移动阅读

师红杰，刘明亮，卫兴，等，2023. 西藏玛旁雍错地热水地球化学特征及其成因机制分析[J]. 沉积与特提斯地质，43(2)：311−321. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04009

SHI H J，LIU M L，WEI X，et al.，2023. Geochemical characteristics and formation mechanisms of the geothermal waters from the Mapamyumco, Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology，43(2)：311−321. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.04009

西藏玛旁雍错地热水地球化学特征及其成因机制分析

师红杰[1]，刘明亮[1*]，卫　兴[1]，曹圆圆[2]，尚建波[1]

（1. 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室&资源与环境学院，湖北　武汉　430100；2. 宁夏回族自治区地球物理与地球化学勘察院，宁夏　银川　750001）

摘要：西藏地区位于欧亚板块与印度板块碰撞造山带，构造活动强烈，具有丰富的地热资源。本次研究在西藏阿里地区水热活动强烈的玛旁雍错地热田实地采集地表热泉样品进行水化学分析，依据地热水水化学特征，评估研究区热储平衡状态与热储温度，分析地热水在深部的水文地球化学过程，识别地热系统深部热源类型并阐明地热系统成因机制。通过此次研究表明：区内地热水主要为碱性 Cl-Na 型或 HCO_3-Cl-Na 型水和酸性 SO_4-Na 型水，地热水在深部已经与热储围岩达到完全平衡状态，通过地热温标计算热储温度在 200℃ 左右；地热地表显示、热水水化学组分特征、热储温度类型等分析揭示玛旁雍错为岩浆热源型地热系统，地表不同类型地热水是深部母地热流体沿断裂向上运移过程中经不同水文地球化学过程形成。

关　键　词：地热水；水文地球化学；岩浆热源；成因机制；玛旁雍错

中图分类号：P314.1；P641.3　　**文献标识码：**A

Geochemical characteristics and formation mechanisms of the geothermal waters from the Mapamyumco, Tibet

SHI Hongjie[1]，LIU Mingliang[1*]，WEI Xing[1]，CAO Yuanyuan[2]，SHANG Jianbo[1]

（1. *Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment & College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*；2. *Geophysical and Geochemical Exploration Institute of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan* 750001, *China*）

Abstract：Tibet is located at the Indian-Eurasia collision orogenic belt, where the tectonic activity is intense, resulting in abundant geothermal resources. In this study, the hot spring samples from the Mapamyumco geothermal field situated at the Ngari Prefecture of Tibet with strong geothermal activity were collected for hydrochemical analysis. Based on the hydrochemical characteristics of the geothermal water, the equilibrium state and temperature of the reservoir was evaluated; the hydrogeochemical processes of deep geothermal fluid was analyzed; and the heat source type of the geothermal system was identified. These results are contributed to clarify its genesis mechanism. This study shows that: the geothermal water in the area are mainly alkaline Cl-Na type or HCO_3-Cl-Na

收稿日期： 2023-01-07；**改回日期：** 2023-04-11；**责任编辑：** 曹华文

作者简介： 师红杰（2000—），男，硕士研究生，主要从水文地球化学方向研究工作。E-mail：shihongjie0011@163.com

通讯作者： 刘明亮（1989—），男，副教授，主要从事地热领域的研究工作。E-mail：lml2008@cug.edu.cn

资助项目： 国家自然科学基金项目（41902257）；宁夏回族自治区重点研发计划项目（2022BEG03060）；自然资源部深部地热资源重点实验室开放基金项目（KLDGR2022G01）；宁夏回族自治区财政专项项目（NXCZ20220206）

type and acidic SO_4-Na type water; the geothermal water has reached a complete equilibrium state with the thermal reservoir rocks at depth, and the thermal reservoir temperature is about 200℃ based on geochemical geothermometer calculation; surface geothermal manifestations, hydrochemical characteristics of geothermal water, and the reservoir temperatures reveal that Mapamyumco geothermal field is a magmatic geothermal system, and different types of geothermal water are formed by different hydrogeochemical processes during the upward transport of deep parent geothermal fluid along the fault.

Key words：geothermal water；hydrogeochemistry；magmatic heat source；formation mechanism；Mapamyumco

0 引言

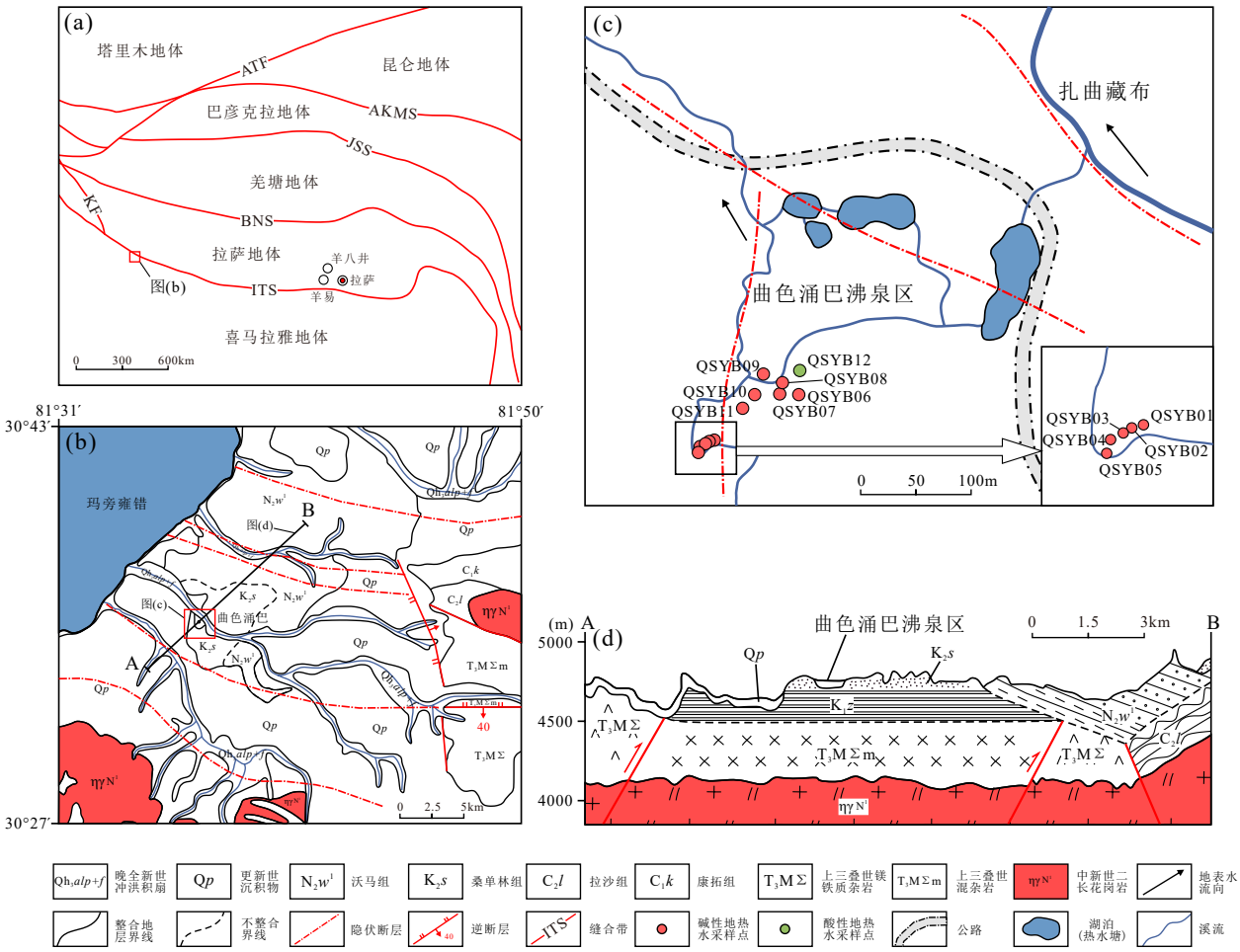
现今，以碳中和、碳达峰为目标的能源结构转型已经成为全球共识，地热资源作为一种低碳、清洁的可再生能源，其科学开发利用所带来的巨大经济、环境效益已经受到社会的广泛关注。我国内陆地区地热资源储量丰富，分布广泛，其中滇藏地热带更是占据我国地热资源总量的 80%(胡先才等, 2002; 李文等, 2020; 王贵玲等, 2020; 赵斌等, 2023)。能量来源更稳定、开发利用价值更高的岩浆热源型地热系统多分布于此。从上世纪 70 年代起，学者们对滇藏地热带开展了大量研究工作，仅第一次青藏高原综合科考就在西藏发现包括温泉、沸泉、间歇喷泉和水热爆炸等多种形式在内的水热活动区 600 余处(廖志杰和赵平, 1999; 佟伟等, 2000; 佟伟等, 1981)。近年来也有许多学者针对西藏羊八井、羊易(已证实存在岩浆热源)等地进行过一系列详细的地球物理与地球化学勘察研究，其成因与热源类型已有较为清晰的认识(Guo et al., 2008; Yuan et al., 2014; 吕苑苑等, 2012; 赵平等, 2001)。而其他地区如古堆、错那和谷露等地，也有学者进行了初步探索。比如 Wang and Zheng (2019)通过分析古堆地热水地球化学特征，估算古堆热储温度可达 266.6℃，并借助氯焓图和硅焓图确定地热田下方的母地热流体性质(Cl^-浓度为 697 mg/L; 焓值为 1 250 J/g)；余浩文等(2021)对山南市错那地热田水化学特征进行分析，初步探明地热水物质来源与热储温度；高洪雷等(2023)结合物探、钻探资料，判断谷露地热水赋存主要场所与热水运移途径，建立谷露地热田地热系统概念模型；邹俊等(2022)在卡嘎温泉附近开展大地电磁测深和土壤氡气测量等工作，同羊八井地热系统进行对比，评估地热资源潜力并提出区域内地热资源成因模式。除此之外，西藏大多数热水活动较为发育的地热系统研究程度较低，青藏高原内部仍存在许多开发利用潜力较大的地热系统，其热源类型与成因机制尚未开展系统性研究，由此导致我国西南一带诸多地热资源至今未能得到科学合理的评估与有效开发利用。

玛旁雍措地热田位于西藏阿里地区，地表水热活动强烈，Wang et al. (2016)曾对玛旁雍措地热田进行相关地球化学调查，评估了玛旁雍措热储层温度和溶质起源，并揭示地热水中的 CO_2 为岩浆成因和变质成因，但该地热系统的成因模式与深部热源仍有待进一步探讨。本次研究通过实地采集地热水样品，对玛旁雍错地热水进行了较为系统的水文地球化学分析，评估玛旁雍错地热系统深部平衡状态与热储温度，分析地热水水文地球化学过程。基于此，探讨玛旁雍措地热系统成因模式，以期为西藏大量成因机制尚未明确的地热系统的研究工作提供借鉴思路，为地热资源科学、有效、合理地开发利用提供理论依据。

1 研究区概况

玛旁雍错地热田(81°34′45″E, 30°35′23″N, 海拔约 4 620 m)位于西藏阿里地区普兰县境内，“圣湖”玛旁雍错东南约 6 公里处，区内地热水大多沿河道分布在河漫滩与河流阶地上，汇入自东南向西北流向的扎曲藏布，最终注入玛旁雍错。玛旁雍错地热田分为昂布弄巴、曲色涌巴、曲普和当果其沙四个沸(热)泉区，地热田内遍布水热爆炸活动的产物，以硫华、硅华沉积和水热爆炸穴坑最为显眼，爆炸穴坑直径最大约 80 m，部分穴坑内部充水后形成热水塘，热水塘上方雾气弥漫，周围有众多喷气孔、沸泉、热泉等(佟伟等, 2000)。其中，曲色涌巴水热活动尤为强烈，水热爆炸规模最大；此外，粗略估计区内热泉、沸泉点多达二三十处，并伴有大量的泉华沉积物。本研究采样地点主要位于曲色涌巴沸泉区(图 1)。

玛旁雍错地热田在大地构造上位于雅鲁藏布江缝合带(ITS)以南的一个小型地堑盆地内，盆地内 EW 向和 NW-SW 向隐伏断裂发育良好，成为地



ATF—阿尔泰左旋走滑断裂；KF—喀喇昆仑断裂；AKMS—阿尼玛卿–昆仑–木孜塔格缝合带；JSS—金沙江缝合带；BNS—班公湖–怒江缝合带；ITS—雅鲁藏布江缝合带。

图 1　青藏高原大地构造简图（a）（改自李振清，2002 和张朝锋等,2018）；玛旁雍错地热田地质简图（b）（改自 Wang et al.,2016）；采样点位置示意图（c）和地质剖面图（d）（改自 Wang et al.，2016）

Fig. 1　Brief tectonic map of the Qinghai-Tibet Plateau (a) (modified from Li, 2002 and Zhang et al., 2018); Geological map of Mapamyumco geothermal field (b) (modified from Wang et al., 2016) and Sampling point location diagram; d: Geological profile (d) (modified from Wang et al. (2016))

热系统导水、导热的重要渠道。研究区出露的沉积地层单元由新到老依次为第四系松散沉积物、古近系沃马组、白垩系桑单林组、中石炭统拉沙组以及下石炭统康拓组。其中沃马组主要岩性为砂岩和砾岩；桑单林组由石英砂岩、泥岩和硅质岩组成；拉沙组和康拓组经历了较为强烈的变质作用，主要岩性为千枚岩、变质砂岩、石灰岩和砾岩(河北省地质调查院区调所, 2005)。除沉积地层外，区域内也有燕山、喜山两期岩浆侵入活动，主要产出岩浆岩有：上三叠世镁铁质岩、上三叠世混杂岩和中新世二长花岗岩(Wang et al., 2016)。其中中新世二长花岗岩很可能为研究区主要热储，其长石类矿物在高温条件下的溶滤构成了地热水中 Na、K 含量高，Ca、Mg 含量较低的水化学特征(Giggenbach, 1988; 沈立成等, 2011)；第四系松散沉积物尤其是更新世河湖相沉积形成的深厚碎屑物质为地热水在浅部的赋存提供了良好条件。

2　样品采集与测试

本次研究共采集水样 12 件，采样位置见图 1。样品均通过 0.22 μm 滤膜过滤，并储存在 500 mL 聚乙烯瓶中，聚乙烯瓶在取样前用待取水样润洗三次。在每个采样点采集水样 2 瓶，水样要求尽可能充满采样瓶，防止进入空气。其中阳离子分析水样加入优级纯硝酸直至 pH 小于 1，用于阴离子分析的水样不做特殊处理。所有采集后的样品在 4℃

条件下冷藏，并在一周内完成测试。对于水样温度（*T*）、总溶解性固体（*TDS*）、pH、氧化还原电位（*Eh*）和电导率（*EC*）等水化学参数在现场通过便携式多参数测定仪（Hach LDOTM HQ10）测定，硫化物、亚铁离子使用便携式比色计（Hach sension2）现场测定，并用 0.025 mol/L 稀盐酸现场滴定碱度。F^-、Cl^-、SO_4^{2-}采用离子色谱仪（DX-120 型）进行测试；Na^+、K^+、Ca^{2+}和 Mg^{2+}使用电感耦合等离子体发射光谱仪（IRIS Intrepid Ⅱ XPS 型）测定；微量元素使用电感耦合等离子体质谱仪（POEMS Ⅲ型）测定，测试工作在中国地质大学（武汉）环境学院分析测试中心完成。HCO_3^-和 CO_3^{2-}含量通过碱度借助 PHREEQC 计算得出，使用数据库为 WATEQ4F。计算得出大部分样品电荷平衡误差在±5% 左右，测试结果较为可靠。现场测试指标及水化学参数分别见附表 1*、附表 2*。

3 讨论与分析

3.1 水化学特征

本次研究所采集地热水样水温在 76℃～90℃之间，平均值为 84℃，大多数泉口温度已超过当地沸点（86℃），属于沸泉。在区内发现有酸性泉的出露（QSYB12，pH=2.4），除此之外的其他热水样均为碱性，pH 值在 8.32～9.56 之间。碱性地热水 TDS 值范围为 840.7 mg/L～998.4 mg/L，平均为 878.7 mg/L；酸性水 QSYB12 的 TDS 值较高，为 1 477.0 mg/L。碱性地热水水化学类型均为 Cl-Na 型或 HCO_3-Cl-Na 型（图 2），阳离子中 Na^+占主导地位，其次为 K^+，大多数水样中 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量极低（平均含量分别为 1.52 mg/L 和 0.98 mg/L），仅有 QSYB02 和 QSYB08 两个水样的 Ca 和 Mg 含量相对较高；阴离子中 Cl^-含量较高，其次为 HCO_3^-与 SO_4^{2-}。酸性水样 QSYB12 中 SO_4^{2-}含量高达 1 104.06 mg/L，阳离子中以 Na^+和 K^+为主，Ca^{2+}和 Mg^{2+}含量相对较低，其水化学类型为 SO_4-Na 型（图 2）。地热水中主要阳离子的这一特征说明地热系统热储类型主要为长英质花岗岩裂隙型热储。区内地热水微量元素如 SiO_2、F、B、As、Li 含量均较高，其含量平均值分别为 240.59 mg/L、11.87 mg/L、146.55 mg/L、0.39 mg/L 和 2.28 mg/L。但酸性水较为特殊，水样中各种微量元素含量表现出与碱性地热水完全不同的特征。

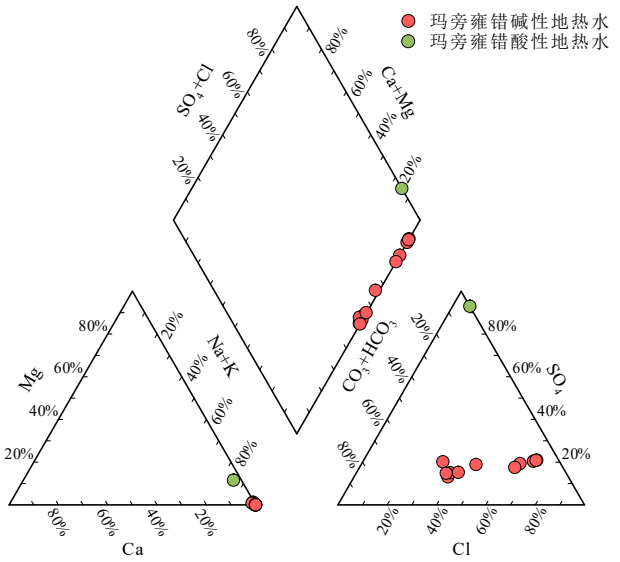


图 2 玛旁雍错地热水 Piper 三线图

Fig. 2 Piper diagram of Mapamyumco geothermal water

此外，在现场测量指标中发现，碱性热水样品 Eh 值均为负值，仅有酸性样品 QSYB12 为正值，表明其处于氧化环境，且硫化物含量相比于碱性地热水来说要低得多（0.05 mg/L）。推测是由于氧化条件下，H_2S 气体溶解在浅层地下冷水中被氧化最终生成硫酸盐，这也恰好解释了该样品较强的酸性与其中极高含量 SO_4^{2-}的来源，强酸性抑制 Fe、Al 离子的氧化与沉淀析出，因此 QSYB12 有较高含量的 Fe、Al。依据 Giggenbach et al.（1990）和 Guo et al.（2014）的分析，在高温地热系统中往往发育有“蒸汽加热型酸性水”，QSYB12 号样品就属于此类水样，由于此类型地热水是浅层地下冷水受蒸汽加热形成，Ca^{2+}、Mg^{2+}含量较高，但更短的循环路径与更低的水—岩相互作用导致样品中 F、As、B 和 Li 等微量元素含量相较于碱性水都不高；研究区热储非碳酸盐岩热储，即使在深部高温条件下，能够通过水岩作用进入到地热水的 Sr 含量也极为有限，因此在酸性水与碱性水中 Sr 含量差异不明显。碱性水样 QSYB02 金属离子含量略高，与酸性样品类似但低于酸性样品，可能是碱性地热水向上运移过程中与富含 Al、Fe、Ca、Mg 的酸性水发生混合的结果；而 QSYB08 较高的 Ca^{2+}、Mg^{2+}含量可能是因为碱性地热水中混合了较大比例的浅层冷水。

综合上述分析，玛旁雍错地热田内出露三种不

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

同水化学类型的热泉，分别为碱性 Cl-Na、HCO_3-Cl-Na 和酸性 SO_4-Na 型，泉水中如 SiO_2、F、B 等微量组分含量较高，但不同类型热泉微量元素表现出不同的特征，尤其是区内出现的酸性泉，F、As、B、Li 含量很低，其存在与否往往是岩浆热源识别的重要标识(郭清海, 2020)。通过研究区地热水所表现的水化学特征，我们初步判断玛旁雍错地热系统是一个典型的高温岩浆热源型地热系统。

3.2　热储平衡状态及热储温度估算

Na-K-Mg 三角图可以用来评估地热水样品平衡状态，适用于地热水与石英、长石、云母、斜绿泥石等铝硅酸盐矿物的平衡系统(Giggenbach, 1988)。研究区主要热储岩性为下新世二长花岗岩，由石英、钾长石、钠长石、角闪石和黑云母等硅酸盐矿物组成，因此可以将研究区样品投影在 Na-K-Mg 三角图中进行分析(图 3)。从图中可以看出，除酸性水 QSYB12、与酸性水混合的 QSYB02、与浅层冷水混合比例较大的 QSYB08 这三个样品处于未成熟水区，其他水样均分布在部分平衡区，并且基本具有相同的 Na-K 温度，特别是 QSYB01 非常接近完全平衡线，这表明这些地热水来源于统一的深部热储。根据上节分析，酸性水是地下冷水受高温蒸汽加热形成，并未达到过深部的完全平衡状态，水－岩相互作用程度很低，且其中高含量的 Mg 也导致水样点分布在未成熟水区靠近 Mg 的一端。综上，Na-K-Mg 三角图指示除酸性泉外，其他地热水相对于 Na、K、Mg 的相关矿物已达到部分平衡，可以用 Na-K 温标、K-Mg 温标等阳离子温标对区内热储温度进行估算。

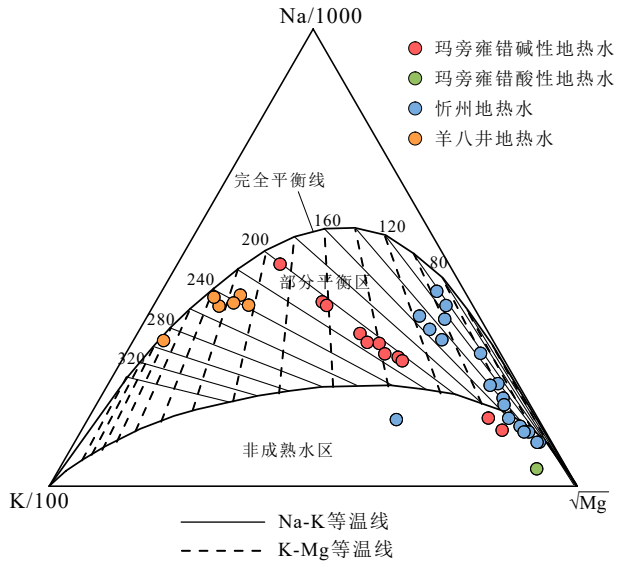


图 3　玛旁雍错地热水 Na-K-Mg 三角图（羊八井和忻州地热水数据分别来源于 Guo et al.（2019）和张梦昭等（2022），下同）

Fig. 3　Na-K-Mg triangular diagram for Mapamyumco geothermal water (The geothermal water data of Yangbajing and Xinzhou were obtained from Guo et al. (2019) and Zhang et al. (2022), same as the following)

$lg(SiO_2)$-$lg(K^2/Mg)$图基于地热水中溶解性 SiO_2(SiO_2 温标)与 K、Mg 离子(K-Mg 温标)的含量而建立(Giggenbach et al., 1994; Guo et al., 2017)。图 4 中水样点基本落在石英平衡线附近，表明水样对于常见钾长石、绿泥石等钾镁矿物与石英矿物处于部分平衡状态；QSYB01 位于传导冷却平衡线上，基本达到对钾镁矿物与石英矿物的完全平衡，QSYB04、QSYB05、QSYB06、QSYB09 四个样品则位于绝热冷却平衡线附近；而酸性热水样品 QSYB12 仅受蒸汽加热，从未经历过深部完全平衡状态，因此分布在最左端，非常靠近无定形硅平衡线，QSYB02、QSYB08 样品混合比例较大同样远离石英平衡线。依据水样点在图中呈现的水平分布趋势，可以推测地热水是由深部地热水与浅层地下冷水混合形成，而水样点在图中呈现的水平分布，除了与冷水混合作用导致的 Mg 浓度变化相关，也受含镁蚀变矿物的溶度积常数控制。地热水在由深部热储向浅部热储运移直至出露地表的过程中，随着温度、压力条件的变化，Mg 含量变化相比于 Na、K、Si 而言要迅速的多，可以更快的达到再平

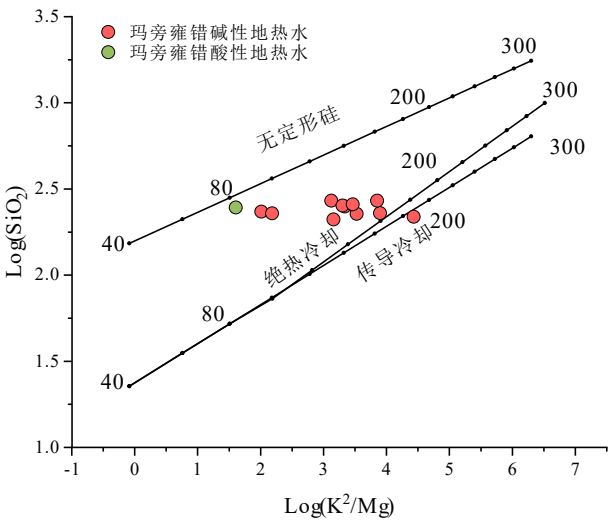


图 4　玛旁雍错地热水 $log(SiO_2)$-$log(K^2/Mg)$ 图

Fig. 4　$log(SiO_2)$-$log(K^2/Mg)$ diagram of Mapamyumco geothermal water

衡状态，因而 K-Mg 温标对于温度响应更为灵敏，因此 K-Mg 温标估算结果代表地热水在相对较浅位置的热储温度(浅部热储温度在 170℃ 左右)，相比于 Na-K 温标和石英温标而言，K-Mg 温标估算值也偏小(附表 3*)。

3.3 地热水水文地球化学过程

稳定场图可以评估水样在热储温度下相对于粘土矿物的平衡状态，识别控制地热水地球化学特征的主要矿物类别及相关水文地球化学过程(Guo et al., 2019; Li et al., 2022; 张彦鹏等, 2022)。通过 PHREEQC 计算各个水样中 K^+、Ca^{2+}、Na^+、Mg^{2+}和 SiO_2 活度，并根据热储岩性选择长石、云母和石英等常见铝硅酸盐矿物与高岭石、水铝矿、绿泥石和葡萄石等次生矿物，绘制 K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O、Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O、MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O 和CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O 体系稳定场图(图 5)。据 3.2 节中地热温标估算结果，研究区热储温度在 200℃ 左右，因此此次研究参考稳定场图中 200℃ 边界。可以看出，在 200℃ 条件下，除酸性水 QSYB12 位于高岭石区，碱性地热水全部分布在葡萄石、绿泥石、钠长石、钾长石稳定场。这表明热水中 Na、K 含量主要受控于高温环境下的热水与花岗岩热储中长石类矿物的水-岩相互作用；而其较低的 Ca、Mg 含量，尤其是极低的 Mg 含量，是受葡萄石、绿泥石控制，因此地热系统中也伴随着蚀变矿物如葡萄石、绿泥石的沉淀。这与郭清海(2020)给出结论一致，即高温条件下，在相关蚀变矿物(例如绿泥石等)溶度积常数的控制下，以长英质花岗岩为热储的岩浆热源型地热系统所形成的地热水中 Ca、Mg 含量很低，尤其是 Mg 含量极低，一般小于 0.1 mg/L。

地热水中氯和硼具有高度的不相容性，一旦从岩石矿物中淋滤进入到地热流体中，则难以通过共沉淀或吸附等方式重新被次生矿物固定，常作为深部流体的特征组分(Arnórsson and Andrésdóttir, 1995; Liu et al., 2019)；相较于地热水而言，浅层地下冷水通常具有 Mg^{2+}含量较高的特点，Mg^{2+}常代表浅层冷水端元(本次研究地热水和浅层冷水水化学组成也可印证这一个观点)，因此 Cl、B 和 Mg^{2+} 相关关系图常被用来分析深部地热流体与浅层冷水的混合过程(Guo et al., 2017)。从图 6 中可以看出，所有水样呈现出良好的线性关系，表明研究区地表热泉水具有相同的地球化学起源，是由富 B 和 Cl 的深部地热流体与富 Mg 的浅层地下冷水混合而形成，其中 QSYB01 样品呈现出深部地热流体端元组成的特点，酸性水样 QSYB12 具有浅层冷水端元组成的特点，其他碱性水样显示出较高比例浅层冷水的混合。

综合上述分析，地热水在形成与运移过程中，一方面，在热储温度条件下，地热水与硅酸盐矿物之间的相互作用强烈，尤其是长石类矿物与绿泥石等次生矿物的溶解与重结晶占主导地位，这一过程决定了地热水的富 Na、Cl 和 Si，贫 Ca 和 Mg 的特征；另一方面，地热水由深部统一热储向浅部运移过程中与浅层冷水的混合，一定程度上导致了地表热泉同深部流体在水文地球化学特征上的差异。

3.4 水化学特征对地热系统热源的指示

通常而言，经历“等化学溶解”与“热液蚀变矿物沉淀”两个阶段的地热流体在深部热储中与周围岩石达到全平衡状态而形成“母地热流体”，经过不同冷却过程升流至地表形成不同水化学类型的热泉(分别为酸性硫酸泉、中性氯化物型泉、弱碱性重碳酸型泉)，据此可以判断地热系统是否具备岩浆热源(郭清海, 2020)。而“母地热流体”作为三种类型热泉的统一起源，其存在与否可以作为岩浆热源存在的重要证据。研究区样品 QSYB01 位于 Na-K-Mg 三角图中的完全平衡线附近，Na-K 温度与 K-Mg 温度基本一致，其在深部已几乎达到与围岩矿物的完全平衡，可以近似代表岩浆释放的酸性流体完全中性化后形成的母地热流体。分布在部分平衡区的其他碱性地热水样与 QSYB01 具有近似的 Na-K 温度(约 200℃)，表明他们是深部同一储层的地热水(即母地热流体)经过不同的水文地球化学过程(如绝热冷却、传导冷却、冷水混合等)演化而来。据此我们可以推断研究区下方可能存在岩浆热源。

另外，我们将玛旁雍错地热系统与热储岩性同样为长英质岩石的羊八井地热系统(岩浆热源型地热系统)和忻州盆地地热水(非岩浆热源型地热系统)对比分析(Guo et al., 2019; 张梦昭等, 2022)。除 Na-K-Mg 三角图中玛旁雍错地热水显示出与羊八井地热水相似的水化学特征外，微量元素(如 F、SiO_2、B、Li)也指示玛旁雍错下方有岩浆热源的存

*数据资料联系编辑部或者登录本刊网站获取。

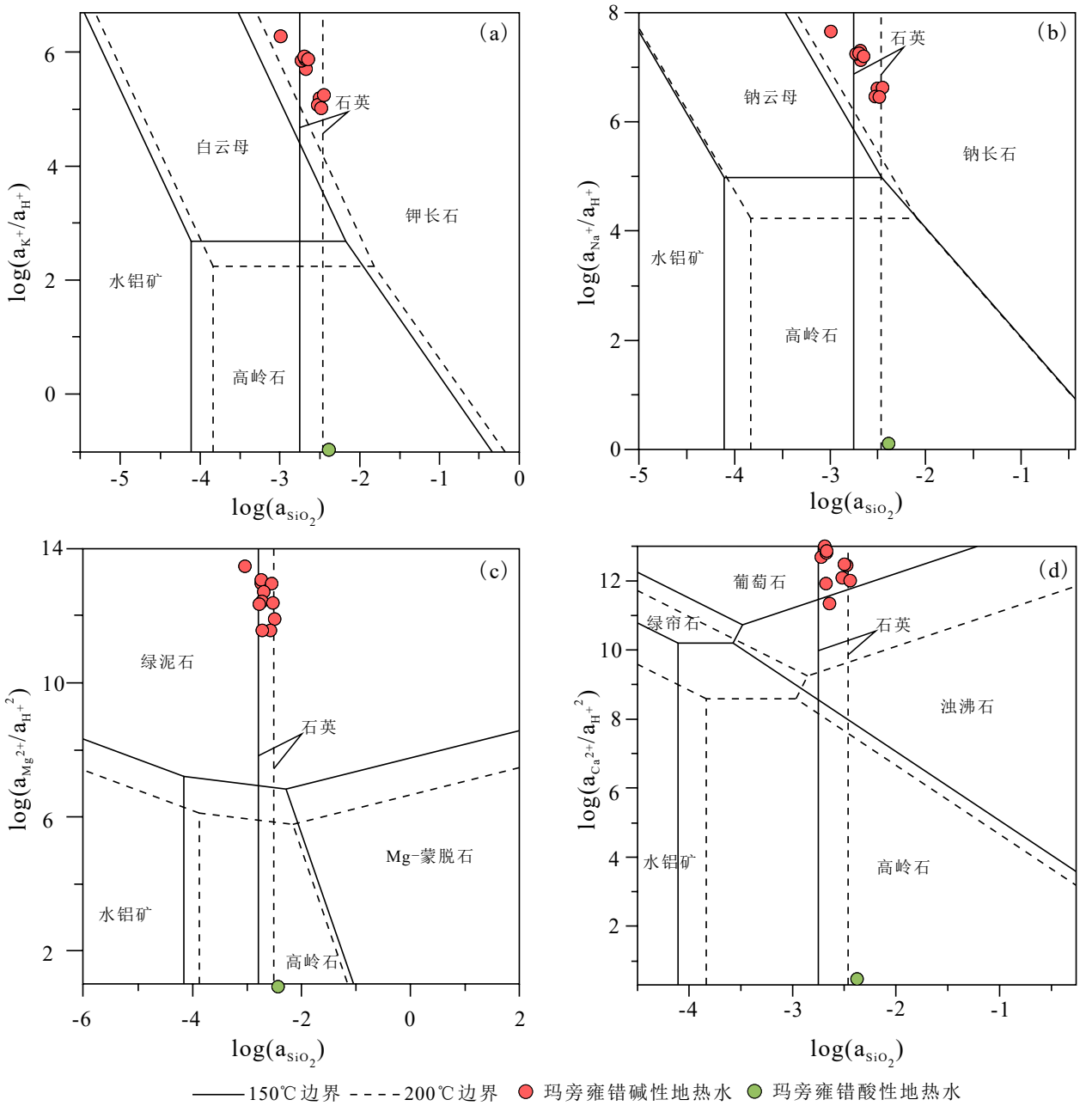


图 5　玛旁雍错地热水稳定场图（a）K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O；（b）Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O；（c）MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O；（d）CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O

Fig. 5　Activity plots of Mapamyumco geothermal water (a)K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O; (b)Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O; (c)MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O; (d)CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O

在(图 7),无论是源于岩浆流体补给或是更高热储温度下围岩的淋滤作用,同样为长英质热储的羊八井地热水中微量元素含量整体高于忻州盆地地热水,而玛旁雍错地热水中微量元素含量与羊八井相当,其 B 含量还要高于羊八井,也就是说,地热水中可能与岩浆活动有关的微量组分也表明玛旁雍错与羊八井类似,下方有岩浆热源的存在。

因此,除了根据地表强烈的水热活动以及地质构造背景推测地热田下方可能存在岩浆热源外,Na-K-Mg 三角图以及与岩浆活动有关的元素也均指示玛旁雍错地热田为岩浆热源型地热系统,即地热田下方可能存在一岩浆热源,一方面为该地热系统提供源源不断的热量,另一方面其所释放的岩浆流体直接或间接地影响系统内地热水水文地球化

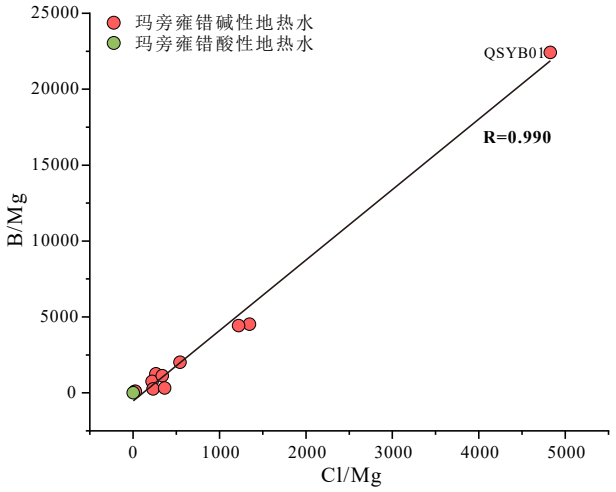


图 6 玛旁雍错地热水组分比例关系图

Fig. 6 Composition diagram of Mapamyumco geothermal water

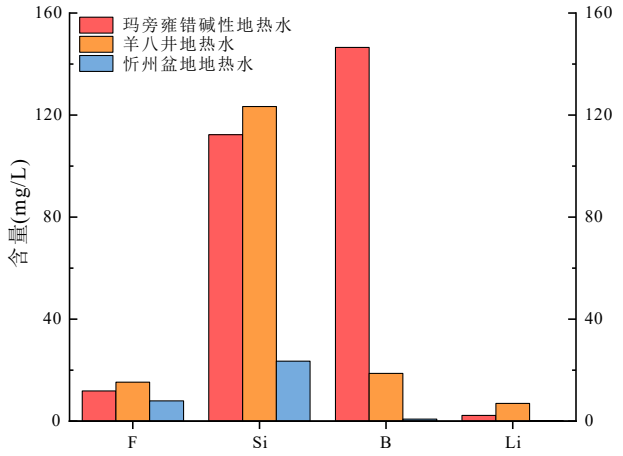


图 7 玛旁雍错地热水微量元素柱状图

Fig. 7 Histograms of the average concentrations of microcomponent in Mapamyumco geothermal water

学特征。

3.5 地热系统成因机制分析

根据上述分析，我们推测研究区下方存在岩浆热源并形成与围岩矿物达到完全平衡的母地热流体，母地热流体通过不同冷却方式上升至地表形成地表各个热泉。在假设地热水中 Si 含量不受混合过程影响的前提下，建立 Si-焓混合模型以用于估算母地热流体性质，这一方法已经广泛应用于不同地热系统的研究(Fournier, 1977; Wang and Zheng, 2019; 庞忠和等, 1990; 张彦鹏等, 2022; 张云辉, 2018; 赵平等, 1998)。将研究区地热水样品投在 Si-焓图中(见图 8)，以当地地表冷水为起点，作一条经过热水样点的直线交沸腾线(H=419 J/g)于点 A，过 A 作水平线交于最大蒸汽损失溶解曲线即可获得热水端元焓值，作经过交点的垂线交石英溶解度曲线即为研究区下方的母地热流体(点 B)，其焓值与二氧化硅浓度分别为 856.14 J/g 和 264.08 mg/L。

结合地热水水化学特征以及地热水水文地球化学过程的分析，我们将在研究区采集到的地热水样分为以下五类：(1)QSYB12(蒸汽加热型酸性水)，该类水样由母地热流体经过绝热冷却分离出的酸性气体快速上升至地表加热浅层地下冷水而形成，其中 H_2S 气体在浅表氧化环境中被氧化，因而形成地热水中较高的酸性与高浓度硫酸根；(2)QSYB04、QSYB05、QSYB06 和 QSYB09，该类水样在 Na-K-Mg 三角图中位于部分平衡区靠近完全平衡线的一端，是由母地热流体快速绝热冷却上升至地表形成；(3)QSYB01，位于 Na-K-Mg 三角图完全平衡线附近，是由母地热流体以较慢的速度传导冷却直接上升至地表形成，上升过程中冷水混合作用对水化学成分影响很小；(4)QSYB03、QSYB07、QSYB08、QSYB10、QSYB11，母地热流体升流过程中与冷水的混合作用导致这些水样中含有较高含量的 HCO_3^-，样品大多位于 Na-K-Mg 三角图的部分成熟水区远离完全平衡线的一端，尤其是 8 号样品位于未成熟水区，Ca、Mg 含量最高，混合比例较大；(5)QSYB02，Al、Fe、Mn 等金属离子含量较高，HCO_3^-相对较低，是由碱性地热水与酸性水混合的结果，同样位于未成熟水区。

基于前人关于地热水氢氧同位素组成的分析，

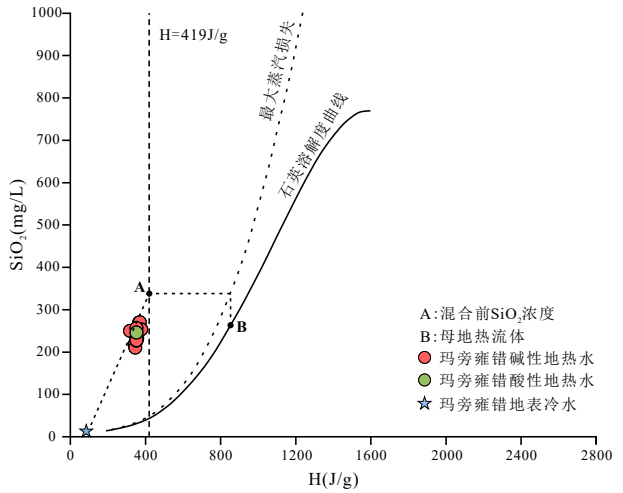


图 8 玛旁雍错地热水 Si-焓图（地表冷水数据来源于 Wang et al.（2016））

Fig. 8 Si-Enthalpy diagram of Mapamyumco geothermal water (Surface cold water data from Wang et al. (2016))

研究区地热水来源于大气降水入渗补给(Wang et al., 2016)。深循环的大气降水入渗至岩浆囊上方后，一方面受到岩浆囊的高温烘烤，另一方面伴随着富含酸性气体的高温岩浆流体混入，而后在温度与密度驱动下向上对流，沿断裂带上涌消耗其自身酸性溶解围岩(长英质花岗岩)，并伴随着绿泥石等次生矿物的沉淀，这一阶段决定了地热流体具有高含量 Na、K、SiO_2，极低含量 Ca、Mg 的特征；经过以上过程的地热流体进入到深部热储中(即中新世二长花岗岩)，形成相对于围岩矿物达到完全平衡状态的中性母地热流体，母地热流体沿断裂带(主要是 EW 向断裂)继续升流过程中，经过绝热冷却、传导冷却、冷水混合等不同冷却方式(或以上方式的不同组合)，最终出露至地表形成中性-弱碱性泉；另外，在母地热流体绝热冷却过程中分离出的酸性气体(H_2S)，沿断裂快速上升至浅层地表，加热浅层地下冷水并在浅层氧化环境下转化为 SO_4^{2-}，形成地表高硫酸根含量的酸性泉(图 9)。

4　结论

(1)研究区地热水水化学类型主要为 Na-Cl、Na-HCO_3-Cl 型，F、SiO_2、B、Li 等微量组分含量较高；除此之外也发育有 Al、Fe 含量较高的“蒸汽加热型酸性水”。

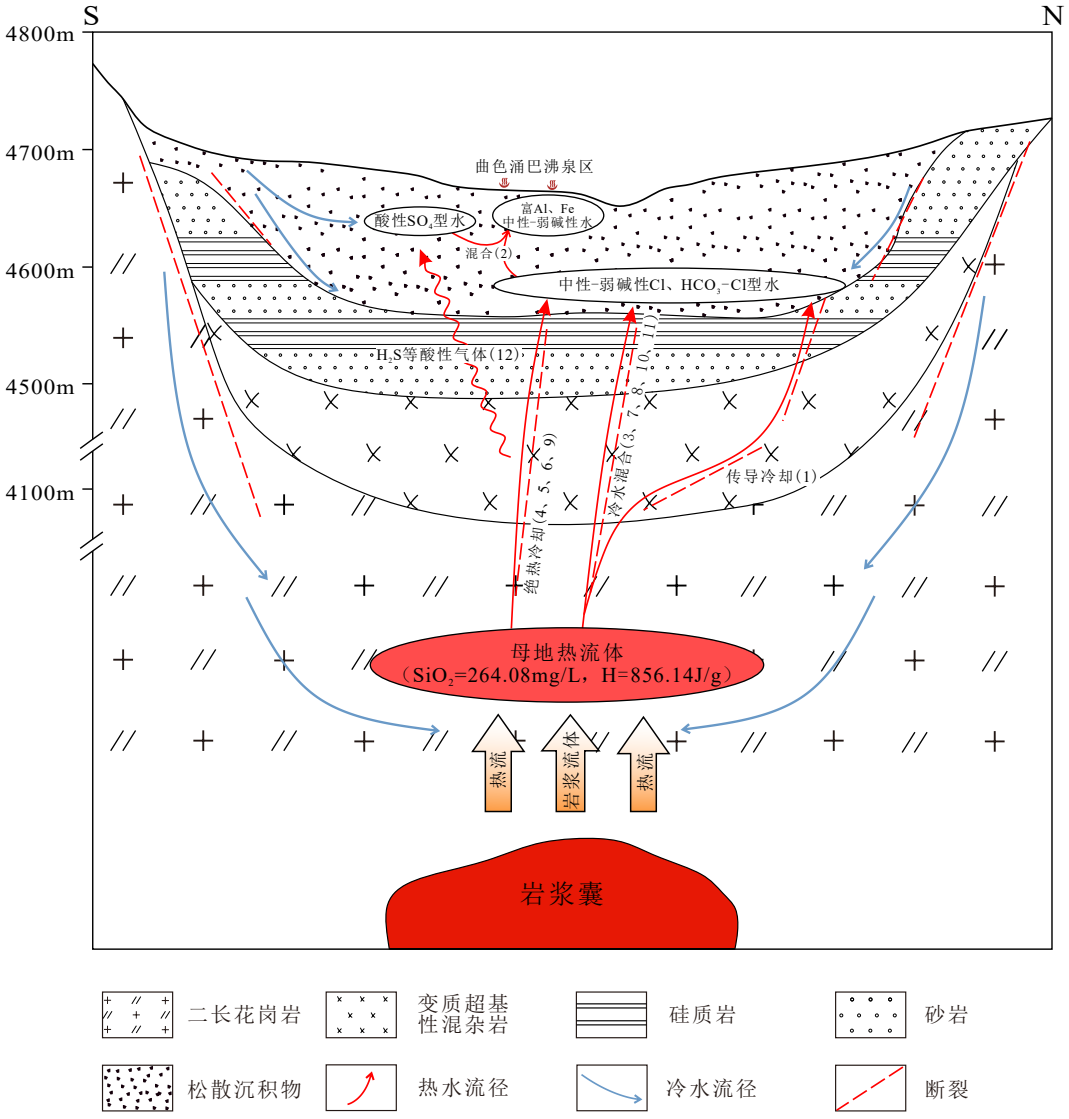


图 9　玛旁雍错地热系统成因机制模式图（一些地层岩性与岩层厚度的观点引自 Wang et al.（2016））

Fig. 9　Conceptual model of formation mechanism of Mapamyumco geothermal system (Some views on stratigraphic lithology and thickness are cited from Wang et al. (2016))

（2）Na-K-Mg 三角图中地热水基本分布在部分平衡区，表明地热水在深部已经达到过完全平衡状态，可以使用阳离子温标进行热储温度估算；lg(SiO_2)-lg(K^2/Mg)图中，样品点呈现水平分布，结合 K-Mg 温标估算结果，表明存在一温度为 170℃左右的浅部热储层。通过 SiO_2 温标与阳离子温标估算，最终得到深部热储温度在 200℃ 左右。

（3）研究区内热泉水具有相同的地球化学起源，在葡萄石、绿泥石等次生矿物沉淀和浅层冷水混合的影响下，导致了地表热泉富 Mg 而不同于深部地热流体富 B、富 Cl、贫 Mg 的水化学组成。

（4）地表地热显示、构造地质背景以及水化学特征均指示玛旁雍错地热田为岩浆热源型地热系统；通过硅焓图计算得出深部发育的母地热流体 SiO_2 浓度和焓值分别为 264.08 mg/L 和 856.14 J/g，母地热流体沿断裂带上升过程中通过不同冷却过程形成地表不同类型的热泉。

致谢：两位匿名审稿专家对文章提出诸多宝贵的修改意见和建议，在此表示由衷的感谢。

References

Arnórsson S and 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 .

Fournier R O， 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. Geothermics, 5（1-4）: 41 − 50 .

Gao H L， Hu Z H， Wan H P， et al.， 2023. Characteristics of geothermal geology of the Gulu geothermal field in Tibet[J]. Earth Science, 48（3）: 1014 − 1029 (in Chinese with English abstract).

Giggenbach W F， Garcia P N， Londoño C A， et al.， 1990. The chemistry of fumarolic vapor and thermal-spring discharges from the Nevado del Ruiz volcanic-magmatic-hydrothermal system，Colombia[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 42（1-2）: 13 − 39 .

Giggenbach W F， Sheppard D S， Robinson B W， et al.， 1994. Geochemical structure and position of the Waiotapu geothermal field，New Zealand[J]. Geothermics, 23（5）: 599 − 644 .

Giggenbach W F， 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52（12）: 2749 − 2765 .

Guo Q H，Liu M L，Li J X，et al.， 2017. Fluid geochemical constraints on the heat source and reservoir temperature of the Banglazhang hydrothermal system， Yunnan-Tibet Geothermal Province，China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 172: 109 − 119 .

Guo Q H，Liu M L，Li J X，et al.， 2014. Acid hot springs discharged from the Rehai hydrothermal system of the Tengchong volcanic area（China）： formed via magmatic fluid absorption or geothermal steam heating?[J]. Bulletin of Volcanology， 76（10）： 1 − 12（Article 868）.

Guo Q H， Liu M L， Luo L， et al.， 2019. Geochemical controls on magnesium and its speciation in various types of geothermal waters from typical felsic-rock-hosted hydrothermal systems in China[J]. Geothermics, 81: 185 − 197 .

Guo Q H，Wang Y X and Liu W， 2008. B，As，and F contamination of river water due to wastewater discharge of the Yangbajing geothermal power plant， Tibet， China[J]. Environmental Geology, 56（1）: 197 − 205 .

Guo Q H， 2020. Magma-heated geothermal systems and hydrogeochemical evidence of their occurrence[J]. Acta Geologica Sinica, 94（12）: 3544 − 3554 (in Chinese with English abstract).

Hebei Institute of Geological Survey， 2005. 1：250 000 Yagra，Burang，Horba and Babazhadong Sheets in Xizang[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, Z1: 80 − 86 (in Chinese with English abstract).

Hu X C， SUO J， Duo J， 2002. Characteristics and development prospects of high temperature geothermal resources in Tibet[J]. Geology of Tibet, 2: 80 − 85 (in Chinese with English abstract).

Li J X， Wu Z H， Tian G H， et al.， 2022. Processes controlling the hydrochemical composition of geothermal fluids in the sandstone and dolostone reservoirs beneath the sedimentary basin in north China[J]. Applied Geochemistry, 138: 105211 .

Li W， Kong X J， Yuan L J， et al.， 2020. General situation and suggestions of development and utilization of geothermal resources in China[J]. China Mining Magazine, 29（S1）: 22 − 26 (in Chinese with English abstract).

Li Z Q， 2002. Present hydrothermal activities during collisional orogenics of the Tibetan Plateau[D]. Beijing：Chinese Academy of Geological Sciences.

Liao Z J， Zhao P， 1999. Yunnan−Tibet Geothermal Belt−Geothermal resources and case histories[M]. Science Press，Beijing.

Liu M L，Guo Q H，Geng W，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 .

Lv Y Y，Zhao P，Xu R H，et al.， 2012. Geochemical study on boron isotopes in the Yangbajing geothermal field， Tibet[J]. Chinese Journal of Geology, 47（1）: 251 − 264 (in Chinese with English abstract).

Pang Z H，Wang J Y，Fan Z C， 1990. Using the SiO_2 mixing model to calculate Zhang-zhou geothermal heat storage temperature[J]. Chinese Science Bulletin, 1: 57 − 59 (in Chinese with English abstract).

Shen L C，Wu K Y，Xiao Q，et al.， 2011. Carbon dioxide degassing flux from two geothermal fields in Tibet，China[J]. Chinese Science Bulletin, 56（26）: 2198 − 2208 (in Chinese with English abstract).

Tong W，Liao Z J，Liu S B，et al. ，2000. Tibetan Hot Springs[M]. Science Press，Beijing.

Tong W，Zhang M T，Zhang Z F，et al.，1981. Geothermal Heat in Tibet[M]. Science Press，Beijing.

Wang C G and 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，Liu Y G，Zhu X，et al.，2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 27（1）: 1 − 9 (in Chinese with English abstract).

Wang P，Chen X H，Shen L C，et al.，2016. Geochemical features of the geothermal fluids from the Mapamyum non-volcanic geothermal system （Western Tibet，China）[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 320: 29 − 39 .

Yu H W，Liu Z，Rong F，et al.，2021. Characteristics and source mechanism of geothermal field in Cuona，Tibet[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 40（3）: 34 − 44 (in Chinese with English abstract).

Yuan J F，Guo Q H and Wang Y X，2014. Geochemical behaviors of boron and its isotopes in aqueous environment of the Yangbajing and Yangyi geothermal fields，Tibet，China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 140: 11 − 22 .

Zhang C F，Shi Q L，Zhang L J，2018. Discussion on the relationship between Cenozoic magmatic activity and geotherm in Tibetan Plateau[J]. Geological Survey of China, 5（2）: 18 − 24 (in Chinese with English abstract).

Zhang M Z，Guo Q H，Liu M L，et al.，2023. Geochemical characteristics and formation mechanism of geothermal waters in the Xinzhou Basin，Shanxi Province[J]. Earth Science, 48（3）: 973 − 987 (in Chinese with English abstract).

Zhang Y P，Li Q H，Yu S W，2022. Hydrochemical characteristics constrain on evolution of geothermal water in Guantang area in the east coast of Hainan Island［OJ]. Earth Science：1 − 22.

Zhang Y H，2018. Research on genesis and development of the geothermal system in the Kangding−Moxi segment of the Xianshuihe fault[D]. Chengdu：Chengdu University of Technology.

Zhao B，Lv Y，Wen R，et al.，2023. Utilization situation and development prospect of geothermal energy in Tibet[J]. Thermal Power Generation, 52（1）: 1 − 6 (in Chinese with English abstract).

Zhao P，Mack K，Duo J，et al.，2001. Noble gases constraints on the origin and evolution of geothermal fluids from the Yangbajain geothermal field，Tibet. Acta Petrologica Sinica，17（3）：497 − 503.

Zhao P，Jin J，Zhang H Z，et al.，1998. Chemical composition of thermal water in the Yangbajing geothermal field，Tibet[J]. Scientia Geologica Sinica，33（1）：61 − 72.

Zou J，Wu B，Ma Z X，et al.，2022. Geothermal Origin and Resource Potential of Kaga in Xietongmen County，Tibet[OJ]. Hydrogeology & Engineering Geology：1 − 10.

附中文参考文献

高洪雷，胡志华，万汉平，等，2023. 西藏谷露地热田地热地质特征[J]. 地球科学, 48（3）: 1014 − 1029.

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.

河北省地质调查院区调所，2005. 1∶25 万亚热幅、普兰县幅、霍尔巴幅、巴巴扎东幅（国内部分）地质调查成果与进展[J]. 沉积与特提斯地质, Z1: 80 − 86.

胡先才，索加，多吉，2002. 西藏高温地热资源特征及开发远景分析[J]. 西藏地质, 2: 80 − 85.

李文，孔祥军，袁利娟，等，2020. 中国地热资源概况及开发利用建议[J]. 中国矿业, 29（S1）: 22 − 26.

李振清，2002. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]. 北京：中国地质科学院.

廖志杰，赵平，1999. 滇藏地热带：地热资源和典型地热系统[M]. 北京：科学出版社.

吕苑苑，赵平，许荣华，等，2012. 西藏羊八井地热田硼同位素地球化学特征初步研究[J]. 地质科学, 47（1）: 251 − 264.

庞忠和，汪集旸，樊志成，1990. 利用 SiO_2 混合模型计算漳州地热田热储温度[J]. 科学通报, 1: 57 − 59.

沈立成，伍坤宇，肖琼，等，2011. 西藏地热异常区 CO_2 脱气研究：以朗久和搭格架地热区为例[J]. 科学通报, 56（26）: 2198 − 2208.

佟伟，廖志杰，刘时彬，等，2000. 西藏温泉志[M]. 北京：科学出版社.

佟伟，章铭陶，张知非，等，1981. 西藏地热[M]. 北京：科学出版社.

王贵玲，刘彦广，朱喜，等，2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27（1）: 1 − 9.

余浩文，刘昭，荣峰，等，2021. 西藏错那地热田水化学特征与物源机制[J]. 地质科技通报, 40（3）: 34 − 44.

张朝锋，史强林，张玲娟，2018. 青藏高原新生代岩浆活动与地热关系探讨[J]. 中国地质调查, 5（2）: 18 − 24.

张梦昭，郭清海，刘明亮，等，2023. 山西忻州盆地地热水地球化学特征及其成因机制[J]. 地球科学, 48（3）: 973 − 987.

张彦鹏，黎清华，余绍文，2022. 海南岛东海岸官塘地区地热水水化学特征及其循环演化过程识别[OJ]. 地球科学：1 − 22.

张云辉，2018. 鲜水河断裂康定−磨西段地热系统成因及开发利用研究[D]. 成都：成都理工大学.

赵斌，吕玥，温柔，等，2023. 西藏地热能开发利用现状及发展前景[J]. 热力发电, 52（1）: 1 − 6.

赵平，Mack K，多吉，等，2001. 西藏羊八井热田地热流体成因及演化的惰性气体制约[J]. 岩石学报，17（3）：497 − 503.

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.

邹俊，武斌，马昭雄，等，2022. 西藏谢通门县卡嘎地热成因与资源潜力分析[OJ]. 水文地质工程地质：1 − 10.