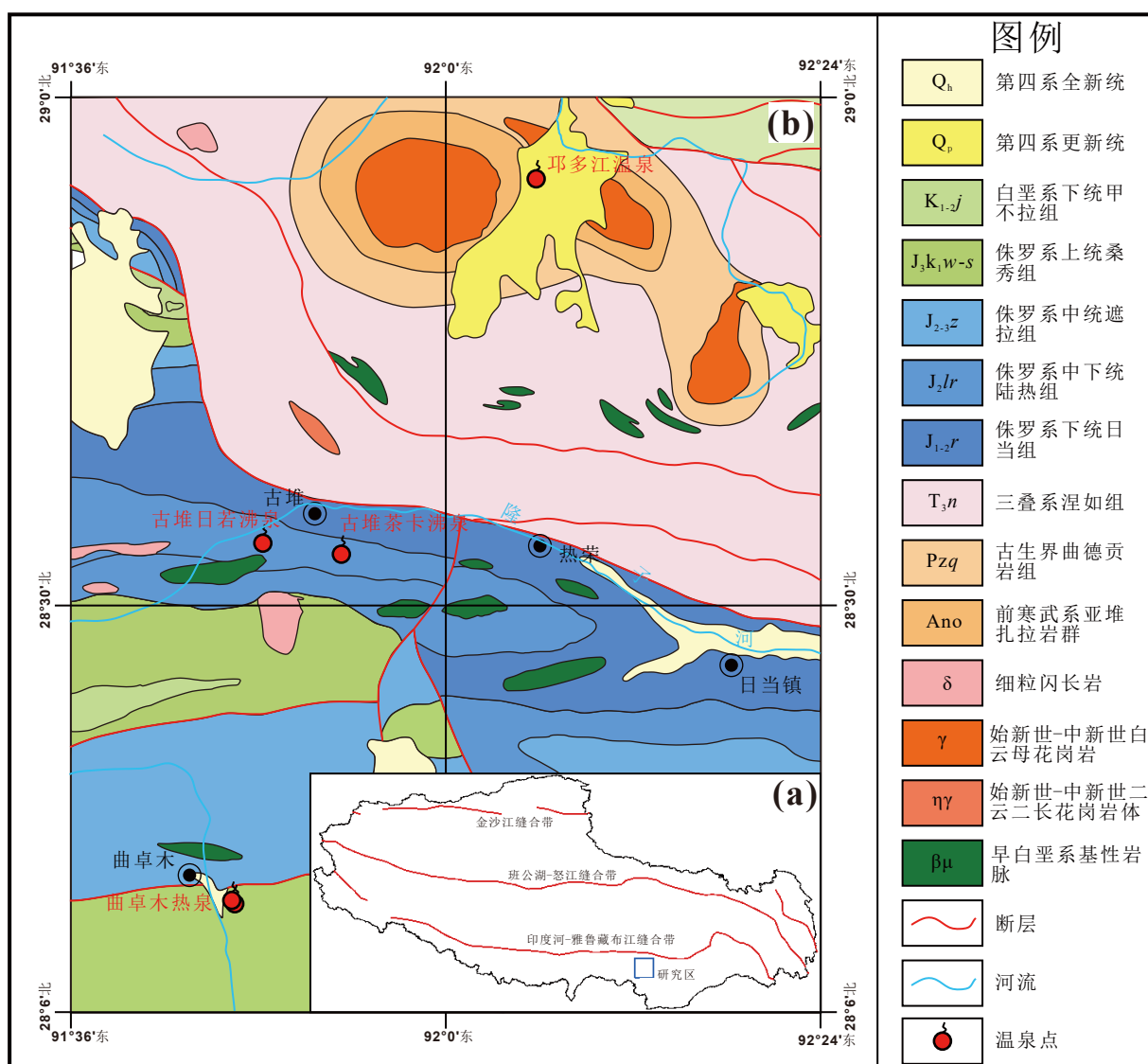


图1 研究区区域位置图(a)(根据文献王鹏等, 2016 修改)和地质简图和采样点分布图(b)

Fig. 1 (a) Study area location map(a) (modified from Wang et al., 2016) and geological map and sampling point distribution map(b)

统的 $\delta(\text{‰})$ 表示法, δD 和 $\delta^{18}O$ 的分析精度分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。对于温泉钙华样品, 于现场采集后送至实验室检测, 常量元素分析采用 Axios^{max} X 射线荧光光谱仪完成, 微量元素分析采用 NexION300D 等离子体质谱仪完成。利用 FinniganMAT-253 稳定同位素质谱仪测定 C-O 同位素, 采用常规的 δ 以千分数(‰)表示。

3 实验结果

3.1 地热水水化学特征

表1所示邛多江温泉、古堆日若沸泉、古堆茶卡沸泉和曲卓木热泉(1和2)地热水的主要物理性

质和化学成分, Schöller 图(图2)指示藏南地热水的物理化学参数变化(Zhang et al., 2018)。研究区地热水的出露温度变化范围为 $36\sim 83^{\circ}\text{C}$ (均值 74°C), 其中邛多江温泉的温度最低(36°C), 其它均较高; 地热水 pH 值变化范围为 $6.59\sim 8.42$ (均值 7.33); 地热水 TDS 变化范围 $396\sim 2910\text{ mg/L}$ (均值 1717 mg/L), 其中 TDS 最大、最小的温泉分别为邛多江温泉、古堆日若沸泉。研究区地热水主要阳离子为 Na^+ 和 Ca^{2+} , 含量范围分别为 $38.79\sim 596.00\text{ mg/L}$ (均值 320.76 mg/L)、 $3.60\sim 218.00\text{ mg/L}$ (均值 106.84 mg/L); 其次为 K^+ , 含量范围为 $5.27\sim 71.60\text{ mg/L}$ (均值 44.57 mg/L); 最低的为 Mg^{2+} , 含量范围

表 1 研究区地热水水文地球化学特征
Table 1 Hydrogeochemical results of geothermal waters in the study area

样品名称	高程(m)	温度(℃)	pH	TDS	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
				mg/L						
邛多江温泉	4 380	36	6.59	2 910	456.00	71.60	32.60	218.00	627.96	150.51
古堆日若沸泉	4 526	83	7.06	396	38.79	5.27	10.74	49.46	32.44	73.14
古堆茶卡沸泉	4 533	83	8.42	2 080	596.00	69.20	0.13	3.60	710.08	203.15
曲卓木热泉1	4 313	82	7.28	1 640	293.00	45.90	13.90	107.18	379.19	357.76
曲卓木热泉2	4 306	82	7.28	1 560	220.00	30.90	14.80	155.98	236.44	453.04

样品名称	HCO ₃ ⁻	Sr	SiO ₂	离子平衡(%)	δ ¹⁸ O	δD	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	钙华δ ¹³ C	钙华δ ¹⁸ O
	mg/L								
邛多江温泉	1 144.96	18.50	112.84	5.8	− 18.47	− 148.6	0.715 580	+1.5	− 18.2
古堆日若沸泉	174.70	0.58	106.61	1.4	− 16.91	− 146.2	0.709 068	− 1.5	− 26.5
古堆茶卡沸泉	351.40	0.55	121.60	4.8	− 15.48	− 139.3	0.709 701	+2.1	− 15.7
曲卓木热泉1	322.87	2.26	87.12	7.2	− 16.13	− 130.9	0.715 168	+2.4	− 21.6
曲卓木热泉2	344.92	2.08	88.21	6.2	− 16.72	− 130.2	0.713 193	+0.5	− 26.3

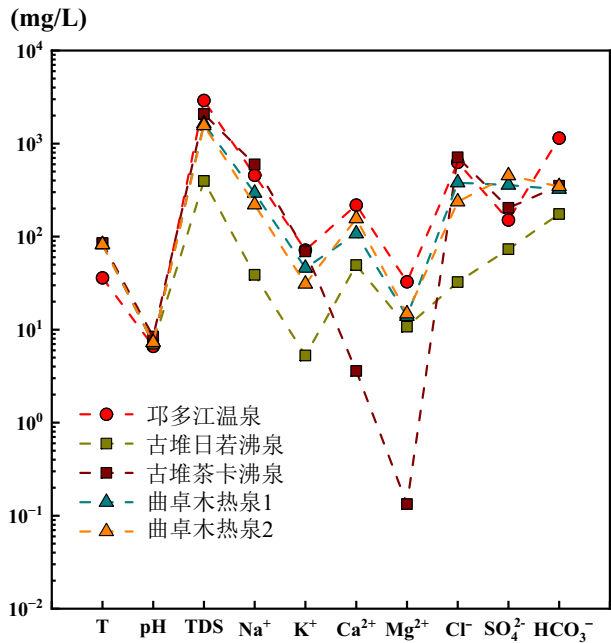


图 2 研究区地热水主要水化学参数 Schöller 图

Fig. 2 Schöller diagram of main hydrochemical parameters of geothermal waters in the study area

为 0.13~32.60 mg/L(均值 14.43 mg/L)。不同温泉中地热水的阴离子含量差异较大,其中 Cl⁻、SO₄²⁻

和 HCO₃⁻的含量变化范围分别为 32.44~710.08 mg/L(均值 397.22 mg/L)、73.14~453.04 mg/L(均值 247.52 mg/L)和 174.70~1 144.96 mg/L(均值 467.77 mg/L)。由各离子的平均值我们可以初步看出,研究区主要阴阳离子的大小关系分别为:Na⁺>Ca²⁺>K⁺>Mg²⁺,HCO₃⁻>Cl⁻>SO₄²⁻。此外,Sr²⁺、F⁻和 SiO₂的含量范围分别为 0.55~18.50 mg/L(均值 4.79 mg/L)、0.10~13.68 mg/L(均值 4.24 mg/L)和 87.12~121.60 mg/L(均值 103.28 mg/L)。

图 3Piper 三线图(Piper, 1944)所示,不同位置温泉地热水的水化学类型明显不同。邛多江温泉的水化学类型为 HCO₃·Cl-Na·Ca 型,古堆日若沸泉的水化学类型为 HCO₃·SO₄-Ca·Na 型,古堆茶卡沸泉的水化学类型为 Cl-Na 型,曲卓木热泉(1 和 2)的水化学类型为 Cl·SO₄-Na·Ca 型。

3.2 温泉钙华地球化学特征

在 5 个温泉钙华(表 2、表 3 和图 4a)的常量元素中,CaO 的含量最高,为 43.43%~56.66%(均值 52.55%),CaO 和烧失量之和的平均值为 93.47%,主要代表了方解石的含量(余石勇, 2022)。SiO₂ 含

量次之 0.02%~18.91%(均值 5.09%), 其中古堆茶卡沸泉 SiO_2 含量最高, 可能是该泉储层温度较高导致硅酸盐矿物析出的速率较快。 TFe_2O_3 、 MgO 和 Al_2O_3 的含量较低, 分别为 0.14%~1.70%、0.25%~0.66% 和 0.05%~1.23%(均值 0.84%、0.66%、0.29%), 含 Fe、Al 钙华多呈黄色。 MgO 平均值 0.66%, 表明钙华中含有少量白云石。其它常量元素的含量非常低, 大部分小于 0.1%。微量元素中

Sr 含量最高, 为 340.56~3 336.04 $\mu\text{g/g}$ (均值 1 436.74 $\mu\text{g/g}$), 其次为 Ba 和 Ti, 分别为 37.65~300.77 $\mu\text{g/g}$ (均值 130.43 $\mu\text{g/g}$)和 1.54~285.61 $\mu\text{g/g}$ (均值 61.13 $\mu\text{g/g}$)。

由于稀土元素具有相似的地球化学性质, 且在流体溶滤、运移、沉积过程中不易迁移, 在地质过程中是以整体形式出现, 因此可作为重要的物源示踪剂(杜磊, 2021)。研究区温泉钙华稀土元素

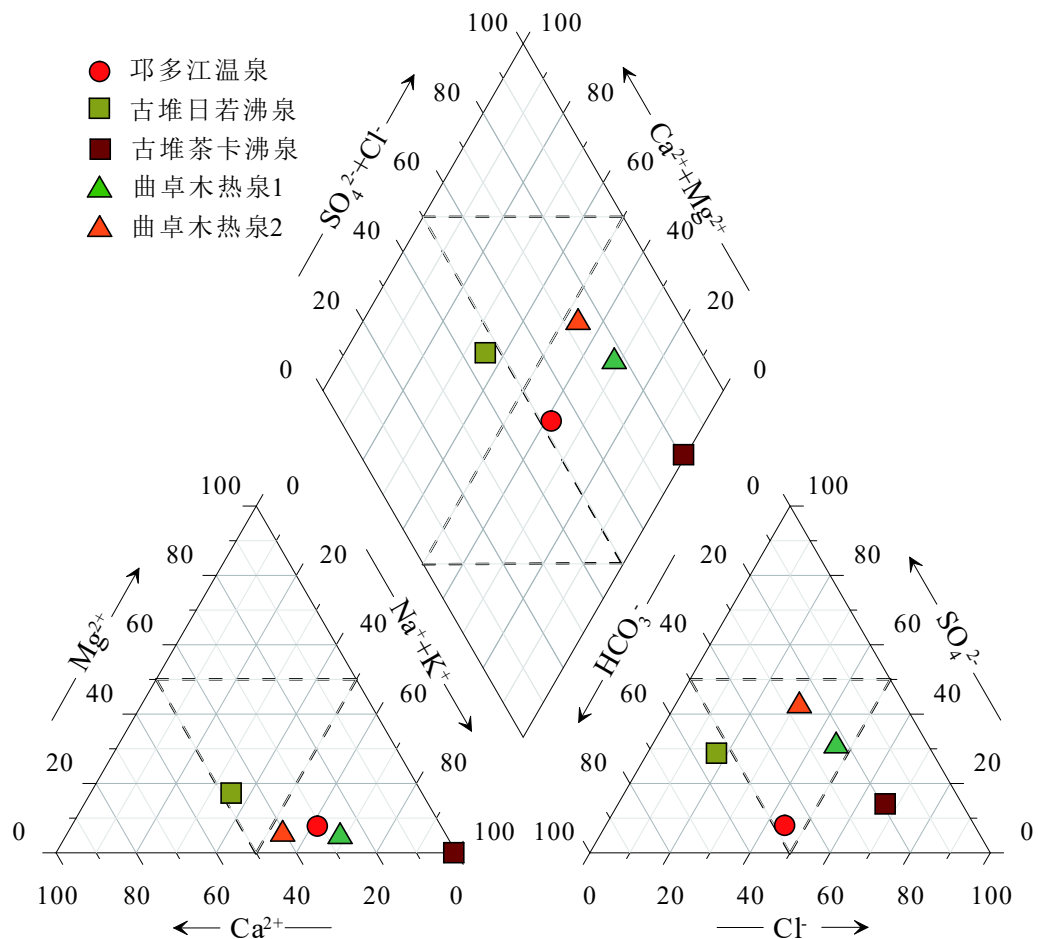


图3 研究区地热水的 Piper 三线图

Fig. 3 Piper triangle diagram of geothermal waters in the study area

表2 研究区温泉钙华常量元素含量(%)

Table 2 Major element content of hot spring travertine in the study area (%)

样品名称	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	TiO_2	CaO	TFe_2O_3	MnO	LOI
邛多江温泉	1.18	0.06	0.56	0.02	0.02	0.04	0.01	53.63	1.16	0.10	42.25
古堆日若沸泉	—	0.05	1.49	0.02	0.01	0.02	0.01	54.82	—	0.06	43.16
古堆茶卡沸泉	18.91	1.23	0.58	0.13	0.19	0.04	0.05	43.43	0.37	0.19	34.07
曲阜木热泉1	0.25	0.05	0.41	0.00	0.02	0.01	0.01	55.20	1.70	0.46	41.35
曲阜木热泉2	0.02	0.07	0.25	—	0.01	0.06	0.01	55.66	0.14	0.04	43.76

(REE)总含量为 0.37~15.11 $\mu\text{g/g}$ (均值 3.64 $\mu\text{g/g}$),明显低于西藏麻米错(20.82 $\mu\text{g/g}$)和云南腾冲(8.51 $\mu\text{g/g}$)(杜磊, 2021; 余石勇, 2022),表明不同地区的钙华形成过程不尽相同。轻稀土元素(LREE)和重稀土元素(HREE)的含量变化范围分别为 0.34~13.56 $\mu\text{g/g}$ (均值 3.16 $\mu\text{g/g}$)和 0.03~1.55 $\mu\text{g/g}$ (均值 0.48 $\mu\text{g/g}$),轻稀土元素含量相对重稀土元素较高。轻重稀土元素标准化后比值可以反映轻重稀土的分异程度(付雷等, 2019),球粒陨石标准化稀土分布模式图(图 4b)显示古堆日若沸泉、曲卓木热泉(1 和 2)和古堆茶卡沸泉温泉钙华均为右倾斜型,显示出轻稀土元素富集的特点,而邛多江温泉的倾斜现象不明显。稀土元素中 Ce 和 Eu 化学性

质活泼,在地质作用过程中容易出现分馏现象,一般在酸性条件下显示出 Eu 贫集和 Ce 富集的特点,碱性条件下则相反(亨德森, 1989)。研究区钙华的 Eu 和 Ce 均小于 1,表现为亏损状态。Eu 亏损是由于深部地壳在偏酸性的状态下补给 CO_2 给地热水,热水上升过程中脱气形成温泉钙华。Ce 亏损可能是 Ce^{4+} 的溶解度较 Ce^{3+} 的溶解度小,更难从沉积流体中沉淀析出,从而造成沉积物 Ce 的负异常(赵元艺等, 2010)。邛多江和古堆茶卡沸泉的稀土元素分配系数更高,表明在形成过程中有更多外源物质加入钙华沉积(杜磊, 2021)。古堆日若沸泉、曲卓木热泉(1 和 2)的钙华变化趋势相似,表明稀土含量变化趋势差异小,形成钙华的原岩成分相似。

表 3 研究区温泉钙华微量元素含量 ($\mu\text{g/g}$)
Table 3 The content of travertine rare earth and trace elements in hot springs in the study area ($\mu\text{g/g}$)

样品名称	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
邛多江温泉	0.34	0.31	0.06	0.20	0.07	0.05	0.078	0.021	0.142	0.046	0.157
古堆日若沸泉	0.22	0.06	0.03	0.07	0.04	0.04	0.004	0.005	0.007	0.006	0.008
古堆茶卡沸泉	3.28	5.98	0.76	2.84	0.57	0.13	0.481	0.080	0.408	0.084	0.223
曲卓木热泉1	0.20	0.03	0.02	0.03	0.03	0.02	0.001	0.004	0.005	0.005	0.006
曲卓木热泉2	0.22	0.07	0.03	0.05	0.03	0.03	0.007	0.005	0.010	0.006	0.010

样品名称	Tm	Yb	Lu	Ti	Rb	Sr	Pb	Zr	Ba	Th	Ta
邛多江温泉	0.031	0.214	0.040	9.33	1.52	850.82	0.36	0.44	74.05	0.13	0.01
古堆日若沸泉	0.005	0.002	0.003	2.95	0.73	1 717.23	0.33	0.14	74.85	0.11	0.09
古堆茶卡沸泉	0.037	0.205	0.030	285.61	25.50	939.02	1.82	8.64	300.77	1.20	0.09
曲卓木热泉1	0.004	0.001	0.003	1.54	1.60	340.56	0.25	0.15	164.84	0.10	0.01
曲卓木热泉2	0.005	0.005	0.004	6.20	0.93	3 336.04	1.23	2.00	37.65	0.10	0.01

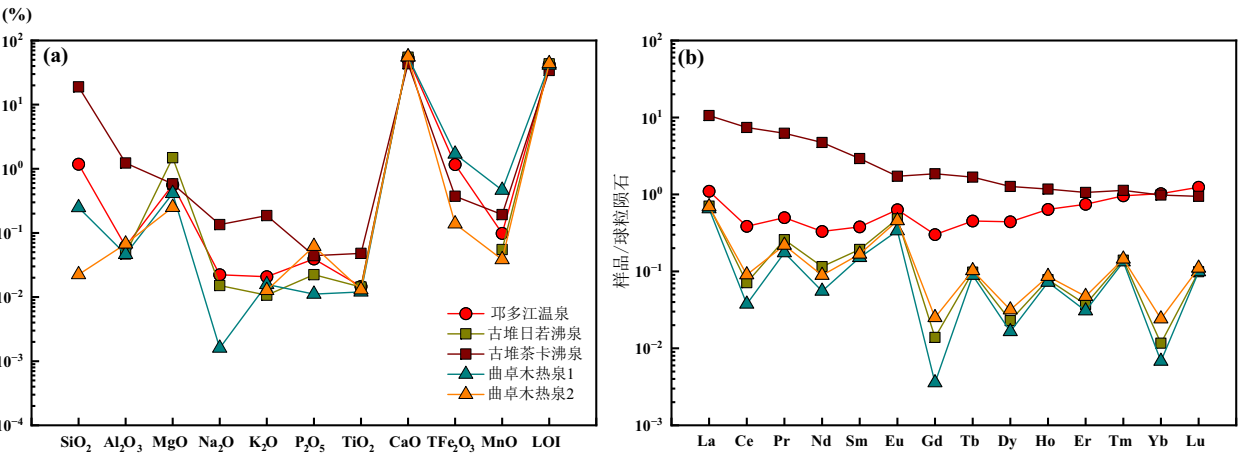


图 4 研究区温泉钙华的常量元素变化趋势图 (a) 和球粒陨石标准化稀土分布模式图 (b)(球粒陨石数据引自 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 4 (a) Change trend of major elements of hot spring travertine in the study area (a) and Chondrite-normalized REE spider diagrams (b) (chondritenormalized data after Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 地热水水-岩作用特征

4.1.1 控制因素分析

通过分析地热水水化学特征可知,藏南地热水中的 TDS、 Na^+ 和 Cl^- 含量均较高,说明地热水的径流路径较长,水岩作用强烈(章旭等, 2019)。可以通过吉布斯图来描述影响水化学成分的主导因素。通过吉布斯图,将控制地下水化学组分的机理划分为:降水、水岩和蒸发作用 3 种(Marandi and Shand, 2018)。图 5 绘制了藏南 5 个温泉中地热水的吉布斯图。从图中可以看出,古堆日若沸泉位于水岩作用区,邛多江温泉、曲卓木热泉(1 和 2)和古堆茶卡沸泉则位于水岩作用区和蒸发作用区的过渡带,均远离大气降水区,说明研究区地热水水化学成分的控制因素主要是由水岩作用控和蒸发作用共同控制。

4.1.2 离子组合比分析

岩盐溶解产生的($\text{Na}^+ + \text{K}^+$)和 Cl^- 之间的摩尔比关系通常用于揭示地下水中 Na^+ 和 K^+ 的来源(孙岐发等, 2020)。图 6a 可以看出,研究区地热水样点均略微偏离 $y=x$ 线,趋向于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 轴,说明地热水中存在岩盐的溶解,但 Na^+ 和 K^+ 并不是完全来自

于岩盐,还可能由其它矿物溶解提供,如硅酸盐矿物(钠、钾长石等)的溶解;地下水中的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要来自碳酸盐或硅酸盐及蒸发岩的溶解,因此可以用 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ 之间的摩尔比来判断 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的主要来源(Yu et al., 2022)。如图 6b 所示,研究区地热水样点偏向于 $y=x$ 线上方,说明地热水中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 主要是来自硅酸盐溶解以及部分岩盐和碳酸盐的溶解; Ca^{2+} 与 HCO_3^- 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ 与 HCO_3^- 之间的摩尔比值可判断碳酸盐岩溶解对水中主要离子成分的影响(严宇鹏等, 2022)。如图 6c 和 6d,古堆茶卡沸泉的 HCO_3^- 偏高,多余的 HCO_3^- 可能来自深部 CO_2 溶解。邛多江温泉样点位于方解石溶解线附近,说明该温泉的 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 受到方解石的影响较大。古堆日若沸泉和曲卓木热泉(1 和 2)的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量偏多,可以利用 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的摩尔比来进一步阐明碳酸盐的溶解(Hamzah et al., 2017; Zhang et al., 2021b)。可以看出地热水中的 Ca^{2+} 也受到硅酸盐溶解的影响(图 6f),多余的 Ca^{2+} 可能是来自钙硅酸盐矿物的溶解(张云辉等, 2021); Ca^{2+} 与 SO_4^{2-} 之间的摩尔比值呈 $y=x$ 的线性关系,则表明水中的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 来源于石膏的溶解反映(Zhang et al., 2021c; 章旭等, 2023)。研究区地热水样点均偏离石膏溶解线,说

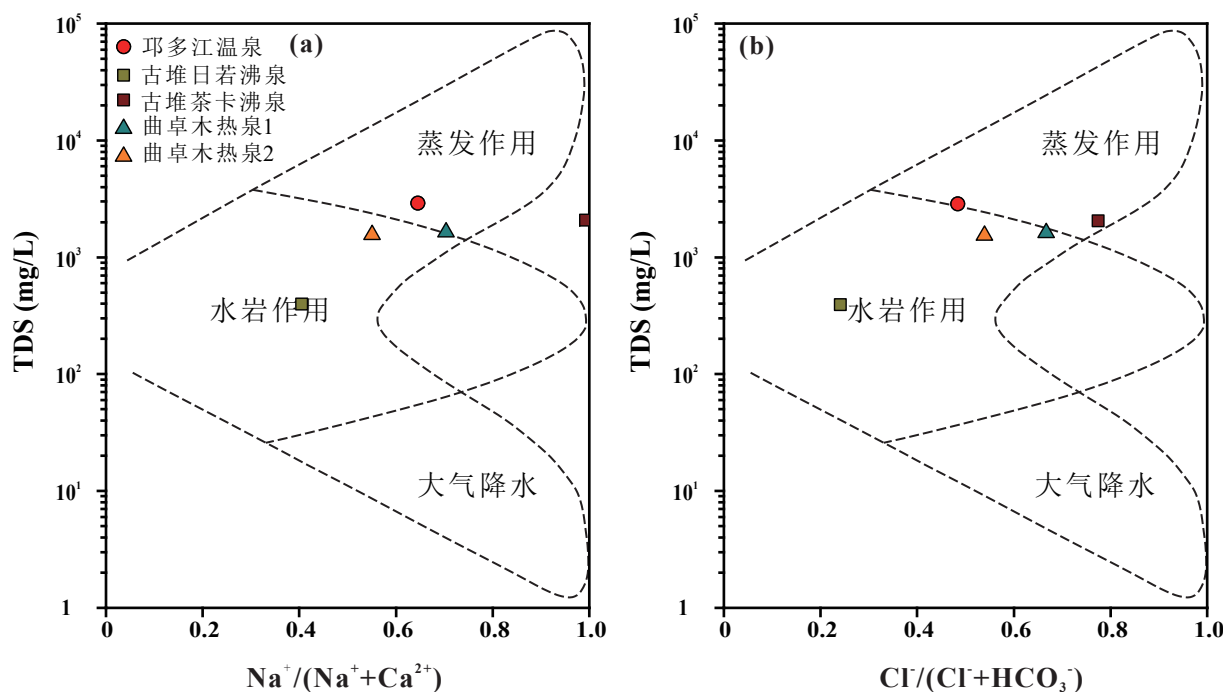


图 5 研究区地热水吉布斯图解

Fig. 5 Gibbs diagram of geothermal waters in the study area

明石膏矿物的溶解对 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的影响较小(图 6e)。

$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ 和 $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ 的比值图被广泛的用于说明离子交换对地下水的的影响(Pan et al., 2018; 周鹏等, 2023)。在图 7a 中, 研究区的地热样点均接近离子交换线, 说明存在阳离子交换作用。另外, Schoeller 指数 $\text{CAI-I} = (\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)) / \text{Cl}^-$ 、 $\text{CAI-II} = (\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)) / (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{NO}_3^-)$ 可以证实阳离子交换类型(Zhang et al., 2021a)。在本研究中, 全部地热水样品的 CAI-I 和 CAI-II 值均低于零(图 7b), 说明表明发生了正阳离子交换, 从而导致地热水中 Na^+ 和 K^+ 含量增加, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量减少。

4.1.3 锶同位素分析

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 可作为水-岩相互作用的保守示踪剂。通常, 碳酸盐岩的 Sr 浓度较高, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较低; 硅酸盐岩的 Sr 浓度较低, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高(Palmer and Edmond, 1989; Palmer and Edmond, 1992; Blum, 1993)。根据前人研究表明, 海洋碳酸盐中的

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.707~0.709(Han and Liu, 2006), 中国长江流域硅酸盐岩石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为通常 >0.715(Wang et al., 2007), 西藏地区花岗岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.712~0.718(赵平等, 2003)。如图 8 所示, 研究区的邛多江温泉和曲卓木热泉(1 和 2)主要是位于硅酸盐岩和花岗岩区, 说明这 3 个温泉地热水可能是受到与硅酸盐岩和花岗岩相似的源溶解影响; 古堆日若沸泉和古堆茶卡沸泉靠近碳酸盐岩区, 说明这 2 个温泉地热水可能是受到与碳酸盐岩相似的源溶解影响。值得注意的是, 邛多江温泉的 Sr 含量(18.5 mg/L)明显高于其它温泉。图 5 可以看出邛多江温泉主要是受到蒸发作用的影响, 且邛多江温泉几乎所有离子的含量均高于其它温泉(表 1), 说明蒸发作用对该温泉的影响强烈, 导致 Sr 含量及其它离子含量偏高。

4.1.4 矿物饱和指数(SI)分析

饱和指数(SI)对于评估矿物与地下水之间的平衡和反应性非常重要。在水-岩相互作用过程中, 矿物平衡计算可以反映天然水系统的热力学过程

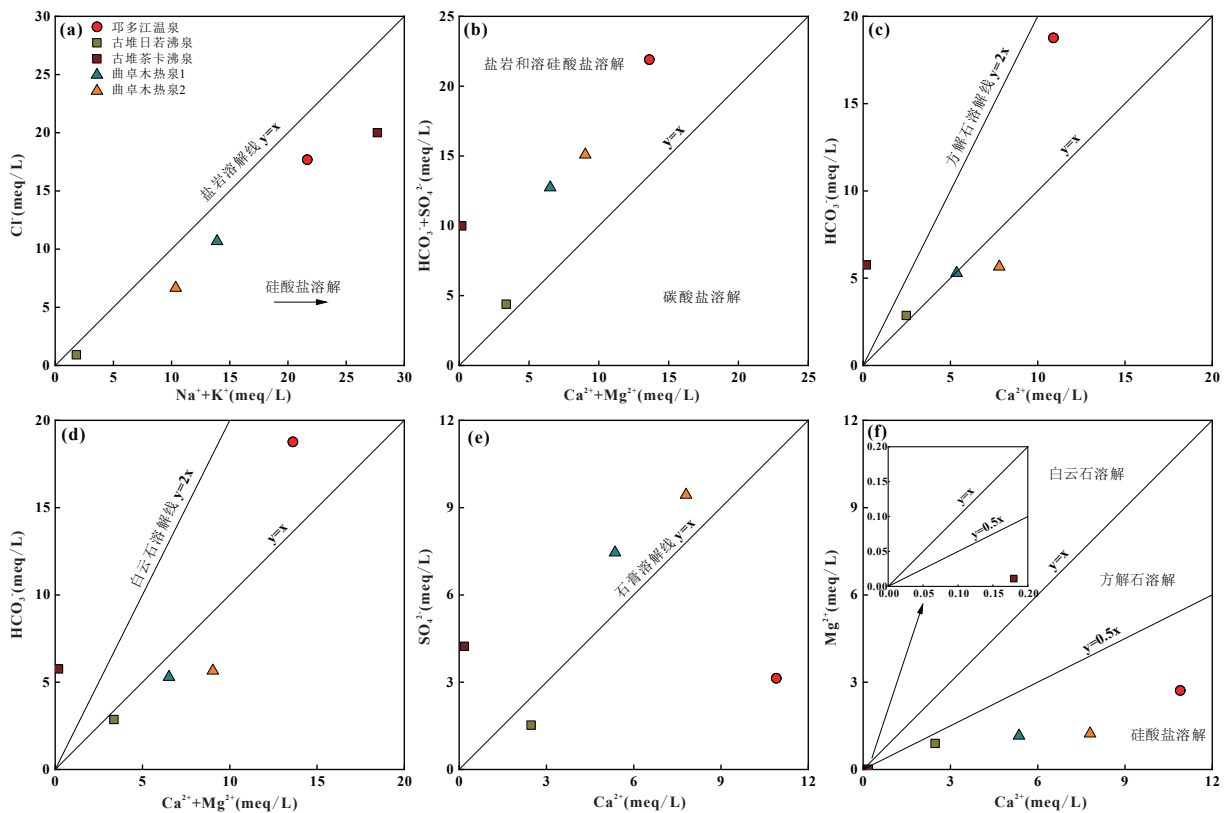


图 6 离子组合摩尔比值关系图 (a. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. Cl^- ; b. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$; c. Ca^{2+} vs. HCO_3^- ; d. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. HCO_3^- ; e. Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} ; f. Ca^{2+} vs. Mg^{2+})

Fig. 6 Molar ratio diagrams of ion combination (a. $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. Cl^- ; b. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$; c. Ca^{2+} vs. HCO_3^- ; d. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. HCO_3^- ; e. Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} ; f. Ca^{2+} vs. Mg^{2+})

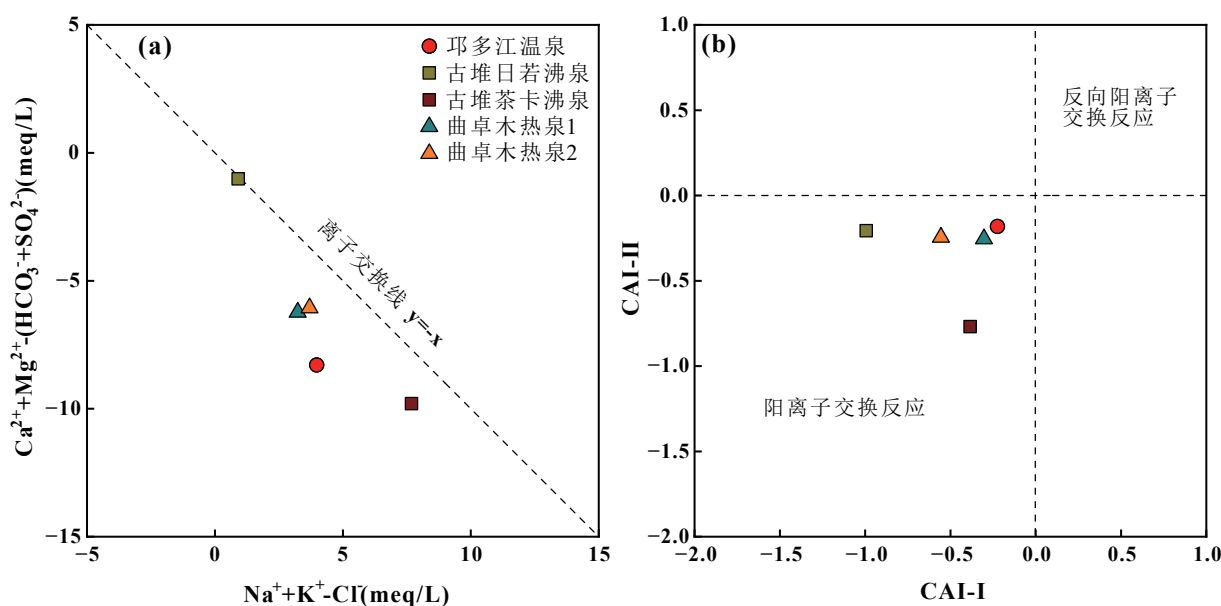
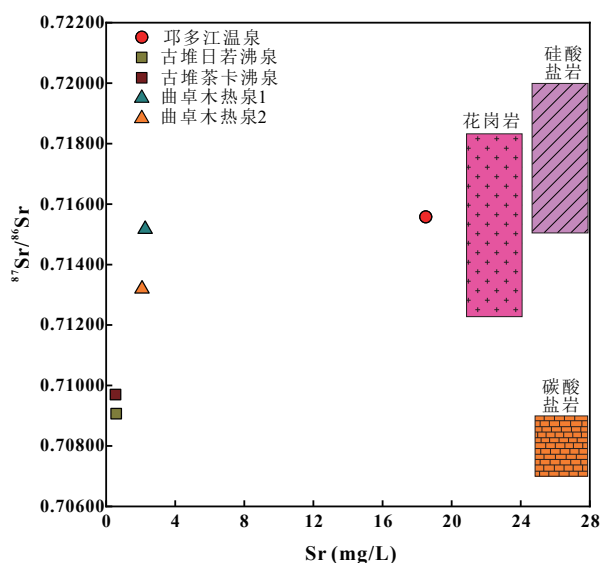


图7 阳离子交换的离子组合比值图

Fig. 7 Ion combination ratio diagram of ion exchange

图8 研究区地热水的Sr vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值图Fig. 8 Sr vs. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ of geothermal water in the study area

(Liu et al., 2017; Singh et al., 2017)。在本研究中, 用 Phreeqc 3.0 软件计算和评估研究区内矿物的 SI 值。基于公式(1):

$$SI = \lg(IAP/K) \quad (1)$$

其中 IAP 是离子活度积, K 是平衡常数。 $SI > 0$ 的矿物表示过饱和, 矿物会出现沉淀的趋势; $SI < 0$ 表示不饱和, 矿物会发生溶解; $SI = 0$ 表示矿物与溶液处于平衡状态(Zhang et al., 2016)。如图9所示, 研究区地热水中文石、方解石和白云石达到了过饱和

状态。因此, 说明研究区地热水中会发生文石、方解石和白云石的溶解, 并且 CaCO_3 会在一定条件下析出形成钙华等泉化。

4.2 地热水的储热温度估算

4.2.1 地热水水-岩平衡状态分析

化学地热温标是否合适取决于其适用的校准温度、受控矿物平衡相以及热水上升至地表期间对成分变化的敏感性(Peralta Arnold et al., 2017; Fan et al., 2019)。因此, 在估算热储温度之前, 需要先判断地热水的平衡状态, 然后选择合适的温度计估算热储温度。Giggenbach(Giggenbach, 1988)提出可运用 Na-K-Mg 三角图来判断地热水的平衡状态。图10可以看出, 仅古堆茶卡沸泉位于部分饱和和水区域, 其余温泉均位于未成熟水区域, 说明研究区地热水的的水-岩作用均为达到平衡状态。此外, 研究区地热水中大部分矿物表现出未饱和特征, 也表明未达到平衡状态(图9)。地热水在上升过程中可能与浅部冷水混合发生了重新平衡, 运用阳离子温度计估算的热储温度会发生偏差(胡立堂, 2014; Liu et al., 2022; Wang et al., 2023)。因此, 本研究中, 运用 SiO_2 地热温标估算热储温度。

4.2.2 二氧化硅地热温标

在选取二氧化硅地热温标时, 需要先确定地热水中各种二氧化硅矿物的饱和状态, 如石英, 玉髓, 方石英和无定形二氧化硅(Peralta Arnold et al., 2017)。本次研究主要分析石英和玉髓这两种二氧

化硅矿物。研究区所有地热水样品的石英都处于饱和状态,玉髓则处于轻微欠饱和状态(图9)。lg(K^2/Mg)与lg(SiO_2)比值图可以看出(Giggenbach and Glover, 1992)(图11a),除了古堆茶卡沸泉样点以外,其余温泉样点均位于玉髓线上方。可以确定石英和玉髓是研究区地热储层中常见的二氧化硅类型。因此综合选取石英地热温标计算热储温度。研究区地热水运用石英地热温标(Fournier, 1977)估算的热储温度分别为129~148℃。考虑到地热水在上升过程中受到了浅部冷水混合作用的影响,因此二氧化硅温度计估算的热储温度仅能代表浅

层储层温度。深层储层温度和冷水混合比例需要进一步分析。

4.2.3 硅-焓图解法分析

本研究选取硅-焓图解法(Truesdell and Fournier, 1977)进一步估算研究区地热水的深层储层温度和冷水混合比例。该方法是假设在混合之前或之后不存在二氧化硅沉积,并且石英决定二氧化硅在热水中的溶解度。如图11b所示,估算得出研究区地热水的深层储层温度(无蒸汽损失)和冷水混合比例为181~221℃和58%~65%。其中古

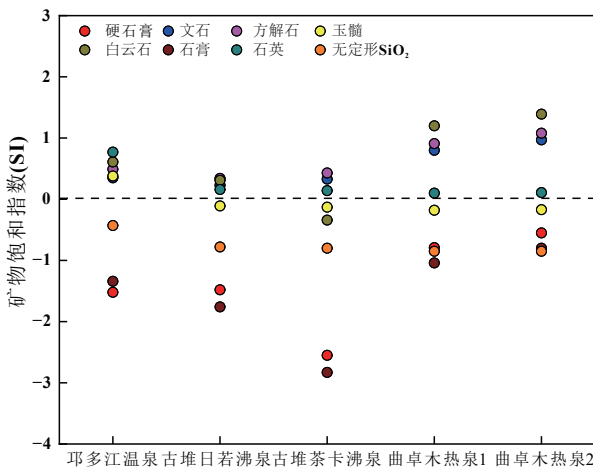


图9 研究区地热水中主要矿物的饱和指数图

Fig. 9 Saturation indices diagram of main minerals in geothermal waters in the study area

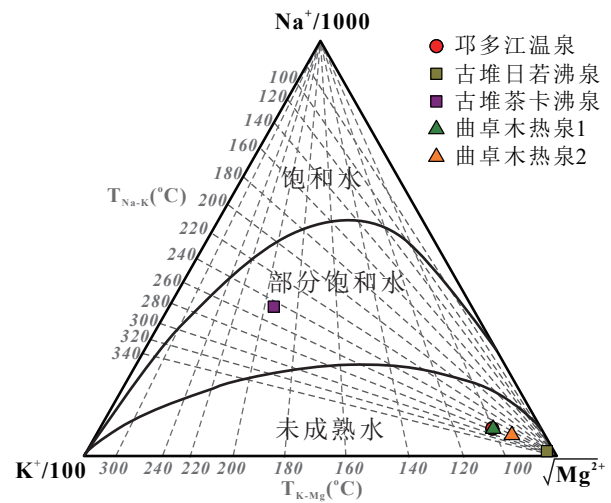


图10 研究区地热水的Na-K-Mg三角图

Fig. 10 Na-K-Mg trilinear equilibrium diagram of the geothermal waters in the study area

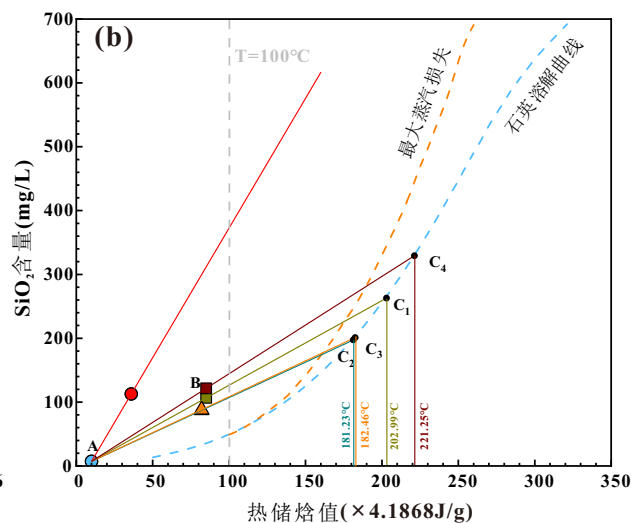
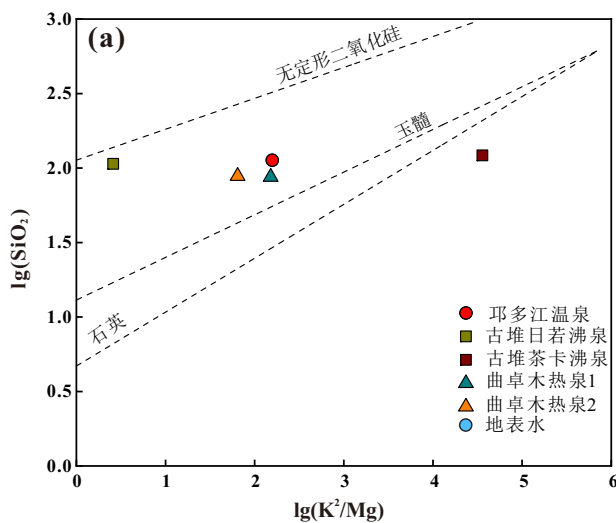


图11 研究区地热水的lg(K^2/Mg)/lg(SiO_2)比值图(a)和硅-焓模型图(b)(地表水数据引用王思琪, 2017)

Fig. 11 The lg(K^2/Mg)/lg(SiO_2) ratio plots(a) and (b) silicon-enthalpy model diagrams of the geothermal waters in the study area(surface water data reference after Wang, 2017)

堆茶卡沸泉的储层温度最高, 到达了 221℃。可以看出深层储层温度比出露温度高很多, 且估算出的冷水混合比例较大, 说明地热水在上升到地表的过程中发生了大量的冷水混合。

4.3 地热水补给来源分析

地热流体主要来源于大气降水。在地热系统中, 氢和氧同位素被广泛用于确定地热水来源 (Craig, 1963; Xu et al., 2022)。研究区地热水样点均位于全球大气降水线 (GMWL) (Craig, 1961) 和西南地区大气降水线 (LMWL) (Kong et al., 2019) 附近, 表明大气降水为地热水主要补给来源 (图 12)。值得注意的是, 邛多江温泉的氢氧同位素最为贫化, 这可能是由于补给来源和补给海拔高低不同导致的 (Blasch and Bryson, 2007)。

海拔升高 100m, 对应的 $\delta^{18}\text{O}$ 降低的范围为 $-0.15\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$, δD 相应的降低范围为 $-1\text{‰} \sim -4\text{‰}$ (Yeh et al., 2011)。本研究采用 δD 估算地热水的补给高程。根据公式(2)估算补给高程 (Ta et al., 2019):

$$H = (\delta\text{R} - \delta\text{P}) / K + h \quad (2)$$

在本研究中, h 为采样点的高程, δP 取 -126‰ (王思琪, 2017), K 取西南地区的 δD 梯度值 $-2.6\text{‰}/100\text{ m}$ (Yu et al., 1984)。估算出研究区地热水的补给高程为 4 467~5 303 m, 推测藏南温泉是来自附近的高海拔大气降水和冰雪融水的补给,

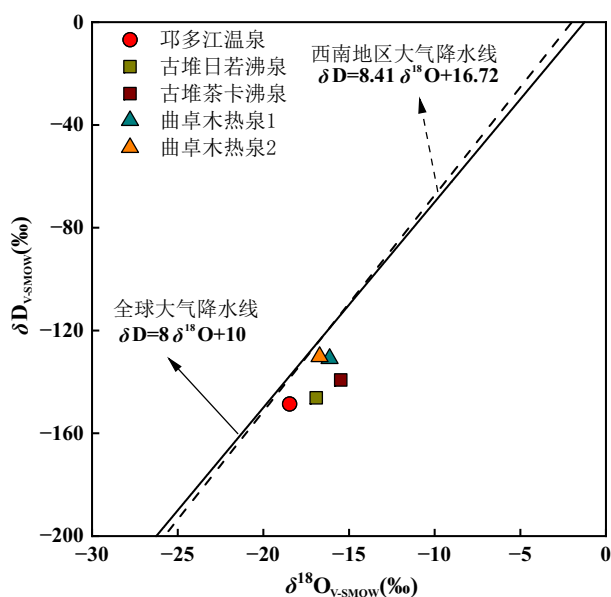


图 12 研究区地热水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 关系图

Fig. 12 Plots of δD - $\delta^{18}\text{O}$ for the geothermal waters in the study area

通过主要断裂构造运移到深部加热形成高温深层地热水, 然后在高温高压下沿着裂隙、节理上升, 并与浅层冷水混合形成浅层地热水, 最后沿浅部地表松散破碎带出露形成温泉。

4.4 温泉钙华地球化学特征

4.4.1 钙华类型和形成年代

大气成因类钙华 $\delta^{13}\text{C}$ 含量范围约为 $-12\text{‰} \sim -2\text{‰}$, 热成因类钙华 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-2\text{‰} \sim +10\text{‰}$ (Pentecost, 1995), 而研究区温泉钙华 $\delta^{13}\text{C}$ 含量为 $-1.5\text{‰} \sim +2.4\text{‰}$ (表 1), 显示研究区温泉钙华均属热成因类钙华。虽然硅酸盐矿物 (石英) 也处于过饱和状态, 但受动力学因素影响, 处于过饱和状态的石英沉淀很缓慢, 只有随着闪蒸以一定速率产生无定形 SiO_2 且随后冷却, 才可能出现沉淀 (韦梅华, 2012), 因此硅华含量很低, 研究区泉华成分以 CaCO_3 为主 (即钙华)。

研究区温泉储层估算温度较高, 表明 $\delta^{13}\text{C}$ 来源于地壳深部。地壳深部兼有幔源碳和变质碳两种, 地幔来源碳 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$, 碳酸盐岩脱碳作用形成 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 0 左右 (刘再华等, 2000; 顾慰祖, 2011)。推测研究区温泉钙华的碳主要来自深部碳酸盐岩的变质成因, 仅古堆日若沸泉有部分地幔来源碳。运用同位素质量守恒公式(3)估算混合比例:

$$C = WC_1 + (1 - W)C_2 \quad (3)$$

W 表示碳酸盐岩变质来源的碳所占的比例, C 表示混合后的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, C_1 表示碳酸盐变质来源碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值, C_2 代表上地幔来源碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。本次研究碳酸盐岩变质来源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别取 0‰ 、 1‰ 和 2‰ , 上地幔来源碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别取 -5‰ 、 -6‰ 和 -7‰ 。估算得出地幔碳源的比例为 $30\% \sim 38\%$ 。古堆日若沸泉位于断裂带附近, 且热储温度较高以及循环深度较大, 为深部地幔碳提供了良好的通道。

位于西藏南部 (以雅鲁藏布江为例) 的构造活动十分发育, 经历了碰撞→扩张→碰撞→造山等多次构造运动 (孙东和王道永, 2011)。温泉钙华的形成可能与西藏南部频繁的构造活动有关。根据 ^{14}C 测年显示, 邛多江温泉、曲卓木热泉 (1 和 2) 和古堆茶卡沸泉钙华的年龄为 $21\,280 \pm 70 \sim 42\,110 \pm 930$ 年, 古堆日若沸泉的年龄为 $>43\,500$ 年, 均形成于全新世之前。新生代时期, 印度-欧亚大陆汇聚导致的后碰撞陆内变形, 使研究区构造变形十分复杂 (Wang et al., 1998), 推断研究区温泉钙华可能形成

于该构造运动之后,且反映了晚更新世到全新世前的水热活动受青藏高原隆升和新构造运动的控制作用。

4.4.2 钙华对古气候的指示意义

大气成因类钙华能有效记录气候环境信息,地热成因类钙华不仅可以指示构造控制的水热活动等相关信息(汪智军等, 2018),还可利用热泉钙华的 C-O 同位素、主微量元素数据等各项气候代用指标提取与恢复古气候信息(杜磊等, 2022)。构造活动的强弱与深部储层流体的温度、压力影响钙华形成,温暖湿润的气候通过加快地下水流动速度、循环速率和流量促进温泉钙华形成(R. Zentmyer et al., 2008)。青藏高原钙华年龄显示其主要形成于印度季风增强时期(汪智军等, 2018)。图 13 显示 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 具有较好相关性($R^2=0.57$),表明研究区温泉钙华 C 和 O 同位素受到类似因素的影响,可能是气候变化的原因。

由于温泉钙华均为地热成因,可能同时受到 CO_2 脱气作用、水-岩相互作用等影响,因此有必要进一步分析。付雷(2019)对青海冰凌山的地热成因钙华进行研究,认为古降水与 Mg/Ca 比值呈正相关。图 14a 显示 30~40 ka 年 Mg/Ca 和 Mg/Sr 的比值呈现了不同的走向趋势(负相关),而在此之前和之后则是表现出正相关。进一步分析 $\delta^{13}\text{C}$ 随着钙华年龄变化的关系时,发现其变化趋势与 Mg/Ca 比值变化呈现负相关(图 14b)。由于温泉中碳同位素主要来源于 CO_2 脱气,降雨量增大会导致地热水温度降低并溶滤大量黏土矿物(Mg 含量

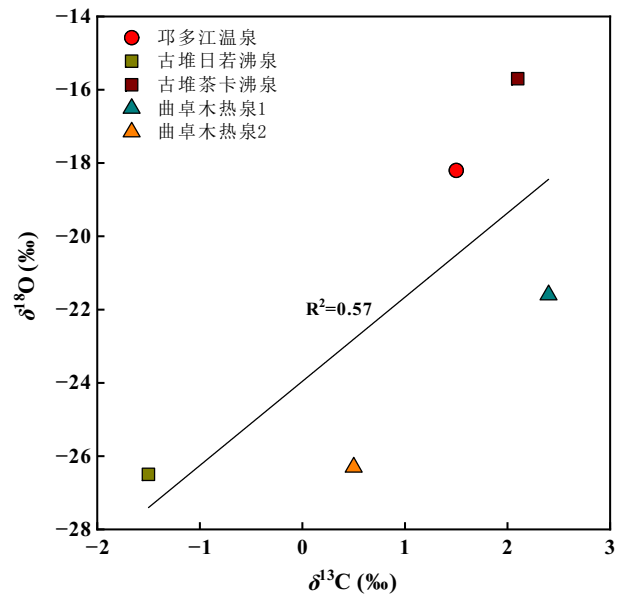


图 13 研究区地热水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 关系图

Fig. 13 Plot of $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ for the geothermal waters in the study area

较高),使 CO_2 脱气程度和水岩作用强度降低,导致 $\delta^{13}\text{C}$ 的分馏作用减弱以及 Sr 浓度减小(付雷等, 2019; 杜磊, 2021)。因此当降雨降雨量增大时钙华中 Mg 含量会增加,而 Sr 和 $\delta^{13}\text{C}$ 会降低。推测研究区的降雨量在 43.50 ka 年由峰值迅速减弱,并在 42 ka~21.28 ka 年期间降雨量又逐渐增强。

5 结论

本次研究通过对藏南的地区的 5 个温泉地热水和温泉钙华样品进行了水化学、同位素和钙华

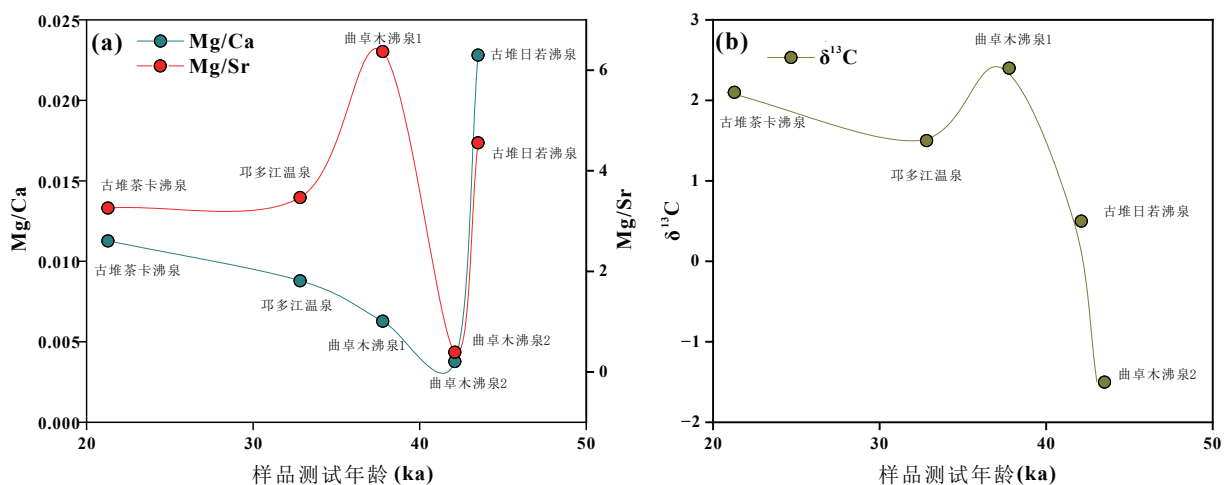


图 14 研究区钙华样品 Mg/Ca 、 Mg/Sr 比值与测试年龄的关系曲线图 (a) 和钙华样品 $\delta^{13}\text{C}$ 与测试年龄的关系曲线图 (b)
Fig. 14 The relationship between Mg / Ca ratio and test age of travertine samples in the study area(a) and the relationship between $\delta^{13}\text{C}$ and test age of travertine samples(b)

特征进行了分析,得到了以下结论:

(1)研究区邛多江温泉的水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型;古堆日若沸泉的水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Ca}\cdot\text{Na}$ 型;古堆茶卡沸泉的水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{Na}$ 型;曲卓木热泉(1 和 2)的水化学类型为 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\cdot\text{Na}\cdot\text{Ca}$ 型。

(2)研究区温泉地热水中的离子来源主要是硅酸盐岩的溶解、部分碳酸盐岩和岩盐的溶解。地热水发生了阳离子交换作用。

(3)研究区温泉地热水均未达到水-岩平衡状态。利用石英地热温标得出浅部热储温度为 $129\sim 148^\circ\text{C}$, 利用硅-焓图解得出深部热储温度和冷水混合比例为 $181\sim 221^\circ\text{C}$ 和 $58\sim 65\%$ 。氢氧同位素证据显示地热水的补给高程为 $4\,467\sim 5\,303\text{ m}$, 主要是来自附近的高海拔大气降水和冰雪融水的补给。

(4)温泉钙华 CaO 含量为 $43.43\%\sim 56.66\%$; 稀土元素特征总体显示出轻稀土元素富集的特点; $\delta^{13}\text{C}$ 指示温泉钙华为热成因, 钙华中的碳主要来源于深部碳酸盐岩的变质成因, 仅古堆日若沸泉有部分地幔碳。 ^{14}C 测年显示钙华的年龄为 $21\,280\pm 70\sim >43\,500$ 年; 钙华的 Mg/Ca 、 Mg/Sr 比值指示降雨量在 43.50 ka 年由峰值迅速减弱, 并在 $42\text{ ka}\sim 21.28\text{ ka}$ 年期间降雨量又逐渐增强。

References

- Andreo B, Martín-Martín M, Martín-Algarra A, 1999. Hydrochemistry of spring water associated with travertines. Example of the Sierra de la Alfaguara (Granada, southern Spain) [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 328 (11): 745–750.
- Blasch K W, Bryson J R, 2007. Distinguishing sources of ground water recharge by using $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ [J]. *Ground Water*, 45 (3): 294–308.
- Blum J D, Erel Y, Brown K, 1993. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of sierra nevada stream waters: Implications for relative mineral weathering rates [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57 (21-22): 5019–5025.
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Craig H, 1961. Isotopic variations in meteoric waters [J]. *Science*, 133 (3465): 1702–1703.
- Craig H, 1963. The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas [J]. *Nuclear Geological on Geothermal areas*, 17–53.
- Dong S L, Zhang Z, Zhang L K, et al., 2018. Geochemistry, Hf-Sr-Nd Isotopes and Petrogenesis of Acidic Volcanic Rocks in Quzhuomu Region of Southern Tibet [J]. *Earth science*, 43 (8): 2701–2714 (in Chinese with English abstract).
- Du L, 2021. Study on the sedimentary and geochemical characteristics of the Holocene hot spring travertine in Tengchong hot water pond, Yunnan [D]: Chengdu university of technology.
- Du Lei, Wen H G, Luo L C, et al., 2022. Terrestrial hot-Spring travertine: An important window into paleoclimate reconstruction [J]. *Geology in China*, 49 (3): 802–821.
- Fan Y F, Pang Z H, Liao D W, et al., 2019. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of Geothermal Water from the Ganzi Geothermal Field, Eastern Tibetan Plateau [J]. *Water*, 11 (8).
- Ford T D, Pedley H M, 1996. A review of tufa and travertine deposits of the world [J]. *Earth-Science Reviews*, 41 (3-4): 117–175.
- Fournier R, 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems [J]. *Geothermics*, 5 (1-4): 41–50.
- Fu L, Zahng S Q, Jia X F, et al., 2019. Test of the paleoenvironment reconstruction of Blingling Hill travertine in large time scale [J]. *Quaternary Sciences*, 39 (2): 510–517 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Giggenbach W F, 1988. Geothermal solute equilibria. derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers [J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 52 (12): 2749–2765.
- Gu W Z, 2011. Isotope hydrology [M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Guo Q, 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.
- Guynn J H, Kapp P, Pullen A, et al., 2006. Tibetan basement rocks near Amdo reveal "missing" Mesozoic tectonism along the Bangong suture, central Tibet [J]. *Geology*, 34 (6): 505–508.
- Hamzah Z, Aris A Z, Ramli M F, et al., 2017. Groundwater quality assessment using integrated geochemical methods, multivariate statistical analysis, and geostatistical technique in shallow coastal aquifer of Terengganu, Malaysia [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (2): 49.
- Han G L, Liu C Q, 2006. Strontium isotope and major ion chemistry of the rainwaters from Guiyang, Guizhou Province, China [J]. *Science of The Total Environment*, 364 (1-3): 165–74.
- Henderson P, 1989. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Hu L T, 2014. Integrated simulation and application of surface water and groundwater in the middle reaches of Heihe River [J]. *Journal of*

- Beijing Normal University (Natural Science Edition), 50 (5) : 563 – 569 (in Chinese with English abstract).
- Karimi S, Mohammadi Z, Samani N, 2017. Geothermometry and circulation depth of groundwater in Semnan thermal springs, Northern Iran[J]. *Environmental Earth Sciences*, 76 (19) : 1 – 24 .
- Kong Y L, Wang K, Li J, et al., 2019. Stable Isotopes of Precipitation in China: A Consideration of Moisture Sources[J]. *Water*, 11 (6) : 1239 .
- 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 .
- Liao Z J, 1999. Yunnan–Tibet tropical [M] : Yunnan–Tibet tropical.
- Liao Z J, Zhao P, 1999. Tropical Yunnan–Tibet : geothermal resources and typical geothermal systems [M] : Tropical Yunnan–Tibet : geothermal resources and typical geothermal systems.
- Liu H S, Zhou X, Zhang Y Q, et al., 2020. Influencing factors of travertine deposition in hot springs[J]. *Chinese karst*, 39 (1) : 6 (in Chinese with English abstract).
- Liu M L, Guo Q H, Wu G, et al., 2019. Boron geochemistry of the geothermal waters from two typical hydrothermal systems in Southern Tibet (China) : Daggyai and Quzhuomu[J]. *Geothermics*, 82: 190 – 202 .
- Liu P, Hoth N, Drebenstedt C, et al., 2017. Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions - Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches[J]. *Science of The Total Environment*, 601-602: 1 – 14 .
- Liu W, Guan L F, Liu Y, et al., 2022. Fluid geochemistry and geothermal anomaly along the Yushu-Ganzi-Xianshuihe fault system, eastern Tibetan Plateau: Implications for regional seismic activity[J]. *Journal of Hydrology*, 607: 127554 .
- Liu Z H, Yuan D X, He S Y, et al., 2000. Geochemical characteristics of geothermal CO₂-water-carbonate system and its CO₂ source: a case study of Huanglonggou, Kangding, Sichuan and Xiaji, Zhongdian, Yunnan[J]. *Chinese Science: D*, 30 (2) : 209 – 214 (in Chinese with English abstract).
- Marandi A, Shand P, 2018. Groundwater chemistry and the Gibbs Diagram[J]. *Applied Geochemistry*, 97: 209 – 212 .
- Meng H R, Cao R, Cheng D F, et al., 2023. Types, Distribution Characteristics, and Exploration Direction of Hydrothermal Alteration in Gudui Geothermal Field, Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 44 (1) : 158 – 168 (in Chinese with English abstract).
- Niu X S, Zheng M P, Liu X F, et al., 2017. Sedimentary property and the geological significance of travertines in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science & Technology Review*, 35 (6) : 59 – 64 (in Chinese with English abstract).
- Palmer M R, Edmond J M, 1989. The strontium isotope budget of the modern ocean[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 92 (1) : 11 – 26 .
- Palmer M R, Edmond, J M, 1992. Controls over the strontium isotope composition of river water[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (5) : 2099 – 2111 .
- Pan G F, Li X Q, Zhang J, et al., 2018. Groundwater-flow-system characterization with hydrogeochemistry: a case in the lakes discharge area of the Ordos Plateau, China[J]. *Hydrogeology Journal*, 27 (2) : 669 – 683 .
- Pentecost A, 1995. The Quaternary travertine deposits of Europe and Asia Minor[J]. *Quaternary Science Reviews*, 14 (10) : 1005 – 1028 .
- Peralta Arnold Y, Cabassi J, Tassi F, et al., 2017. Fluid geochemistry of a deep-seated geothermal resource in the Puna plateau (Jujuy Province, Argentina) [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 338: 121 – 134 .
- Piper A M, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses[J]. *Transactions-American Geophysical Union*, 25 (6) : 914 – 923 .
- Pu J B, Yuan D X, Zhang C, et al., 2012. Identifying the sources of solutes in karst groundwater in Chongqing China: a combined sulfate and strontium isotope approach[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 86 (4) : 980 – 992 .
- R Zentmyer, Myrow P M, Newell D L, 2008. Travertine deposits from along the South Tibetan Fault System near Nyalam, Tibet[J]. *Geological Magazine*, 145 (6) : 753 – 765 .
- Singh C K, Kumar A, Shashtri S, et al., 2017. Multivariate statistical analysis and geochemical modeling for geochemical assessment of groundwater of Delhi, India[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 175: 59 – 71 .
- Sun, McDonough, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42 (1) : 313 – 314 .
- Sun D, Wang D Y, 2011. New insights into the structural characteristics and genetic model of the middle section of the Yarlung Zangbo suture zone[J]. *Journal of Geology*, 85 (1) : 56 – 65 (in Chinese with English abstract).
- Sun Q F, Jia L G, Tian H, et al., 2020. Chemical characteristics and genesis analysis of groundwater in Lianhuashan area of Changchun[J]. *Geology and Resources* 29 (5) : 476 – 482.
- Ta M M, Zhou X, Guo J, et al., 2019. Hydrogeochemical characteristics and formation of the hot springs occurring in the plunging ends of an anticline in Chongqing, Eastern Sichuan Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 78 (15) : 468 .
- Tan H B, Su J B, Xu P, et al., 2018. Enrichment mechanism of Li, B and K in the geothermal water and associated deposits from the Kawu area of the Tibetan plateau: Constraints from geochemical experimental data[J]. *Applied Geochemistry*, 93: 60 – 68 .
- Tan H B, Zhang Y F, Zhang W J, et al., 2014. Understanding the circulation of geothermal waters in the Tibetan Plateau using oxygen and hydrogen stable isotopes[J]. *Applied Geochemistry*, 51 (1) : 23 – 32 .
- Truesdell A, Fournier R, 1977. Procedure for estimating the temperature of a hot-water component in a mixed water by using a plot of dissolved silica versus enthalpy[J]. *Journal of Research of the US geological Survey*, 5 (1) : 49 – 52 .
- 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 C G, Zheng M P, Zhang X F, et al., 2020. O, H, and Sr isotope evidence for origin and mixing processes of the Gudui geothermal system, Himalayas, China[J]. *Geoscience Frontiers*, 11 (4) : 1175 – 1187 .
- Wang E, Burchfiel B C, Royden L H, et al., 1998. Late Cenozoic Xianshuihe-Xiaojiang, Red River, and Dali fault systems of Southwestern Sichuan and Central Yunnan, China[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 327: 1 – 108 .
- Wang P, Chen X H, Shen L C, et al., 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 Z J, Yin J J, Yuan D X, 2018. The application of travertine in Quaternary research: taking the Qinghai-Tibet Plateau as an example[J]. *Scientific Notification*, 63 (11) : 1012 – 1023 (in Chinese with English abstract).
- Wang S Q, 2017. Hydrogeochemical Processes and Genesis Macheism of High-temperature Geothermal System in Gudui, Tibet[D]: China University of Geosciences (Beijing) .
- Wang X, Wang G L, Lu C, et al., 2018. Evolution of deep parent fluids of geothermal fields in the Nimu-Nagchu geothermal belt, Tibet, China[J]. *Geothermics*, 71: 118 – 131 .
- Wang Y, Yuan X, Zhang Y H, et al., 2023. Hydrochemical, D–O–Sr isotopic and electromagnetic characteristics of geothermal waters from the Erdaoqiao area, SW China: Insights into genetic mechanism and scaling potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 158: 105486.
- Wang Z L, Zhang J, Liu C Q, 2007. Strontium isotopic compositions of dissolved and suspended loads from the main channel of the Yangtze River[J]. *Chemosphere*, 69 (7) : 1081 – 1088 .
- Wei M H, 2012. Analysis of the scaling Mechanism and Trend of Thermal Groundwater in Kangding County of Sichuan Province[D]. China University of Geosciences (Beijing) .
- Xu S, Guan L F, Zhang M L, et al., 2022. Degassing of deep-sourced CO₂ from Xianshuihe-Anninghe fault zones in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 65 (1) : 139 – 155 .
- Yan Y P, Niu F X, Liu J, et al., 2022. Hydrochemical characteristics and source analysis of the upper reaches of the Yarlung Zangbo River in summer[J]. *Chinese Environmental Science*, 42 (2) : 815 – 825 (in Chinese with English abstract).
- Yeh H F, Lee C H, Hsu K C, 2011. Oxygen and hydrogen isotopes for the characteristics of groundwater recharge: a case study from the Chih-Pen Creek basin, Taiwan[J]. *Environmental Earth Sciences*, 62 (2) : 393 – 402 .
- Yu S Y, 2022. Hydrochemistry, travertine chronology and geochemical characteristics of lithium deposits in Mam Co Salt Lake, Tibet [D] : Chinese Academy of Geological Sciences.
- 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]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 3 (2) : 93 – 101 .
- Yu X, Yuan X C, Guo H Y, et al., 2022. Coupling Hydrochemistry and Stable Isotopes ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) to Identify the Major Factors Affecting the Hydrochemical Process of Groundwater and Surface Water in the Lower Reaches of the Yarlung-Zangbo River, Southern Tibet, Southwestern China[J]. *Water*, 14 (23) : 3906 .
- Yuan X C, Zhang Y H, Wang Y, et al., 2023. Geothermal water chemical characteristics and scaling analysis of Xianshuihe fault zone[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (2) : 357 – 372 (in Chinese with English abstract).
- Zhang W J, Tan H B, Zhang Y F, et al., 2015. Boron geochemistry from some typical Tibetan hydrothermal systems: Origin and isotopic fractionation.[J]. *Applied Geochemistry*, 63: 436 – 445 .
- Zhang X, Hao H B, Liu K L, et al., 2019. Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet[J]. *Hydrogeological Engineering Geology*, 46 (04) : 1 – 9 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X, Hao H B, Liu K L, et al., 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).
- Zhang X, Zhang W, Lü G S, et al., 2023. Geochemical, Geophysical Genesis of the Ranggu Geothermal Spring in Aba Prefecture, Western Sichuan: Evidence from Hydrogeochemical and Geophysical Exploration[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43 (2) : 388 – 403 (in Chinese with English abstract).
- Zhang X B, Li X, Gao X B, 2016. Hydrochemistry and coal mining activity induced karst water quality degradation in the Niangziguan karst water system, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 23 (7) : 6286 – 6299 .
- Zhang Y H, Dai Y S, Wang Y, et al., 2021a. Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, southwestern China[J]. *Science of The Total Environment*, 784: 147186 .
- Zhang Y H, He Z H, Tian H H, et al., 2021b. Hydrochemistry appraisal, quality assessment and health risk evaluation of shallow groundwater in the Mianyang area of Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80 (17) : 576 .
- Zhang Y H, Li X, Luo M, et al., 2021c. Hydrochemistry and Entropy-Based Groundwater Quality Assessment in the Suining Area, Southwestern China[J]. *Journal of Chemistry*, 2021: 5591892 .
- Zhang Y H, Xu M, Li X, et al., 2018. Hydrochemical Characteristics and Multivariate Statistical Analysis of Natural Water System: A Case Study in Kangding County, Southwestern China[J]. *Water*, 10 (1) : 80 – 96 .
- Zhang Y H, Li X, Xu M, et al., 2021b. Hydrogeochemical Characteristics of Geothermal Waters in the Daofu Area of the Xianshuihe Geothermal Belt[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 28 (3) : 42 – 51 (in Chinese with English abstract).
- Zhao P, Duo J, Xie E J, et al., 2003. Strontium isotope data for thermal waters in selected high-temperature geothermal fields, China. *Acta Petrologica Sinica*. 19 (3) : 569 – 576.
- Zhao Y Y, Cui Y B, Zhao X T, 2010. Geological and geochemical features and significance of travertine in travertine-island from

- Zhabuye salt lake, Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(1): 124–141.
- Zheng M P, 1989. A new type of cesium ore in Tibet[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- 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 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y, et al., 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana research*, 23(4): 1429–1454.
- ### 附中文参考文献
- 曹华文, 邹灏, 李光明, 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.
- 董随亮, 张志, 张林奎, 等, 2018. 藏南曲卓木地区酸性火山岩地球化学、Hf-Sr-Nd 同位素特征及其成因[J]. 地球科学, 43(8): 2701–2714.
- 杜磊, 2021. 云南腾冲热水塘全新世热泉钙华沉积学与地球化学特征研究[D]: 成都理工大学.
- 杜磊, 文华国, 罗连超, 等, 2022. 陆地热泉钙华: 重建古气候历史信息重要载体[J]. 中国地质, 49(3): 802–821.
- 付雷, 张森琦, 贾小丰, 等, 2019. 万年尺度下钙华的古环境重建检验——以青海冰凌山为例[J]. *第四纪研究*, 39(2): 510–517.
- 顾慰祖, 2011. 同位素水文学[M]. 北京: 科学出版社.
- 亨德森 P, 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 胡立堂, 2014. 黑河干流中游地区地表水和地下水集成模拟与应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 50(5): 563–569.
- 廖志杰, 1999. 滇藏地热带[M]: 滇藏地热带.
- 廖志杰, 赵平, 1999. 滇藏地热带: 地热资源和典型地热系统[M]: 滇藏地热带: 地热资源和典型地热系统.
- 刘海生, 周训, 张彧齐, 等, 2020. 温泉钙华沉积的影响因素[J]. 中国岩溶, 39(1): 6.
- 刘再华, 袁道先, 何师意, 等, 2000. 地热 CO₂ 水-碳酸盐岩系统的地球化学特征及其 CO₂ 来源——以四川黄龙沟, 康定和云南中甸下给为例[J]. 中国科学: D 辑, 30(2): 209–214.
- 蒙晖仁, 曹锐, 陈德凡, 等, 2023. 西藏古堆地热水热蚀变类型、分布特征及对勘探方向的启示[J]. 地球学报, 44(1): 158–168.
- 牛新生, 郑棉平, 刘喜方, 等, 2017. 青藏高原钙华沉积属性特征及其地质意义[J]. 科技导报, 35(6): 59–64.
- 孙东, 王道永, 2011. 雅鲁藏布江缝合带中段构造特征及成因模式新见解[J]. 地质学报, 85(1): 56–65.
- 孙岐发, 贾林刚, 田辉, 等, 2020. 长春莲花山地区地下水化学特征及成因分析[J]. 地质与资源, 29(5): 476–482.
- 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 等, 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.
- 汪智军, 殷建军, 袁道先, 2018. 钙华在第四纪研究中的应用: 以青藏高原为例[J]. 科学通报, 63(11): 1012–1023.
- 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]: 中国地质大学(北京).
- 韦梅华, 2012. 四川省康定县地下水热结垢机理及趋势分析[D]: 中国地质大学(北京).
- 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.
- 余石勇, 2022. 西藏麻米错盐湖锂矿水化学与钙华年代学和地球化学特征[D]: 中国地质科学院.
- 袁兴成, 张云辉, 王鹰, 等, 2023. 鲜水河断裂带地热水化学特征及结垢趋势分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 43(2): 357–372.
- 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等, 2019. 西藏加查象牙泉水水文地球化学特征及成因[J]. *水文地质工程地质*, 46(04): 1–9.
- 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等, 2020. 西藏沃卡地堑地下水水文地球化学特征及其形成机制[J]. *中国地质*, 47(6): 1702–1714.
- 章旭, 张文, 吕国森, 等, 2023. 川西阿坝州壤古温泉成因机制研究: 来自水文地球化学和地球物理勘探的证据[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 388–403.
- 张云辉, 李晓, 许模, 等, 2021b. 鲜水河地热带道孚地区地热水水文地球化学特征研究[J]. *安全与环境工程*, 28(3): 42–51.
- 赵平, 多吉, 谢鄂军, 等, 2003. 中国典型高温热田热水的锶同位素研究[J]. 岩石学报, 19(3): 569–576.
- 赵元艺, 崔玉斌, 赵希涛, 2010. 西藏扎布耶盐湖钙华岛钙华的地质地球化学特征及意义[J]. 地质通报, 29(1): 124–141.
- 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.