

引用格式：侯明才，左银辉，胡亚召，等，2026. 川西高原三大断裂带高温地热成因与资源潜力研究[J]. 地质力学学报，32（5）：1062–1081. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2026056](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2026056)

Citation: HOU M C, ZUO Y H, HU Y Z, et al., 2026. Genesis and resource potential of high-temperature geothermal systems along the three major fault zones of the western Sichuan Plateau[J]. Journal of Geomechanics, 32（5）：1062–1081. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2026056](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2026056)

川西高原三大断裂带高温地热成因与资源潜力研究

侯明才¹，左银辉²，胡亚召³，牟蜚声²，彭 勃⁴，徐小青³，张俊龙²
HOU Mingcai¹，ZUO Yinhu²，HU Yazhao³，MU Feisheng²，PENG Bo⁴，XU Xiaoqing³，ZHANG Junlong²

1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室（成都理工大学），四川 成都 610059；

2. 成都理工大学能源学院，四川 成都 610059；

3. 四川省地质工程勘察院集团有限公司，四川 成都 611032；

4. 成都理工大学地球与行星科学学院，四川 成都 610059

1. *State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation & Institute of Sedimentary Geology (Chengdu University of Technology), Chengdu 610059, Sichuan, China;*

2. *College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

3. *Sichuan Institute of Geological Engineering Investigation Group Co., Ltd., Chengdu 611032, Sichuan, China;*

4. *School of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*

Genesis and resource potential of high-temperature geothermal systems along the three major fault zones of the western Sichuan Plateau

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the present-day geothermal field, geothermal-fluid evolution, and differential heat-control mechanisms of the Kangding–Luhuo, Ganzi–Litang, and Batang geothermal belts in the western Sichuan Plateau. [Methods] Field investigations and hydrochemical analyses were conducted on 55 hot springs and geothermal wells. Temperature-logging data from 10 boreholes, geothermal-gradient and terrestrial heat-flow data from two wells, and thermophysical measurements of 43 rock samples were integrated with regional fault-distribution and deep seismic-velocity data. [Results] The results show that hot springs in the western Sichuan Plateau are mainly distributed in belts along major deep faults, including the Xianshuihe, Ganzi–Litang, and Jinsha River faults. Geothermal gradients range from 17.5 to 59.7 °C/km, while terrestrial heat flow ranges from 50.8 to 116.2 mW/m², with an average of 77.2 mW/m², showing an overall pattern of higher values in the southwest and lower values in the northeast. The geothermal fluids are predominantly of the HCO₃-Na type and are mainly recharged by high-altitude meteoric water, with varying degrees of water–rock interaction and cation exchange during deep circulation. SiO₂ geothermometry indicates that reservoir temperatures are mainly concentrated between 100 and 180 °C, with local values approaching or exceeding 200 °C. Overall, the high-temperature geothermal systems in western Sichuan are fault-controlled hydrothermal systems jointly governed by the regional thermal background, deep heat input, heat and fluid transport along major deep faults, and deep circulation of meteoric water. Regional comparison indicates that the Ganzi–Litang geothermal belt is characterized by relatively high terrestrial heat flow and a substantial crustal heat-flow contribution, together with relatively stable fault-controlled fluid transport. The Batang geothermal belt exhibits pronounced deep thermal anomalies and is mainly controlled by strong deep

基金项目：地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项（2024ZD1003501）

This research was financially supported by Deep Earth Probe and Mineral Resources Exploration-National Science and Technology Major Project (Grant No. 2024ZD1003501).

第一作者及通信作者：侯明才（1968—），男，教授，博士生导师，主要从事深时沉积学和古地理重建及深层超深层油气勘探研究与教学工作。Email: houmc@cdut.edu.cn

收稿日期：2026-05-15；修回日期：2026-09-20；录用日期：2026-09-20；网络出版日期：2026-09-20；责任编辑：王婧

Received: 2026-05-15; Revised: 2026-09-20; Accepted: 2026-09-20; Available Online: 2026-09-20; Handling Editor: WANG Jing

heat input and the coupled effects of the Jinsha River Fault and deeply incised valleys. In contrast, the Kangding–Luhuo geothermal belt has a comparatively lower regional thermal background, although activity of the Xianshuihe Fault and local frictional heating promote the localized accumulation of high-temperature geothermal fluids. [Conclusions] Integration of geothermal manifestations and fault distribution suggests that the Ganzi–Litang and Batang geothermal belts have relatively favorable regional exploration potential for high-temperature geothermal resources, whereas the Kangding–Luhuo geothermal belt shows stronger localized potential, particularly at intersections of the main Xianshuihe Fault with subsidiary faults and in areas with concentrated high-temperature geothermal manifestations. [Significance] These results provide a basis for evaluating favorable areas and selecting exploration targets for high-temperature geothermal resources in western Sichuan Plateau.

Keywords: high-temperature geothermal resources; water–rock interaction; present-day geothermal field; genetic mechanism; western Sichuan Plateau

摘要:为揭示川西高原康定–炉霍、甘孜–理塘和巴塘三大地热带的现今地温场、地热流体演化及差异控热机制,基于55处温泉和地热井的调查与水化学资料、10口钻井的测温数据、2口井的地温梯度和大地热流数据及43组岩石热物性测试数据,结合区域断裂和深部速度结构资料开展综合分析。结果表明,川西高原温泉主要沿鲜水河、甘孜–理塘和金沙江等深大断裂呈带状展布;地温梯度为17.5~59.7 °C/km,大地热流为50.8~116.2 mW/m²,平均值为77.2 mW/m²,整体呈西南高、东北低的分布格局。地热流体以HCO₃-Na型为主,主要接受高海拔大气降水补给,并经历不同程度的水–岩作用和阳离子交换;SiO₂温标估算的热储温度主要集中于100~180 °C,局部接近或超过200 °C。川西高温地热系统总体属于区域热背景、深部热输入、深大断裂输导和大气降水深循环共同控制的断裂型水热系统。区域对比表明,甘孜–理塘地热带大地热流和地壳热贡献较高,断裂输导较稳定;巴塘地热带深部热异常显著,受较强深部热输入及金沙江断裂–河谷耦合作用控制;康定–炉霍地热带区域热背景相对较低,但鲜水河断裂活动及局部摩擦生热促进了高温热流体局部汇聚。热显示与断裂分布特征表明,甘孜–理塘和巴塘地热带具有较好的区域高温地热资源勘查潜力,康定–炉霍地热带则以鲜水河主断裂与次级断裂交汇部位及高温热显示集中区的局部勘查潜力更为突出。研究结果可为川西高温地热资源有利区评价与勘探靶区优选提供依据。

关键词: 高温地热资源; 水–岩作用; 现今地温场; 成因机制; 川西高原

中图分类号: P314 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616(2026)05-1062-20

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2026056

0 引言

在全球能源结构低碳转型与能源安全需求不断提升的背景下,地热能因具有清洁低碳、可再生和基荷稳定供能等优势而受到广泛关注。随着全球地热发电装机规模持续增长以及增强型地热系统等技术不断发展,地热资源开发正由传统水热型资源利用向深部、高温和规模化开发拓展(Soltani et al., 2019; PatSnap Insights Team, 2026)。其中,高温地热资源具有较高的能量品位和开发利用价值,其形成与深部热结构、活动构造和流体循环密切相关,因此成为地热资源勘查与成因研究的重要对象。从资源温度等级划分看,热储温度是判别高温地热资源的主要依据,依据《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615—2010; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会,

2011),主要热储层温度≥150 °C的地热资源属于高温地热资源。高温地热系统的形成受区域构造–热背景、深部热源、断裂输导体系及地下流体循环过程共同制约(Alasino et al., 2026; Aviña-Jiménez et al., 2026; 邱楠生等, 2026),多发育于板块离散边界、汇聚边界及活动造山带等构造活动强烈地区。大陆碰撞造山带因地壳增厚、放射性生热增强、深部热异常及深大断裂发育,同样具备形成高温水热系统的有利条件(蔺文静等, 2013; 张健等, 2017; Wallis et al., 2018; Leung et al., 2024)。青藏高原及其东缘是中国高温地热资源集中分布区(Tang et al., 2017; 汪集暘等, 2023),研究该区地热系统成因对于认识大陆碰撞造山带的热结构及指导资源勘查具有重要意义。

川西高原位于青藏高原东缘构造转换带,是青藏高原向四川盆地过渡的关键区域。受印度板块

与欧亚板块持续碰撞及其远程效应影响,鲜水河、甘孜-理塘和金沙江等深大断裂密集发育,为深部热量传输、地下水循环和热流体上升提供了重要通道,使川西高原具备高温地热系统形成和高温地热资源富集的有利地质条件(李朋武等, 2009; 高玲举等, 2015; 李午阳等, 2018; Tang et al., 2023)。区内温泉总体沿活动断裂呈条带状或串珠状分布,区域大地热流呈西南高、东北低的格局,巴塘、理塘和康定等地热区在深部速度结构、热流背景和地表热显示方面存在明显差异(孙东等, 2019; 申华梁等, 2023; Cao et al., 2025)。已有研究认为,川西高温水热系统总体经历大气降水沿断裂下渗、深部受热和沿断裂上升排泄的循环过程(张健等, 2017)。然而,中下地壳低速异常的空间展布及其与区域热异常、活动断裂之间的耦合关系仍存在分歧(Zhang, 2013; Hu et al., 2022; 申华梁等, 2023)。围绕鲜水河断裂带、理塘毛垭温泉群和金沙江断裂带,已开展了水文地球化学、稳定同位素及深部结构研究,揭示了不同地热区的流体来源、循环过程和热源条件。川西高原地热水总体以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型为主,主要接受大气降水补给,但受围岩性质、构造条件、热源背景和循环路径差异影响,不同断裂带在离子组成、矿化度、水-岩作用和循环深度等方面表现出明显差异。理塘毛垭温泉群具有较深的循环系统和较强的水-岩相互作用(申华梁等, 2023); 鲜水河断裂带热泉水的化学组成受断裂活动和地震过程影响(李晓等, 2018; 黄珣等, 2024; Cao et al., 2025); 金沙江断裂带地热流体演化则受构造活动、围岩性质与流体混合作用共同控制(Li et al., 2018; Liu et al., 2023; 袁兴成等, 2023)。近期研究进一步表明,巴塘和理塘地区具有较高热储温度和较深循环深度,而鲜水河断裂带浅部热量传输受到地下水对流及强活动断裂的共同影响(梁颂等, 2025; 刘祥等, 2025; Tang et al., 2025)。尽管已有研究对川西高原典型地热区的流体循环和热源条件进行了较多探讨,但多局限于单一断裂段或局部温泉群,三大断裂带地热系统的区域差异及其控热机制仍缺乏系统认识。文章综合温泉与地热井调查、钻孔测温、岩石热物性、水化学及氢氧同位素等资料,对康定-炉霍、甘孜-理塘和巴塘三大地热带的地温场、流体演化、热源构成及断裂控热特征进行对比,揭示其差异化成因机制,并评价高温地热资源相对潜力及有利勘查靶区。

1 地质背景

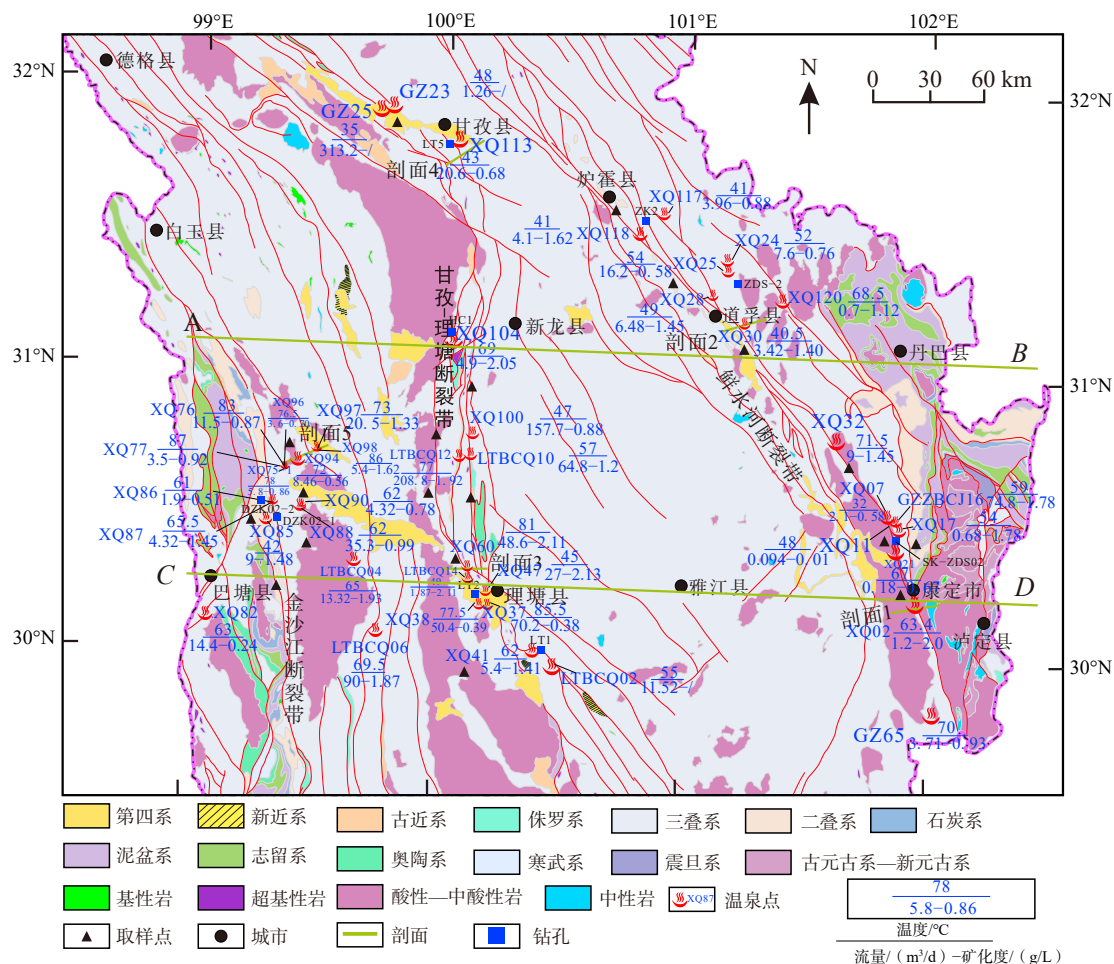
研究区位于川西高原甘孜州境内,处于青藏高原东缘强烈构造变形带。新生代以来多阶段构造变形使区域形成高山深谷相间、地势起伏强烈以及断裂与河谷高度耦合的构造地貌格局(Zhang, 2013; Hu et al., 2022)。鲜水河、甘孜-理塘和金沙江等深大断裂构成区域主要构造骨架,不仅控制地貌分异和构造样式,也对温泉等地表热显示的空间展布具有重要约束作用(图 1; 张健等, 2017; 李午阳等, 2018)。区内地层出露较全,主要由古生界、中生界沉积岩、变质岩及多期岩浆岩组成,第四系松散堆积物多沿河谷、盆地和断裂破碎带分布(图 2)。其中,三叠系分布最广,岩性以砂岩、板岩、变质砂岩及碳酸盐岩为主;古生界主要发育灰岩、白云岩、片岩及其他变质岩类;岩浆岩则以花岗岩、中酸性侵入岩及局部火山岩为主,呈岩基、岩株或岩脉状分布。

2 样品采集测试与研究方法

2.1 样品采集与测试

此次调查采样点遵循区域覆盖性、构造代表性和地热显示代表性原则,覆盖康定-炉霍、甘孜-理塘和巴塘三大地热带,重点选择鲜水河、甘孜-理塘和金沙江等主干断裂及其次级断裂附近出露稳定、泉温和水化学特征具有代表性的温泉。共调查 55 处温泉和地热井,现场测定水温和总溶解性固体(TDS),并采集水样及周缘岩石样品,采样点分布见图 1。温泉水样优先采自主泉口或泉温最高、出露稳定的位置,以降低浅表冷水混入和停滞水体的影响;地热井水样在出水参数稳定后采集。共完成 35 组水样的常量组分和微量元素分析、36 组水样的氢、氧同位素测试。

岩石样品采自典型地热显示附近的出露地层及围岩,共 43 组,主要包括砂岩、灰岩、岩浆岩和变质岩,用于岩石热导率测试。水样主要阴、阳离子采用 Dionex ICS-1100 离子色谱仪测定,测试精度为 0.2%,阴、阳离子电荷平衡误差控制在 $\pm 5\%$ 以内。氢、氧同位素采用 L2130-i 液态水同位素分析仪测定,测试结果以维也纳标准平均海洋水(VSMOW)为参照。岩石热导率测试在油气藏地质及开发工程全国重点实验室完成,采用 DRE-III 多功能导热系



“/”表示矿化度数据缺失

图 1 川西高原区域地质背景、主要断裂、典型剖面位置及调查温泉点分布图

Fig. 1 Regional geological setting, major faults, locations of representative profiles and distribution of surveyed hot spring sites in the Western Sichuan Plateau

“/” indicates missing TDS (total dissolved solids) data.

数测试仪，测量范围为 $0.001 \sim 500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，分辨率为 $0.0001 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，测量精度为 $\pm 3\%$ 。

2.2 研究方法

地温梯度指恒温带下深部温度随深度的变化率。川西高原断裂裂隙及地下水活动较为发育，部分钻井温度-深度曲线存在温度突变、反转、近等温或斜率异常变化等现象。计算前依据温度-深度曲线形态，剔除明显受浅层地下水补给、含水层间流动或井内流体对流影响的异常井段；对剩余温度随深度稳定增加的有效井段，根据温度曲线斜率和地层变化进行分段，并采用最小二乘法分别拟合各段地温梯度：

$$T = T_0 + G_i Z \quad (1)$$

式中， G_i —第 i 个计算段内的地温梯度， $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ； T_0 —常温带温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T —深度 Z 处的地层温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

Z —测点深度， km 。对于包含多个有效计算段的钻井，以各井段厚度为权重计算单井平均地温梯度。

根据傅里叶热传导定律，在一维稳态热传导条件下，第 i 个井段的大地热流计算公式为

$$q_i = -K_i \times G_i \quad (2)$$

式中， q_i —第 i 个深度段大地热流， mW/m^2 ； K_i —第 i 个深度段岩石热导率， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；负号表示大地热流方向与地温梯度方向相反。各井段热导率根据所在层位及主要岩性确定；当同一井段包含多种岩性时，根据不同岩性的厚度比例确定该井段的等效热导率。在获得各有效井段大地热流后，以井段厚度为权重计算单井平均大地热流。

地下水的氢、氧同位素具有高程效应，即 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 随高程的增加而降低。因此，利用氢、氧同位

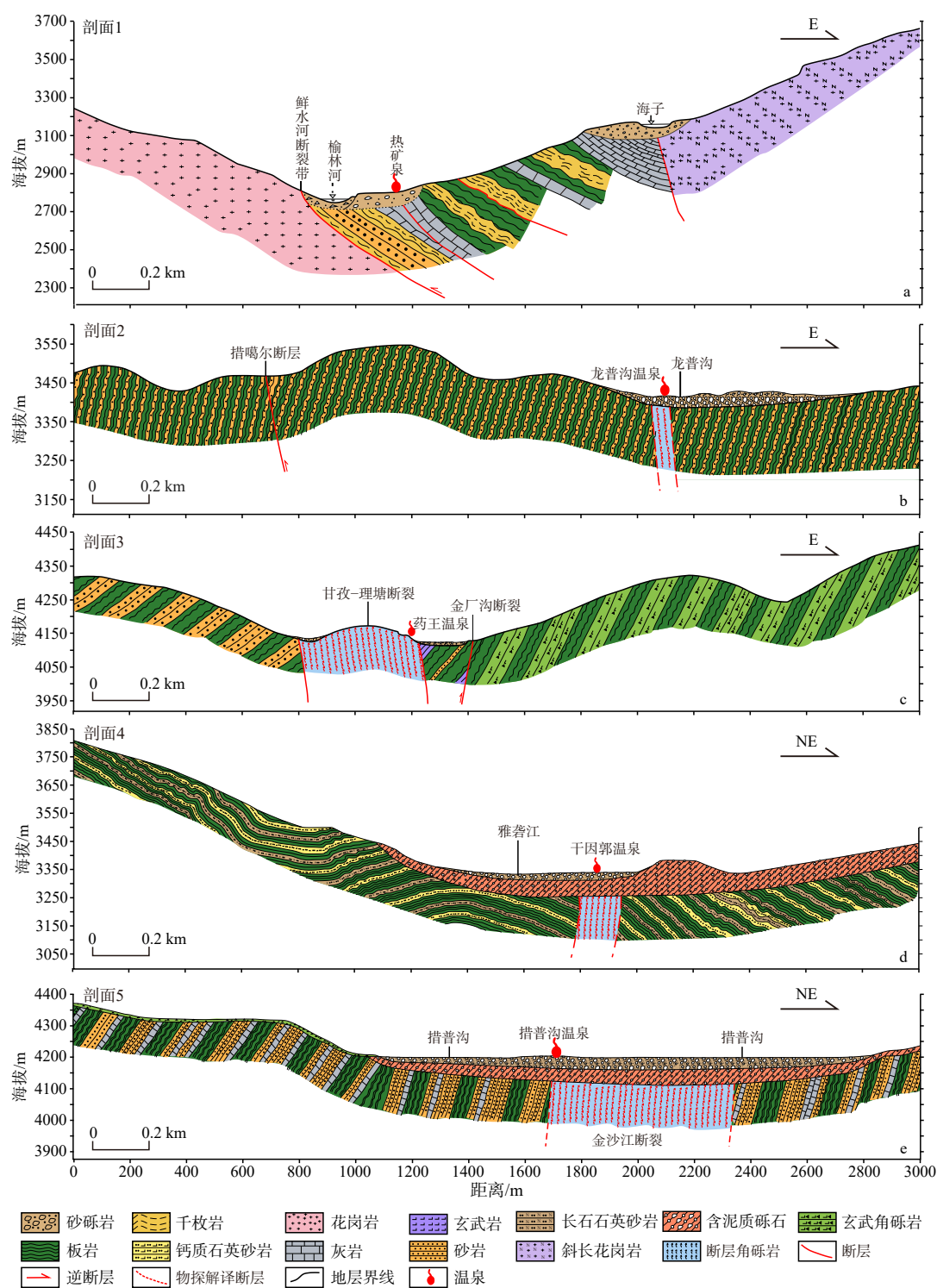


图 2 川西高原典型剖面地层岩性与断裂分布图 (剖面位置见图 1)

Fig. 2 Stratigraphic lithology and fault distribution along representative profiles in the western Sichuan Plateau (profile locations are shown in Fig. 1)

(a) Yulinhe Thermal Mineral Spring along the Xianshuihe Fault Zone; (b) Longpugou Hot Spring along the Cuoga'er Fault; (c) Yaowang Hot Spring along the Ganzi-Litang Fault Zone; (d) Ganyinguo Hot Spring in the Yalong River Valley; (e) Cuopugou Hot Spring along the Jinsha River Fault Zone

素的高程效应可以估算地热水的补给高程(Blasch and Bryson, 2007)。其公式如下:

$$H = \frac{\delta_s - \delta_p}{k} + h \quad (3)$$

式中, H —补给高程, m; h —已知参考站点高程, m; δ_s —实测水样中 $\delta^{18}\text{O}$ 或 δD 含量, ‰; δ_p —参考站点大气降水同位素值, ‰; k —稳定同位素随高程变化的梯度, ‰/m, 取中国西南地区 δD 的高程梯度 ($-2.6/100$ m; Yu et al., 1984)。考虑到地热水在高温水-岩作用过程中可能发生氧同位素交换, 使 $\delta^{18}\text{O}$ 产生正漂移, 补给高程主要采用相对稳定的 δD 值进行估算。根据川、黔、藏地区大气降水氢同位素组成与高程的关系(于津生等, 1980), 川西高原大气降水 δD 值与高程 H 的关系如下:

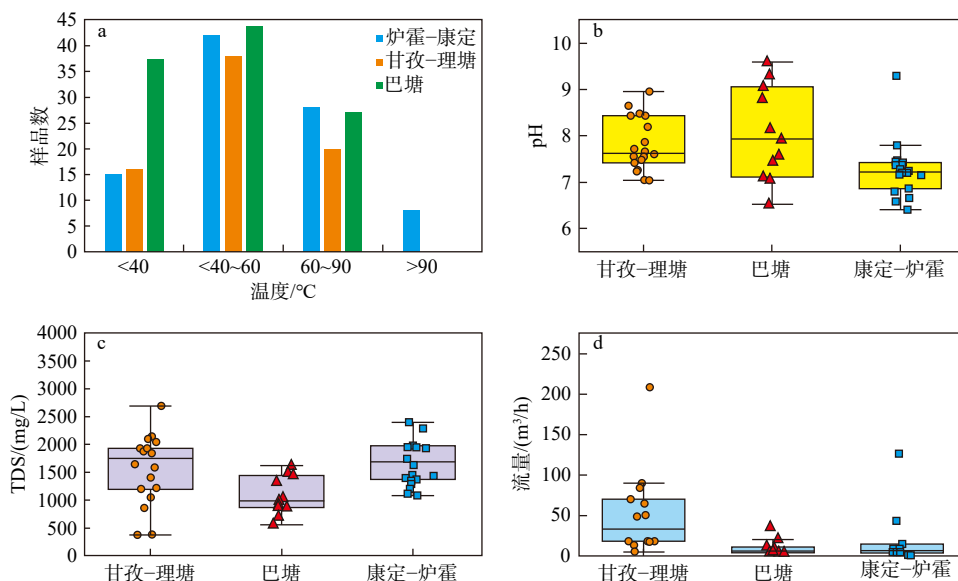
$$\delta\text{D} = -0.026H - 30.20 \quad (4)$$

式中变量含义同上。

3 川西高原温泉分布与特征

综合区域温泉资料和此次调查结果, 川西高原有地热点 274 处, 其中温泉、沸泉、喷泉、沸喷泉、间歇喷泉等天然出露温泉 225 处(Zhang et al., 2026), 地热井 49 口, 天然温泉泉口最高温度 94 °C, 最大流量 7000 m³/d。温泉主要分布于 99°~102°E、29°~

32°N 范围内, 集中于巴塘、理塘、甘孜、乡城、稻城、道孚和康定等地, 并沿主要活动断裂呈带状或串珠状展布。按温泉分布格局, 川西高原地热区可划分为炉霍-康定、甘孜-理塘、巴塘 3 个地热带。康定-炉霍地热带共有地热点 93 处, 主要沿鲜水河断裂分布, 其中温度 <40 °C、40~60 °C、60~90 °C 和 >90 °C 的地热点分别为 15、42、28 和 8 处, 高温地热点相对集中。甘孜-理塘地热带共有地热点 74 处, 主要沿甘孜-理塘断裂展布, 其中 <40 °C、40~60 °C 和 60~90 °C 的地热点分别为 16、38 和 20 处, 以 40~60 °C 为主。巴塘地热带共有地热点 107 处, 受金沙江断裂及其次级断裂控制, 其中 <40 °C、40~60 °C 和 60~90 °C 的地热点分别为 37、43 和 27 处, 中低温地热点数量较多。总体上, 3 个地热带均以 40~60 °C 的地热点最为常见, 但康定-炉霍地热带大于 90 °C 的地热点较为集中(图 3a)。此次调查温泉水的 pH 总体呈中性-弱碱性。甘孜-理塘地热带 pH 主要为 7.0~8.9; 巴塘地热带变化范围较大, 约为 6.5~9.6; 康定-炉霍地热带多数集中于 6.4~7.8, 个别样品呈较强碱性(图 3b)。TDS 结果显示, 巴塘地热带整体较低且分布相对集中, 甘孜-理塘和康定-炉霍地热带相对较高, 反映不同地热带水-岩作用程度、循环条件及浅部混合作用存在差异(图 3c)。温泉流量离散性较强, 甘孜-理塘地热带



a—温泉温度区间分布; b—温泉 pH 分布; c—温泉水 TDS 分布; d—温泉流量分布

图 3 川西高原三大地热带温泉基本特征对比

Fig. 3 Comparison of basic characteristics of hot springs in the three major geothermal belts of the western Sichuan Plateau

(a) Temperature distribution; (b) pH distribution; (c) Total dissolved solids (TDS) distribution; (d) Discharge distribution

整体流量较大且变化范围较宽;巴塘和康定-炉霍地热带多数泉点流量较小,但康定-炉霍地热带存在少量高流量泉点(图 3d)。综合来看,川西高原地热点受深大断裂及其次级裂隙系统控制明显,但 3 个地热带在高温热显示比例、地热水矿化程度和排泄强度方面存在差异。其中,康定-炉霍地热带高温点较集中,甘孜-理塘地热带温泉流量相对较大,巴塘地热带则以中低温、较低 TDS 地热水为主。

4 现今地温场特征

4.1 岩石热导率

岩石热导率能够表示岩石导热能力的大小,对地温场研究和地热资源量评估具有重要作用(唐博宁等, 2024)。川西高原岩石热导率为 $1.30 \sim 4.29 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,其中沉积岩、岩浆岩和变质岩的岩石热导率平均值分别为 $3.09 \pm 0.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 、 $2.73 \pm 0.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $2.71 \pm 0.64 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (表 1)。沉积岩中灰岩和砂岩岩石热导率分别为 $3.05 \pm 0.66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $3.14 \pm 1.61 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。根据地层岩性占比,计算了川西高原不同地层时代热物性柱(表 1),结果表明,寒武系地层热导率较低,仅为 $2.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;泥盆系及志留系地层热导率较高,分别为 $3.22 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $3.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

4.2 现今地温场特征

研究共采用 12 个大地热流测点,其中 10 口井具有完整的温度-深度测量资料,包括巴塘地热带 2 口、甘孜-理塘地热带 5 口和康定-炉霍地热带 3 口(图 4),

另外 2 口井仅具有地温梯度和大地热流(表 2)。川西高原钻孔测温深度较浅,钻孔测温数据主要分布在三叠系,分段明显,各地区之间温度差异显著。按照深度与温度的线性关系在 0.95 以上,分段计算地温梯度和大地热流,剔除地下水扰动的影响。结果表明,川西高原地温梯度为 $17.5 \sim 59.7 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$,平均值为 $29.1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。其中,康定-炉霍地区地温梯度平均值为 $22.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;甘孜-理塘地区地温梯度平均值为 $29.2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$;巴塘地区地温梯度平均值为 $30.36 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (表 2)。结合地层对应的岩石热导率数据,计算得到大地热流在 $50.80 \sim 116.20 \text{ mW}/\text{m}^2$ 之间,平均为 $77.22 \text{ mW}/\text{m}^2$,其中,康定-炉霍地区大地热流平均值为 $67.47 \text{ mW}/\text{m}^2$,甘孜-理塘地区大地热流平均值为 $85.42 \text{ mW}/\text{m}^2$,巴塘地区大地热流平均值为 $81.12 \text{ mW}/\text{m}^2$,表明热流由金沙江-巴塘方向向康定-泸定方向逐渐降低。

5 水文地球化学特征

5.1 水化学组成及类型特征

Piper 图显示,3 个地热带温泉水样品总体集中于 $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ 端附近, Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量整体较低,表明研究区地热流体阳离子以碱金属离子占优势;同时,绝大多数样品分布在 HCO_3^- 端附近, Cl^- 次之, SO_4^{2-} 含量普遍较低,显示地热流体阴离子组成以 HCO_3^- 为主(图 5)。川西高原地热流体总体以 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$ 型为主,部分样品向 $\text{HCO}_3^- - \text{Cl} - \text{Na}$ 型过渡,整体表现为富 Na、富 HCO_3^- 的基本特征。甘孜-理塘温泉水样

表 1 川西高原地质单元岩石热导率表

Table 1 Thermal conductivity of rocks from different geological units in the western Sichuan Plateau

地质年代	岩性	个数	岩石热导率范围/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	平均值/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	岩性含量/%	地质单元岩石热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
三叠纪	灰岩	23	2.12~3.44	3.11±0.67	25	2.93
	砂岩	3	1.30~4.29	3.14±1.61	35	
	岩浆岩	5	1.49~3.18	2.25±0.69	10	
	变质岩	7	1.94~4.17	2.78±0.95	30	
二叠纪	灰岩	1	2.62	2.62	50	2.76
	变质岩	3	2.50~2.32	2.93±0.38	40	
	岩浆岩	5	1.91~3.34	2.79±0.55	10	
泥盆纪	岩浆岩	2	2.91~3.54	3.22±0.44	/	3.22
志留纪	灰岩	2	2.64~3.43	3.03±0.56	70	3.07
	变质岩	1	3.15	3.15	30	
寒武纪	片岩	8	2.01~2.88	2.42±0.31	/	2.42

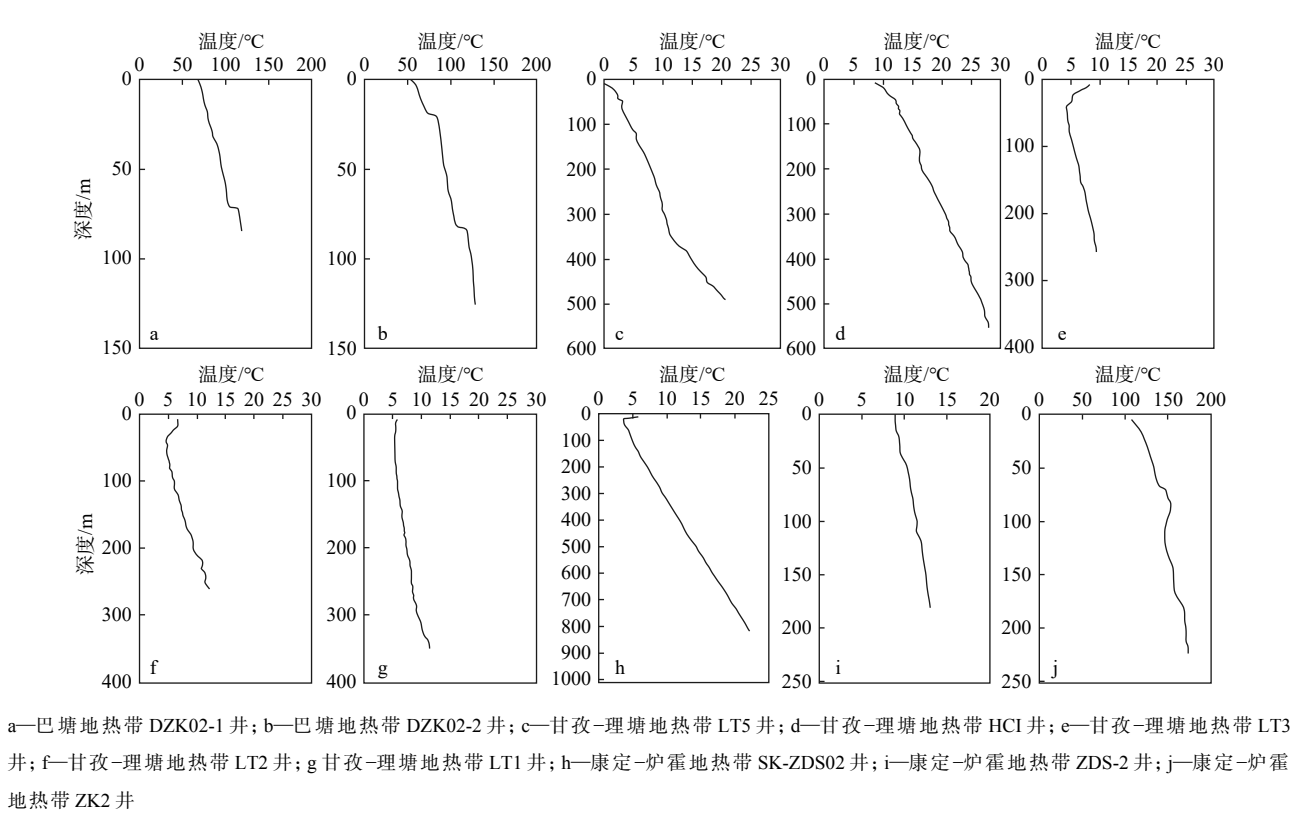


图 4 川西高原 10 口钻井温度-深度关系

Fig. 4 Temperature-depth relationships of 10 boreholes in the weatern Sichuan Plateau

(a) DZK02-1 well in the Batang geothermal belt; (b) DZK02-2 well in the Batang geothermal belt; (c) LT5 well in the Ganzi-Litang geothermal belt; (d) HCI well in the Ganzi-Litang geothermal belt; (e) LT3 well in the Ganzi-Litang geothermal belt; (f) LT2 well in the Ganzi-Litang geothermal belt; (g) LT1 well in the Ganzi-Litang geothermal belt; (h) SK-ZDS02 well in the Kangding-Luhuo geothermal belt; (i) ZDS-2 well in the Kangding-Luhuo geothermal belt; (j) ZK2 well in the Kangding-Luhuo geothermal belt

表 2 川西高原三大地热带 12 个测点的地温梯度与大地热流

Table 2 Geothermal gradients and terrestrial heat flow at 12 measurement sites in the three major geothermal belts of the western Sichuan Plateau

区域	井号	深度范围/m	地层	地温梯度(G)	岩石热导率(K)	地层大地热流($q_{\text{地层}}$)	平均大地热流($q_{\text{平均}}$)
				$^{\circ}\text{C}/\text{km}$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	mW/m^2	mW/m^2
康定-炉霍	SK-ZDS-02	100~810	三叠系	24.00	3.33	79.90	79.90
	ZDS-2	50~180	中三叠统杂谷脑组	21.30	2.99	63.70	63.70
	ZK2	110~221.4	三叠系	23.30	2.87	66.89	66.89
	XJ04	691.8~1162.5	上三叠统	20.60	2.87	59.12	61.70
		1195~1818.6	上三叠统	22.20	2.87	63.71	
	ZK1	160~230	三叠系	22.70	2.87	65.16	65.16
甘孜-理塘	LT1	60~350	三叠系	17.50	2.90	50.80	50.80
	LT2	60~200	三叠系	32.50	2.84	93.28	93.28
	LT3	60~260	三叠系	26.50	2.72	72.10	72.10
	LT5	60~550	三叠系	37.30	3.12	116.20	116.20
	HCI	0~600	三叠系	32.20	2.95	94.70	94.70
巴塘	DZK02-1	0~82.80	全新统	59.66	1.70	101.43	101.43
	DZK02-2	20.0~83.8	全新统	37.02	1.70	62.93	60.81
		83.8~124.7	上三叠统图姆沟组	20.04	2.87	57.51	

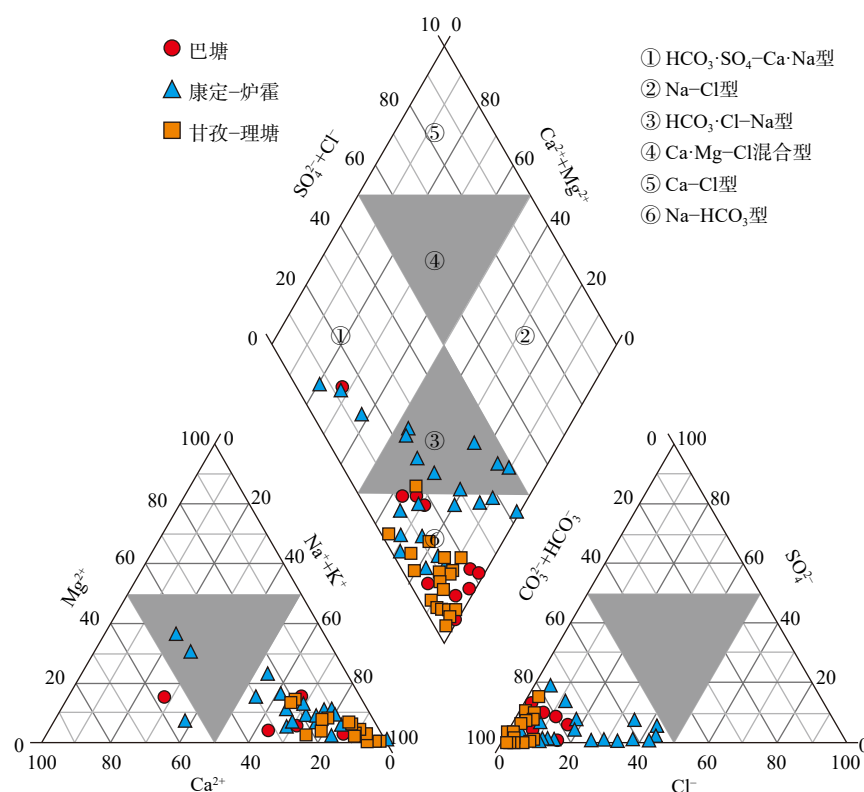


图5 川西高原三大地热带地热流体水化学类型 Piper 图

Fig. 5 Piper diagram showing the hydrochemical types of geothermal fluids in the three major geothermal belts of the western Sichuan Plateau

品分布集中,主要分布于 Na^+K^+ 和 HCO_3^- 区,水化学类型相对单一,主要为 HCO_3-Na 型;巴塘地热带样品总体上也以 HCO_3-Na 型为主,但部分样品向 Cl^- 方向略有偏移,表现出一定的 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型特征;康定-炉霍地热带样品分布相对离散,除主要分布于 HCO_3-Na 型和 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$ 型区域外,个别样品在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 及 Cl^- 方向上偏移更为明显,表明该区地热流体水化学组成的复杂性相对较高。矿化度显示不同地区存在差异(图3c),其中,康定-炉霍地热带平均矿化度最高,为1684.00 mg/L;甘孜-理塘地热带次之,为1568.27 mg/L;巴塘地热带相对较低,为1075.52 mg/L。

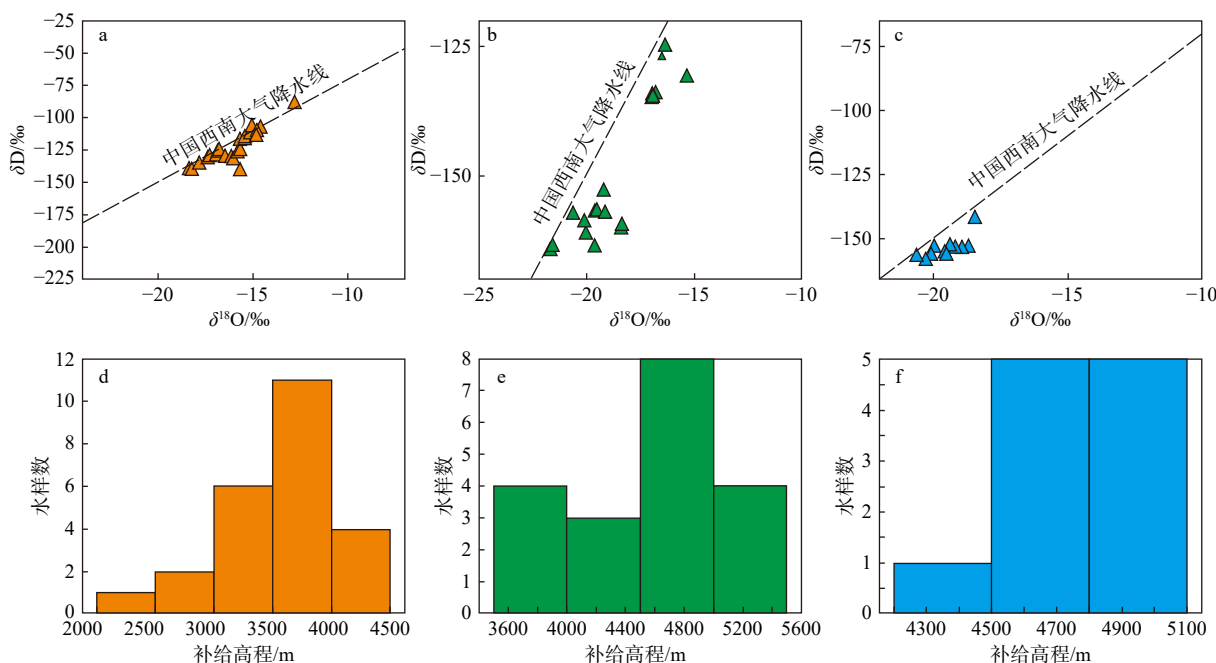
5.2 氢、氧同位素特征及补给来源

地下水中的氢、氧同位素特征可以确定地下水的补给来源,解释地下水与大气降水、地表水之间的关系(戴蔓等, 2021; 黄珣等, 2024)。地下水中的 δD 主要受补给区温度和补给高程影响,而 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受循环路径中水-岩相互作用期间的交换程度和水与岩石的相对比例影响(黄珣等, 2024)。川西高原 δD 值变化范围为 -140.7‰ ~ -107.8‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围为 -16.97‰ ~ -14.61‰ ,表明研究区地热流体整体具有高海拔降水同位素亏损的基本特征。川西高

原地热流体样品点总体沿中国西南大气降水线(李维杰等, 2018)附近分布,说明地热流体补给来源以大气降水为主(图6a—6c)。而且,3个典型区的地下水同位素样品整体上接近于当地的大气降水线,但部分样点存在一定程度的 $\delta^{18}\text{O}$ 正漂移,反映热水在深循环增温过程中发生了不同程度的水-岩氧同位素交换。区域上,川西高原地热流体的氢、氧同位素组成范围较宽,表明不同地热带在补给条件、循环路径及循环深度等方面存在一定的差异。根据地热流体中氢氧稳定同位素高程效应,由公式(4)可以计算地下水的补给高程,进而判断地下水的可能补给区。结果表明,康定-炉霍地热带补给高程约为2000~4500 m,主要集中于3500~4000 m;甘孜-理塘地热带约为3600~5600 m,主要集中于4500~5200 m;巴塘地热带约为4200~5100 m,主要集中于4500~5000 m(图6d—6f)。

5.3 水-岩作用与流体演化过程

在地热水上升过程中, Cl^- 几乎不受水-岩相互作用的影响,并且不会通过吸附作用被固相矿物表面吸附,经常作为水文地球化学过程的重要示踪离子。因此, Cl^- 与其他常量离子的相关关系可用来反映地热流体热在循环过程中的水化学过程(Tian et



a—康定-炉霍地区 δD - $\delta^{18}O$ 关系; b—甘孜-理塘地区 δD - $\delta^{18}O$ 关系; c—巴塘地区 δD - $\delta^{18}O$ 关系; d—康定-炉霍地区补给高程分布; e—甘孜-理塘地区补给高程分布; f—巴塘地区补给高程分布

图6 川西高原康定-炉霍、甘孜-理塘和巴塘地区地热流体 δD - $\delta^{18}O$ 关系及补给高程分布

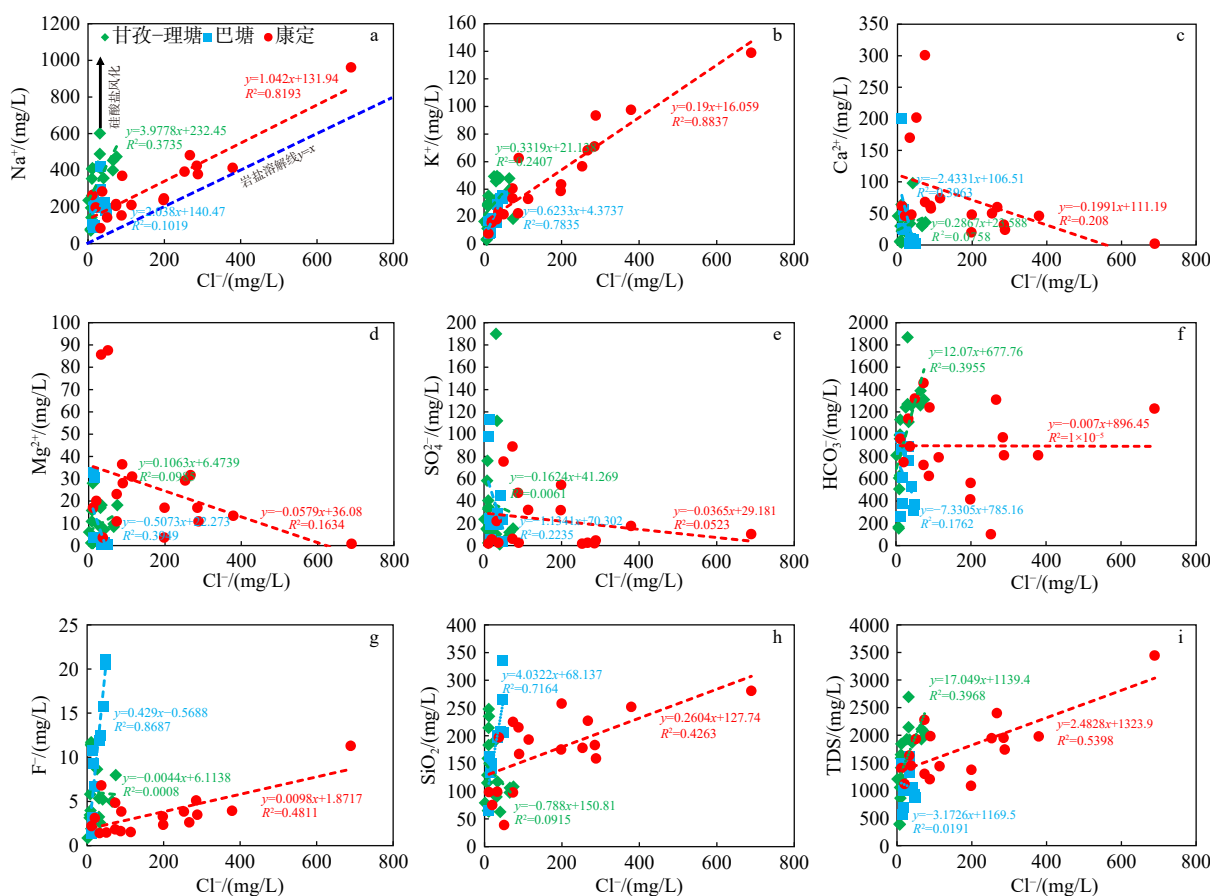
Fig. 6 δD - $\delta^{18}O$ relationships and recharge elevation distributions of geothermal fluids in the Kangding-Luhuo, Ganzi-Litang, and Batang regions of the western Sichuan Plateau

(a) δD - $\delta^{18}O$ relationship in the Kangding-Luhuo region; (b) δD - $\delta^{18}O$ relationship in the Ganzi-Litang region; (c) δD - $\delta^{18}O$ relationship in the Batang region; (d) Recharge elevation distribution in the Kangding-Luhuo region; (e) Recharge elevation distribution in the Ganzi-Litang region; (f) Recharge elevation distribution in the Batang region

al., 2023)。川西高原不同地热带中 Cl^- 与其他常量离子的相关关系存在明显差异(图7)。在康定-炉霍地热带中, Cl^- 与 Na^+ 、 K^+ 表现出较好的正相关性, 且与 TDS 亦具有一致性, 表明热流体中碱金属离子富集与含氯离子演化具有较强耦合关系; 巴塘地热带中 Cl^- 与 K^+ 、 F^- 及 SiO_2 相关性相对较好, 该流体演化除受含氯离子影响外, 还与硅酸盐矿物溶解具有较密切联系; 甘孜-理塘地热带中, 整体上 Cl^- 与各离子的相关性较弱, 仅与 Na^+ 、 HCO_3^- 和 TDS 表现出一定对应关系, 反映流体化学演化受多因素的共同控制。

利用地热水主要阴、阳离子间的关系可以进一步识别各种岩石矿物参与水-相互作用的过程(Wang et al., 2022)。由图8可见, Ca^{2+} 、 HCO_3^- 、 $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ 和 HCO_3^- 的离子毫克当量浓度(γ)关系表明, 川西高原温泉水总体分布于方解石和白云石溶解线附近, 表明碳酸盐矿物溶解是 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 HCO_3^- 的重要来源。相比之下, 多数样品在 $\gamma(Ca^{2+})$ 与 $\gamma(SO_4^{2-})$ 关系图中偏离石膏溶解线, 仅少数点位靠近该线, 说明石膏溶解对川西高原水化学组成的贡献相对

有限, 仅在局部区段可能起一定作用(图8a-c), 表明川西高原热水中 HCO_3^- 的形成主要受碳酸盐矿物溶解控制。离子毫克当量浓度 γ 组合 $[\gamma(Na^++K^+)-\gamma(Cl^-)]$ 和 $[\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})]$ 之间的比值可以显示地下水和对应的含水层是否发生了离子交换(Ren et al., 2021)。该比值的样品点总体沿 $y=-x$ 附近分布, 表明研究区热水普遍经历了较明显的阳离子交换作用; 多数样品位于 $[\gamma(Na^++K^+)-\gamma(Cl^-)]>0$ 且 $[\gamma(Ca^{2+}+Mg^{2+})-\gamma(HCO_3^-+SO_4^{2-})]<0$ 的区域, 说明正向阳离子交换是含水介质中的主要反应过程, 即 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 被矿物表面吸附, 而 Na^+ 、 K^+ 释放进入水体, 从而进一步强化了地热流体以 Na^+ 为优势阳离子的化学特征(图8d)。综上所述, 川西高原地热流体以大气降水补给为基础, 地下水化学成分主要受到碳酸盐矿物溶解的控制, 局部地下水化学成分受碳酸盐矿物溶解、硅酸盐矿物溶解及阳离子交换作用的共同影响, 并在不同地热带产生了不同程度的溶质富集与化学分异。甘孜-理塘地热带水化学演化以碳酸盐矿物溶解和稳定阳离子交换为主, 水-



a— Na^+ 与 Cl^- 的关系; b— K^+ 与 Cl^- 的关系; c— Ca^{2+} 与 Cl^- 的关系; d— Mg^{2+} 与 Cl^- 的关系; e— SO_4^{2-} 与 Cl^- 的关系; f— HCO_3^- 与 Cl^- 的关系; g— F^- 与 Cl^- 的关系; h— SiO_2 与 Cl^- 的关系; i—TDS与 Cl^- 的关系

图7 川西高原三大地热带地热流体 Cl^- 与主要水化学组分关系图

Fig. 7 Relationships between Cl^- and major hydrochemical components of geothermal fluids in the three major geothermal belts of the western Sichuan Plateau

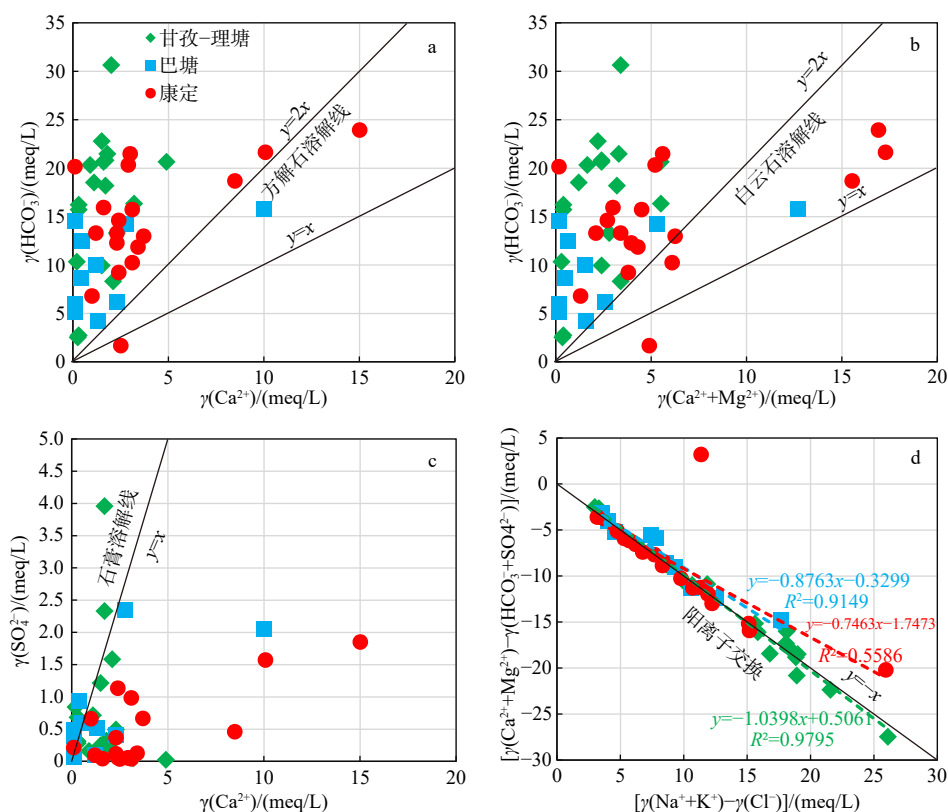
(a) Na^+ versus Cl^- ; (b) K^+ versus Cl^- ; (c) Ca^{2+} versus Cl^- ; (d) Mg^{2+} versus Cl^- ; (e) SO_4^{2-} versus Cl^- ; (f) HCO_3^- versus Cl^- ; (g) F^- versus Cl^- ; (h) SiO_2 versus Cl^- ; (i) TDS versus Cl^-

岩作用进行比较充分,其样品与阳离子交换曲线相关性最好,且 HCO_3^- 含量较高。巴塘地热带样品总体矿化度不高,但 F^- 、 SiO_2 与 Cl^- 具有较好的相关性,表明其除碳酸盐溶解和阳离子交换外,还受到硅酸盐矿物溶解的影响,反映出深循环和高温水-岩反应特征。康定-炉霍地热带样品 Na^+ 、 K^+ 、TDS 与 Cl^- 相关性较强,且离子浓度变化范围大,说明其溶质富集程度较高,反映该区受多级裂隙补给、浅部冷水混合和局部深循环共同影响,水-岩反应过程最为复杂。

5.4 热储温度

川西高原的温泉水均未达到水-岩反应平衡,有冷水混入,因此可用硅焓模型图解排除冷水混合的影响 (Fournier, 1977; 刘祥等, 2025), 此外, Na-K 等阳离子地热温标的适用性受到限制,只能采用二

氧化硅温标法计算热储温度。硅-焓图解法基于冷、热水混合过程中热量和溶解 SiO_2 近似守恒的原理,首先根据代表性地表冷水的焓值和 SiO_2 浓度确定冷水端元点 A,并根据温泉水的焓值和 SiO_2 浓度确定样品点 B 或 C; 随后连接 A、B 或 A、C 并向高焓方向延伸,混合线与石英无蒸汽损失曲线或石英最大蒸汽损失曲线的交点 D 或 F 所对应的焓值,即为冷水混合前高温端元的估算初始焓值,再根据水焓-温度关系换算为热储温度。按照上述方法对逐个样品进行图解计算,得到甘孜-理塘地热带热储温度为 $136.5 \sim 321.9^\circ\text{C}$,巴塘地热带为 $170.1 \sim 379.0^\circ\text{C}$,康定-炉霍地热带为 $103.9 \sim 576.0^\circ\text{C}$ (图 9a)。结合 SiO_2 矿物溶解平衡判别结果 (图 9b),川西高原温泉水样品 SiO_2 与 $\lg(\text{K}^2/\text{Mg})$ 主要分布在石英、玉髓及 α -方石英相关曲线附近,因此,热储温度计算分别采



a— Ca^{2+} - HCO_3^- 当量关系图; b— $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ - HCO_3^- 当量关系图; c— Ca^{2+} - SO_4^{2-} 当量关系图; d— $[\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+)-\gamma(\text{Cl}^-)]$ 与 $[\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})]$ 关系图

图8 川西高原温泉水主要阴阳离子关系

Fig. 8 Relationships among major cations and anions in hot spring water in the western Sichuan Plateau

(a) Ca^{2+} - HCO_3^- equivalent relationship; (b) $(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})$ - HCO_3^- equivalent relationship; (c) Ca^{2+} - SO_4^{2-} equivalent relationship; (d) Relationship between $[\gamma(\text{Na}^++\text{K}^+)-\gamma(\text{Cl}^-)]$ and $[\gamma(\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+})-\gamma(\text{HCO}_3^-+\text{SO}_4^{2-})]$

用石英温标、玉髓温标和 α -石英温标进行估算(公式5—公式9)。石英无蒸汽损失温标计算热储温度为 $79.4\sim 198.1^\circ\text{C}$,平均约 145.0°C ;石英最大蒸汽损失温标为 $83.1\sim 182.9^\circ\text{C}$,平均约 139.1°C ,2种石英温标结果整体接近,温度主要集中于 $100\sim 180^\circ\text{C}$ 。玉髓温标和 α -石英温标结果整体低于石英温标,其中玉髓无蒸汽损失温标为 $48.1\sim 180.0^\circ\text{C}$,平均约 119.6°C ;玉髓最大蒸汽损失温标为 $55.5\sim 161.2^\circ\text{C}$,平均约 114.2°C ; α -石英温标为 $29.6\sim 149.2^\circ\text{C}$,平均约 94.7°C 。综合来看,川西高原三大地热带石英温标结果较为稳定,热储温度主要集中于 $100\sim 180^\circ\text{C}$,局部样品接近或超过 200°C ,区域上巴塘地热带和康定-炉霍地热带热储温度整体高于甘孜-理塘地热带(图9c)。

石英无蒸汽损失(Fournier, 1977):

$$T = \frac{1309}{5.19 - \lg C} - 273.15 \quad (5)$$

石英最大蒸汽损失(Fournier, 1977):

$$T = \frac{1309}{5.75 - \lg C} - 273.15 \quad (6)$$

玉髓无蒸汽损失(Fournier, 1977):

$$T = \frac{1032}{4.69 - \lg C} - 273.15 \quad (7)$$

玉髓最大蒸汽损失(Fournier, 1977):

$$T = \frac{1263}{5.75 - \lg C} - 273.15 \quad (8)$$

α -石英(Fournier, 1977):

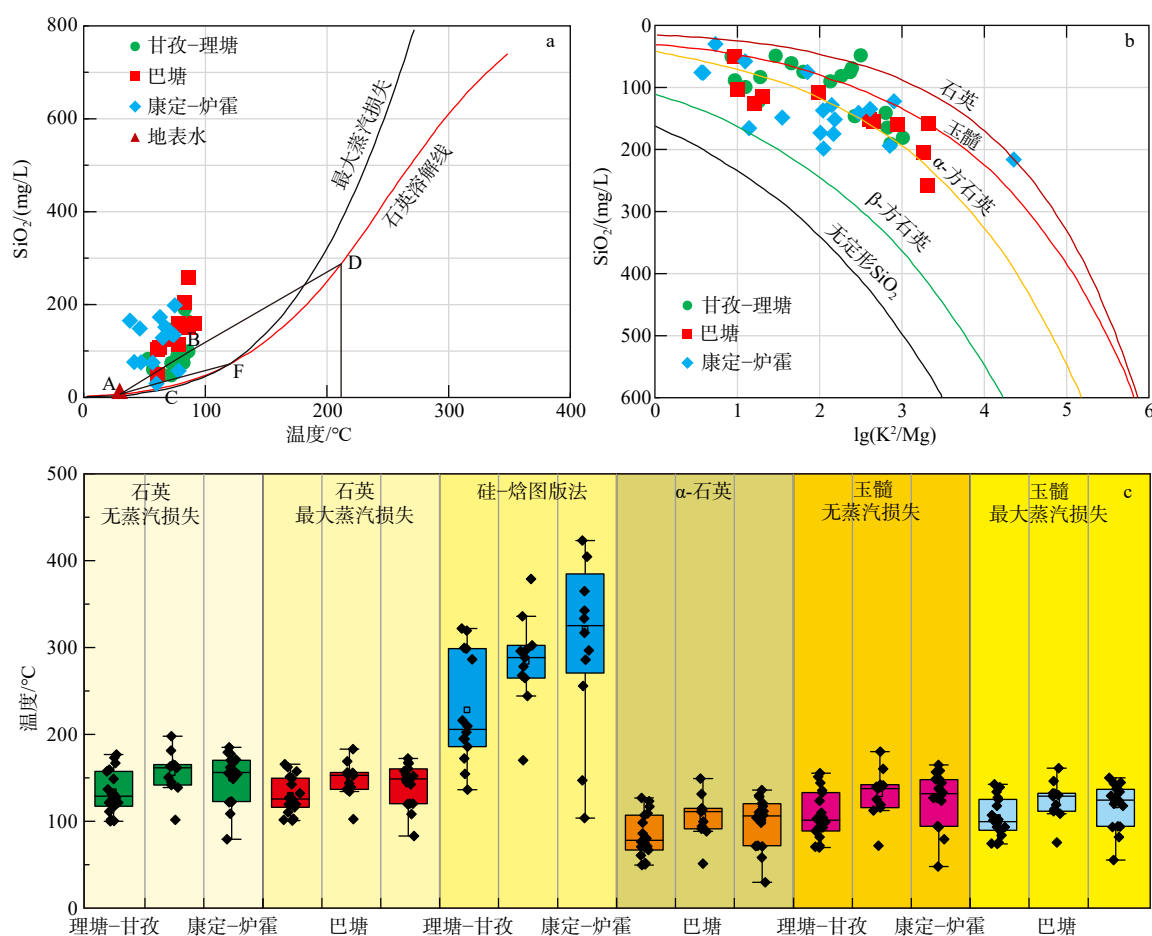
$$T = \frac{1309}{5.75 - \lg C} - 273.15 \quad (9)$$

式中, C —二氧化硅的溶解度, mg/L ; T —热储温度, $^\circ\text{C}$ 。

6 讨论

6.1 川西高原地热系统热源构成差异及控制因素

川西高温地热系统的热量来源具有明显的差



a—川西高原三大热带硅-焓图解; b— SiO_2 矿物溶解平衡判别; c—热储温度估算结果

图9 川西高原地热流体地球化学温标及热储温度评价

Fig. 9 Geochemical geothermometry and reservoir temperature estimation of geothermal fluids in the western Sichuan Plateau

(a) Silica-enthalpy graphical method; (b) Silica-mineral dissolution equilibrium in the SiO_2 - $\lg(K^2/\text{Mg})$ diagram; (c) Statistical comparison of reservoir temperatures estimated using different methods

异,地壳热贡献和深部热输入共同构成地热系统的基本热背景,局部强活动断裂摩擦生热可对断裂邻近区热异常产生叠加作用。鲜水河、甘孜-理塘和金沙江等深大断裂本身主要发挥热量与流体输导作用,通过控制地下水深循环及高温流体上升,影响浅部热量聚集与释放。因此,文章结合大地热流、壳幔热流分配、深部S波速度结构及断裂活动特征,对不同热源的相对作用及其空间差异进行综合判断。甘孜-理塘、巴塘和康定-炉霍地热带平均大地热流分别为 85.42 mW/m^2 、 81.12 mW/m^2 和 67.47 mW/m^2 ,表明甘孜-理塘和巴塘地热带区域热背景总体高于康定-炉霍地热带。地壳热流与幔源热流之比 q_c/q_m (图 10a) 及地壳热流与地表大地热流之比 q_c/q (图 11),均显示甘孜-理塘地热带的地壳热贡献相对较高,巴塘次之,康定-炉霍较低。深

部S波速度(V_s)结构显示,巴塘-理塘一带中下地壳发育较连续的低速异常,其中巴塘附近约 $20\sim 30 \text{ km}$ 和理塘附近约 $15\sim 30 \text{ km}$ 深度的低速异常较为明显;向东至康定-炉霍地区,其连续性和幅度总体减弱(图 10c、10d,图 11)。S波低速异常可能与高温、富流体弱化地壳、塑性变形及局部部分熔融有关(侯爵等, 2023),因此可作为巴塘-理塘地区深部高温背景和深部热输入相对较强的地球物理证据。除区域尺度的地壳热贡献和深部热输入外,活动断裂摩擦生热可进一步强化局部热异常。数值模拟表明,鲜水河走滑断裂剪切摩擦生热对断裂邻近区地表热流的贡献约为 $5\sim 50 \text{ mW/m}^2$,并可能促进 $20\sim 25 \text{ km}$ 深度范围内的局部增温或部分熔融(Ai et al., 2021)。但该作用主要局限于强活动断裂及其邻近区域,难以解释川西高原大尺度地温场和深部速

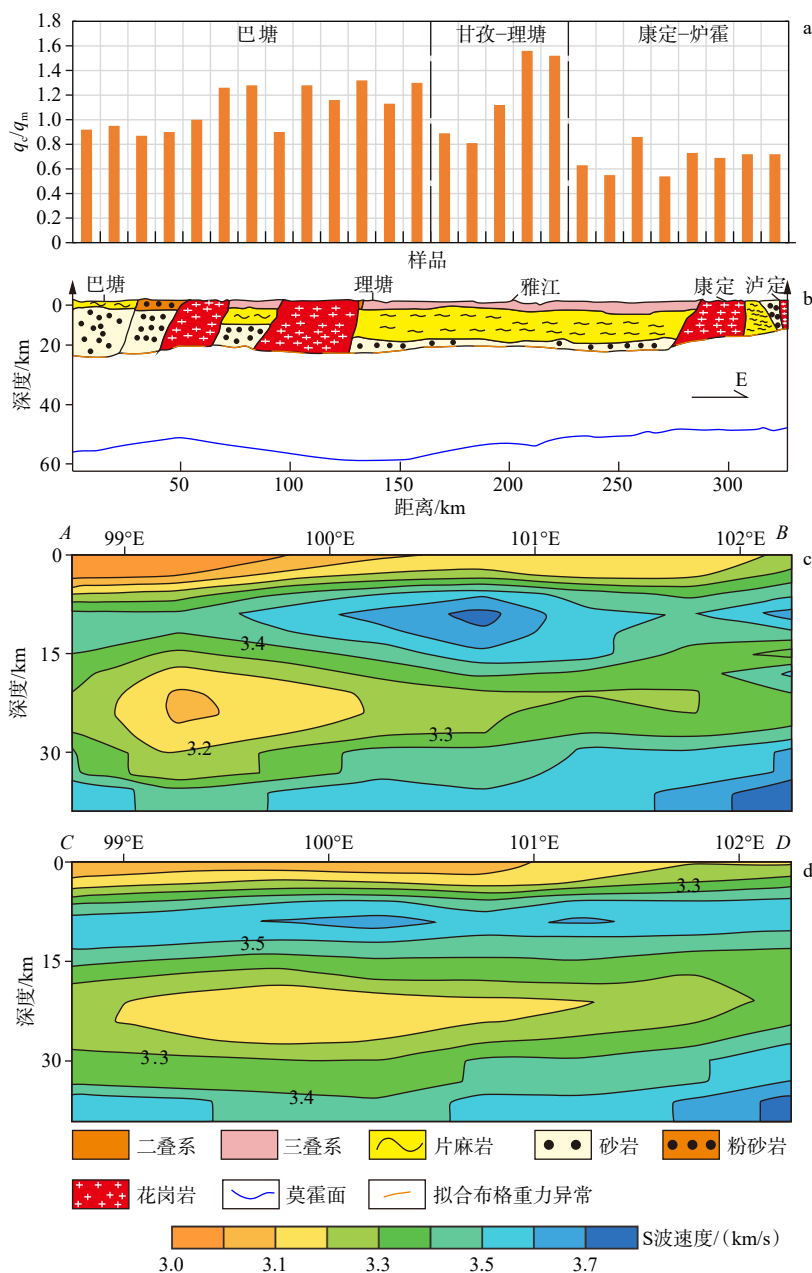


图 10 川西高原巴塘-理塘-康定剖面热流、地层岩性与深部 S 波速度结构特征 (据高玲举等, 2015; 张健等, 2017; 李午阳等, 2018 修改)

Fig. 10 Heat flow, lithology and deep S-wave velocity structure along the Batang-Litang-Kangding profile in the western Sichuan Plateau (modified from Gao et al., 2015; Zhang et al., 2017; Li et al., 2018)

(a) Ratio of crustal heat flow to mantle heat flow in the three major geothermal belts; (b) Geological structure, Moho geometry, and Bouguer gravity anomaly along the Batang-Litang-Yajiang-Kangding-Luding profile; (c) Deep S-wave velocity structure along profile AB; (d) Deep S-wave velocity structure along profile CD

度结构的整体差异, 因此更适合作为康定-炉霍地热带局部高温异常的补充热源, 而非区域地热背景的主控因素。

综上, 三大地热带的热源组合及其控热方式存

在明显差异。甘孜-理塘地热带表现为较高地壳热贡献与深部高温异常共同作用, 连续发育的主、次级断裂进一步提高了热量和流体的输导效率; 巴塘地热带具有较高区域热背景和较强深部热输入, 金

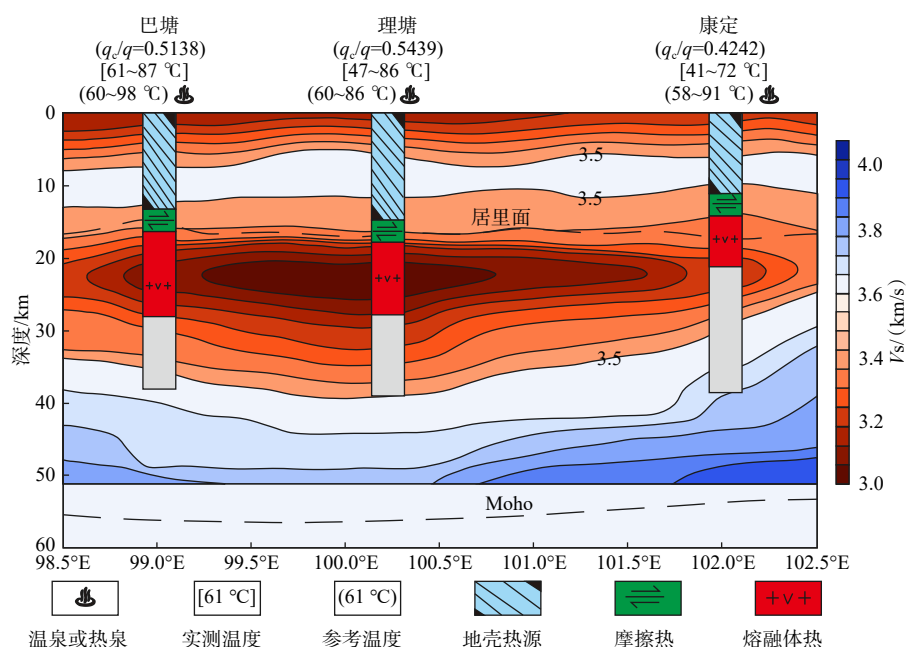


图 11 30°N 剖面深部剪切波速度结构与壳幔热结构示意图 (据李午阳等, 2018 修改)

Fig. 11 Schematic diagram of deep S-wave velocity structure and crust-mantle thermal structure along the 30°N profile in the western Sichuan Plateau (modified from Li et al., 2018)

沙江深大断裂及其次级断裂为深部热量和高温流体向浅部运移提供通道; 康定-炉霍地热带区域热背景相对较低, 但鲜水河断裂切割深、活动性强, 多级裂隙系统及局部摩擦生热可促进深部热量传输和局部热流体汇聚。由此表明, 川西高原三大地热带的地温场和热储特征差异主要受壳幔热流分配、深部热结构及局部构造热效应共同控制, 而深大断裂则主要决定热量和热流体由深部向浅部传输的效率。

6.2 川西高原地热系统流体差异及控制因素

氢、氧同位素结果表明, 川西高原三大地热带的地热流体均主要来源于高海拔大气降水, 但水化学组成、TDS 及补给高程存在明显差异。康定-炉霍地热带补给高程主要集中于 3500~4000 m, 样品分布较离散、平均矿化度较高; 甘孜-理塘地热带主要集中于 4500~5200 m, 水化学组成相对集中; 巴塘地热带主要集中于 4500~5000 m, 整体 TDS 较低, 但部分样品 Cl^- 、 K^+ 、 F^- 和 SiO_2 含量相对较高。上述差异表明, 三大地热带虽具有相似的补给来源, 但受断裂体系贯通性和组合方式控制, 其地下水循环路径、受热过程、水-岩作用及浅部混合程度存在明显差异。康定-炉霍地热带受鲜水河主断裂及多级次生裂隙共同控制, 地下水既可沿主断裂向深部循环, 也可沿次级裂隙和浅部破碎带侧向运移, 形成多层次循环路径。复杂的断裂网络使流体经历

不同程度的受热水-岩作用, 上升过程中又易受到浅部冷水混合, 因此表现为水化学类型离散度较高、矿化度较高及局部高温热显示集中。甘孜-理塘地热带主断裂延伸稳定、次级断裂发育且贯通性较好, 有利于形成较稳定的补给-深循环-受热-排泄通道, 使地下水在较稳定的循环过程中持续发生水-岩作用, 并沿主、次级断裂交汇部位上升, 表现为水化学组成较集中、温泉沿断裂连续出露及流体演化相对稳定。巴塘地热带主要受金沙江深大断裂及其分支断裂控制, 较好的深部贯通条件有利于地下水深循环增温, 部分样品较高的 F 和 SiO_2 含量反映了较明显的高温水-岩作用; 同时, 深切河谷降低局部排泄基准面, 促进热流体快速上升, 使其在保持较高热储温度的同时, 整体 TDS 并未明显升高。因此, 三大地热带可建立“断裂贯通条件-流体循环-水-岩作用与增温-热储形成-浅部排泄”耦合关系: 断裂切割深度及贯通性控制地下水深循环的可能性和循环路径, 循环深度及停留过程进一步影响流体受热程度和水-岩反应, 而区域热背景与深循环增温共同决定热储温度; 热流体随后沿断裂快速上升, 并受到次级裂隙、河谷切割及浅部冷水混合的进一步改造。由此, 康定-炉霍地热带表现为复杂断裂网络控制下的多层次循环和局部高温富集; 甘孜-理塘地热带表现为连续断裂输导控制下

的稳定深循环;巴塘地热带则表现为深大断裂控制深循环、断裂-河谷耦合促进高温流体快速排泄。

6.3 三大地热带对比及地热成因模式

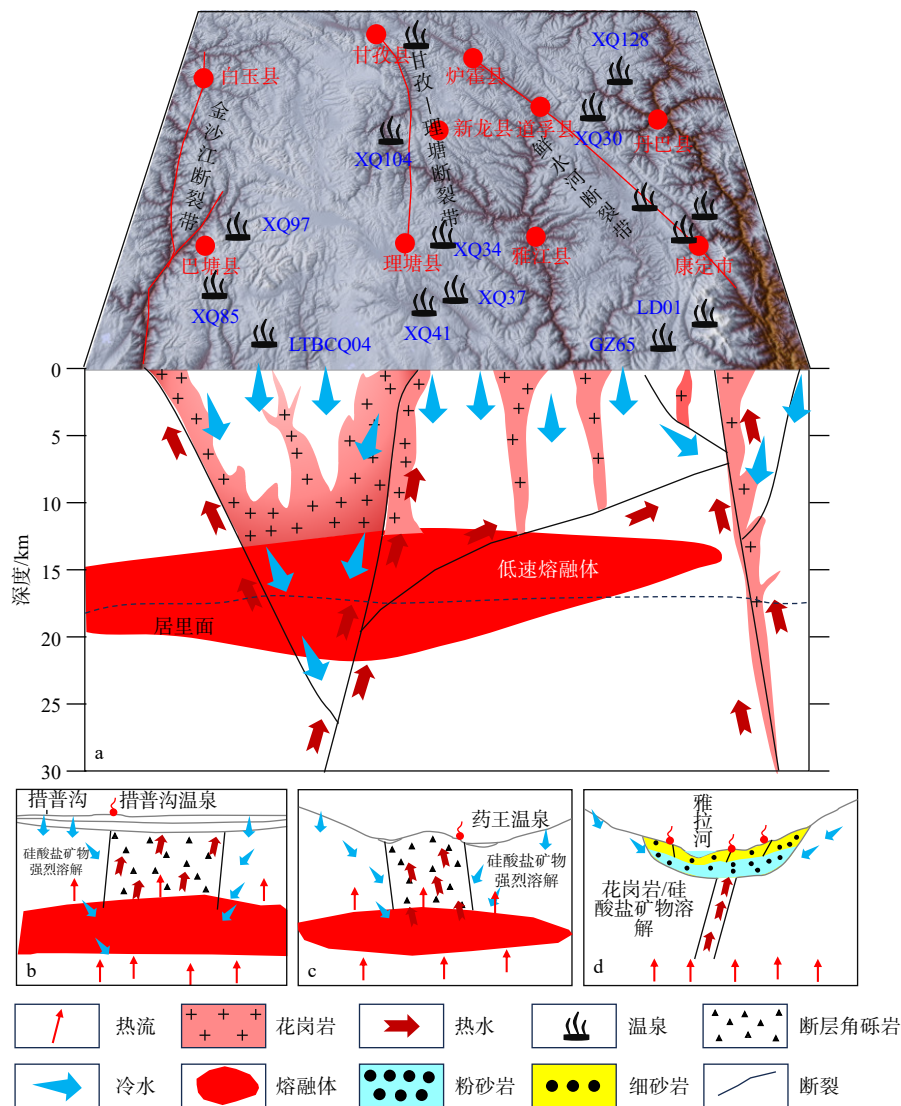
综合现今地温场、热储温度、水文地球化学、深部热结构及断裂特征,川西高原三大地热带具有明显差异。甘孜-理塘地热带平均大地热流最高(85.42 mW/m^2),地壳热流贡献较高,中下地壳低速异常连续发育,且断裂输导体系较为稳定,表现为较高区域热背景和稳定流体循环共同控制的地热系统;巴塘地热带平均大地热流为 81.12 mW/m^2 ,深部低速异常显著,热储温度整体较高,金沙江深大断裂与深切河谷共同促进高温流体快速上升和集中排泄,表现出较强深部热输入特征;康定-炉霍地热带平均大地热流相对较低(67.47 mW/m^2),但鲜水河断裂切割深、活动性强,局部摩擦生热及多级裂隙输导可促进热量和流体汇聚,因此表现为区域热背景相对较低而局部高温热显示集中的特征。总体上,三大地热带均受区域热背景、深大断裂输导和大气降水深循环共同控制,但深部热输入、地壳热贡献及断裂输导方式的差异造成了其地温场、流体演化和地表热显示的区域分异。川西高原三大地热带可概括为受青藏高原东缘的区域高热背景控制、深大断裂导热导水、大气降水深循环补给共同作用形成的断裂导控型水热系统(图12)。其形成过程可归纳为研究区位于青藏高原东缘高热背景区,中下地壳低速异常和较高大地热流为地下水增温提供基础热源;鲜水河断裂、甘孜-理塘断裂和金沙江断裂等深大断裂及其派生裂隙构成地下水下渗和热流体上升的主要通道;高海拔大气降水沿断裂及裂隙系统向深部循环,在中深部热储中受热增温,并与围岩持续发生水-岩作用和离子交换,后沿主断裂、次级断裂及断裂交汇部位上升,最终在河谷、沟谷、断裂破碎带及基岩与第四系接触部位出露,形成温泉、热泉、沸泉和喷汽孔等地表热显示。但由于断裂贯通深度、裂隙网络复杂程度、热储介质和浅部混合作用不同,各地热带在流体演化程度、矿化度水平和温泉出露方式上表现出明显差异:①巴塘地热带具有较高热流背景,中下地壳低速异常较为显著,表明其深部热输入较强。金沙江深大断裂及次级断裂为地下水深循环和高温流体上升提供了通道,高山峡谷和深切河谷进一步降低局部排泄基准面,促使热流体在断裂-河谷耦合部位集中排泄。部分样品中 Cl^- 、 K^+ 、 F^- 和 SiO_2 含量相

对较高,可能反映较深循环和较强硅酸盐矿物溶解作用;整体 TDS 相对较低,则可能与断裂通道较通畅、流体上升较快及浅部停留时间较短有关。②甘孜-理塘地热带具有较高的大地热流和地壳热贡献,中下地壳低速异常连续发育,表明其受地壳热和深部热输入共同影响。甘孜-理塘主断裂及多级次生断裂构成较连续的流体输导网络,有利于大气降水沿断裂稳定下渗、深循环增温并沿断裂带排泄。该区温泉沿断裂分布较连续,水化学组成相对集中,反映其补给-径流-排泄过程及流体演化相对稳定。③康定-炉霍地热带的区域大地热流和中下地壳低速异常相对较弱,但鲜水河断裂切割深、活动性强,且次级断裂和裂隙系统发育,可有效沟通深部热量与浅部热储。局部断裂摩擦生热可进一步增强断裂邻近区的热异常,多级裂隙则控制热流体汇聚和快速上升。复杂的断裂网络使地下水循环路径多样,上升过程中容易受到浅部冷水混合,因而表现为水化学组成较分散、TDS 较高及局部高温热显示集中。

综上,川西高原三大地热带具有相似的“降水补给-断裂下渗-深循环增温-断裂上升-浅部排泄”过程,但区域热背景、深部热输入、断裂贯通性、裂隙组合及地貌排泄条件不同。巴塘地热带突出较强深部热输入和断裂-河谷耦合排泄;甘孜-理塘地热带以较高地壳热贡献和连续断裂输导为特征;康定-炉霍地热带则主要受鲜水河深大断裂、局部摩擦生热和多级裂隙聚流控制。上述差异共同造成三大地热带地温场、流体演化和地表热显示的空间分异。

6.4 高温地热资源潜力分析

综合前述现今地温场、热储温度、深部热结构及断裂输导条件,川西高原三大地热带的高温地热资源潜力具有明显的区域差异。甘孜-理塘和巴塘地热带区域热背景较高,深部热异常及断裂输导条件较为有利,整体具有较好的高温地热资源勘查潜力;康定-炉霍地热带区域热背景相对较低,但局部高温热显示集中,表明其资源潜力更多表现为强活动断裂控制下的局部富集。因此,川西高温地热资源总体表现为“区域有利区与局部高温靶区并存”的空间分布特征。从勘查方向看,甘孜-理塘地热带应重点关注主断裂与次级断裂复合部位及热显示连续分布区,巴塘地热带应重点关注金沙江断裂及其分支断裂与深切河谷耦合部位;康定-炉霍地热带则应优先关注鲜水河主断裂与次级断裂交汇



a—川西主要断裂带成因模式对比图；b—巴塘成因模式；c—理塘地热成因模式；d—康定地热成因模式

图 12 川西高原断裂导控型地热系统成因模式图

Fig. 12 Genetic model of the fault-controlled geothermal systems in the western Sichuan Plateau

(a) Comparison of conceptual models for the major fault zones in western Sichuan; (b) Conceptual model of the Batang geothermal system; (c) Conceptual model of the Litang geothermal system; (d) Conceptual model of the Kangding geothermal system

部位及高温热显示集中区。上述评价主要反映区域尺度上的相对资源潜力和勘查有利性，并不等同于可开发资源量评价；具体资源规模及开发潜力仍需进一步结合热储范围、有效厚度、储层物性、井温及生产性试验等资料进行验证。

7 结论

(1) 川西高原地温场与地表热显示具有明显的区域分异和断裂控制特征。温泉主要沿鲜水河、甘孜-理塘和金沙江等深大断裂及其次级断裂呈带状

或串珠状。研究区地温梯度为 $17.5 \sim 59.7 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{km}$ ，大地热流为 $50.80 \sim 116.20 \text{ mW}/\text{m}^2$ ；甘孜-理塘和巴塘地热带平均大地热流分别为 85.42 和 $81.12 \text{ mW}/\text{m}^2$ ，区域热背景明显高于康定-炉霍地热带的 $67.47 \text{ mW}/\text{m}^2$ ；地表热显示则表现为康定-炉霍局部高温点集中、甘孜-理塘沿断裂连续出露、巴塘地热点数量较多但中低温点占优势的差异特征。

(2) 三大地热带具有相同的大气降水补给基础，但断裂贯通条件和循环路径差异导致不同的流体演化特征。地热流体总体以 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型为主，热储温度主要集中于 $100 \sim 180 \text{ } ^\circ\text{C}$ ，局部接近或超过

200 ℃。甘孜-理塘地热带表现为较稳定的深循环,巴塘地热带较明显的深循环和高温水-岩作用特征,康定-炉霍地热带则受多级裂隙循环和浅部冷水混合影响较强。

(3)三大地热带形成了差异化的壳幔-断裂复合控热机制。区域尺度上,地壳热贡献和深部热输入构成主要热背景,深大断裂控制热量和流体输导,局部摩擦生热对强活动断裂邻近区产生叠加作用。甘孜-理塘地热带以较高地壳热贡献和连续断裂输导为特征,巴塘地热带以较强深部热输入和金沙江断裂控制为主,康定-炉霍地热带则突出鲜水河断裂、多级裂隙及局部摩擦生热的共同作用。

(4)川西高温地热资源呈现区域有利区与局部高温靶区并存的潜力格局。甘孜-理塘和巴塘地热带具有较好的区域勘查潜力,前者宜重点关注主断裂与次级断裂复合部位及连续热显示区,后者宜关注金沙江断裂及其分支断裂与深切河谷耦合部位;康定-炉霍地热带则应重点关注鲜水河主断裂与次级断裂交汇部位及高温热显示集中区。

谨以此文致敬著名地质学家、地质教育家李四光先生!20世纪70年代,当全球能源困局初现,李四光先生已高瞻远瞩地指出:“地下是一个大热库,是人类开辟自然能源的一个新来源,就像人类发现煤炭、石油可以燃烧一样重要。”他敏锐洞察“地球是一个庞大的热库,有源源不绝的热流”,在生命最后岁月仍心系地热开发,在天津亲手点燃了中国地热大会战的“星星之火”,留下殷切遗愿。半个多世纪过去,中国地热事业已呈“燎原之势”。致敬先生的深邃远见——他以地质学家的宏大视野,为清洁能源开辟了新纪元。

作者贡献声明:侯明才负责论文构思、研究方法;左银辉负责数据分析、论文写作;胡亚召、徐小青、牟蜚声参与数据分析和技术手段的实践应用和绘图;彭勃、张俊龙参与数据分析、研究方法和修改。所有作者均阅读并同意稿件的提交和发表。

Author's Contributions: HOU Mingcai conceived the study and designed the research methodology; ZUO Yinhui performed data analysis and wrote the manuscript; HU Yazhao, XU Xiaoqing and MU Feisheng participated in data analysis, practical application of technical app-

roaches, and figure generation; PENG Bo and ZHANG Junlong were involved in data analysis, refinement of the research methodology. All authors have read and approved the submission and publication of the manuscript.

利益冲突声明:本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。

Conflict of Interests: All authors declare no conflict of interests.

References

- AI Y F, ZHANG J, DONG M, et al., 2021. Heat generation effects from shear friction along Xianshui river strike-slip fault in western Sichuan, China[J]. *Geothermics*, 89: 101936.
- ALASINO P H, CAMPODONICO V A, ROCHER S, et al., 2026. The Inca-pillo Caldera geothermal system: implications for geothermal resources in the Southern Central Andes, Argentina[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 475: 108623.
- AVIÑA-JIMÉNEZ H M, PROL-LEDESMA R M, GARCÍA-ÁVILA M A, et al., 2026. Opportunities for geothermal direct use in Mesillas geothermal prospect, Mexico[J]. *Geothermics*, 139: 103687.
- 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.
- CAO R, CAI Y Q, DOR J, et al., 2025. Distribution and genesis of geothermal waters in the Xianshuihe fault zone, Western Sichuan plateau, China: constraints on fracture system and regional seismic activities[J]. *Geothermics*, 125: 103150.
- DAI W, JIANG X W, LUO Y F, et al., 2021. Identification and quantification of factors controlling hydrogen and oxygen isotopes of geothermal water: an example from the Guide Basin, Qinghai Province[J]. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 420-427. (in Chinese with English abstract)
- FOURNIER R O, 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. *Geothermics*, 5(1-4): 41-50.
- GAO L J, ZHANG J, DONG M, 2015. The study of gravity-magnetic anomaly and tectonic background in Sichuan west region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 2996-3008. (in Chinese with English abstract)
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2011. Specification of geothermal resources geological exploration: GB/T 11615—2010[S]. Beijing: Standards Press of China.
- HOU J, PAN J T, LI Y H, et al., 2023. Crustal S-wave velocity structure in the western and central North China Craton and its geological significance[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 66(5): 1960-1975. (in Chinese with English abstract)
- HU F Y, WU F Y, DUCEA M N, et al., 2022. Does large-scale crustal flow shape the eastern margin of the Tibetan Plateau? Insights from episodic magmatism of Gongga-Zheduo Granitic Massif[J]. *Geophysical Research Letters*, 49(12): e2022GL098756.
- HUANG X, ZHANG Y H, LI X, et al., 2024. Hydrochemical characteristics

- and genetic mechanism of geothermal water in the Wandong geothermal area along the Moxi fault in western Sichuan[J]. *Coal Geology & Exploration*, 52(6): 91-101. (in Chinese with English abstract)
- LEUNG C F, WANG J G, XIE H P, et al., 2024. Geothermal energy for sustainable and green energy supply in the future[J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 3(3): 255.
- LI J X, YANG G, SAGOE G, et al., 2018. Major hydrogeochemical processes controlling the composition of geothermal waters in the Kangding geothermal field, western Sichuan Province[J]. *Geothermics*, 75: 154-163.
- LI P W, GAO R, GUAN Y, et al., 2009. Paleomagnetic constraints on the closure time of paleo-tethys: implications for the tectonic setting of formation of Triassic Songpan-Ganzi Flysch complex[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 39-50. (in Chinese with English abstract)
- LI W J, WANG J L, WANG J L, 2018. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the southwest region[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 27(5): 1132-1142. (in Chinese with English abstract)
- LI W Y, ZHANG J, TANG X C, et al., 2018. The deep geothermal structure of high-temperature hydrothermal activity region in western Sichuan Plateau: a geophysical study[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(7): 2926-2936. (in Chinese with English abstract)
- LI X, WANG J J, HUANG X, et al., 2018. Chemical and isotopic characteristics of hot water in the Kangding-Daofu section of Xianshuihe fault zone, Sichuan, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45(6): 733-745. (in Chinese with English abstract)
- LIANG S, LU Y Q, LIANG J L, et al., 2025. Geochemical characteristics and cyclic evolution process of hot springs in Batang, western Sichuan[J]. *Geoscience*, 39(6): 1716-1729. (in Chinese with English abstract)
- LIN W J, LIU Z M, WANG W L, et al., 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312-321. (in Chinese with English abstract)
- LIU J, ZHOU X C, LI Y, et al., 2023. Relationship between hydrogeochemical characteristics of hot springs and seismic activity in the Jinshajiang fault zone, Southeast Tibetan Plateau[J]. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1015134.
- LIU X, JIA Z Q, LUO Z H, 2025. Genesis of geothermal water in the overnight area of the central Ganzi-Litang County fault: a geochemistry approach[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 46(1): 61-69. (in Chinese with English abstract)
- PatSnap Insights Team, 2026. Enhanced geothermal systems technology landscape 2026[R]. Singapore: PatSnap Insights Team.
- QIU N S, ZHU C Q, SONG J L, et al., 2026. Distribution, development and utilization of geothermal resources in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 47(1): 294-310. (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]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80(1): 74-91.
- SHEN H L, YANG Y, ZHOU Z H, et al., 2023. Genesis and deep geothermal process of Maoya hot springs in Litang, western Sichuan[J]. *Seismology and Geology*, 45(3): 689-709. (in Chinese with English abstract)
- SOLTANI M, KASHKOOL F M, DEHGHANI-SANIJ A R, et al., 2019. A comprehensive review of geothermal energy evolution and development[J]. *International Journal of Green Energy*, 16(13): 971-1009.
- SUND D, CAO N, LIU X Z, et al., 2019. Geothermal resources and development in Garzê prefecture, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 39(1): 133-138. (in Chinese with English abstract)
- TANG B N, QIU N S, ZHU C Q, et al., 2024. Thermal conductivity column of rocks and distribution characteristics of paleo-geothermal field in the Songliao Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 52(1): 26-35. (in Chinese with English abstract)
- TANG X, WANG Y C, JIA H X, et al., 2025. Thermal budget of hydrothermal systems for the Xianshuihe fault belt in the SE Tibetan Plateau: insights to the geothermal accumulation processes[J]. *Geothermics*, 125: 103189.
- TANG X C, ZHANG J, PANG Z H, et al., 2017. The eastern Tibetan Plateau geothermal belt, western China: geology, geophysics, genesis, and hydrothermal system[J]. *Tectonophysics*, 717: 433-448.
- TANG Y, YIN A, XU X, et al., 2023. Tectonic evolution of the Triassic Songpan-Ganzi basin as constrained by a synthesis of multi-proxy provenance data[J]. *Basin Research*, 35(1): 28-60.
- TIAN J, STEFÁNSSON A, LI Y M, et al., 2023. Geochemistry of thermal fluids and the genesis of granite-hosted Huangshadong geothermal system, Southeast China[J]. *Geothermics*, 109: 102647.
- WALLIS I C, ROWLAND J V, DEMPSEY D, 2018. The relationship between geothermal fluid flow and geologic context: a global review[C]//*Proceedings of the Geothermal Resources Council Transactions*. Reno: Geothermal Resources Council: 1-19.
- WANG J Y, PANG Z H, CHENG Y Z, et al., 2023. Current state, utilization and prospective of global geothermal energy[J]. *Science & Technology Review*, 41(12): 5-11. (in Chinese with English abstract)
- WANG X, LUO Z J, XU C H, et al., 2022. Formation mechanism of a carbonate geothermal system and calculation of the reservoir temperature under complex conditions[J]. *Geothermics*, 99: 102295.
- YU J S, ZHANG H B, YU F J, et al., 1980. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Xizang[J]. *Geochemica*, 9(2): 113-121. (in Chinese with English abstract)
- 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.
- 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 G, TANG Y J, WANG X B, et al., 2026. Deep electrical structure and thermodynamic mechanism of the high-temperature geothermal field in Kangding, Western Sichuan, China[J]. *Tectonophysics*, 921: 231055.
- ZHANG J, LI W Y, TANG X C, et al., 2017. Geothermal data analysis at the high-temperature hydrothermal area in western Sichuan[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(8): 1507-1521.

ZHANG P Z, 2013. A review on active tectonics and deep crustal processes of the western Sichuan region, eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Tectonophysics, 584: 7-22.

附中文参考文献

戴蔓, 蒋小伟, 罗银飞, 等, 2021. 地热水氢氧同位素控制因素识别与定量计算: 以青海贵德盆地为例[J]. 地学前缘, 28(1): 420-427.

高玲举, 张健, 董森, 2015. 川西高原重磁异常特征与构造背景分析[J]. 地球物理学报, 58(8): 2996-3008.

侯爵, 潘佳铁, 李永华, 等, 2023. 华北克拉通中西部地壳S波速度结构及其地质意义[J]. 地球物理学报, 66(5): 1960-1975.

黄珣, 张云辉, 李晓, 等, 2024. 川西磨西断裂带东地热化学特征及成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 52(6): 91-101.

李朋武, 高锐, 管焜, 等, 2009. 古特提斯洋的闭合时代的古地磁分析: 松潘复理石杂岩形成的构造背景[J]. 地球学报, 30(1): 39-50.

李维杰, 王健力, 王家录, 2018. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 27(5): 1132-1142.

李午阳, 张健, 唐显春, 等, 2018. 川西高温水热活动区深部热结构的地球物理分析[J]. 地球物理学报, 61(7): 2926-2936.

李晓, 王金金, 黄珣, 等, 2018. 鲜水河断裂带康定至道孚段热水化学与同位素特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 45(6): 733-745.

梁颂, 路玉沁, 梁金龙, 等, 2025. 川西巴塘温泉地球化学特征及其

循环演化过程[J]. 现代地质, 39(6): 1716-1729.

蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 等, 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 40(1): 312-321.

刘祥, 贾志泉, 骆志红, 2025. 甘孜—理塘断裂中段通霄地区地热水的成因分析: 基于水文地球化学的方法[J]. 矿产综合利用, 46(1): 61-69.

邱楠生, 朱传庆, 宋佳霖, 等, 2026. 中国地热资源分布及开发利用[J]. 石油学报, 47(1): 294-310.

申华梁, 杨耀, 周志华, 等, 2023. 川西理塘毛垭温泉群的成因及深部地热过程[J]. 地震地质, 45(3): 689-709.

孙东, 曹楠, 刘馨泽, 等, 2019. 川西甘孜州地热资源特征及开发利用前景[J]. 四川地质学报, 39(1): 133-138.

唐博宁, 邱楠生, 朱传庆, 等, 2024. 松辽盆地岩石热导率柱及古地温场分布特征[J]. 煤田地质与勘探, 52(1): 26-35.

汪集暘, 庞忠和, 程远志, 等, 2023. 全球地热能的开发利用现状与展望[J]. 科技导报, 41(12): 5-11.

于津生, 张鸿斌, 虞福基, 等, 1980. 西藏东部大气降水氧同位素组成特征[J]. 地球化学, 9(2): 113-121.

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.

张健, 李午阳, 唐显春, 等, 2017. 川西高温水热活动区的地热学分析[J]. 中国科学: 地球科学, 47(8): 899-915.

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2011. 地热资源地质勘查规范: GB/T 11615—2010[S]. 北京: 中国标准出版社.

获奖者简历:

侯明才, 教授, 博士生导师, 2025年获第十九次李四光地质科学奖科研奖。曾在瑞士洛桑大学(University of Lausanne)地质古生物研究所担任访问学者、邀请教授, 现任成都理工大学副校长, 担任深时地理环境重建与应用自然资源部重点实验室主任、深时数字地球(DDE)国际大科学计划古地理工作组组长, 兼任中国地质学会沉积地质专业委员会副主任委员、中国石油学会天然气专业委员会委员、四川省地质学会副理事长。主要从事沉积地质学与资源能源勘探相关的科研与教学工作, 主持深地国家科技重大专项、高等学校学科创新引智计划(111计划)、国家自然科学基金委指南引导类原创探索项目(0-1)/重点项目/面上项目、油气国家科技重大专项任务、国家重点基础研究发展计划(973计划)课题、国家地质调查项目及企业合作科研项目60余项; 在*Nature Communications*、*Geology*、*Earth-Science Reviews*、*Geosciences Frontiers*、*Geophysical Research Letters*、*GSA Bulletin*、*Gondwana Research*、*Global and Planetary Change*和《地质学报》《沉积学报》等国内外高水平期刊上共发表论文357篇(SCI 150篇), 出版教材与专著10部, 任*Ore and Energy Resource Geology*期刊编辑, 《地质论评》《天然气工业》《沉积学报》等期刊编委; 获国家科技进步二等奖1项、四川省科技进步一等奖1项、国土资源科学技术奖二等奖1项、优秀地图作品裴秀奖金奖1项、四川省教学成果奖一等奖1项, 支撑所在单位获国家科技进步一等奖和国家科技进步奖二等奖各1项。获四川省学术技术带头人、四川省有突出贡献优秀专家、天府青城计划杰出科学家等荣誉称号, 享受国务院政府特殊津贴。

