

doi: 10.12029/gc20240226001

张林友, 李旭峰, 朱贵麟, 张盛生, 张超, 王璜, 冯庆达, 许文豪, 牛兆轩, 邓志辉. 2025. 青海共和盆地温度场特征、干热岩成因及资源潜力[J]. 中国地质, 52(2): 399–415.

Zhang Linyou, Li Xufeng, Zhu Guilin, Zhang Shengsheng, Zhang Chao, Wang Huang, Feng Qingda, Xu Wenhao, Niu Zhaoxuan, Deng Zhihui. 2025. Geothermal geological characteristics, genetic model and resource potential of hot dry rocks in the Gonghe Basin, Qinghai[J]. Geology in China, 52(2): 399–415(in Chinese with English abstract).

青海共和盆地温度场特征、干热岩成因及资源潜力

张林友¹, 李旭峰², 朱贵麟¹, 张盛生³, 张超⁴, 王璜⁵, 冯庆达¹, 许文豪¹,
牛兆轩¹, 邓志辉¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010; 3. 青海省水文地质工程地质环境地质调查院, 青海 西宁 810008; 4. 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; 5. 中国地质调查局, 北京 100037)

摘要:【研究目的】位于青藏高原东北缘的共和盆地干热岩体是近年来我国内陆地区深层高温地热探测的重要发现之一, 其成因机制一直备受争议, 是研究的热点内容。现今热状态是盆地地热地质研究的重要内容, 对深入理解高温地热分布规律及成藏机理具有重要的意义。【研究方法】本文基于地球物理探测和钻井测温资料, 分析了共和盆地基底结构特征与高温地热分布规律。采用数值模拟方法, 初步获取了盆地近东西向二维温度场剖面, 在此基础上, 评估了干热岩资源潜力并对干热岩成藏要素进行了讨论。【研究结果】共和盆地干热岩地热资源丰富, 5 km 以浅资源量估算为 2.48×10^{21} J。盆地温度场东西向存在显著差异, 变化规律与盆地基底埋深起伏特征相类似, 盆地东北部新街—瓦里关隆起带周缘地区具有较好的地热地质条件。【结论】在综合前人研究基础上, 我们认为, 共和盆地深部部分熔融持续供热, 放射性花岗岩体增温导热, 新构造抬升剥蚀释热控热, 沉积盖层保温聚热多种因素的影响, 共同导致了盆地现今东西向差异明显的温度场特征和干热岩体的成藏就位。

关 键 词: 温度场; 干热岩; 成因模式; 资源潜力评价; 地热地质调查工程; 共和盆地; 青海省

创 新 点: (1)结合二维地震勘探、钻井等资料, 厘定了共和盆地基底埋深特征, 采用数值模拟方法, 获取了盆地近东西向浅部地壳二维温度场分布; (2)在系统研究共和盆地地热地质特征基础上, 探讨了共和盆地高温地热成因机制, 为共和盆地干热岩勘探提供了地质依据。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0399-17

Geothermal geological characteristics, genetic model and resource potential of hot dry rocks in the Gonghe Basin, Qinghai

ZHANG Linyou¹, LI Xufeng², ZHU Guilin¹, ZHANG Shengsheng³, ZHANG Chao⁴, WANG Huang⁵,
FENG Qingda¹, XU Wenhao¹, NIU Zhaoxuan¹, DENG Zhihui¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 2. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. Qinghai Survey

收稿日期: 2024-02-26; 改回日期: 2024-04-12

基金项目: 国家自然科学青年科学基金项目(42202336)和中国地质调查局项目(DD20190131、DD20211336、DD20230018)联合资助。

作者简介: 张林友, 男, 1987 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事地热资源调查研究及数值模拟等工作; E-mail:
zhanglinyou@mail.cgs.gov.cn。

Institute of the Hydrogeology and Engineering and Environmental Geology, Xining 810008, Qinghai, China; 4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 5. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

[Objective] The Gonghe Basin, situated on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau, is a significant experimental area for the exploration and development of hot dry rock (HDR) in China. The formation mechanisms of HDR within the Gonghe Basin remain controversial and have attracted considerable research attention. The current thermal state is of great significance for a deeper understanding the distribution patterns and formation mechanisms of high-temperature geothermal reservoirs.

[Methods] In this study, extensive geophysical exploration and drilling data are integrated to describe the geological and geothermal architecture of the Gonghe Basin. A two-dimensional temperature field profile across the east-west axis is established through numerical simulation. Based on these results, the resource potential of HDR is assessed, and the key factors controlling HDR formation are analyzed.

[Results] The Gonghe Basin hosts abundant HDR resources, with an estimated 2.48×10^{21} J within the depth of 5 km. The two-dimensional numerical simulation reveals significant temperature field variations between the eastern and western parts of the basin. The temperature field variations are consistent with the distribution of the basin's basement depth, which decreases from west to east. High-temperature anomalies are observed in the northeastern region, particularly around the Xinjie-Waliguan uplift belt.

[Conclusions] On the basis of understanding the knowledge of predecessors, this paper proposes a comprehensive HDR formation mechanism from the perspectives of geological, geothermal, and geophysical backgrounds. The formation of HDR in the Gonghe Basin is controlled by multiple factors, including continuous heating by partial melting, heating and conducting heat by granite, heat controlling by neotectonic uplift and denudation, and heat preservation and accumulation by sedimentary covers.

Key words: geothermal field; hot dry rock; formation mechanism; potential evaluation of HDR resources; geothermal geological survey engineering; Gonghe Basin; Qinghai Province

Highlights: (1) The stratigraphic distribution within the Gonghe Basin was determined through the integration of 2D seismic, drilling and other exploration datasets, and the two-dimensional temperature field distribution of the shallow crust in the basin was established for the first time by numerical simulation; (2) Based on the systematic study of geothermal geological characteristics of the Gonghe Basin, a genetic mechanism for the high-temperature geothermal resources within the basin was proposed. This mechanism provides a fundamental geological basis for the exploration of hot dry rock resources in the Gonghe Basin.

About the first author: ZHANG Linyou, male, born in 1987, Ph.D., senior engineer, mainly engaged in geothermal geology; E-mail: zhanglinyou@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42202336), the projects of China Geological Survey (No.DD20190131, No.DD20211336, No.DD20230018).

1 引言

随着人类对环境质量的重视度持续提升和科学技术水平的不断进步,越来越多的人开始关注可再生清洁能源的重要性。地热资源因具有清洁、稳定且灵活的优势,备受国际关注,开发利用力度不断增大(Bertani, 2016; Axelsson, 2024)。干热岩资源作为地热资源的重要组成部分,常指埋藏在深部不含或微含流体、高温岩体内蕴藏的可被当前技术利用的能源。增强型或工程型地热系统(Enhanced/Engineering Geothermal System, EGS)是目前进行干

热岩开发利用的主要方式(Olasolo et al., 2016)。干热岩资源潜力丰富,据估算全球 EGS 发电潜力可达到 6~108 TWe(Aghahosseini and Breyer, 2020)。作为未来能源安全的潜在可接替型清洁能源之一(Jiang et al., 2014),干热岩勘查开发一直以来受到国际广泛关注。自 20 世纪 70 年代提出干热岩概念以来,美国、英国、法国、日本、中国等多个国家相继开展干热岩勘查开发工作,建立了超过 60 处的工程场地(Pollack et al., 2020)。经过 50 余年的不断探索,干热岩资源开发利用前景进一步明朗,使其越来越有望成为一种经济、实用的新型清洁能源。

源(Breede et al., 2013; Lu, 2018)。

中国地热资源蕴藏丰富,其中印度–欧亚板块俯冲碰撞过程造就了青藏高原广阔的构造变形区,强烈的构造活动使得该地区具有较高的热背景(郭镜等,2023),是我国重要的高温热异常分布带,孕育了诸如羊八井、羊易等高温地热田(Jiang et al., 2019)。位于青藏高原东北缘的共和盆地地表地热显示丰富,沿共和盆地边缘断裂出露有大量温泉,最高温度可达96.6℃,超过当地沸点,被认为是深部存在高温地热资源的证据(Feng et al., 2018)。2014年以来,共和盆地内实施了多眼地热探孔,揭示共和恰卜恰地区在3500 m深度温度普遍超过180℃(张森琦等,2018),贵德扎仓地区ZR2井在4092.8 m深度钻获温度达180℃的高温岩体(雷玉德等,2023),证实了深部存在丰富的干热岩资源。

近年来,随着青海共和干热岩的勘查开发,诸多学者在共和盆地开展了大量与地热相关研究工作,其中,干热岩热成因机制分析是研究中的热点内容,对主要热量贡献来源,有地幔热、部分熔融热、花岗岩放射性生热的等不同的争议。其中严维德等(2013)、Feng et al.(2018)基于地震波低速异常推测共和高温异常可能与地幔热柱相关;李林果和李百祥(2017)认为花岗岩放射性生热对盆地高温地热资源的形成具有重要的贡献;Zhang et al. (2018)、Zhao et al. (2020)、唐显春等(2020)、Pan et al. (2021)从大地电磁、地震波速等地球物理异常、水化学同位素及地温场理论计算等方面认识到共和盆地东部中—上地壳深度可能存在部分熔融,是盆地干热岩的重要热量来源。然而,当前已有认识多基于区域地球物理探测和热模拟计算等方法的推论,由于长期以来缺乏对共和盆地深部地质结构和温度场分布的整体认识,使得对共和盆地干热岩形成的主要热量来源尚存在一定的争议。因此,本文在综合盆地已有地球物理探测资料获取盆地地质结构的基础上,结合钻井实测温度数据,采用数值模拟方法拟合获取了盆地近东西向现今温度场分布特征,探讨了影响盆地温度场的主要因素和干热岩成因模式,并初步评估了盆地干热岩资源潜力,以期为共和盆地干热岩资源勘查与评价工作提供有益借鉴。

2 地质背景

2.1 盆地区域地质特征

共和盆地位于青藏高原东北缘,西秦岭和东昆仑的结合部位(图1a),是在古生代基底上发育的中—新生代沉积盆地(孙延贵,2004),四周被隆起的山地所围限,呈北西向的菱形展布,东西长约300 km,南北宽在30~95 km,面积约为15200 km²,是青海省第三大盆地(图1c)。

盆地北界和南界分别为北西西向的青海南山南缘和共和南山逆冲兼右行走滑断裂;东界和西界分别为北北西向的多禾茂和哇洪山—温泉右行走滑断裂(张森琦等,2018)(图1b)。盆地内以西部哇玉香卡附近低缓分水岭和中东部的新街—瓦里关隆起相隔,可划分为茶卡次级盆地、共和次级盆地和贵德次级盆地(图2)。共和盆地在元古代末至新生代初期漫长地质时期内受到南北向、北东向及东西向主应力的挤压,形成了北西西向、北西向的褶皱、压性断裂和近南北向、北东向张性断裂,控制着盆地的基底形态。

2.2 盆地地层格架

共和盆地内主要被新生代河湖相沉积覆盖,由老至新主要有古新统—渐新统西宁组、新近系中新统咸水河和中—上新统临夏组及第四系共和组等沉积地层。其中西宁组(EN_x)由棕红色泥岩、砂质泥岩与灰绿色、灰白色石膏夹砂岩、粉砂岩组成;咸水河组(N_x)以紫红、青灰色的泥岩、粉砂岩为主,含杂色杂砂岩;临夏组(N_{2l})主要为土黄、砖红色泥岩夹砂砾岩;第四系沉积以砂砾岩、砂泥岩混杂堆积为主。沉积层由盆地边缘到内部,沉积厚度逐渐增大,粒度变细。沉积层平均热导率在1.59 W·m⁻¹·k⁻¹,是共和盆地高温地热形成的较好保温层。

共和盆地基底主要由前三叠纪变质岩和侵入岩体构成,并广泛出露于周缘山脉(图1c)。共和地区岩浆活动频繁,活动时代跨度大、类型多样,经历了加里东、华力西、印支和喜山期等多期次的岩浆旋回,其中以印支期为主,侵入到早—中三叠纪浅变质沉积岩中,岩性以二长花岗岩、花岗闪长岩主,有中细粒—中粗粒似斑或斑状结构的变化特征,结晶年龄主体集中在220~245 Ma(张永明,2017),形

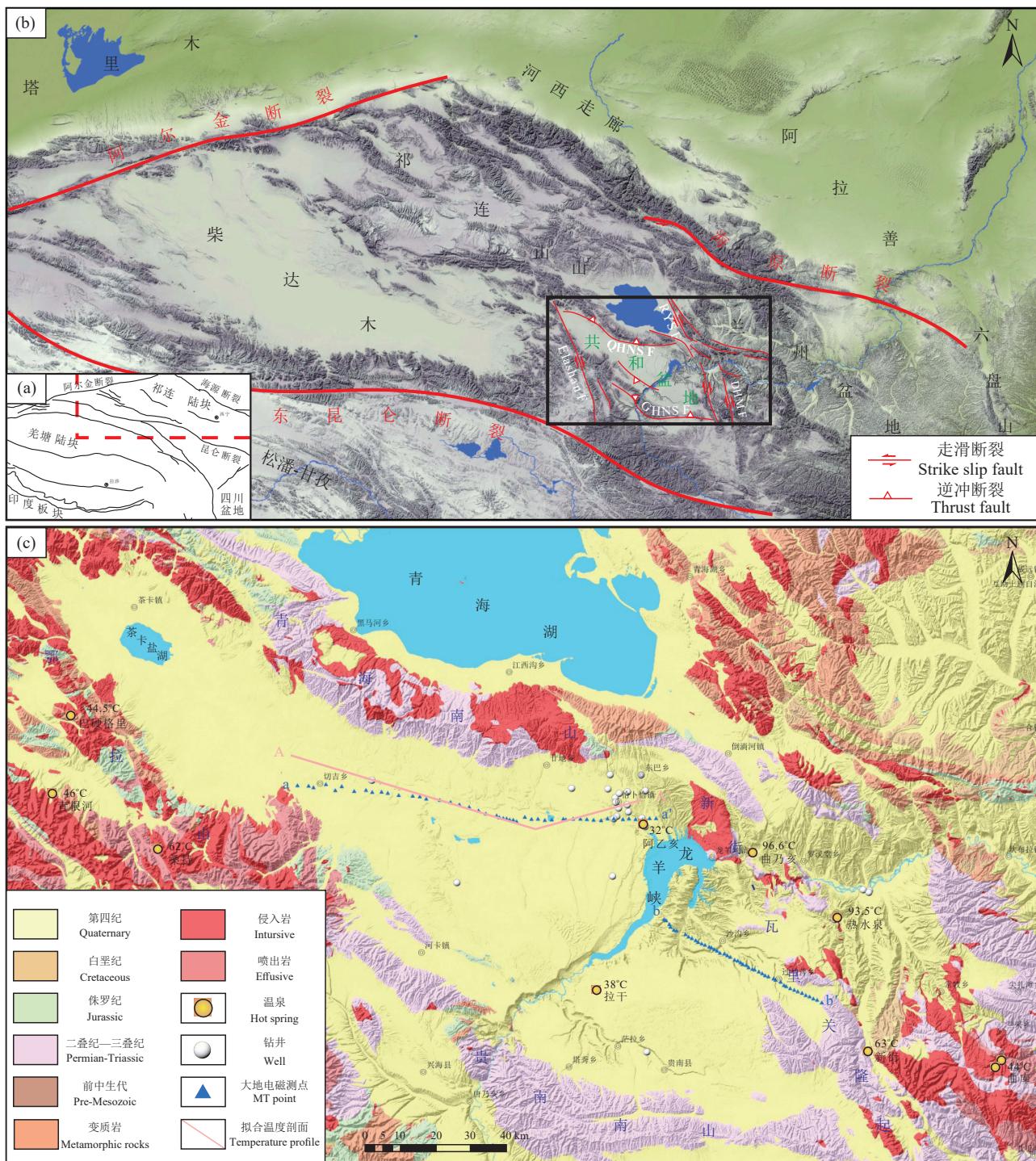


图 1 共和盆地区域构造位置图(a)、共和盆地及周缘地貌图(b)、共和盆地及周缘地质简图(c)^①

Fig.1 东祁连地区现今构造位置图(a)、东祁连地及山系西北部(b)、东祁连地及山系地质简图(c)
 WQ—WHS F—温泉—哇洪山断裂; RYS F—日月山断裂; QHNS F—青海南山南缘断裂; GHNS F—共和南山断层; DHM F—多禾茂断裂
 Fig.1 The regional tectonic location map of the Gonghe basin (a), geomorphological map of the Gonghe Basin and its surrounding margins (b), the geological map of the Gonghe Basin and its surrounding margins (c)
 WQ—WHS F—Wenquan—Wahongshan Fault; RYS F—Riyueshan Fault; QHNS F—south margin of Qinghai Nanshan Fault; GHNS F—Gonghe Nanshan Fault; DHM F—Duohemao Fault

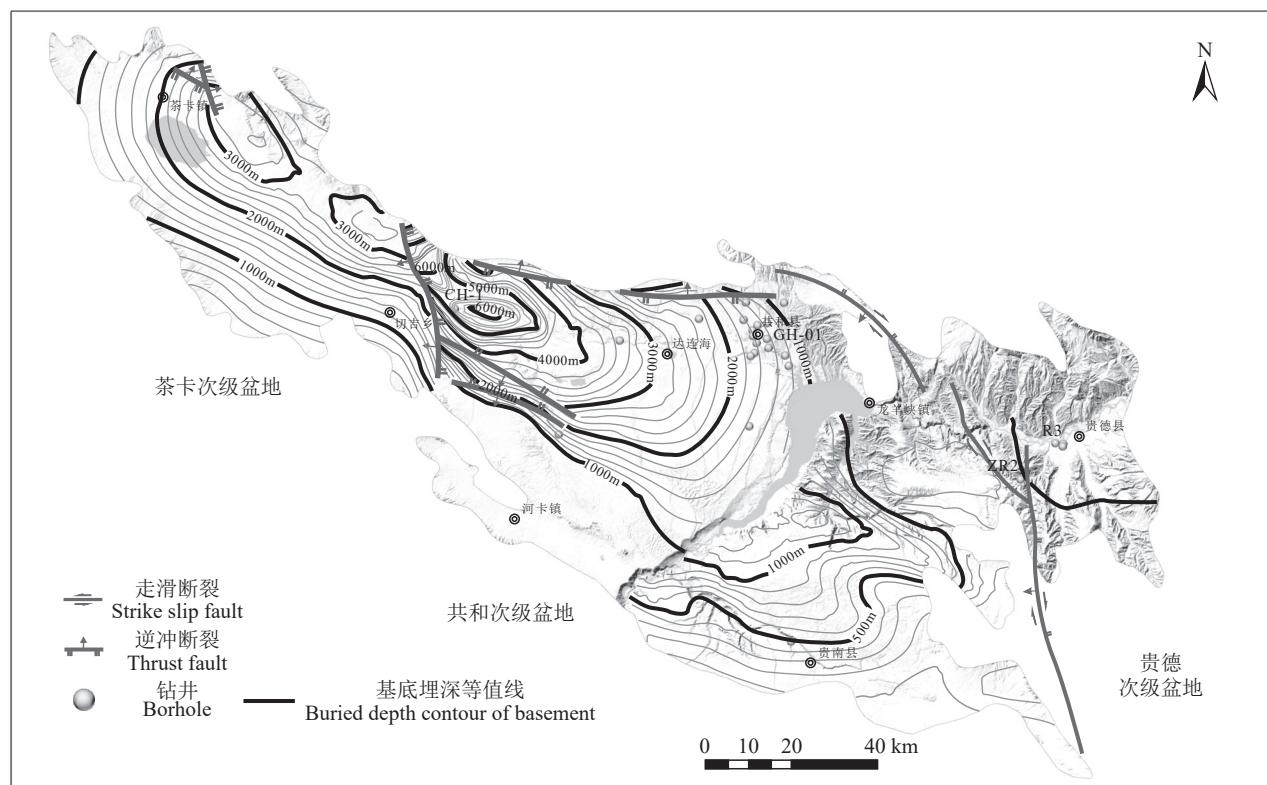


图 2 共和盆地主要断裂构造及基底埋深等值线图(据中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 2023^①)
Fig.2 The buried depth contour of basement and the distribution of main faults in the Gonghe Basin^①

成了干热岩主要赋存岩体。共和印支期花岗岩体相对高硅、富钾, 呈现准铝质—弱过铝质 I 型花岗岩特征, 推测岩体为同碰撞—后碰撞构造背景下, 由下地壳基性岩为原岩部分熔融形成的(陈希节等, 2020)。

2.3 盆地基底形态

迄今为止, 在共和盆地及周缘开展了大量包括重磁、二维地震和电磁法等在内的地球物理勘探工作, 据此建立了盆地基底结构。勘探资料显示, 经多期的构造叠加, 共和次级盆地基底埋深呈西深、东浅的箕状特征, 最深处位于盆地中西部切吉乡大水桥断裂附近, 附近的共参 1 井 5026 m 未钻穿古近系(王昌桂和吕友生, 2004), 推测最大埋深超过 6000 m(图 2), 而东部龙羊峡地区盆地结晶基底已广泛出露至地表(图 1c)。相对于东西向, 共和次级盆地内部南北向地层起伏相对较弱。盆地边缘两侧受深大断裂控制, 两侧山体沿断裂推覆到盆地内, 最大垂直断距可达数千米, 由西向东逐渐减小(图 2)。茶卡次级盆地基底埋深由南向北逐渐加深, 最大超过 3000 m。龙羊峡以东的贵德和贵南地

区基底埋深相对较浅, 深度普遍小于 3000 m(唐显春等, 2020; 何碧竹等, 2023)。

2.4 盆地新生代演化过程

共和盆地是青藏高原北东缘内陆地区广泛发育的新生代沉积中心之一, 渐新世晚期—中新世早期沉积了上千米的湖相和冲积相沉积物。随着印度—欧亚持续俯冲碰撞, 青藏高原的不断向北东方向的增生和扩展, 大约 8 Ma B.P. 起始的构造变形结束了青藏高原东北缘盆地的沉积(张培震等, 2006), 一系列北西西向的逆冲断裂错断隆起, 导致了沉积盆地的消亡和山脉的隆起, 形成现今盆岭地貌格局。

新构造运动、地形地貌学等研究认为青藏高原东北缘是最近青藏高原最主要的隆升区域(Fang et al., 2005; Wu et al., 2024)。共和盆地新近纪以来构造活动主要表现为强烈的垂向隆升。古近纪早期, 盆地抬升遭受剥蚀, 在基底上部形成一层数十米不等的风化壳。古近纪末, 周缘受山前深大断裂的控制, 盆地发生断陷, 山体急剧隆升(Craddock et al., 2014), 盆地内沉积了巨厚新生代河湖相沉积, 由老

至新依次为古近纪—新近纪西宁组、临夏组和咸水河组及第四纪沉积地层。磁性地层学结果显示,茶卡次级盆地沉积序列的年龄在 20 Ma 左右 (Craddock, 2011), 古生物显示共和次级盆地西部在渐新世就已经有了沉积(王昌桂和吕友生, 2004)。至新近纪末, 由于长期的剥蚀, 周缘山地与湖盆高差大为缩减(徐叔鹰等, 1984)。上新世末, 构造活动使盆地周缘山脉进一步上升, 造成盆地边缘新近纪地层发生褶皱并与共和组形成不整合接触, 古黄河切穿河卡山进入共和盆地, 经由东北端的瓦里关山流向贵德盆地。中更新世晚期以来, 盆地进入到以强烈上升为主的构造运动时期, 强烈的抬升造成黄河急剧下切。黄河龙羊峡沿岸河流阶地恢复显示, 更新世以来共和盆地经历了震荡式的抬升剥蚀过程, 且上升速率具有不断加快的趋势, 2.47 Ma 至今平均隆升速率在 0.26 mm/a (Jia et al., 2017), 隆升幅度可达 500~700 m。在盆地抬升期间, 河湖相地层遭受剥蚀, 形成多级夷平面, 造成了共和盆地现有的层状地貌特征。

3 共和盆地温度场分布规律

3.1 盆地地表地热显示

共和盆地周缘断裂带切割较深, 新构造运动强烈, 沿断裂岩浆岩体侵入, 并出露大量高温温泉(图 1b)。沿哇洪山—温泉断裂带由北向南东, 依次出露乌兰县巴硬格里温泉群、兴海县青天河上游桑持温泉群和兴海县温泉镇温泉群, 温泉水温由北向南东有增高的趋势; 沿新街—瓦里关由南东向北西依次出露新街温泉群、贵德热水泉温泉群和曲

乃亥温泉群, 温泉水温由南东向北西递增。沿多禾茂断裂出露有同仁县曲库温泉等。在共和盆地内部还有温泉零星出露, 均以低温为主, 如阿乙亥温泉等。

3.2 盆地钻井温度曲线

获取盆地现今温度场主要借助各种钻孔测温数据, 常见的数据包括钻孔系统连续测温、地层试油温度(DST)、孔底温度(BHT)和地层随压测试温度(MDT)。其中钻井连续测温尤其是近稳态或准稳态连续测温, 多是在静井之后数天至数十天测井获取的温度, 由于井温基本恢复, 接近真正的地层温度, 可信度较高, 温度数据连续, 反映了盆地地温场的原始状态和类型, 因此钻井连续测温, 尤其是深度较大的钻井测温数据, 是构建盆地现今温度场的理想基础数据, 也是深部地热储层开发评价的必要条件。共和盆地至今实施了 20 余眼超过 1000 m 的地热和石油勘探井, 集中分布在共和恰卜恰和贵德等地区。本文收集现有钻井连续测温数据 12 眼, 地层随压测试温度 1 眼(表 1), 以初步揭示共和盆地现今的温度场分布特征。

钻井测温曲线显示共和盆地东西向温度场差异明显(图 3), 在共和次级盆地西部基底埋藏最深的切吉地区, 5000 m 深度温度低于 167℃, 平均地温梯度仅为约 30.8℃/km。东部基底埋深较浅的恰卜恰地区, 平均 3350 m 深度温度即可达到 180℃, 在南北向上, 北部靠近山前断裂带, 地温梯度相对较高, 沉积盖层地温梯度最高可达 81℃/km, 花岗岩结晶基底地温梯度在 39~45.2℃/km(Zhang et al., 2021)。进入到贵德次级盆地, 深层同等埋深较共

表 1 共和盆地主要钻井信息
Table 1 Drilling information in the Gonghe Basin

孔号	经纬度		成井时间/年	孔深/m	基底埋深/m	井底温度/℃	测温类型
	东经	北纬					
DR1	100°36'45"	36°14'31"	2011	1453.58	1354	88	连续测温
DR2	100°36'08"	36°14'08"	2012	1852.38	1440.9	99	连续测温
DR3	100°37'06"	36°15'48"	2014	2927.26	1340.25	181	连续测温
DR4	100°37'15"	36°18'02"	2015	3102	1402	182	连续测温
DR11	100°29'15"	36°18'45"	2021	2356	2220	131	连续测温
GH-01	100°38'44"	36°16'17"	2019	4002.88	1360	209	连续测温
GR1	100°38'55"	36°15'09"	2017	3705	1350	180/3325	连续测温
GR2	100°41'30"	36°14'09"	2017	3003	940	186	连续测温
GC1	99°50'11"	36°20'32"	1995	5026	-	167	地层随压测试温度
R2	101°24'32"	36°2'14"	2010	1709.56	1490.55	97	连续测温
R3	101°23'18"	36°2'23"	2012	2701.2	1400	104	连续测温
ZR1	101°18'06"	36°58'05"	2014	3050.68	12	151	连续测温
ZR2	101°17'41"	35°57'54"	2017	4700	550	205	连续测温

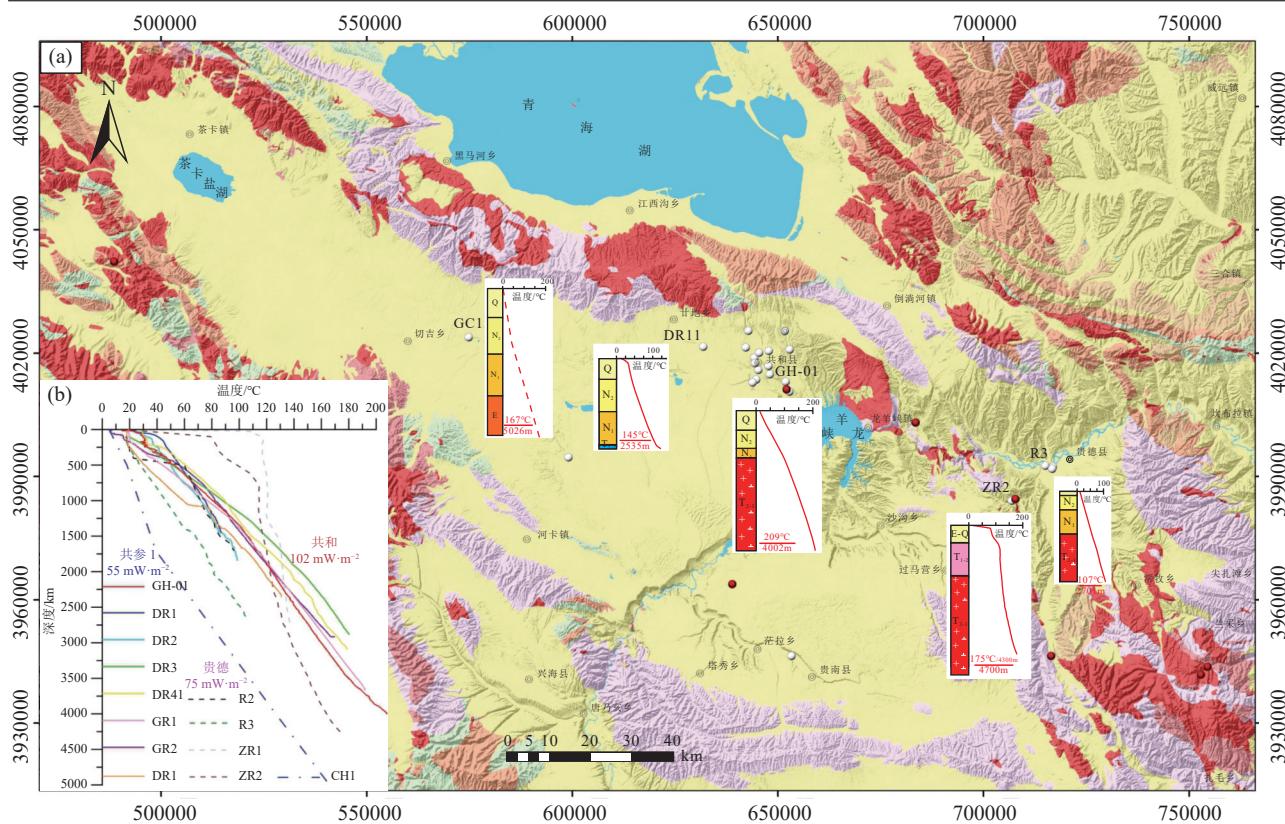


图 3 共和盆地钻井温度曲线(钻井位置分布见图 1)

Fig.3 Drilling temperature curve in the Gonghe Basin (the distribution of drilling locations is shown in Fig.1)

和次级盆地偏低, 3000 m 井深温度仍未超 150℃。

共和地区钻井测温多呈典型传导型特征(图 3, 图 4a、b)。贵德次级盆地已有地热钻井由于多分布在断裂边缘(张森琦等, 2020a), 在不同层段揭示了多组中—高温水热型热储层。如在贵德扎仓地区先后施工的 ZR1 和 ZR2 井, 受到断裂带影响, 岩体中裂隙较为发育, 水循环作用明显, 钻井测温曲线显示出显著的对流传热特征, 在浅部温度迅速上升(ZR1 井 20 m 温度达到 102℃。ZR2 井 610 m 温度达到 107℃), 形成高温异常, 体现了断裂构造在贵德地区的控热与导热作用。之后地温梯度与共和次级盆地逐渐一致(图 4c~d)。

3.3 盆地大地热流特征

大地热流是地球内热在地表的一个综合反映, 相对其他参数更能反映一个地区的地温场特征(Davies and Davies, 2010), 为地温梯度和相对应深度的岩石热导率的乘积。

$$q = -k \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

式中, z 为垂直深度(m), T 为温度(℃), q 为热流率($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$), k 为热导率($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$), $\frac{dT}{dz}$ 为地温梯度(℃/m)。

基于共和次级盆地西部共参 1 井随钻测温数据计算地温梯度, 结合邻区钻井岩心热导率数据, 计算获得盆地沉积中心切吉凹陷地区大地热流在 54.7 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 2), 略高于典型克拉通平均热流值(Davies, 2013), 并未表现出明显的温度异常。盆地东北部隆起区数眼地热深井连续测温数据和实测岩心热导率数据计算显示, 平均大地热流在 102 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (张超等, 2018), 远高于世界平均值, 是典型克拉通盆地的 2~3 倍。西部贵德次级盆地测井数据显示大地热流在 79.5 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (郎旭娟等, 2016), 与周缘造山带热流值相近(沈显杰等, 1989; 徐明等, 2011; He and Zhang, 2018; Jiang et al., 2019)。由此可见, 共和盆地东西向具有明显的地温场差异。

3.4 盆地二维地温场特征

盆地现今温度场是古温度场演化的最后一幕, 受到岩石圈深部热动力过程和浅部构造演化等多

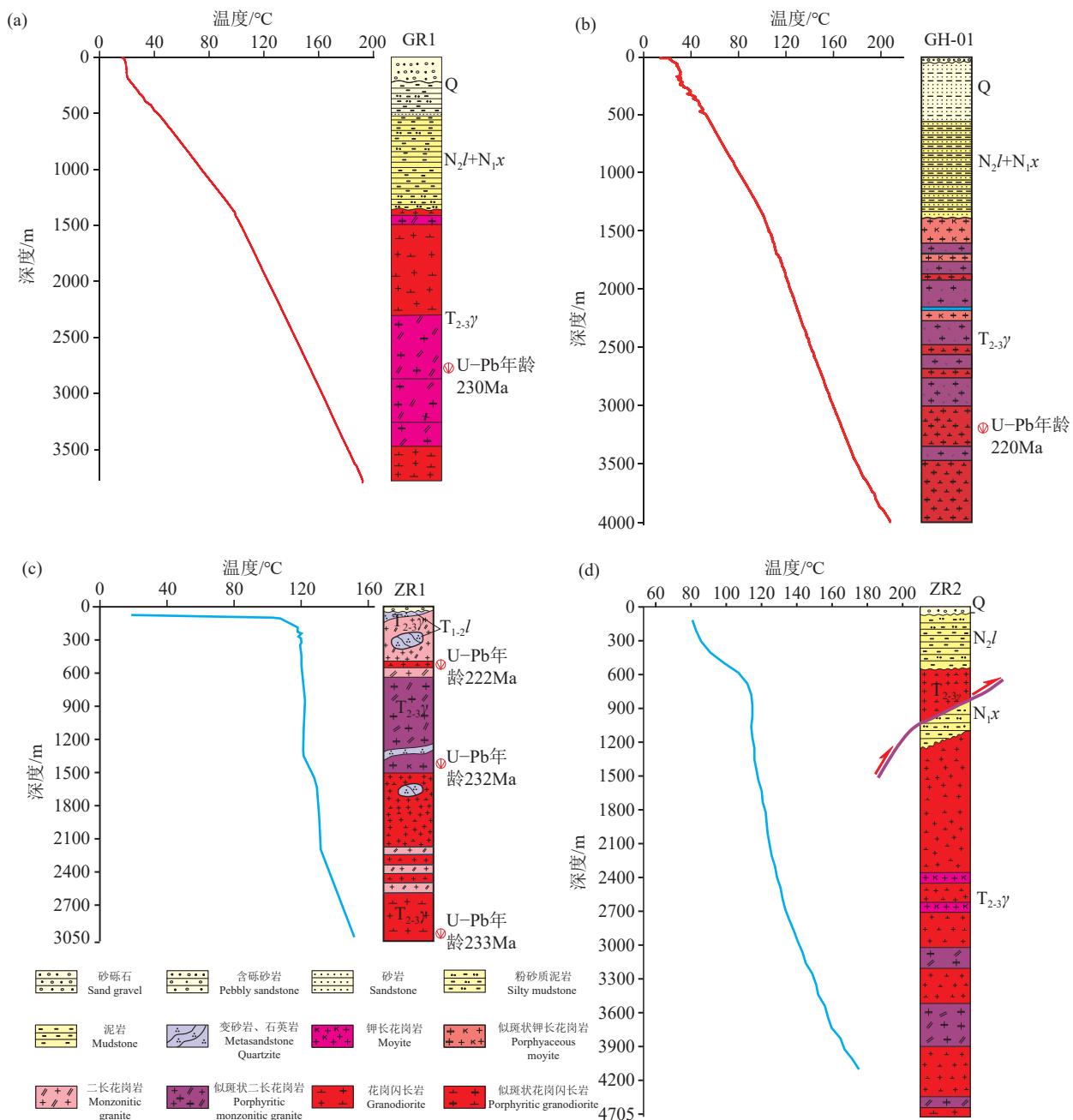


图 4 共和—贵德地区已有钻井地层结构及测温曲线

Q—第四系; N_2l —新近系中—上新统临夏组; N_x —新近系中新统咸水河组; $T_{1-2}l$ —下—中三叠统隆务河组; $T_{2-3}y$ —中—晚三叠世花岗岩

Fig.4 Existing drilling formation structure and temperature measurement curve in the Gonghe-Guide area

Q—Quaternary; N_2l —Middle to Upper Pliocene Linxia Formation (Neogene); N_x —Middle Miocene Xianshuihe Formation (Neogene); $T_{1-2}l$ —Lower to Middle Triassic Longwuhe Formation; $T_{2-3}y$ —Middle to Late Triassic Granite

重作用过程的综合控制, 温度场分布规律是探究干热岩资源成藏模式的重要内容。本文基于获取的盆地地层结构和钻井测温数据, 对盆地深部温度场进行拟合计算, 获得了盆地在二维空间上的温度剖面, 弥补了共和盆地二维温度场研究上的不足。模

拟采用二维稳态热传导方程, 表述为:

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + A(x, z) = 0 \quad (2)$$

K 为热导率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$), T 为温度 ($^\circ\text{C}$), A 为热源 (放射性生热, $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), x 为横向距离 (km), z 为垂向深度 (km), 采用的热物性参数如表 3。

表 2 共和盆地不同区域钻井大地热流值

Table 2 Thermal current values of drilling in different areas of the Gonghe Basin

钻井编号	地温梯度/(°C/100 m)	热导率/(W·m⁻¹·K⁻¹)	大地热流	数据来源	数据质量
GC1	34.4	1.59	54.7	本文	C
GH-01	40.5	2.51	101.6	本文	A
ZR1	2.91	2.93	79.5	郎旭娟等, 2016	B

注: GC1采用地层随压测试温度计算地温梯度, 采用邻区地层热导率计算大地热流值, 因此归为C类数据; GH-01井大地热流基于为完井1个月后准稳态测温, 及钻井岩心热导率数据, 因此归为A类。分类依据参考汪集旸和黄少鹏, 1990。

表 3 模型热物性参数及取值

Table 3 Model thermal property parameters and values

地质体结构	热导率/(W·m⁻¹·K⁻¹)	生热率/(μW·m⁻³)
沉积盖层	1.59	1.67
结晶基底	2.51	3.20

注: 热导率和生热率据 Zhang et al., 2020, 模型上边界地形起伏数据来自30 m高程DEM数据。

模型长为 125 km, 模型底界为 -10 km(图 5), 边界条件为:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(x, z_0) = T_0(x) \\ \frac{\partial T}{\partial x}(x_1, z) = \frac{\partial T}{\partial x}(x_2, z) = 0 \\ -k(x, z_m) \frac{\partial T}{\partial z}(x, z_m) = Q_m(x) \end{array} \right. \quad (3)$$

式中: z_0 模型表面, z_m 模型底部, x_1 模型左边界, x_2 模型右边界, T_0 表面温度, Q_m 底部热流。

模型左右为绝热边界条件, 上边界为恒温边界条件(取温度值 15°C), 底部为热流边界条件(Q_m)。模拟过程中, 通过不断调整迭代底部热流(Q_m)以拟合地表钻井温度, 最终获得盆地二维温度场(图 5)。

模拟结果如图 5 所示, 共和盆地温度场变化与基底埋深整体形体特征相吻合, 同等深度的温度场

在东部隆起区高, 西部凹陷区低, 体现了基底起伏形态对现今温度场的影响作用。由二维温度剖面看出, 150°C 等温线埋深在 4400~2270 m, 180°C 等温线埋深在 3000~5760 m, 同等深度温度场最高值出现在盆地东北部新街—瓦里关隆起西缘的达连海—共和地区。

4 共和盆地干热岩资源量评价

共和盆地基底主要由浅变质岩和花岗岩体构成, 均可作为干热岩热储进行开发利用。本文采用热储法, 重点对共和盆地 5 km 以浅、温度超过 180°C 的干热岩热储所蕴含的资源潜力进行初步评估, 计算公式为:

$$Q = \rho C_p V (T - T_c) \quad (4)$$

Q 热储中储存的热量(J); ρ 热储密度(kg·m⁻³); C_p 热储比热容(J·(kg·K)⁻¹); V 热储体积(m³); T 热储温度(°C); T_c 可利用温度下限(取 90°C 作为参考温度)。

根据钻井岩心和野外露头实测数据, 岩体平均密度取值为 2700×10^3 kg·m⁻³, 比热容满足式 5。

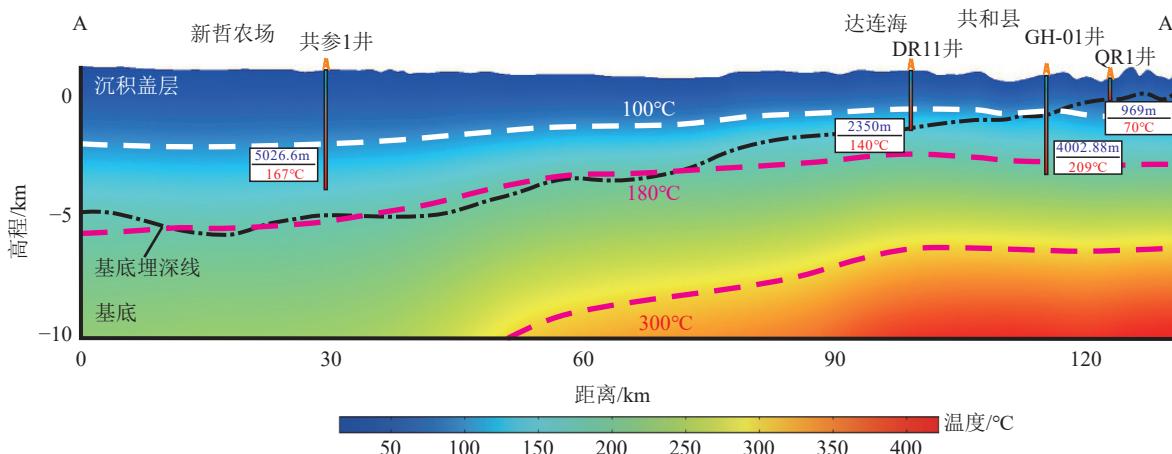


图 5 共和盆地二维温度剖面
Fig.5 2D temperature profile of the Gonghe Basin

$$C_p = 0.0614 \ln T + 0.8536 \quad (5)$$

在计算过程中,首先基于共和盆地二维地震、电磁法和钻井等资料建立三维地热地质模型,将模型插值剖分成 1 km 的若干栅格,分别进行计算后再进行求和,最终获得盆地的干热岩资源量。经计算,共和盆地 5 km 以浅干热岩热储理论体积约为 $6.70 \times 10^{12} \text{ m}^3$,估算资源量约为 $2.48 \times 10^{21} \text{ J}$,折合标准煤约为 $8.45 \times 10^{10} \text{ t}$ 。上述计算为共和盆地干热岩理论资源储量,实际上受制于实际开发过程中干热岩储层建造规模、裂隙网络复杂程度及取换热工艺等,可采资源量要显著低于理论计算值(Zhang et al., 2022)。

5 共和盆地干热岩成因机制讨论

全球现有干热岩相关试验场地多集中在板块边缘和新生代裂谷区域(Lu, 2018; Kong et al., 2021; 汪集暘等, 2023)。深部地幔高热流供给以及新生代地质时期显著的构造、岩浆活动是该类干热岩形成的主要因素(Genter et al., 2003; Benato, 2016; Garcia, 2016)。然而共和盆地处于板块内部,远离东部沿海环太平洋和西南喜马拉雅高温地热带,盆地地壳厚度大(Xu et al., 2014; Jia et al., 2019),深部活动相对微弱(Zhao et al., 2020),成因机制与上述明显不同。目前,对于共和盆地高温地热成因机制,提出了地幔热、部分熔融供热、花岗岩放射性生热

等认识(张超等, 2018, 2020; 张森琦等, 2018, 2020b, 2021; 陈希节等, 2020; 唐显春等, 2020, 2023; Tang et al., 2022; 蔺文静等, 2022, 2023; 何碧竹等, 2023)。本文针对以上不同方面,结合盆地现今温度场分布特征,探讨分析共和盆地干热岩成藏要素。

5.1 干热岩热源机制

5.1.1 地幔供热

严维德等(2013)基于宽频地震探测认为共和盆地上地幔存在有低速带,并与巴颜喀拉地块地幔热柱相关联,该低速带的存在导致共和盆地及其周边一带形成高温异常区。Feng et al.(2018)基于地震波低速异常推测共和高温异常可能与地幔热柱相关。然而,盆地温泉 $^{3/4}\text{He}$ 比值在 0.04~0.08 Ra,反映热源主要源自地壳,不存在异常地幔热源叠加(李林果和李百祥, 2017; 唐显春等, 2020)。岩石圈热结构研究显示,共和地区地幔热贡献仅占大地热流值的 26% 左右(张超等, 2020; 蔺文静等, 2023),并不是主导因素。此外,重力和航磁等地球物理显示,共和深部(>30 km)并不存在显著异常,来自深部的热可能不占据主导地位(Zhao et al., 2020)。

5.1.2 部分熔融供热

青藏高原普遍存在低速高导层(LV-HCZs),被认为是深部存在部分熔融(Wang et al., 2015)。玛多—共和—雅布赖测线反演结果(图 6a)显示共和盆地区域在地面以下 5~20 km 深度 P 波速存在低

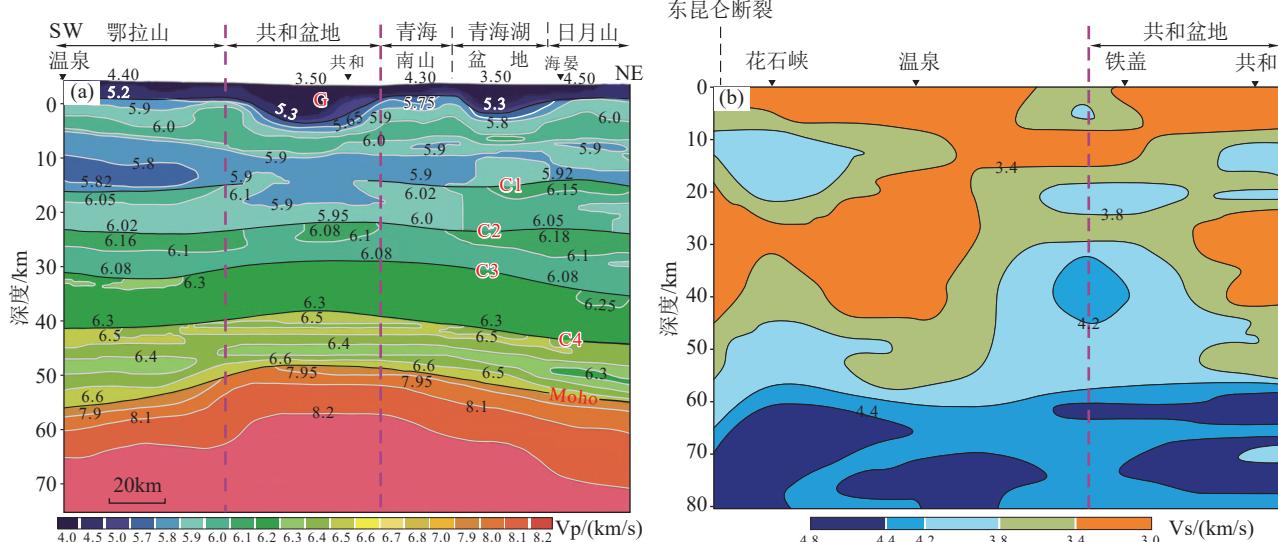


图 6 共和盆地地震波速度结构(据 Jia et al., 2019; 钱辉等, 2001 修改)

Fig.6 Seismic wave velocity structure in the Gonghe Basin (modified from Jia et al., 2019; Qian Hui et al., 2001)

速异常，并影响盆地内部中、上地壳之间的界限出现明显的缺失(Jia et al., 2019)。钱辉等(2001)利用青海共和—玉树测线数据，采用接收函数方法反演了共和—玉树测线的 S 波速度结构，结果(图 6b)显示共和盆地(36.3° N, 100.6° E, 199 台)在 23~41 km 深度有一低速体。

大地电磁数据揭示，在共和盆地中—上地壳存在多个囊状低阻高导异常体，视电阻率小于 10 $\Omega \cdot m$ ，深度在 10~25 km(图 7, C1、C2、C3)，可能是部分熔融导致，对地表热流的热贡献大致为 30 $mW \cdot m^{-2}$ (Gao et al., 2018; Zhao et al., 2020; Gao et al., 2020; 张森琦等, 2021; 唐显春等, 2023)。

另外，Pan et al.(2021)基于水化学研究认为，高 D、¹⁸O、Cl 以及微量元素值指示共和盆地内地热水及其高温母源地热流体可能受到了岩浆流体的补给；Zhang et al.(2018)基于地温场计算发现共和盆地中—上地壳深度范围内温度达到了湿花岗岩部分熔融的温度，认为该深度范围内的低速高导体，可能与部分熔融有关，是盆地干热岩的重要热量来源。目前，壳内部分熔融为共和干热岩形成提供了额外的热源这一认识逐步得到学者的认可。但值得一提的是，岩浆(部分熔融)本身不是热量的本质来源，其热能来源于深部供热增加、高放射性生热、构造活动等其他方式。对于共和盆地壳内部分熔融的成因解释，Pan et al.(2021)、张森琦等(2021)、蔺文静等(2023)认为中下地壳滑脱面发生韧性剪切滑动，为地壳提供了额外热量，致使在中、上地壳尺度产生了部分熔融。

5.1.3 放射性生热

地质体的放射性生热是盆地大地热流主要来

源之一，放射性生热元素在岩石圈中丰度和分布对于岩石圈的温度场分布具有重要的影响(Brown and Rushmer, 2008)。一般认为花岗岩富含铀系元素的矿物，放射性生热能产生并聚集大量的热量，在合适的条件下可能会形成较高的地热异常。澳大利亚库珀盆地具有较高的放射性生热率(Siégel et al., 2012)，侵位于石炭纪—二叠纪的 Big Lake Suite 岩体生热率在 7~9.7 $\mu W/m^3$ ，被认为是该地区形成干热岩的主要因素(Ayling et al., 2016)。

共和盆地沉积盖层平均生热率接近邻区沉积层生热率大小(邱楠生, 2002)，没有提供额外的热供给。虽然已有放射性生热数据显示，共和花岗岩体并没有异常高的放射性生热率(张超等, 2020; Weinert et al., 2021)，仅略高于全球均值(Artemieva et al., 2017; 张超等, 2020)。然而近期地热探孔钻井岩心分析显示，花岗岩体内存在多处高放射性段，生热率达 7 $\mu W \cdot m^{-3}$ 以上(何碧竹等, 2023；雷玉德等, 2023)，接近 Copper 盆地干热岩试验场地花岗岩放射性大小。并且共和盆地花岗岩体分布广泛，在恰卜恰地区，花岗岩体延深至少可达 10 km(张森琦等, 2018)，加上东北缘增厚的地壳厚度(Jia et al., 2019)，放射生热对盆地干热岩形成热贡献占比达 30%~40%(张超等, 2020)。据模拟计算，共和恰卜恰地区花岗岩体的存在可使得 4000 m 深度增温幅度在 39~70°C(Zhang et al., 2024)，可见放射性生热对盆地整体大地热流及盆地高温热异常形成的贡献作用明显。

5.2 高温地热成藏控热因素

5.2.1 差异性抬升剥蚀对盆地温度场的影响作用

热年代学和实验模拟研究均显示，构造隆升是

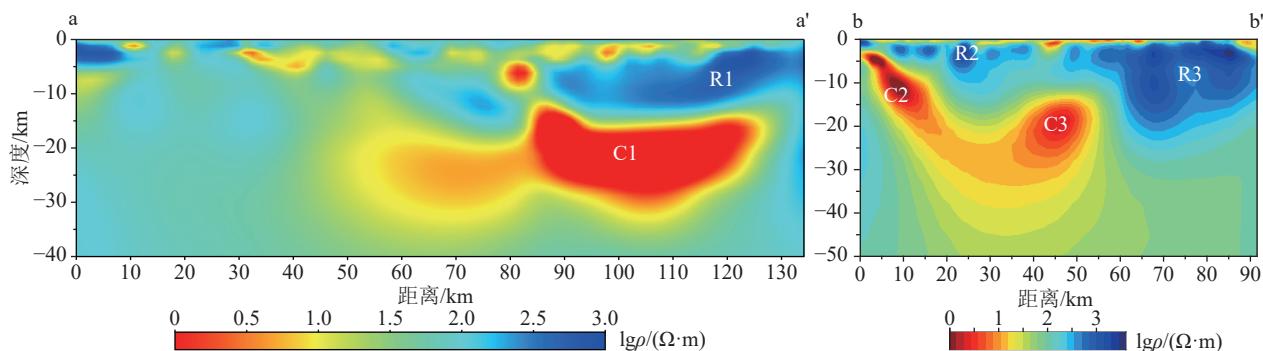


图 7 共和盆地大地电磁测深测线电阻率剖面图(位置见图 1c)
Fig.7 Resistivity profile of magnetotelluric sounding line in the Gonghe Basin (see Fig. 1c for location)

将深部热快速带至地表的一种有效方式,能迅速提高地壳浅层温度场(Woodhouse and Birch, 1980; England and Thompson, 1984)。青藏高原东北缘沉积盆地分别在 8 Ma、3.6 Ma、2.6 Ma、1.8~1.7 Ma、1.2~0.6 Ma 和 0.15 Ma 普遍发生了快速的阶段性抬升剥蚀过程(Callonc et al., 2014)。垂向速率场显示共和盆地周缘地区正在持续隆升(Wu et al., 2024)。钻井岩心角闪石的电子探针显示,共和盆地干热岩体中的角闪石均属于中低压类角闪石(1.91~3.52 kPa),中低温(681~693℃),推算其岩体侵位深度在 7.2~13.2 km(袁晓瑞等, 2020)。现今花岗岩体已广泛出露至地表,测井和录井数据显示花岗岩顶界面发育数十米的风化壳,表明共和盆地深部地质体曾发生了向地表快速抬升过程,至少有千米量级的上覆盖层被剥露去顶。共和盆地东西向基底埋深差异最大可达 6000 余米,说明盆地东西向显著的沉降-抬升剥蚀过程。盆地东部瓦里关地区基岩已剥露到地表,剥蚀速率则可能达到了 0.5 mm/a(张会平和刘少峰, 2009)。此外,盆地内还发育有三级湖相阶地和二十余级黄河阶地,ESR 测年显示,盆地中更新世末至今经历了差异性快速抬升剥蚀过程(孙延贵等, 2007),龙羊峡地区 2.47 Ma 以来抬升量达到了 647 m,平均抬升速率为 0.26 mm/a,并且抬升速率有不断增大的趋势,0.41 Ma 至今抬升速率达到 0.35 mm/a(吴环环等, 2019)。快速隆升剥蚀,引起岩石冷却滞后,等温面抬升,产生等温降压过程,可以形成地表温度异常(Allen and Allen, 2013)。另一方面,盆地同等深度的温度场变化与盆地基底埋深由西向东的整体形体特征相吻合(图 6),高温异常出现在盆地东北部抬升剥蚀强烈的新街—瓦里关隆起带周缘,体现了差异性的抬升剥蚀可能是造成共和盆地东西向温度场不同的重要因素之一。

5.2.2 沉积盖层保温对盆地温度场的影响

低热导率的沉积盖层被认为是高温地热资源成因的重要因素之一,如 Cooper 盆地干热岩(Beardmore, 2004)。共和盆地沉积盖层以新近纪河湖相沉积为主,岩性为泥岩、粉砂质泥岩、砂岩等,平均热导率在 $1.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,是花岗岩基底的 0.67 倍(Zhang et al., 2018),为良好的保温层。盆地

适宜厚度的沉积盖层使热量在基底积聚,形成高温异常。据计算,共和恰卜恰地区,1360 m 沉积盖层的存在可使得 4000 m 深度增温幅度约 20~30℃(待发表),虽然低热导率沉积盖层对干热岩热源没有直接贡献,但是对形成盆地高温异常具有重要原因。

5.2.3 断裂构造对地热资源形成的影响

由钻井数据可知,共和盆地温度场分布和测温曲线类型在平面上差异明显,不仅表现在东西向区域方面,还表现在受断裂控制方面。共和盆周缘青海南山南缘断裂、温泉—哇洪山断裂、贵南南山断裂、新街—瓦里关断裂、多禾茂断裂等断裂切割深度较大,且晚中新世—上新世以来普遍发生了活化,作为通道可以以流体为介质,通过深循环作用将深部热带到浅部,形成带状热异常区。如沿北北西和近东西断裂交汇处多出露高温温泉(图 1a),且已有钻探(如 ZR1)也显示了断裂段对高温地热形成重要影响(图 4c、d)。

5.3 共和盆地高温地热成藏模式

综上,笔者初步认为共和盆地干热岩成藏模式为:深部部分熔融持续供热,放射性花岗岩体增温导热,新构造抬升剥蚀释热控热,沉积盖层保温聚热多种因素的影响,共同导致了盆地东西向差异明显的温度场,和东北部隆起剥蚀区干热岩体的形成与就位。此外,盆地周缘的深大断裂沟通热储,形成局部对流型热循环通道,导致在周缘出现沿断裂分布的温泉群等地热异常。该模式可能也适用于青藏高原周缘新生代构造活跃型沉积盆地深层高温成藏(图 8)。

6 结 论

(1) 共和盆地东西向温度场存在显著差异,150℃ 等温线埋深在 4400~2270 m,180℃ 等温线埋深在 3000~5760 m,同等深度的温度场变化与盆地基底埋深由西向东的整体形体特征相似,暗示差异性抬升剥蚀可能对盆地温度场的具有重要的影响作用。

(2) 共和盆地地热资源丰富,5 km 以浅干热岩资源量估算为 $2.48 \times 10^{21} \text{ J}$,盆地东北部具有较好的地热地质条件及资源潜力,是干热岩勘探的有

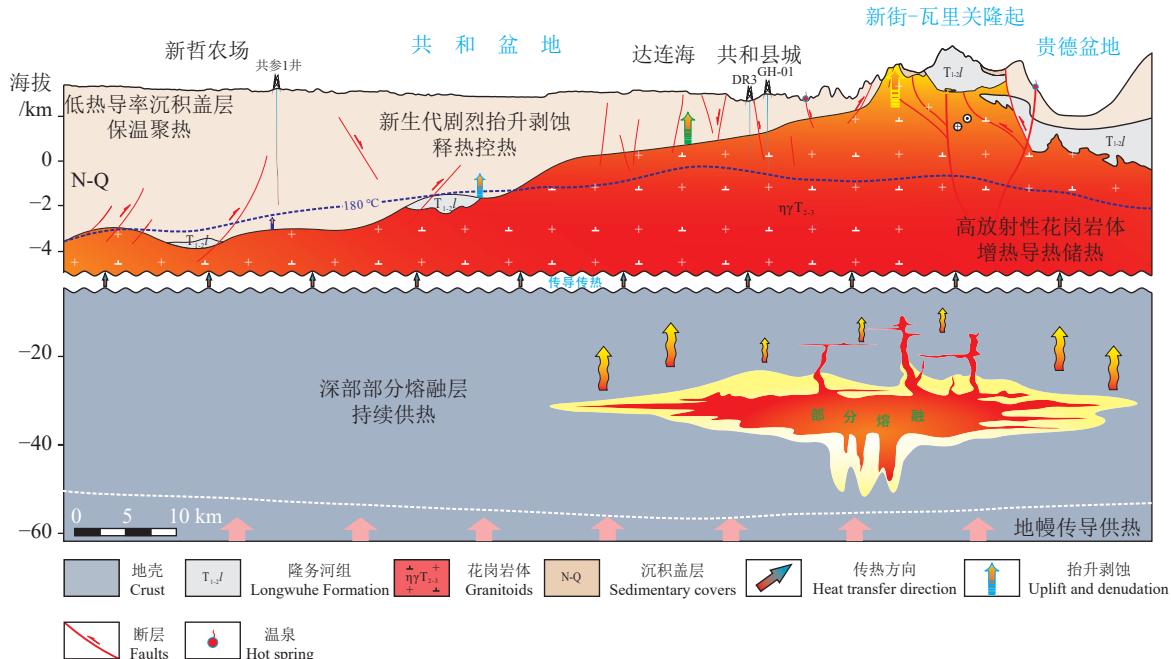


图 8 青海共和盆地干热岩成藏模式图
Fig.8 Genetic model of hot dry rock in the Gonghe Basin, Qinghai Province

利区。

(3) 综合前人研究认为,部分熔融持续放热(约30%)、花岗岩体放射性生热(30%~40%)是共和盆地干热岩体形成主要热量来源,而新构造抬升剥蚀释热控热、沉积盖层保温聚热是形成共和盆地干热岩现今赋存特征的主要影响因素。多种因素综合影响下,共同控制了共和盆地现今干热岩形成与就位。

注释

①中国地质调查局水文地质环境地质调查中心. 2023. 青海共和盆地干热岩调查评价与勘查示范成果报告 [R].

References

- Aghahosseini A, Breyer C. 2020. From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential[J]. *Applied Energy*, 279: 115769.
- Allen P A, Allen J R. 2013. Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment[M]. UK: John Wiley & Sons, 479–480.
- Artemieva I M, Thybo H, Jakobsen K, Sørensen N K, Nielsen L S K. 2017. Heat production in granitic rocks: Global analysis based on a new data compilation GRANITE 2017[J]. *Earth-Science Reviews*, 172: 1–26.
- Axelsson G. 2024. Chapter 20—The Future of Geothermal Energy, in:
- Living With Climate Change[M]. Netherlands: Elsevier, 397–422.
- Ayling B F, Hogarth R A, Rose P E. 2016. Tracer testing at the Habanero EGS site, central Australia[J]. *Geothermics*, 63: 15–26.
- Beardmore G. 2004. The influence of basement on surface heat flow in the Cooper Basin[J]. *Exploration Geophysics*, 35(4): 223–235.
- Benato S. 2016. Conceptual model and numerical analysis of the Desert Peak EGS project: Reservoir response to the shallow medium flow-rate hydraulic stimulation phase[J]. *Geothermics*, 63: 139–156.
- Bertani R. 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report[J]. *Geothermics*, 60: 31–43.
- Breede K, Dzebisashvili K, Liu X, Falcone G. 2013. Systematic review of enhanced (or engineered) geothermal systems: Past, present and future[J]. *Geothermal Energy*, 1(1): 4.
- Brown M, Rushmer T. 2008. Evolution and Differentiation of the Continental Crust[M]. New York: Cambridge University Press.
- Callonnet L L, Renard M, Rafélis M D, Minoli F, Beltran C, Chêne R J D. 2014. Evolution of the trace element contents (Sr and Mn) of hemipelagic carbonates from the Zumaia Paleocene section (Gipuzkoa, Spain): Implications for the knowledge of seawater chemistry during the Selianian[J]. *Bulletin De La Societe Geologique De France*, 185(6): 413–435.
- Chen Xijie, Yun Xiaorui, Lei Min, Cai Zhihui, Zhang Shengsheng, Liu Ruohan, Li Yibing, He Bizhu. 2020. Petrogenesis of Middle Triassic granite association in the Gonghe basin, Qinghai: Constraints from geochemistry, U-Pb ages and Hf isotopic[J]. *Acta Petrologica Sinica* 36(10): 3152–3170 (in Chinese with English abstract).

- Craddock W H. 2011. Structural and Geomorphic Evolution of the Gonghe Basin Complex, Northeastern Tibet: Implications for the Timing of Plateau Growth[D]. State College: Pennsylvania State University.
- Craddock W H, Kirby E, Zhang H, Clark M K, Champagnac J D, Yuan D. 2014. Rates and style of Cenozoic deformation around the Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Geosphere*, 10(6): 1255–1282.
- Davies J H, Davies D R. 2010. Earth's surface heat flux[J]. *Solid Earth*, 1(1): 5–24.
- Davies J H. 2013. Global map of solid Earth surface heat flow[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10): 4608–4622.
- England P C, Thompson A B. 1984. Pressure–temperature–time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust[J]. *Journal of Petrology*, 25: 894–928.
- Fang X, Yan M, Voo R V D, Rea D K, Song C, Parés J M, Gao J, Nie J, Shuang D. 2005. Late Cenozoic deformation and uplift of the NE Tibetan Plateau: Evidence from high-resolution magnetostratigraphy of the Guide Basin, Qinghai Province, China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9/10): 1208–1225.
- Feng Y F, Zhang X X, Zhang B, Liu J T, Wang Y G, Jia D L, Hao L R, Kong Z Y. 2018. The geothermal formation mechanism in the Gonghe Basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. *China Geology*, 1(3): 331–345.
- Gao J, Zhang H J, Zhang H P, Zhang S Q, Cheng Z P. 2020. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the SE Gonghe Basin: Implication for the orogenic uplift in the northeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Tectonophysics*, 789: 228525.
- Gao J, Zhang H J, Zhang S Q, Chen X B, Cheng Z P, Jia X F, Li S T, Fu L, Gao L, Xin H L. 2018. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the geothermal system beneath the Gonghe Basin, northeast Tibetan Plateau[J]. *Geothermics*, 76: 15–25.
- Garcia J. 2016. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California: Part 1: Characterization and reservoir response to injection[J]. *Geothermics*, 63: 97–119.
- Genter A, Guillou-Frottier L, Feybesse J L, Nicol N, Dezayes C, Schwartz S. 2003. Typology of potential hot fractured rock resources in europe[J]. *Geothermics*, 32(4/6): 701–710.
- Guo Jing, Tang Fawei, Guan Hui, Zhao Haihua, Zhao Xiaoyun, Danzeng Guojie, Du Bingrui. 2023. Structure–thermal coupling model of the high temperature geothermal system in Rujiao on the Xizang Plateau[J]. *Geology in China*, 50(6): 1621–1631 (in Chinese with English abstract).
- He Buzhu, Zheng Menglin, Yun Xiaorui, Cai Zhihui, Jiao Cunli, Chen Xijie, Zheng Yong, Ma Xuxuan, Liu Ruohan, Chen Huiming, Zhang Shengsheng, Lei Min, Fu Guoqiang, Li Zhenyu. 2023. Structural architecture and energy resource potential of Gonghe Basin, NE Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 30(1): 81–105 (in Chinese with English abstract).
- He L J, Zhang L Y. 2018. Thermal evolution of cratons in China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 164(15): 237–247.
- Jia L Y, Hu D G, Wu H H, Zhao X T, Chang P Y, You B J, Zhang M, Wang C Q, Ye M N, Wu Z Q, Liang X Z. 2017. Yellow River terrace sequences of the Gonghe–Guide section in the northeastern Qinghai–Tibet: Implications for plateau uplift[J]. *Geomorphology*, 295: 323–336.
- Jia S X, Guo W B, Mooney W D, Wang F Y, Duan Y H, Zhao J M, Lin J Y, Liu Z. 2019. Crustal structure of the middle segment of the Qilian fold belt and the coupling mechanism of its associated basin and range system[J]. *Tectonophysics*, 770: 128154.
- Jiang F M, Chen J L, Huang W B, Luo L. 2014. A three-dimensional transient model for EGS subsurface thermo–hydraulic process[J]. *Energy*, 72: 300–310.
- Jiang G Z, Hu S B, Shi Y Z, Zhang C, Wang Z T, Hu D. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 753: 36–48.
- Kong Y L, Pan S, Ren Y Q, Zhang W Z, Wang K, Jiang G Z, Cheng Y Z, Sun W J, Zhang C, Hu S B, He L J. 2021. Catalog of enhanced geothermal systems based on heat sources[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 95(6): 1882–1891.
- Lang Xujuan, Liu Feng, Liu Zhiming, Lin Wenjing, Xing Linxiao, Wang Guiling. 2016. Terrestrial heat flow in Guide Basin, Qinghai[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 35(3): 227 (in Chinese with English abstract).
- Lei Yude, Yuan Youjing, Qin Guangxiong, Ba Ruishou, Zhao Zhen, Li Tongbang. 2023. Analysis of thermal storage characteristics of the Guide Zhacang geothermal field in Gonghe Basin based on logging data[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 145–157 (in Chinese with English abstract).
- Li Linguo, Li Baixiang. 2017. A discussion on the heat source mechanism and geothermal system of Gonghe–Guide basin and mountain geothermal field in Qinghai Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 41(1): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Gan Haonan, Zhao Zhen, Zhang Shengsheng. 2022. Lithospheric thermal–rheological structure and geothermal significance in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44: 45–56 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Guilin, Zhang Shengsheng, Zhao Zhen, Xing Linxiao, Gan Haonan. 2022. Heat source mechanism of hot dry rock in the Gonghe Basin on the northeastern Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geothermal Energy*, 3: 14–24 (in Chinese with English abstract).
- Lu S Y M. 2018. A global review of enhanced geothermal system (EGS)(Review)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81: 2902–2921.
- Olasolo P, Juárez M C, Morales M P, D'Amico S, Liarte I A. 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review[J]. *Renewable &*

- Sustainable Energy Reviews, 56: 133–144.
- Pan S , Kong Y L, Wang K, Ren Y Q, Pang Z H, Zhang C, Wen D G, Zhang L Y, Feng, Q D, Zhu G L, Wang J Y. 2021. Magmatic origin of geothermal fluids constrained by geochemical evidence: Implications for the heat source in the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hydrology*, 603: 126985.
- Pollack A, Horne R N, Mukerji T. 2020. What are the challenges in developing enhanced geothermal systems (EGS)? Observations from 64 EGS Sites[C]// Reykjavik, Iceland: Proceedings World Geothermal Congress 2020+1.
- Qian Hui, Jiang Mei, Xue Guangqi, Su Heping, Wittlinger G, Vergne J. 2001. Crustal structure of northeastern Tibet inferred from receiver function analysis[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 23(1): 103–108 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China[J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 196–206 (in Chinese with English abstract).
- Shen Xianjie, Zhang Wenren, Guan Hua, Jin Xu. 1989. The Yadong–Qaidam heat flow great section spanning the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 17: 1329–1329 (in Chinese with English abstract).
- Siégal C, Bryan S E, Purdy D, Allen C M, Schrank C, Uysal T, Gust D, Beardmore G. 2012. Evaluating the Role of Deep Granitic Rocks in Generating Anomalous Temperatures in South–west Queensland, in Geological Survey of Queensland: Digging Deeper 10 Seminar Extended Abstracts [Queensland Geological Record 2012/14][R]. Brisbane, Australia: Geological Survey of Queensland, Department of Natural Resource and Mines, 95–102.
- Sun Yangui, Fang Hongbin, Zhang Kun, Zhao Fuyue, Liu Shiyi. 2007. Step-like landform system of the Gonghe basin and the uplift of the Qinghai–Tibet Plateau and development of the Yellow River[J]. *Geology in China*, 34(6): 1141–1147 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yangui. 2004. Gonghe Aulacogen and Conjugate and Transfer Between the West Qinling and East Kunlun Orogens[D]. Xi'an: Northwest University (in Chinese with English abstract).
- Tang X C, Liu S S, Zhang D L, Wang G L, Luo Y F, Hu S B, Xu Q. 2022. Geothermal accumulation constrained by the tectonic transformation in the Gonghe Basin, Northeastern Tibetan Plateau[J]. *Lithosphere*, 2021 (Special 5): 3936881.
- Tang Xianchun, Wang Guiling, Ma Yan, Zhang Dailei, Liu Zhong, Zhao Xu, Cheng Tianjun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052–2065 (in Chinese with English abstract).
- Tang Xianchun, Wang Guiling, Zhang Dailei, Ma Yan. 2023. Coupling mechanism of geothermal accumulation and the cenozoic active tectonics evolution in Gonghe Basin, northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 7–20 (in Chinese with English abstract).
- Chinese with English abstract).
- Wang Changgui, Lü Yousheng. 2004. Gonghe Basin: A new and worth-researching Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 25(5): 471–473 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1990. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd Edition)[J]. *Seismology and Geology*, 12(4): 351–366 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Pang Zhonghe, Cheng Yuanzhi, Huang Yonghui, Jiang Guangzheng, Lu Zhenneng, Kong Yanlong. 2023. Current state, utilization and prospective of global geothermal energy[J]. *Science & Technology Review*, 41(12): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q, Hawkesworth C J, Wyman D, Chung S L, Wu F Y, Li X H, Li Z X, Gou G N, Zhang X Z, Tang G J, Dan W, Ma L, Dong Y H. 2015. Pliocene–Quaternary crustal melting in central and northern Tibet and insights into crustal flow[J]. *Nature Communications*, 7: 11888.
- Weinert S, Br K, Scheuvens D, Sass I. 2021. Radiogenic heat production of crystalline rocks in the Gonghe Basin Complex (northeastern Qinghai–Tibet plateau, China)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 80: 270.
- Woodhouse J H, Birch F. 1980. Comment on 'Erosion, uplift, exponential heat source distribution, and transient heat flux' by T. – C. Lee[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 85(B5): 2691–2693.
- Wu D L, Ge W P, Liu S Z, Yuan D Y, Zhang B, Wei C M. 2024. Present-day 3D crustal deformation of the northeastern Tibetan Plateau from space geodesy[J]. *Geophysical Research Letters*, 51(4): e2023GL106143.
- Wu Huanhuan, Wu Xuewen, Li Yue, Hu Daogong, Jia Liyun, Yan Jiandong, Wang Chaoqun, Xia Mengmeng. 2019. River terraces in the Gonghe–Guide section of the Yellow River: Implications for the late uplift of the northeastern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(12): 3239–3248 (in Chinese with English abstract).
- Xu Ming, Zhu Chuanning, Tian Yuntao, Rao Song, Hu Shengbiao. 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(4): 1052–1060 (in Chinese with English abstract).
- Xu Shuying, Xu Defu, Shi Shengren. 1984. Discussion on geomorphic development and environmental evolution of Gonghe Basin[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 20(1): 146–157 (in Chinese with English abstract).
- Xu T, Wu Z B, Zhang Z J, Tian X B, Deng Y F, Wu C L, Teng J W. 2014. Crustal structure across the Kunlun fault from passive source seismic profiling in East Tibet[J]. *Tectonophysics*, 627: 98–107.
- Yan Weide, Wang Yanxin, Gao Xuezhang, Zhang Shuheng, Ma Yuehua, Shang Xiaogang, Guo Shouyun. 2013. Distribution and aggregation mechanism of geothermal energy in Gonghe Basin[J]. *Northwestern Geology*, 46(4): 223–230 (in Chinese with English abstract).

- abstract).
- Yun Xiaorui, Chen Xijie, Cai Zhihui, He Bizhu, Zhang Shengsheng, Lei Min, Xiang Hua. 2020. Preliminary study on magmatic emplacement and crystallization conditions and deep structure of hot dry rock in the northeastern Gonghe basin, Qinghai Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 36(10): 3171–3191 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Hu S B, Zhang S S, Li S T, Zhang L Y, Kong Y L, Zuo Y H, Song R C, Jiang G Z, Wang Z T. 2020. Radiogenic heat production variations in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for the origin of high-temperature geothermal resources[J]. *Renewable Energy*, 148: 284–297.
- Zhang C, Huang R H, Qin S, Hu S B, Zhang S S, Li S T, Zhang L Y, Wang Z T. 2021. The high-temperature geothermal resources in the Gonghe–Guide area, northeast Tibetan Plateau: A comprehensive review[J]. *Geothermics*, 97: 102264.
- Zhang C, Jiang G Z, Shi Y Z, Wang Z T, Wang Y, Li S T, Jia X F, Hu S B. 2018. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure of the Gonghe–Guide area, northeastern Qinghai–Tibetan plateau[J]. *Geothermics*, 72: 182–192.
- Zhang Chao, Hu Shengbiao, Song Rongcai, Zuo Yinhui, Jiang Guangzheng, Lei Yude, Zhang Shengsheng, Wang Zhuting. 2020. Genesis of the hot dry rock geothermal resources in the Gonghe basin: Constraints from the radiogenic heat production rate of rocks[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(7): 2697–2709 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Jiang Guangzheng, Gao Peng, Wang Yibo, Hu Shengbiao. 2018. Geothermal characteristics of the Qiabuqia geothermal area in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4545–4557 (in Chinese with English abstract).
- Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, Yan W De, Wang W S, Ye C M, Li X F, Wang H, Tang X C, Weng W, Li K, Zhang C Y, Liang M X, Luo H B, Hu H Y, Zhang W, Zhang S Q, Jin X P, Wu H D, Zhang L Y, Feng Q D, Xie J Y, Wang D, He Y C, Wang Y W, Chen Z B, Cheng Z P, Luo W F, Yang Y, Zhang H, Zha E L, Gong Y L, Zheng Y, Jiang C S, Zhang S S, Niu X, Zhang H, Hu L S, Zhu G L, Xu W H, Niu Z X, Yang L. 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 5: 372–382.
- Zhang Huiping, Liu Shaofeng. 2009. Pleistocene deposition and subsequent erosion distribution around Xunhua–Guide Basin, North Eastern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 29(4): 806–815 (in Chinese with English abstract).
- Zhang L Y, Li X F, Zhang S S, Zhu G L, Xu W H, Feng Q D, Deng Z H. 2024. Deep-seated radiogenic heat production characteristics in the northeastern Gonghe basin (northeastern Qinghai–Tibet plateau) from deep borehole samples: Implications for the formation of hot dry rock resources[J]. *Geothermics*, 123: 103110.
- Zhang Peizhen, Zheng Dewen, Yin Gongming, Yuan Daoyang, Zhang Guangliang, Li Chuanyou, Wang Zhicai. 2006. Discussion on Late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Fu Lei, Zhang Yang, Song Jian, Wang Fuchun, Huang Jinhui, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Zhang Linyou, Feng Qingda. 2020b. Delineation of hot dry rock exploration target area in the Gonghe Basin based on high-precision aeromagnetic data[J]. *Natural Gas Industry*, 40(9): 156–169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Li Xufeng, Song Jian, Wen Dongguang, Li Zhiwei, Li Dunpeng, Cheng Zhengpu, Fu Lei, Zhang Linyou, Feng Qingda, Yang Tao, Niu Zhaoxuan. 2021. Analysis on geophysical evidence for existence of partial melting layer in crust and regional heat source mechanism for hot dry rock resources of Gonghe Basin[J]. *Earth Science*, 46(4): 1416–1436 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Wu Haidong, Zhang Yang, Song Jian, Zhang Linyou, Xu Weilin, Li Dunpeng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Fu Lei, Li Xufeng, Feng Qingda. 2020a. Characteristics of regional and geothermal geology of the Reshuiquan HDR in Guide County, Qinghai Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1591–1605 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087–1102 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongming. 2017. Indosian Tectonic–Magmatism and Regional Tectonic Evolution in the Qinghai–Tibetan Plateau Belt[D]. Xi'an: Chang'an University (in Chinese with English abstract).
- Zhao X Y, Zeng Z F, Huai N, Wang K. 2020. Geophysical responses and possible geothermal mechanism in the Gonghe Basin, China[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6(1): 1–12.

附中文参考文献

- 陈希节, 负晓瑞, 雷敏, 蔡志慧, 张盛生, 刘若涵, 李毅兵, 何碧竹. 2020. 青海共和盆地中三叠世花岗岩组合岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束 [J]. *岩石学报*, 36(10): 3152–3170.
- 何碧竹, 郑孟林, 负晓瑞, 蔡志慧, 焦存礼, 陈希节, 郑勇, 马绪宣, 刘若涵, 陈辉明. 2023. 青海共和盆地结构构造与能源资源潜力 [J]. *地学前缘*, 30(1): 81–105.
- 郎旭娟, 刘峰, 刘志明, 薛文静, 邢林啸, 王贵玲. 2016. 青海省贵德盆地大地热流研究 [J]. *地质科技情报*, 35(3): 227–232.
- 雷玉德, 袁有靖, 秦光雄, 巴瑞寿, 赵振, 李铜邦. 2023. 基于测井资料

- 的共和盆地贵德扎仓地热田热储特征分析[J]. *地球学报*, 44(1): 145–157.
- 李林果, 李百祥. 2017. 从青海共和—贵德盆地与山地地温场特征探讨热源机制和地热系统[J]. 物探与化探, 41(1): 29–34.
- 蔺文静, 甘浩男, 赵振, 张盛生. 2023. 青海共和盆地岩石圈热-流变结构及地热意义[J]. *地球学报*, 44(1): 45–56.
- 蔺文静, 王贵玲, 张盛生, 赵振, 邢林啸, 甘浩男. 2022. 青藏高原东北缘共和盆地干热岩热源机制[J]. 地热能, 3: 14–24.
- 钱辉, 姜枚, 薛光琦, 宿和平, Wittlinger G, Vergne J. 2001. 天然地震接收函数揭示的青藏高原东部地壳结构[J]. 地震学报, 23(1): 103–108.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征[J]. *地质科学*, 37(2): 196–206.
- 沈显杰, 张文仁, 管烨, 金旭. 1989. 纵贯青藏高原的亚东-柴达木热流大断面[J]. 科学通报, 17: 1329–1329.
- 孙延贵, 方洪宾, 张琨, 赵福岳, 刘世英. 2007. 共和盆地层状地貌系统与青藏高原隆升及黄河发育[J]. *中国地质*, 34(6): 1141–1147.
- 孙延贵. 2004. 西秦岭—东昆仑造山带的衔接转换与共和坳拉谷[D]. 西安: 西北大学.
- 唐显春, 王贵玲, 马岩, 张代磊, 刘忠, 赵旭, 程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热源机制与聚热模式[J]. *地质学报*, 94(7): 2052–2065.
- 唐显春, 王贵玲, 张代磊, 马岩. 2023. 青藏高原东北缘活动构造与共和盆地高温热异常形成机制[J]. 地球学报, 44(1): 7–20.
- 王昌桂, 吕友生. 2004. 共和盆地——一个值得研究的新盆地[J]. *新疆石油地质*, 25(5): 471–473.
- 汪集旸, 黄少鹏. 1990. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J]. *地震地质*, 12(4): 351–366.
- 汪集旸, 庞忠和, 程远志, 黄永辉, 姜光政, 陆振能, 孔彦龙. 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.
- 吴环环, 吴学文, 李玥, 胡道功, 贾丽云, 颜建东, 王超群, 夏蒙蒙. 2019. 黄河共和—贵德段河流阶地对青藏高原东北缘晚期隆升的指示[J]. *地质学报*, 93(12): 3239–3248.
- 徐明, 朱传庆, 田云涛, 饶松, 胡圣标. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 54(4): 1052–1060.
- 徐叔鹰, 徐德馥, 石生仁. 1984. 共和盆地地貌发育与环境演化探讨[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 20(1): 146–157.
- 严维德, 王焰新, 高学忠, 张树恒, 马月花, 尚小刚, 郭守鳌. 2013. 共和盆地地热能分布特征与聚集机制分析[J]. *西北地质*, 46(4): 223–230.
- 贞晓瑞, 陈希节, 蔡志慧, 何碧竹, 张盛生, 雷敏, 向华. 2020. 青海共和盆地东北部干热岩岩浆侵位结晶条件及深部结构初探[J]. *岩石学报*, 36(10): 3171–319.
- 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 左银辉, 姜光政, 雷玉德, 张盛生, 王朱亭. 2020. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制: 来自岩石放射性生热率的约束[J]. *地球物理学报*, 63(7): 2697–2709.
- 张超, 张盛生, 李胜涛, 贾小丰, 姜光政, 高珊, 王一波, 胡圣标. 2018. 共和盆地恰卜恰地热区现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 61(11): 4545–4557.
- 张会平, 刘少峰. 2009. 青藏高原东北缘循化—贵德盆地及邻区更新世时期沉积与后期侵蚀样式研究[J]. *第四纪研究*, 29(4): 806–816.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 袁道阳, 张广良, 李传友, 王志才. 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. *第四纪研究*, 26(1): 5–13.
- 张森琦, 付雷, 张杨, 宋健, 王富春, 黄金辉, 贾小丰, 李胜涛, 张林友, 冯庆达. 2020b. 基于高精度航磁数据的共和盆地干热岩勘查目标靶区圈定[J]. *天然气工业*, 40(9): 156–169.
- 张森琦, 李旭峰, 宋健, 文冬光, 李志伟, 黎敦朋, 程正璞, 付雷, 张林友, 冯庆达. 2021. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析[J]. *地球科学*, 46(4): 1416–1436.
- 张森琦, 吴海东, 张杨, 宋健, 张林友, 许伟林, 黎敦朋, 李胜涛, 贾小丰, 付雷. 2020a. 青海省贵德县热水泉干热岩体地质—地热地质特征[J]. *地质学报*, 94(5): 1591–1605.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087–1102.
- 张永明. 2017. 青海南山构造带印支期构造岩浆作用与区域构造演化[D]. 西安: 长安大学.