

青藏高原南部南北地堑系温泉气体地球化学特征与演化过程

全三余, 王迎春, 唐鑫, 周金林, 罗璐, 宋荣彩

Geochemical characteristics and evolution process for hot spring gas of the north-south graben system in Qinghai-Xizang Plateau

QUAN Sanyu, WANG Yingchun, TANG Xin, ZHOU Jinlin, LUO Lu, and SONG Rongcai

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401037>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

四川巴塘地热田水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and genesis of the geothermal fields in Batang of Sichuan

赵佳怡, 张薇, 张汉雄, 屈泽伟, 李曼, 岳高凡 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 81-89

西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet

章旭, 郝红兵, 刘康林, 毛武林, 肖尧 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 1-9

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

川藏铁路康定隧址区地热水成因及其工程影响分析

An analysis of the genesis and engineering influence of geothermal water in the Kangding tunnel site of the Sichuan-Tibet Railway

张云辉, 李晓, 徐正宣, 常兴旺, 黄, 多吉 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 46-53

云南勐海县勐阿街温泉水化学和同位素特征及成因

Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the Mengajie hot spring in Menghai county of Yunnan

谭梦如, 周训, 张齐, 刘海生, 余鸣潇, 海阔 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 70-70



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401037

全三余, 王迎春, 唐鑫, 等. 青藏高原南部南北地堑系温泉气体地球化学特征与演化过程 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 190-202.

QUAN Sanyu, WANG Yingchun, TANG Xin, et al. Geochemical characteristics and evolution process for hot spring gas of the north-south graben system in Qinghai-Xizang Plateau[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 190-202.

青藏高原南部南北地堑系温泉气体地球化学特征与演化过程

全三余¹, 王迎春^{1,2}, 唐鑫¹, 周金林¹, 罗璐³, 宋荣彩¹

(1. 成都理工大学能源学院(页岩气现代产业学院), 四川成都 610059; 2. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610051; 3. 中石化集团新星公司新能源研究院, 北京 100083)

摘要: 目前, 对于青藏高原南部单个地热田的水文地球化学演化过程, 已有较为清晰的认识, 但对于该地区各个地堑系的热泉气体来源和空间特征及演化过程仍缺乏深入了解。通过对青藏高原南部 3 个地堑(错那—沃卡、亚东—谷露、申扎—定结)的 16 个热泉气体进行采样与测试, 研究分析了地热气体组分、同位素特征、地热气体来源、各地热气体物质含量与状态和地下热储温度的空间关系。以地幔缝合线为分界, 识别了青藏高原南部 3 种类型的热泉气体, 取得以下结论: (1)地幔缝合线南北侧的温泉气体演化过程存在明显差异, 且青藏高原南部部分温泉气体发生脱气分馏现象; (2)温泉气体中氮、碳主要来源于地壳, 氮的运移主要依附于二氧化碳的流动; (3)研究区热储温度存在明显差异, 亚东—谷露地堑温度较高(225 °C)。研究成果可为阐释青藏高原南部构造与地热气体及地热田的相关性提供参考, 同时, 对气体地球化学特征及其演化过程的深入探讨, 对于深化对地下地质过程的认识以及推动地热资源的高效开发有重要意义。

关键词: 地球化学; 地热气体; 地热温度计; 气体同位素

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0190-13

Geochemical characteristics and evolution process for hot spring gas of the north-south graben system in Qinghai-Xizang Plateau

QUAN Sanyu¹, WANG Yingchun^{1,2}, TANG Xin¹, ZHOU Jinlin¹, LUO Lu³, SONG Rongcai¹

(1. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering (Chengdu University of Technology), Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. New Energy Research Institute, Sinopec Xinxing Company, Beijing 100083, China)

Abstract: While the hydrogeochemical characteristics of a single geothermal field in Qinghai-Xizang Plateau are well understood, the study of hot spring gases in various graben systems and their spatial characteristics and evolutionary processes, remains insufficiently explored. The study reported 16 hot spring gases from three grabens (Cuona-Woka graben, Yadong-Gulu graben and Shenzha-Dingjie graben) in Qinghai-Xizang Plateau. The

收稿日期: 2024-01-16; 修订日期: 2024-03-05

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42130809; 42372301); 四川省科技计划资助项目(2025ZNSFSC0308)

第一作者: 全三余(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事同位素地球化学研究。E-mail: quansanyu@163.com

通讯作者: 王迎春(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地热资源勘探与评价等相关教学和科研工作。E-mail: wangyingchun19@cdu.edu.cn

composition and isotopic characteristics as well as the sources of hot spring gas were analyzed. Additionally, the relationship between the content of hot spring gas and the reservoir temperature was conducted in the three grabens. Three types of gases were distinguished in Qinghai-Xizang Plateau by using the “mantle suture line” as the boundary. The results show that hot spring gases in the north and south sides of the boundary have undergone different evolutionary processes, with some samples in the south showing evidence of degassing and fractionation. The sources of helium and carbon isotopes in the hot spring gases are mainly derived from the crust, and the migration of helium is dependent on the flow of carbon dioxide. There are significant differences of reservoir temperature in the three grabens, with a higher temperature (225 °C) in the Yadong-Gulu graben. This study provides insights in understanding the relationship between structures, hot spring gases, and geothermal fields in Qinghai-Xizang Plateau. The exploration of gas geochemical characteristics and their evolutionary processes are significant for the understanding of the underground geological processes and the exploitation and utilization of geothermal resources.

Keywords: geochemistry; geothermal gas; geothermal thermometer; gas isotopes

相较于其他能源,地热资源具有低碳清洁、可再生、输出平稳不受天气变化影响的优势,利用地热能对实现节能减排和能源结构转型有重要意义^[1-2]。我国地热资源丰富,特别是在西藏地区发现了超过 600 个明显的地热出露点^[3-4],这些地热异常点大多分布在南北向的地堑系内,其中最为著名的则是在亚东—谷露地堑内的羊八井、羊易地热田,该地区成功进行了地热发电,表明西藏高温地热田具有开发利用的价值^[5-8]。并且西藏地热资源利用潜力巨大,高于 150 °C 的水热活动地区预估发电潜力在 2 900 MW^[9]。

地热研究中温泉是地热资源最直观的表现,是目前水热型地热开发和利用的主要载体。地热流体内部所含的化学组分、物质组成以及同位素组成携带了大量地球内部的能量和信息^[10-11],这些特征不仅指示了地热资源的开发条件,还与氦气资源、温室气体排放、结垢以及腐蚀等后续问题密切相关^[12]。地热水的研究涉及多个环节,从样品采集、测试、标准化分析到水文地球化学研究,既推动了相关方法技术的升级,如地热温度计使用方法的完善^[13-14],也在地球化学组分来源演化研究方面取得了长足进步^[15-17]。地热气体研究是水文地球化学的拓展^[18],来自地球内部的地热气体能够提供更深层的地质信息,并且不容易受到浅层地表水的影响^[19]。

目前对于青藏高原南部地区单个地热田中温泉组分的来源、通量以及控制机制已有一定认识,例如已初步明确了补给水源^[15]、补给高度^[16]、热源及热水通道等信息^[17],对于热储特征、地热流体的运移演化过程的揭示^[23]等重要信息的解析也比较完善。但对整个青藏高原南部地区地热田热储的分布规律及各

类气体演化过程与青藏高原南部构造的相关性研究仍存在不足。本文通过对青藏高原南部地区 3 个地堑(错那一沃卡、亚东—谷露、申扎—定结)的多个地热显示点进行野外考察与系统采样研究,基于利用 ³He/⁴He 识别出的地幔缝合线(氦分界线)^[21-24],对地热气体组分进行相关性分析,探究气体地球化学特征及其演化过程,这对于深入理解青藏高原南部地区地质过程以及地热资源的开发与利用具有重要意义。

1 研究区地质概况

青藏高原在约 65 Ma 由印度大陆和亚洲大陆碰撞而形成^[25-28],是目前地球上最具有代表性的陆-陆碰撞造山带,具有海拔最高、规模最大和时代最新的特征,巨厚的地壳(~80 km)是一般陆壳(~35 km)的两倍^[29]。印度-欧亚大陆持续挤压碰撞下^[25],不同地块拼贴以缝合线为界,从南到北有雅鲁藏布缝合线、班公湖—怒江缝合线、金沙江缝合线,将青藏高原腹地分成喜马拉雅地体、拉萨地体、羌塘地体、松潘—甘孜地体^[30]。

青藏高原有一系列南北走向的地堑以及缝合带两侧的共轭走滑断层,这些构造导致其内部有大规模东西向伸展^[31-34]。以班公湖—怒江缝合带为界,北部的地堑分布较为集中,延伸的距离相对较短。反之,缝合带以南的拉萨地体内则表现为 7 条大型南北走向的裂谷带,自西向东依次为帕吉尔、隆格尔、打加错、当惹雍错—孔错、申扎—定结、亚东—谷露和沃卡—错那裂谷带^[35](图 1)。

青藏高原各类火山岩与侵入岩分布广泛(约 30 万 km²),拉萨地块是青藏高原地壳最厚、地层发育最

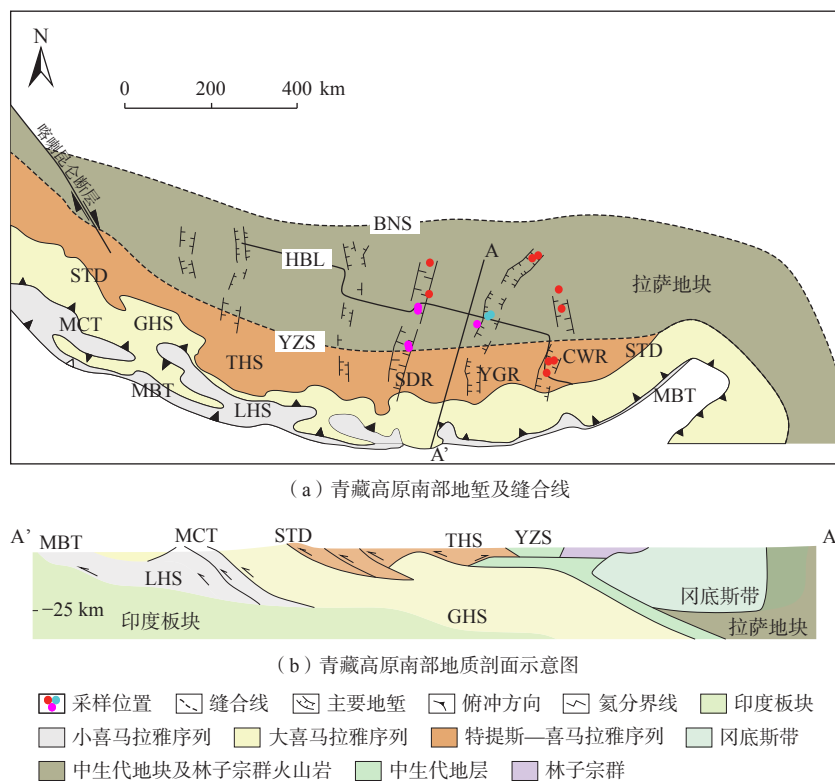


图 1 青藏高原南部地质构造与剖面简化图

Fig. 1 Geological formations and profiles of the southern Qinghai-Xizang Plateau

注: MBT 为主边界逆冲断层; MCT 为主中央逆冲断裂; STD 为藏南拆离系; YZS 为雅鲁藏布缝合线; BNS 为班公—怒江缝合线; SDR 为申扎—定结地堑; YGR 为亚东—谷露地堑; CWR 为错那—沃卡地堑; HBL 为氮分界线; LHS 为小喜马拉雅序列; GHS 为大喜马拉雅序列; THS 为特提斯—喜马拉雅序列; 红色、黄色、蓝色圆形分别代表北部 CO₂ 型气体、南部 CO₂ 型气体及北部 N₂ 型气体。

完全的地区^[26],同时也发育了大量的岩浆岩。冈底斯南部广泛分布着同碰撞期岩浆岩:林子宗火山岩系(65~40 Ma)、冈底斯花岗岩类(51~49 Ma, 高峰期在 50 Ma),及后碰撞期岩浆岩(在青藏高原为 40 Ma~全新世,在冈底斯带为 25~8 Ma),主要有埃达克质斑岩、钾质—超钾质火山岩、淡色花岗岩等。岩浆活动在拉萨地块北部和南部分别在 113 Ma 和 52 Ma 出现强度峰值^[29],由于这 2 次大陆碰撞事件,原来的洋-陆构造体制转化为大陆体制,冈底斯带(拉萨地块)岩石圈转化为大陆岩石圈。

青藏高原的地热特征十分明显,具有强烈的水热活动和高热流值。其水热活动类型多样,是地热流体研究的重要地区。温泉和断层控制的热液系统有一定正相关关系^[36],其中以羊八井、玛宗错热田最为典型。喜马拉雅大地热流值为 87.9~100.1 mW/m²,拉萨块体为 61.3~140.0 mW/m²,羌塘块体为 43.0~98.5 mW/m²,松潘—甘孜块体为 36.0~94.7 mW/m²^[37]。大地热流值分布特征显示青藏高原南部为高值,而岩石圈较薄的藏北为低值,说明大地热流的主要来源不

是上地幔,而是由于地壳增厚引起的放射性富集层厚度增加,以及地壳增厚伴随的高原抬升-剥蚀作用而引起的等温面变浅等^[38]。

2 数据与方法

2.1 样品采集方法

在青藏高原南部地区采集了 16 个气体样品,采集地点主要集中在亚东—谷露、申扎—定结及错那—沃卡 3 个地堑内(图 1)。本次样品采集地区有谷露、德仲、卡吾、古堆、沃卡、日多等,这些温泉的最低温度为 63 °C,属于当地温泉群中具有代表性的泉眼。水样的 pH 值、温度和电导率数据通过便携式多参数系统(HQ40D, Hach)在现场测定,分辨率分别为 0.01、0.1 °C 和 0.1 μS/cm。热泉水 pH 值在 6.0~10.0,温度最高达到了 89 °C(当地沸点)。温泉气体样本依据排水法用玻璃瓶收集,采样过程尽量减少任何可能的空气污染。此外,收集文献中记录的青藏高原南部地堑气体数据 14 组^[24]。

气体样品使用的铅玻璃瓶(50 mL)氮渗透率非常

低。将玻璃瓶先装满对应的地热水并浸没在水中, 热泉喷口的自由气通过密封漏斗连接硅胶管引流到倒置的玻璃瓶中。待玻璃瓶中水超过 2/3 被气体替代时, 在水下用硅胶塞及铝盖密封, 并用石蜡密封瓶口保存。气体采样过程中不使用不锈钢容器以避免腐蚀以及地热水与不锈钢反应产生 H_2 。每个泉口均采集 7~8 瓶气体以便作为平行样品。

2.2 样品测试方法

气样分析在中国科学院西北生态环境研究院进行。气体化学组分分析采用质谱仪(MAT 271), 相对分析误差 $<5\%$ 。采用 GC-IRMS 分析系统、气相色谱仪(Agilent 6 890)、稳定同位素比质谱仪(Thermo-fisher Scientific Delta Plus XP)和在线样品预处理系统

对 CO_2 和 CH_4 中的碳同位素进行测定。结果用相对于 Pee Dee Belemnite (PDB) 标准的 δ 单位表示。测量误差为 $\pm 0.2\%$, 分析精度为 0.3% 。 $^3He/^4He$ 和 $^4He/^20Ne$ 比值用 Noblesse 惰性气体质谱仪(Nu Instruments, UK) 测定, 校准空气来自兰州南部高兰山地区。

3 结果

3.1 气体组分与分类

由表 1 可知, 地热水自由气体中一部分样品主要成分是 N_2 , 其体积占比平均值为 91%, 其他气体的主要成分为 CO_2 。因此按照气体组分和 He 分界线将气体分为 3 个类型, 北部 CO_2 型、南部 CO_2 型及北部 N_2 型。其中北部 CO_2 型、南部 CO_2 型及北部 N_2 型的 CO_2

表 1 青藏高原南部地热气体采样位置及主要气体组分占比

Table 1 Sampling locations and main gas components of geothermal gas in Qinghai-Xizang Plateau

样品编号	类型	He分界线位置	体积占比/%						
			He	H_2	CH_4	N_2	O_2	Ar	CO_2
XZ-022	CO_2	北	4.0×10^{-4}	890.0×10^{-4}	0	3.5	0.8	0.1	94.8
XZ-023	CO_2	北	53.0×10^{-4}	$9\ 970.0 \times 10^{-4}$	0.1	6.3	0.3	0.1	83.3
XZ-026	CO_2	北	59.0×10^{-4}	1.9×10^{-4}	0	4.2	0.4	0	95.2
XZ-029	N_2	北	$6\ 854.0 \times 10^{-4}$	—	5.6	91.4	1.1	1.2	0.1
XZ-030	N_2	北	$6\ 561.0 \times 10^{-4}$	570.0×10^{-4}	5.7	90.7	0.9	1.6	0
XZ-033	CO_2	南	963.0×10^{-4}	0	2.7	14.5	0.4	0.2	82.1
XZ-035	CO_2	南	526.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}	1.6	11.3	0.7	0.1	86.3
XZ-036	CO_2	南	9.0×10^{-4}	4.2×10^{-4}	0.9	7.4	0.5	0.1	91.1
XZ-042	CO_2	南	136.0×10^{-4}	—	—	5.0	0.3	0.1	94.6
XZ-043	CO_2	南	21.0×10^{-4}	—	—	25.1	4.6	0.2	70.2
XZ-046	CO_2	北	201.0×10^{-4}	—	0.1	23.4	1.8	0.3	74.5
XZ-049	CO_2	北	27.0×10^{-4}	—	0.1	5.1	0.4	0.1	94.2
XZ-052	CO_2	北	945.0×10^{-4}	4.2×10^{-4}	1.9	10	0.5	0.1	87.5
XZ-057	CO_2	北	244.0×10^{-4}	—	3.2	9.0	0.4	0.1	87.3
XZ-060	CO_2	北	$1\ 326.0 \times 10^{-4}$	590.0×10^{-4}	3.7	10.5	0.3	0.1	84.7
XZ-063	CO_2	北	$1\ 366.0 \times 10^{-4}$	0	0.1	24.9	1.1	0.2	73.7
36G	N_2	北	$4\ 588.0 \times 10^{-4}$	890.0×10^{-4}	0.2	96.4	1.7	1.0	0.1
95G	N_2	北	$5\ 707.0 \times 10^{-4}$	$9\ 970.0 \times 10^{-4}$	0.1	90.5	8.5	0.7	0.1
96G	N_2	北	$7\ 037.0 \times 10^{-4}$	1.9×10^{-4}	0.1	95.5	3.4	0.8	0.1
48G	CO_2	北	$2\ 015.0 \times 10^{-4}$	—	—	34.8	3.5	0.4	61.2
117G	CO_2	南	585.0×10^{-4}	570.0×10^{-4}	0	32.4	1.0	0.5	65.9
159G	CO_2	北	583.0×10^{-4}	0.0	0.1	17.4	0.8	0.2	81.5
63G	CO_2	南	581.0×10^{-4}	1.7×10^{-4}	0.8	10.6	1.0	0.2	85.7
116G	CO_2	南	$1\ 546.0 \times 10^{-4}$	4.2×10^{-4}	0.1	15.1	0.8	0.2	83.8
46G	CO_2	北	52.0×10^{-4}	—	—	19.7	1.4	0.2	78.7
53G	CO_2	北	143.0×10^{-4}	—	—	20.8	4.3	0.2	74.6
155G	CO_2	北	91.0×10^{-4}	—	—	15.2	2.7	0.1	82.0
152G	CO_2	北	12.0×10^{-4}	0	0.2	6.7	0.4	0	92.7
155G	CO_2	北	57.0×10^{-4}	4.2×10^{-4}	0.1	9.5	1.1	0	89.3
81G	CO_2	南	16.0×10^{-4}	0	—	14.9	2.8	0.1	82.2

注: 部分资料来源为文献[24]; “—”表示未测试。

占比平均值分别为 83.1%、83.8%、0.08%；N₂ 占比平均值为 14.8%、13.5%、92.9%。其他气体如 CH₄、O₂、Ar 等差距不明显，整体占比平均值分别是 1.3%、1.8%、0.5%；大多气体未测出 H₂S、H₂ 和 CO 等。但明显有所不同的是 N₂ 型气体的 He 占比高出 CO₂ 型气体至少 10 倍，这意味着青藏高原南部地热气体中 CO₂、N₂ 和 He 的占比受到构造影响有着一定的空间关联。

3.2 稀有气体同位素

目前地热研究中用到的稀有气体主要有 He、Ne、Ar 3 种。首先是 He，He 有 2 种天然同位素，分别是 ³He 和 ⁴He。³He 主要由地幔脱气释放，是 ³H 经过 β 衰变的产物，其沿着大型构造通道运移上升至浅层流体

释放。⁴He 主要由地壳中 U、Th 经过 α 衰变产生；另外会用到 ⁴He 与 ²⁰Ne 的比值，该值是判断氦气是否是大气来源的重要标准，²⁰Ne 基本不来源于地壳，空气中 ⁴He/²⁰Ne 为 0.318^[39]。本文测得的氦气同位素 R_C/R_A (R_C 为样品 ³He/⁴He，R_A 为大气 ³He/⁴He) 在 0.02 ~ 0.50 之间，⁴He/²⁰Ne 在 3.2 ~ 2 119.0 之间，说明可能地壳端元来源的 He 较多，并且在空间分布上 R_C/R_A 有着明显的南北分区现象(表 2)。

3.3 碳同位素

CO₂ 同位素是判断其来源的重要手段^[40]，本研究测得 δ¹³C-CO₂ 的值在 -14.0‰ ~ -4.5‰ 之间，变化较明显。CO₂/³He 的值在 6.7 × 10⁹ ~ 3.6 × 10¹¹ 之间。但在

表 2 青藏高原南部地热气体 He 和 C 同位素组成
Table 2 He and C isotopes in the geothermal gas in Qinghai-Xizang Plateau

样品编号	R _C /R _A	⁴ He/ ²⁰ Ne	δ ¹³ CO ₂ /‰	δ ¹³ CH ₄ /‰	CO ₂ / ³ He	He来源占比/%			CO ₂ 来源占比/%		
						大气	地幔	地壳	地幔	碳酸岩	有机物
XZ-022	0.50	3	-7.3	—	3.57×10 ¹¹	9.9	4.9	85.2	0.4	72.6	26.9
XZ-023	0.32	26	-4.5	—	3.47×10 ¹⁰	1.2	3.7	95.1	4.3	80.0	15.6
XZ-026	0.09	67	-11.6	—	1.28×10 ¹¹	0.4	0.9	98.6	1.2	56.1	42.7
XZ-029	0.10	1 262	-12.0	-24.6	5.48×10 ⁵	0.0	1.1	98.9	—	—	—
XZ-030	0.10	1 037	-8.7	-29.0	3.57×10 ⁵	0.0	1.1	98.9	—	—	—
XZ-033	0.05	634	-11.0	-12.0	1.28×10 ¹⁰	0.0	0.5	99.5	11.7	50.3	37.9
XZ-035	0.02	394	-11.1	-30.1	5.31×10 ¹⁰	0.0	0.1	99.8	2.8	56.7	40.4
XZ-036	0.12	4	-11.0	—	6.54×10 ¹¹	7.5	0.4	92.0	0.2	59.1	40.7
XZ-042	0.06	126	-9.3	—	8.15×10 ¹⁰	0.2	0.6	99.2	1.9	64.1	34.0
XZ-043	0.18	3	-10.1	—	1.33×10 ¹¹	9.9	0.9	89.2	1.1	61.7	37.1
XZ-046	0.19	88	-8.5	—	1.40×10 ¹⁰	0.3	2.2	97.5	10.7	60.4	28.9
XZ-049	0.35	21	-8.2	—	7.14×10 ¹⁰	1.5	4.1	94.4	2.1	68.0	29.9
XZ-052	0.03	1 305	-7.5	-23.5	2.44×10 ¹⁰	0.0	0.3	99.8	6.2	67.5	26.3
XZ-057	0.03	272	-14.0	-40.6	7.58×10 ¹⁰	0.1	0.2	99.7	2.0	46.6	51.4
XZ-060	0.05	1 304	-9.3	-26.3	9.13×10 ⁹	0.0	0.5	99.5	16.4	53.1	30.5
XZ-063	0.06	687	-12.6	—	6.67×10 ⁹	0.0	0.6	99.4	22.5	36.3	41.3
36G	0.07	322	-13.6	-31.4	2.40×10 ⁶	0.1	0.7	99.2	—	—	—
95G	0.04	300	-13.9	-46.8	4.20×10 ⁶	0.1	0.4	99.6	—	—	—
96G	0.04	460	-12.8	—	2.70×10 ⁶	0.0	0.4	99.6	—	—	—
48G	0.07	288	-10.9	—	3.10×10 ⁹	0.1	0.7	99.1	48.4	22.9	28.7
117G	0.11	141	-9.6	—	7.32×10 ⁹	0.2	1.2	98.6	20.5	48.9	30.6
159G	0.12	433	-11.3	—	8.32×10 ⁹	0.0	1.4	98.6	18.0	44.5	37.5
63G	0.05	1 101	-9.2	—	2.11×10 ¹⁰	0.0	0.5	99.5	7.1	60.5	32.4
116G	0.02	2 119	-1.3	-31.2	1.93×10 ¹⁰	0.0	0.1	99.9	7.8	89.3	2.9
46G	0.16	31	-7.3	—	6.36×10 ¹⁰	1.0	1.8	97.3	2.4	71.2	26.5
53G	0.04	34	-12.4	—	7.46×10 ¹⁰	0.9	0.3	98.8	2.0	52.5	45.4
155G	0.05	76	-11.8	—	1.29×10 ¹¹	0.4	0.5	99.2	1.2	55.4	43.4
152G	0.17	37	-10.0	—	2.99×10 ¹¹	0.8	1.9	97.3	0.5	62.6	36.9
155G	0.19	80	-6.0	—	5.89×10 ¹⁰	0.4	2.2	97.4	2.6	75.8	21.6
81G	0.07	8	-9.3	—	3.67×10 ¹¹	3.8	0.3	95.9	0.4	65.2	34.3

注：“—”表示未测出或无法计算；大气 ³He/⁴He=1.39×10⁻⁶、⁴He/²⁰Ne=0.318，地幔 ³He/⁴He=1.1×10⁻⁵、⁴He/²⁰Ne=1 000，地壳 ³He/⁴He=1.5×10⁻⁸、⁴He/²⁰Ne=1 000；δ¹³C-CO₂端部构件的值：地幔端元取值δ¹³C=(-6.5±2.5)‰，CO₂/³He=2×10⁹，碳酸盐端元取值δ¹³C=(0±1)‰，CO₂/³He=1×10¹³，沉积物端元取值δ¹³C=(-30±10)‰，CO₂/³He=1×10¹³。

N_2 为主的区域, 该比值仅仅在 $5.5 \times 10^5 \sim 4.2 \times 10^6$ 之间。如此之低的 CO_2 气体含量让人猜测该区域的流体发生了强烈的方解石沉淀现象。 CH_4 是青藏高原南部地壳气体中一种主要的微量组分。甲烷碳同位素比值在北部 N_2 型地区为 $-46.8\% \sim -24.6\%$ 之间; 在南部 CO_2 型地区为 $-40.6\% \sim -23.5\%$ 之间; 特殊的是, 在北部 CO_2 型地区该比值达到了 -12% (表 2)。

4 讨论

4.1 气体组分关系

测试的气体组分中 N_2 与 CO_2 基本占据整个气体 (图 2), 说明采集样品时没有空气的污染。以 N_2 为主的温泉, N_2 来源主要是地下水循环时, 大气中氧气与其他物质发生了反应被消耗, 使得 N 相对富集。在前人研究中青藏高原南部地区的 N_2 主要来自于大气 [24], 并且在图 2 中高浓度的 N_2 还包含了高浓度的 He, 说明地下水循环的深度是较深的。南部地区 He 多数处于较高的水平。

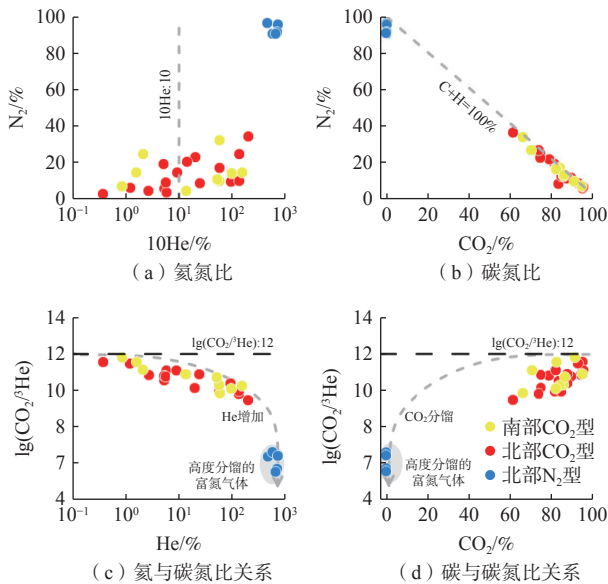


图 2 青藏高原南部温泉自由气体碳、氮、氦组分关系

Fig. 2 Relationship between free gas carbon, nitrogen, and helium components in hot springs in Qinghai-Xizang Plateau

水溶液中 CO_2 和 He 的溶解度差异也能引起 CO_2/He 值的变化 [41]。 CO_2/He 与 He 浓度之间有明显的负相关性 (图 2), 相对于 CO_2 , He 溶解度低, 更容易进入气相, 使得残余液相中 CO_2/He 相比初始值变大。同样 CO_2/He 与 CO_2 浓度则是有着明显的正相关性, 表明了方解石的沉淀可能是气体 CO_2/He 值变化的机制。由于热液上升过程脱气作用导致的方解石沉淀可以

引起 CO_2/He 和 ^{13}C 含量的改变 [42-43]。大气降水循环到深部被加热的同时也能溶解很多围岩中的组分 (富含 Ca^{2+} , Mg^{2+})。深部富含 CO_2 的气体在降温、减压作用下, 能够与这些阳离子反应形成碳酸盐矿物, 进而改变深部初始的 CO_2/He 值。

随着方解石的生成, 青藏高原南部温泉气体中的 CO_2/He 值呈明显下降趋势, 反应强烈区域气体中的 CO_2 受影响明显, 被消耗殆尽 (图 2)。在 CO_2 浓度下降期间, 氦气的占比明显提高 (图 2), 这也说明了 He 的运移过程依靠 CO_2 , 当 CO_2 被消耗后 He 就会明显聚集。

4.2 He 来源、He 通量

分析 $^3He/^4He$ 和 $^4He/^{20}Ne$ 的相互关系有助于定量研究地热气体中 He 的来源。南部的氦气主要是壳内放射性成因为主, 具有可识别的地幔特征; 北部的氦气地幔特征比较明显 (1%~5%), 但是也以壳内放射性成因为主 (95%~99%)。

对于地热气体 R_C/R_A 中, 当地热田 R_C/R_A 超过 0.10 时, 说明存在一定比例的幔源 He 混入地热系统, 当 R_C/R_A 在 0.02 ~ 0.10 时, 则是壳内源占主导地位。由图 3 可知, 北部地幔来源 He 在 0.4% ~ 4.9% 之间, 而南部仅在 0.1% ~ 1.2% 之间, 在分界线北部地区地幔挥发来源 He 占比高于南部地区 (图 4)。这是因为分界线南部地区主要受印度板块岩石圈的影响, 地幔 He 几乎不存在。由于青藏高原含有大范围的花岗岩等侵入岩体 [29], 地壳 He 很可能是由壳内花岗岩中的 U (最大值达到 $97.8 \times 10^{-4}\%$, 平均值 $4.2 \times 10^{-4}\%$) 和 Th (最大值达到 $317 \times 10^{-4}\%$, 平均值 $21.2 \times 10^{-4}\%$) 元素放射性衰变产生的 [44-45]。因此南部大部分地区 He 是地壳来源为主 (基本所有样品的地壳来源占比大于 99%)。北部地块的样品复杂, 表现跨度大, 多数 He 以地壳来源为主, 少部分含较多的地幔挥发 He。

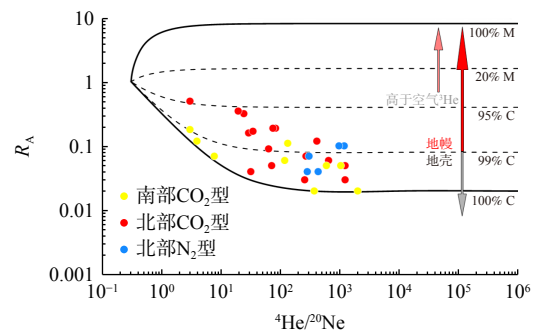


图 3 青藏高原南部地热气体 R_A 与 $^4He/^{20}Ne$ 对比关系图

Fig. 3 Comparison between R_A and $^4He/^{20}Ne$ in geothermal gases in Qinghai-Xizang Plateau

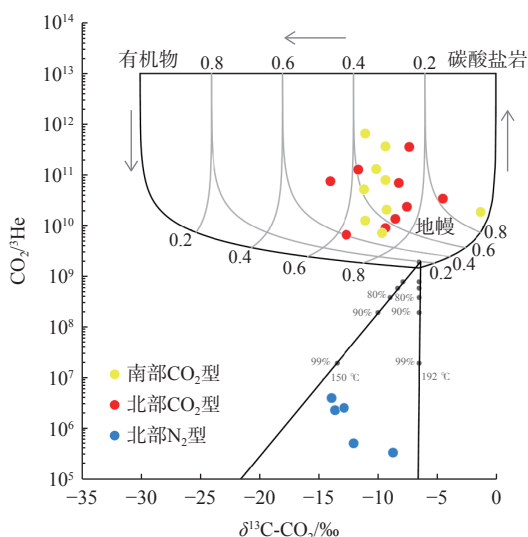


图 4 青藏高原南部温泉气体的 $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2/\text{He}$ 关系 (模型据文献 [46] 修改)

Fig. 4 Relationship between $\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2$ and ^3H in hot springs in Qinghai-Xizang Plateau (model source modified according to Ref. [46])

4.3 CO_2 来源及演化

$\delta^{13}\text{C}-\text{CO}_2/\text{He}$ 关系 (图 4) 能够有效地揭示气体中地幔来源的 CO_2 。虽然青藏高原南部地区的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较靠近大洋中脊玄武岩 (Mid - Ocean Ridge Basalt, MORB) 端元, 但实际上地幔来源的 CO_2 是微量的, 主要是海相碳酸盐和地壳沉积物两者的混合。Sano 等^[46] 建立了 C-He 同位素的三端混合模型, 该模型可以识别不同的端元, 并估计每个端元的比例, 特别是对于 CO_2 浓度高的热液流体。本研究中的 3 个端元如下: 地幔、碳酸盐岩和沉积物。假设地幔部分是 MORB 型地幔, 以简化计算。

图 4 显示青藏高原南部地区 CO_2 型的样品基本落在了地幔、碳酸盐和沉积物来源范围内。分析 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的数据可知青藏高原南部是纯粹的地壳挥发性起源, 南部热液气体中 MORB 比例应不超过 1%, 北部不超过 5%。然而一些富 He 地区的样品特征有明显的高 MORB 比例情况 (7.8% ~ 48.4%), 这种差异可能是由于含水层系统中 He 和 CO_2 之间的解耦, 热液流体长期停留在源区导致放射性成因 He 的加入^[47-48], 也可能是分馏作用不明显导致 CO_2 气体只转化了少部分。

总体上 CO_2 碳酸岩的来源比例明显高于有机物 (碳酸岩来源 $\text{CO}_2(\%)$ 与有机物来源 $\text{CO}_2(\%)$ 比值的平均值为 2.3), 说明青藏高原南部的地热流体主要来自地壳中的变质脱碳, 表明深部结构的温度相对较高, 因为地壳海相石灰岩的变质脱碳反应仅在 $>400\text{ }^\circ\text{C}$ 时

发生^[49]。北部 N_2 型的地热气体样品则落在了 $150 \sim 192\text{ }^\circ\text{C}$ 的脱气区间内^[50], 这可能和地热储层的温度相近。因此在有分馏过程发生的气体运移中, 对气相 CO_2 的来源判断会产生误差, 需要结合 C 与 He 的信息综合考虑。

4.4 热储温度特征

4.4.1 溶解气体地温计

基于气-气和气-岩反应, 利用气体组分之间的关系可评价地热储层的物理化学状态。天然气体地温计具有一些难以控制的特性。使用气相地温计的一个重要障碍是流体的氧化还原状态, 特别是对于 H_2S 、 H_2 、 CH_4 或 CO 等对氧化还原电位敏感的反应相。

Giggenbach 等^[51] 表明 R_{H} 是一个量化氧化还原状态的参数, $R_{\text{H}}=-2.8$ 指示流体组分的稳态化学平衡。气体系统 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{H}_2-\text{CO}-\text{CH}_4$ 是一种有效的地温计, 广泛用于地热流体研究^[52]。然而, 当地热水流到地表时, 样品池中的 $\text{H}_2\text{O}_{(\text{g})}$ 会受到沸腾的影响, 并且 CO 在上升过程中与浅层含水层混合后也会被氧化, 所以在青藏高原南部地热系统中采用 $\text{CO}_2-\text{CH}_4-\text{H}_2$ 体系。因此, 液相沸腾产生的 $X_{\text{CH}_4}/X_{\text{CO}_2}$ 对数值可以用下式表示:

$$\lg\left(\frac{X_{\text{CH}_4}}{X_{\text{CO}_2}}\right)_{\text{V}} = 4R_{\text{H}} + \frac{5181}{T} \quad (1)$$

式中: R_{H} —— $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分压的对数值;

X_{CH_4} —— CH_4 气相分压值;

X_{CO_2} —— CO_2 气相分压值;

T ——温度/K。

因此, 在液相中 $\lg(X_{\text{CO}_2}/X_{\text{CH}_4})$ 也取决于气液之间 CH_4 和 CO_2 的分配系数, 公式如下:

$$\lg\left(\frac{X_{\text{CH}_4}}{X_{\text{CO}_2}}\right)_{\text{L}} = 4R_{\text{H}} + \frac{5181}{T} + \lg(B_{\text{CO}_2}) - \lg(B_{\text{CH}_4}) \quad (2)$$

式中: B_{CO_2} —— CO_2 在气、液相间的平衡系数;

B_{CH_4} —— CH_4 在气、液相间的平衡系数。

假设地热流体中的 Ar 与空气饱和水含量一致^[53], 建立了基于 $\text{H}_2-\text{Ar}-\text{CH}_4-\text{CO}_2$ 气液溶解平衡关系的地质温度计。当水沸腾时, H_2 与 Ar 的关系为:

$$\lg\left(\frac{X_{\text{H}_2}}{X_{\text{Ar}}}\right)_{\text{V}} = R_{\text{H}} + 6.52 \quad (3)$$

式中: X_{H_2} —— H_2 气相分压值;

X_{Ar} ——Ar 气相分压值。

在液相中, 特征公式为:

$$\lg\left(\frac{X_{\text{H}_2}}{X_{\text{Ar}}}\right)_{\text{L}} = R_{\text{H}} + 6.52 - \lg(B_{\text{H}_2}) \quad (4)$$

式中: B_{H_2} —— H_2 在气、液相间的平衡系数。

因此, $\lg(X_{H_2}/X_{Ar})$ 与 $\lg(X_{CH_4}/X_{CO_2})$ 图^[51] 显示气液平衡中的 R_H 值为 $-3.6 \sim -2.8$ 。CO₂-CH₄-H₂ 体系温度计图(图 5)显示, 分界线北部地热田溶液平衡温度明显高于南部地热田的温度。发生过分馏的气体(XZ-030)明显不适用于该模型, 但图 4 中给出的分馏温度可能是地热流体离开储层压力发生较大变化导致的, 分馏温度是另一种体现气-液平衡关系的参数, 推测离开储层发生分馏的温度可能是最外层储层温度。

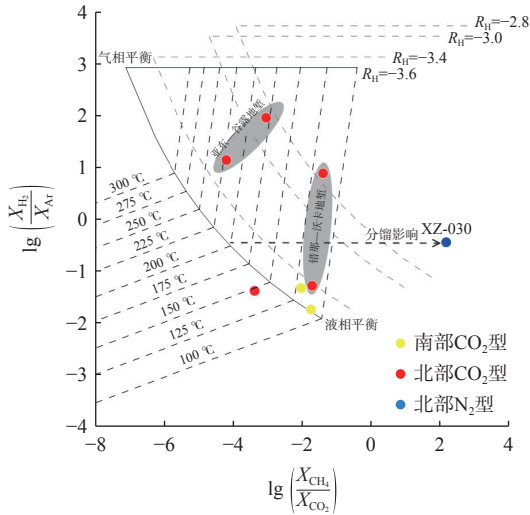


图 5 青藏高原南部气体系统 CO₂-H₂-CH₄-Ar 温度关系
Fig. 5 Relationship between temperature CO₂-H₂-CH₄-Ar in the gas system in Qinghai-Xizang Plateau

4.4.2 碳同位素平衡温度

一般来说 CH₄ 主要有无机成因、热变质成因和微生物成因, 3 种成因的碳同位素比值有明显区别, 将其与 CO₂ 的碳同位素比值综合分析可以直观判断 CH₄ 成因, 并且二者的平衡温度可以指示深部的储层温度^[54]。本文基于赵慈平等^[55] 统计得到的 CO₂、CH₄ 同位素分馏系数与温度的关系式为:

$$T \approx 3880.3 \times (\delta^{13}C_{CO_2} - \delta^{13}C_{CH_4})^{-0.5984} - 273 \quad (5)$$

式中: T ——温度/°C。

如图 6 所示, 大多数的样品点都显示为热变质成因, 部分样点落在了无机成因。热变质成因是沉积物中有机质受热分解成 CH₄, 是天然气的重要成因方式。无机成因的 CH₄ 通常在温度 400 °C 的还原环境下生成^[56]。由于青藏高原南部地热流体主要是地壳来源, 因此 CH₄ 不可能是地幔释放的原始气体, 或金属碳化物在超高温条件下的反应产物。壳内变质成因 CH₄ 的生成机理可能是 Fischer-Tropsch-Type (FTT) 反应^[57]。

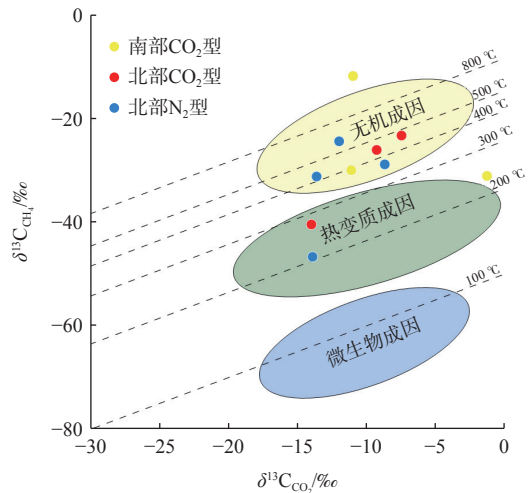


图 6 青藏高原南部气体系统 CO₂-CH₄ 同位素关系图
Fig. 6 Isotope relationship of CO₂-CH₄ in the gas system in Qinghai-Xizang Plateau

热变质和无机成因的甲烷, 来源于深层有机质热解或岩浆脱气, 多数地区的地热温度在 400 °C 左右, 这跟前文海相碳酸盐岩的变质脱碳温度相近, 这可能是壳内脱碳的一个重要节点。部分地区的反应温度达到了 500 °C, 说明下方可能有岩浆体余热活动或者是强烈的构造摩擦产生了较高的环境温度^[58]。

4.5 气体演化过程

沿印度—亚洲俯冲带 He、CO₂ 的演化过程及 N₂、Ar 来源如图 7 所示。地壳北部地热流体的地壳放射性成因通量与地壳的稳定脱气有关。来自地幔深度 (>70 km) 的流体和地壳深部 (>10 km) 产生的变质 CO₂ 可沿东西向伸展引起的断裂, 将厚地壳产生的放射性成因⁴He 迅速带至浅层。然后, 深层流体被溶解到地下水中, 并被地下水带到地表。在较浅的深度, 地热流体可能经历方解石沉淀, 以富集 He。富 He 气体混合物向上运移, 与溶解在地下水中的沉积源气体(即 N₂、CH₄ 和 CO₂)和大气源气体(即²⁰Ne 和³⁶Ar)混合, 并在青藏高原隆升产生强烈热液活动期间释放。

从 He 同位素比值的三元图(图 3)和 CO₂/³He 的三元图(图 4)可知青藏高原南部的地热流体中 CO₂、He 主要源于地壳深部的变质脱碳和放射性成因。虽然大多数 He 与 CO₂ 都是通过深部地区释放, 但是这 2 种流体从下至上运输时每个阶段不一定是耦合的^[59]。例如, 扩散不是 He 在地壳尺度上迁移的可行运输机制^[47], 因此需要平流流体将 He 从地壳深部携带到浅层。对于 CO₂ 型样品中的贫氦气体, 幔源 He 贡献度较高, 相对于富氦 N₂ 型样品, 可视为深源混合气体。因此, 在 80 km 厚的地壳上, CO₂ 作为优势气体最有可

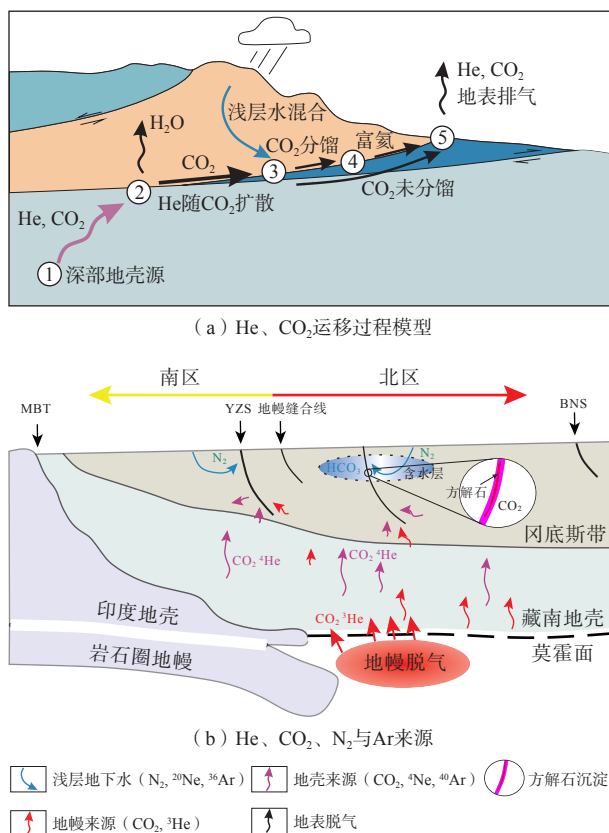


图 7 沿印度—亚洲俯冲带 He、CO₂ 的演化过程及 N₂、Ar 来源示意图

Fig. 7 Evolution processes of He and CO₂ along the Indo-Asian subduction zone and schematic diagram of N₂ and Ar sources

能成为 He 运移的载体^[24]。此外，CO₂/He 与 He 浓度呈负相关，表明 CO₂ 的起源和演化可以用来约束 He 富集机制(图 2)。由于惰性气体和 N₂ 在水溶液中的溶解度低于 CO₂，因此 CO₂ 被保留在水相中，而 N₂ 和惰性气体优先分配到气相中，所以北部 N₂ 型样品可能和深层 CO₂ 流体(北部 CO₂ 型)与浅层地下水混合有关^[60]。

4.6 对揭示青藏高原南部构造活动的启示

基于地球化学特征和热液中 He、CO₂ 同位素特征，提出了青藏高原南部 CO₂ 和 He 的运移模式。在地表地幔缝合线的下方，较冷并俯冲的印度岩石圈地幔与高温、富含流体的青藏高原下软流圈地幔楔并置，造成青藏高原南部拉萨地块下有明显的地震波速边界^[61-62]，这种边界约束了热液流体，形成了地球化学约束的边界。在青藏高原南部的氦边界南部，热液流体是地壳起源，基本未含地幔组分参与^[20,63]，但在印度岩石圈俯冲板块撕裂模型中，青藏高原南部下方的岩石圈地幔也有东西向的伸展^[64-65]，因此南部地区也有相对较低的地幔衍生 He、CO₂。研究区 3 个裂谷下

的印度大陆板块是较为破碎的陡峭岩石圈，伸展处更为陡峭^[66]，板块边缘俯冲的过程中，形成的东西向岩石圈伸展为深部流体的运移提供了有利条件并带出更多的 He。

印度大陆岩石圈持续并相对稳定的俯冲，造就了南部地壳脱气和运移的相对稳定，可以解释青藏高原南部氦分界线以南地区的碳同位素与碳来源相对差异小，而北部在这种拉伸情况下挥发物的输入量明显增加且差异较大，这与先前对 He 的研究成果相似^[48,67-71]。

5 结论

(1) 青藏高原南部地热气体 CO₂ 和 He 的同位素关系表明青藏高原南部地热流体表现为壳源性，样品中 CO₂ 主要来自地壳深部变质沉积物的热成因脱碳，He 主要来自地壳内的放射性衰变。

(2) 青藏高原南部地区深部地壳产生的 He 运移主要依靠平流的 CO₂ 将其带到浅层，CO₂ 的起源和演化可以用来约束 He 富集机制。在氦分界线附近存在方解石分馏的情况，由于惰性气体和 N₂ 在水溶液中的溶解度低于 CO₂，因此 CO₂ 被保留在水相中使得部分地区氦气富集。N₂ 主要来自随地下水循环的大气溶解氮。

(3) 对于地热田水-岩-气平衡反应的储层温度，亚东—谷露北部温度(150 ~ 225 °C)远高于南部(100 ~ 125 °C)，CH₄ 与 CO₂ 同位素反应的深部变质脱碳温度多在 400 °C 左右，并且可能有强烈的岩浆体活动发生，因此地热利用开发应以北部亚东—谷露地热田为主。

参考文献 (References) :

[1] 汪集暘, 庞忠和, 孔彦龙, 等. 我国地热清洁取暖产业现状与展望 [J]. 科技促进发展, 2020(3): 293 - 298. [WANG Jiyang, PANG Zhonghe, KONG Yanlong, et al. Status and prospects of geothermal clean heating industry in China[J]. Science and Technology for Development, 2020(3): 293 - 298. (in Chinese with English abstract)]

[2] 刘畅, 苏金宝. 西藏羊八井-宁中盆地地下水深循环三维模拟及对地热异常分布的限定 [J]. 中国地质, 2024, 51(6): 1868 - 1882. [LIU Chang, SU Jinbao. Geothermal distribution and forming mechanism: Insight from 3D numerical simulation on Yangbajing-Ningzhong Basin, Tibet[J]. Geology in China, 2024, 51(6): 1868 - 1882. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 邱楠生, 唐博宁, 朱传庆. 中国大陆地区温泉分布的深部热背景 [J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 195 - 207. [QIU Nansheng, TANG Boning, ZHU Chuanqing. Deep thermal background of hot spring distribution in the Chinese continent[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 195 - 207. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王晨光, 郑绵平, 张雪飞, 等. 西藏南部古堆高温地热田水化学特征及其成因研究 [J]. *地质学报*, 2024, 98(2): 558 - 578. [WANG Chenguang, ZHENG Mianping, ZHANG Xuefei, et al. Hydrochemical characteristics and origin of geothermal fluids in the Gudui high-temperature geothermal system in Comei County, southern Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(2): 558 - 578. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 赵平. 常用气体地热温度计的应用及效果评价 [J]. *地质科学*, 1993(2): 167 - 176. [ZHAO Ping. Application and evaluation of gas geothermometers[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1993(2): 167 - 176. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 赵平, 多吉, 谢鄂军, 等. 中国典型高温热田热水的锶同位素研究 [J]. *岩石学报*, 2003, 19(3): 569 - 576. [ZHAO Ping, DUO Ji, XIE Ejun, et al. Strontium isotope data for thermal waters in selected high-temperature geothermal fields, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(3): 569 - 576. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 多吉. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征 [J]. *中国工程科学*, 2003(1): 42 - 47. [DUO Ji. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field—a typical high temperature geothermal system[J]. *Engineering Science*, 2003(1): 42 - 47. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GUO Qinghai, WANG Yanxin, Liu Wei. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, et al. China[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2007, 166(3/4): 255 - 268.
- [9] 赵斌, 吕玥, 温柔, 等. 西藏地热能开发利用现状及发展前景 [J]. *热力发电*, 2023, 52(1): 1 - 6. [ZHAO Bin, LV Yue, WEN Rou, et al. Utilization situation and development prospect of geothermal energy in Tibet[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(1): 1 - 6. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 庞菊梅, 王英男, 金爱芳, 等. 承德北部茅荆坝地热田地热流体的水化学和同位素特征及其成因 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(1): 224 - 236. [PANG Jumei, WANG Yingnan, JIN Aifang, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics and genesis of geothermal fluids in the Maojingba geothermal field, northern Chengde City[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 224 - 236. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 范翼帆, 段忠丰, 杨永红, 等. 热储特征对砂岩热储采灌井距的影响—以济阳坳陷为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(1): 215 - 223. [FAN Yifan, DUAN Zhongfeng, YANG Yonghong, et al. Impact of reservoir characteristics on the well spacing of sandstone geothermal reservoir: A case study of Jiyang depression[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 215 - 223. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘明言. 地热流体的腐蚀与结垢控制现状 [J]. *新能源进展*, 2015, 3(1): 38 - 46. [LIU Mingyan. A review on controls of corrosion and scaling in geothermal fluids[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2015, 3(1): 38 - 46. (in Chinese with English abstract)]
- [13] PANG Zhonghe, REED M. Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: Problems and methods[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(6): 1083 - 1091.
- [14] 李义曼, 庞忠和, 罗霖, 等. SiO₂ 温度计沸腾校正方法在高原地区的适用性分析 [J]. *地质论评*, 2021, 67(4): 1050 - 1056. [LI Yiman, PANG Zhonghe, LUO Ji, et al. Applicability of SiO₂ geothermometers with adiabatic boiling correction in plateau areas[J]. *Geological Review*, 2021, 67(4): 1050 - 1056. (in Chinese with English abstract)]
- [15] GUO Qinghai. Hydrogeochemistry of high-temperature geothermal systems in China: A review[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(10): 1887 - 1898.
- [16] 郭清海, 刘明亮, 李洁祥. 腾冲热海地热田高温热泉中的硫代砷化物及其地球化学成因 [J]. *地球科学*, 2017, 42(2): 286 - 297. [GUO Qinghai, LIU Mingliang, LI Jiexiang. Thioarsenic species in the high-temperature hot springs from the Rehai geothermal field (Tengchong) and their geochemical geneses[J]. *Earth Science*, 2017, 42(2): 286 - 297. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 李义曼, 庞忠和. 地热系统碳酸钙垢形成原因及量化评价 [J]. *新能源进展*, 2018, 6(4): 274 - 281. [LI Yiman, PANG Zhonghe. Carbonate calcium scale formation and quantitative assessment in geothermal

- system[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2018, 6(4): 274 - 281. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 天娇, 庞忠和, 李义曼, 等. 地热气体研究进展 [J]. *地质学报*, 2022, 96(5): 1752 - 1766. [TIAN Jiao, PANG Zhonghe, LI Yiman, et al. Research progress on geothermal gas[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(5): 1752 - 1766. (in Chinese with English abstract)]
- [19] LOWENSTERN J B, BERGFELD D, EVANS W C, et al. Origins of geothermal gases at Yellowstone[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2015, 302: 87 - 101.
- [20] HOKE L, LAMB S, HILTON D R, et al. Southern limit of mantle-derived geothermal Helium emissions in Tibet: Implications for lithospheric structure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 180(3/4): 297 - 308.
- [21] KLEMPERER S L, KENNEDY B M, SASTRY S R, et al. Mantle fluids in the Karakoram fault: Helium isotope evidence[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 366: 59 - 70.
- [22] KLEMPERER S L, ZHAO Ping, WHYTE C J, et al. Limited underthrusting of India below Tibet: 3He/4He analysis of thermal springs locates the mantle suture in continental collision[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, 119(12): 2113877119.
- [23] 万汉平, 张松, 高洪雷, 等. 西藏谷露地热田水热系统成因机制 [J]. *世界核地质科学*, 2023, 40(3): 687 - 700. [WAN Hanping, ZHANG Song, GAO Honglei, et al. Hydrothermal system formation mechanism of Gulu geothermal field[J]. *World Nuclear Geoscience*, 2023, 40(3): 687 - 700. (in Chinese with English abstract)]
- [24] HAO Yinlei, KUANG Xingxing, FENG Yuqing, et al. Discovery and genesis of helium-rich geothermal fluids along the India-Asia continental convergent margin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, 360: 175 - 191.
- [25] YIN A, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28: 211 - 280.
- [26] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应 [J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 135 - 148. [MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, DENG Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(3): 135 - 148. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2009, 34(1): 17 - 27. [MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, ZHU Dicheng, et al. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(1): 17 - 27. (in Chinese with English abstract)]
- [28] MO Xuanxue, NIU Yaoling, DONG Guochen, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2008, 250(1/4): 49 - 67.
- [29] 莫宣学. 从岩浆岩看青藏高原地壳的生长演化 [J]. *地球科学*, 2020, 45(7): 2245 - 2257. [MO Xuanxue. Growth and evolution of crust of tibetan plateau from perspective of magmatic rocks[J]. *Earth Science*, 2020, 45(7): 2245 - 2257. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学 [J]. *岩石学报*, 2020, 36(6): 1627 - 1674. [WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan geodynamics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(6): 1627 - 1674. (in Chinese with English abstract)]
- [31] ARMIJO R, TAPPONNIER P, MERCIER J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1986, 91(B14): 13803 - 13872.
- [32] TAYLOR M, YIN An, RYERSON F J, et al. Conjugate strike - slip faulting along the Bangong - Nujiang suture zone accommodates coeval East - West extension and North - South shortening in the interior of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonics*, 2003, 22(4): 18.1 - 18.20.
- [33] 李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 青藏高原新生代地堑构造研究中几个问题的讨论 [J]. *地质论评*, 2005, 51(5): 493 - 501. [LI Yalin, WANG Chengshan, YI Haisheng, et al. A discussion on several problems regarding to the cenozoic grabens in the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geological Review*, 2005, 51(5): 493 - 501. (in Chinese with English abstract)]
- [34] 才巴央增, 赵俊猛. 藏南裂谷系的研究综述 [J]. *地震研究*, 2018, 41(1): 14 - 21. [CAIbayangzeng, ZHAO Junmeng. A summary of researches on southern Tibet rift system[J]. *Journal of Seismological Research*, 2018, 41(1): 14 - 21. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 张佳伟, 李汉敖, 张会平, 等. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35(8): 848 - 862. [ZHANG Jiawei, LI Hanao, ZHANG

- Huiping, et al. Research progress in cenozoic N-S striking rifts in Tibetan Plateau[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(8): 848 – 862. (in Chinese with English abstract)]
- [36] TIAN Jiao, ZHOU Xiaocheng, YAN Yucong, et al. Earthquake-induced impulsive release of water in the fractured aquifer system: Insights from the long-term hydrochemical monitoring of hot springs in the Southeast Tibetan Plateau[J]. *Applied Geochemistry*, 2023, 148: 105553.
- [37] 沈显杰. 西藏喜马拉雅地热带地热资源量级估算的方法探讨 [J]. *地质科学*, 1992, 27(增刊 1): 302 – 312. [SHEN Xianjie. An order of magnitude estimation of high temperature geothermal resources of the himalayan geothermal belt, Xizang (TIBET) [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1992, 27(Sup1): 302 – 312. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 滕吉文, 杨顶辉, 田小波, 等. 青藏高原深部地球物理探测 70 年 [J]. *中国科学(地球科学)*, 2019, 49(10): 1546 – 1564. [TENG Jiwen, YANG Dinghui, TIAN Xiaobo, et al. 70 years of deep geophysical exploration in the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2019, 49(10): 1546 – 1564. (in Chinese with English abstract)]
- [39] DUCHKOV A D, RYCHKOVA K M, LEBEDEV V I, et al. Estimation of heat flow in Tuva from data on Helium isotopes in thermal mineral springs[J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, 51(2): 209 – 219.
- [40] 杨立铮, 卫迦, 孙晋玉. 四川康定温泉系统深源 CO₂ 释放研究 [J]. *地质学报*, 1999, 73(3): 278 – 285. [YANG Lizheng, WEI Jia, SUN Jinyu. A study of the Deep-Source CO₂ release of the hot springs system in kangding, Sichuan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 278 – 285. (in Chinese with English abstract)]
- [41] DUBACQ B, BICKLE M J, EVANS K A. An activity model for phase equilibria in the H₂O–CO₂–NaCl system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2013, 110: 229 – 252.
- [42] WANG Yingchun, ZHOU Xiaocheng, TIAN Jiao, et al. Volatile characteristics and fluxes of He-CO₂ systematics in the southeastern Tibetan Plateau: Constraints on regional seismic activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 129042.
- [43] ZHANG Maoliang, XIE Xiangang, LIU Wei, et al. Hydrothermal degassing through the Karakoram fault, western Tibet: Insights into active deformation driven by continental strike - slip faulting[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, 51(4): e2023GL106647.
- [44] 王迎春, 周金林, 李亮, 等. 羊八井地热田地热地质条件及其对超临界地热资源勘探的启示 [J]. *天然气工业*, 2022, 42(4): 35 – 45. [WANG Yingchun, ZHOU Jinlin, LI Liang, et al. Geothermal geological conditions in the Yangbajing geothermal field and its Enlightenment to the exploration of supercritical geothermal resources[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(4): 35 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [45] CHAPMAN J B, KAPP P. Tibetan magmatism database[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(11): 4229 – 4234.
- [46] SANO Yuji, MARTY B. Origin of Carbon in fumarolic gas from island arcs[J]. *Chemical Geology*, 1995, 119(1/4): 265 – 274.
- [47] BALLENTINE C J, BURGESS R, MARTY B. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47(1): 539 – 614.
- [48] ZHANG Maoliang, ZHANG Lihong, ZHAO Wenbin, et al. Metamorphic CO₂ emissions from the southern Yadong-Gulu rift, Tibetan Plateau: Insights into deep Carbon cycle in the India-Asia continental collision zone[J]. *Chemical Geology*, 2021, 584: 120534.
- [49] FERRY J M. Overview of the petrologic record of fluid flow during regional metamorphism in northern New England[J]. *American Journal of Science*, 1994, 294(8): 905 – 988.
- [50] BARRY P H, NEGRETE-ARANDA R, SPELZ R M, et al. Volatile sources, sinks and pathways: A helium-carbon isotope study of Baja California fluids and gases[J]. *Chemical Geology*, 2020, 550: 119722.
- [51] GIGGENBACH W F, SANO Y, WAKITA H. Isotopic composition of Helium, and CO₂ and CH₄ contents in gases produced along the New Zealand part of a convergent plate boundary[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3427 – 3455.
- [52] CHIODINI G, MARINI L. Hydrothermal gas equilibria: The H₂O–H₂–CO₂–CO–CH₄ system[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(15): 2673 – 2687.
- [53] GIGGENBACH W F. Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand[J]. *Applied Geochemistry*, 1987, 2(2): 143 – 161.

- [54] UENO Y, YAMADA K, YOSHIDA N, et al. Evidence from fluid inclusions for microbial methanogenesis in the early Archaean era[J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 516 – 519.
- [55] 赵慈平, 冉华, 陈坤华. 腾冲火山区壳内岩浆囊现今温度: 来自温泉逸出气体 CO₂、CH₄ 间碳同位素分馏的估计 [J]. 岩石学报, 2011, 27(10): 2883 – 2897. [ZHAO Ciping, RAN Hua, CHEN Kunhua. Present-day temperatures of magma chambers in the crust beneath Tengchong volcanic field, southwestern China: Estimation from carbon isotopic fractionation between CO₂ and CH₄ of free gases escaped from thermal springs[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(10): 2883 – 2897. (in Chinese with English abstract)]
- [56] HORITA J, BERNDT M E. Abiogenic methane formation and isotopic fractionation under hydrothermal conditions[J]. *Science*, 1999, 285(5430): 1055 – 1057.
- [57] FIEBIG J, WOODLAND A B, SPANGENBERG J, et al. Natural evidence for rapid abiogenic hydrothermal Generation of CH₄[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(12): 3028 – 3039.
- [58] LI Yiman, ZHOU Xiaocheng, HUANG Tianming, et al. Origins of volatiles and helium fluxes from hydrothermal systems in the Eastern Himalayan Syntaxis and constraints on regional heat and tectonic activities[J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 631: 130776.
- [59] DUNAI T J, PORCELLI D. Storage and transport of noble gases in the subcontinental lithosphere[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2002, 47(1): 371 – 409.
- [60] BECKER J A, BICKLE M J, GALY A, et al. Himalayan metamorphic CO₂ fluxes: Quantitative constraints from hydrothermal springs[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 265(3/4): 616 – 629.
- [61] LI Chang, VAN DER HILST R D, MELTZER A S, et al. Subduction of the Indian lithosphere beneath the Tibetan Plateau and Burma[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 274(1/2): 157 – 168.
- [62] CHEN Min, NIU Fenglin, TROMP J, et al. Lithospheric foundering and underthrusting imaged beneath Tibet[J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 15659.
- [63] NEWELL D L, JESSUP M J, COTTLE J M, et al. Aqueous and isotope geochemistry of mineral springs along the southern margin of the Tibetan plateau: Implications for fluid sources and regional degassing of CO₂[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2008, 9(8): Q08014.
- [64] CHEN Yun, LI Wei, YUAN Xiaohui, et al. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 413: 13 – 24.
- [65] LI Jiangtao, SONG Xiaodong. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(33): 8296 – 8300.
- [66] ZHAO Wenbin, GUO Zhengfu, ZHENG Guodong, et al. Subducting Indian lithosphere controls the deep carbon emission in Lhasa terrane, southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2022, 127: e2022JB024250.
- [67] WANG Yingchun, GU Hongyu, LI Dan, et al. Hydrochemical characteristics and genesis analysis of geothermal fluid in the Zhaxikang geothermal field in Cuona County, southern Tibet[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(11): 415.
- [68] WANG Yingchun, QUAN Sanyu, TANG Xing, et al. Organic and inorganic carbon sinks reduce long-term deep carbon emissions in the continental collision margin of the southern Tibetan Plateau: Implications for Cenozoic climate cooling[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2024, 129(4): e2024JB028802.
- [69] WANG Yingchun, ZHOU Xiaocheng, Tian Jiao, et al. Spatiotemporal characteristics of hydrothermal volatiles from the Tengchong volcanic field in the southeastern Tibetan Plateau: A probable constraint on the genesis of intraplate volcanism[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2025, 457: 108237.
- [70] TANG Xing, WANG Yingchun, JIA Haoxin, et al. Thermal budget of hydrothermal systems for the Xianshuihe fault belt in the SE Tibetan Plateau: Insights to the geothermal accumulation processes[J]. *Geothermics*, 2025, 125: 103189.
- [71] WANG Yingchun, Li Liang, WEN Huaguo, et al. Geochemical evidence for the nonexistence of supercritical geothermal fluids at the Yangbajing geothermal field, southern Tibet[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127243.