



青海共和盆地高热机制数值模拟分析

范桃园¹⁾, 李冰¹⁾, 闫臻²⁾

1) 中国地质科学院, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

内容提要: 共和盆地位于青藏高原东北缘, 处于秦岭—祁连—昆仑造山带的交汇部位。盆地的平均热流值明显高于中国大陆地区热流平均值, 也明显高于周边构造单元, 表现为高热异常区域。笔者等结合区域地质、地球物理探测资料及近年来新获的热学参数测试数据, 对共和盆地开展了热演化数值模拟, 分析了共和盆地的高热异常机制。结果显示, 如果将新生界地层作为一个整体考虑, 实测的热导率参数不足以形成共和盆地的高热, 必然有深部热源, 如中一下地壳熔融体的影响。而结合地温曲线, 对新生界地层进行分层数值计算分析, 显示盆地高热异常形成的主要控制因素是浅表层松散的新生界沉积层的极低热导率, 同时岩石圈以下的深部过程影响为共和盆地高热异常提供一定程度的区域热异常背景。

关键词: 共和盆地; 青藏高原; 干热岩; 热模拟

共和盆地位于青藏高原的东北缘, 处于秦岭—祁连—昆仑造山带的交汇区, 北侧为祁连山造山带, 南侧为东昆仑造山带, 向东过渡为西秦岭造山带(图1)。共和盆地受周边山前深大断裂的控制, 是一个中新生代期间发展起来的菱形断陷盆地(徐叔鹰等, 1984; Wang Erchie and Burchfiel, 2004; 袁道阳等, 2004a, b)。

共和盆地内大地热流值介于93.3~111.0 mW/m², 平均热流值为102.2 mW/m²。区域上, 其南侧的东昆仑块体平均热流值为61 mW/m², 东侧的秦岭造山带热流平均为61.4 mW/m², 北侧的南、北祁连造山带平均热流值分别为68.1 mW/m²和70.7 mW/m², 均低于共和盆地, 可见共和盆地是明显的高热异常区。此外, 共和盆地热流值也明显高于中国大陆地区约60.4 mW/m²的平均大地热流值。此外, 共和盆地热流值也明显高于中国大陆地区约60.4 mW/m²的平均大地热流值(姜光政等, 2016)。在共和盆地内恰卜恰3705 m深度钻获的236℃高温干热岩体, 是我国首次钻获的埋藏最浅、温度最高的干热岩体, 进一步证实共和盆地属于高热异常区(Xu Tianfu et al., 2018; 许天福等, 2018; 张森琦等, 2018)。

关于共和盆地热流的成因机制, 目前存在壳幔岩浆侵入、放射性生热、断裂构造活动等不同认识。

一种观点认为, 壳幔岩浆侵入作用造成了共和盆地高温热异常, 主要依据是在共和盆地周边发现了各类壳幔源岩体, 比如, 共和盆地基底为侵入花岗岩体。但这些岩浆岩的年龄大都为印支—燕山期, 距今时间久远。如果没有持续的构造运动, 这些岩体与周边围岩早已达到稳定热状态, 不具备保持高温热异常条件(范桃园等, 1999)。另一种观点认为盆地高热异常可能由其基底花岗岩生热所致(李林果等, 2017), 但是共和盆地基底和周缘花岗岩露头样品放射性生热率的测试结果表明, 共和盆地花岗岩的放射性生热率并不比附近的秦岭造山带花岗岩的放射性生热率高, 而且从全球角度来看也不属于高的范畴(高山等, 1993; 严维德, 2015; Artemieva et al., 2017; 张超等, 2018, 2020; Zhang Chao et al., 2020), 与放射性生热率为7~10 μW/m³典型的花岗岩生热型的澳大利亚中部库珀盆地的Innaminka花岗岩相比(Chen et al., 2009), 共和盆地基底花岗岩的放射性生热率偏小, 不是引起局部高热异常的主要原因(Weinert et al., 2021)。还有一种观点认为共和盆地高热异常与其所处区域的强构造活动相关(严维德, 2015; Feng Yanfang et al., 2018; 张超等, 2018; Zhang Chao et al., 2020; Zhao Xueyu et al., 2020), 其断裂活动对于深部的过程如何影响和控制, 依然没有统一的认识。此外, 部分研究者根

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41574090, 42174068)和中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20190132)的成果。

收稿日期:2022-03-28; 改回日期:2022-08-28; 网络首发:2022-09-20; 责任编辑:刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.021

作者简介:范桃园,男,1971年生,博士,教授级高工,主要从事计算地球动力学方面的研究;Email: fanty@cags.ac.cn。

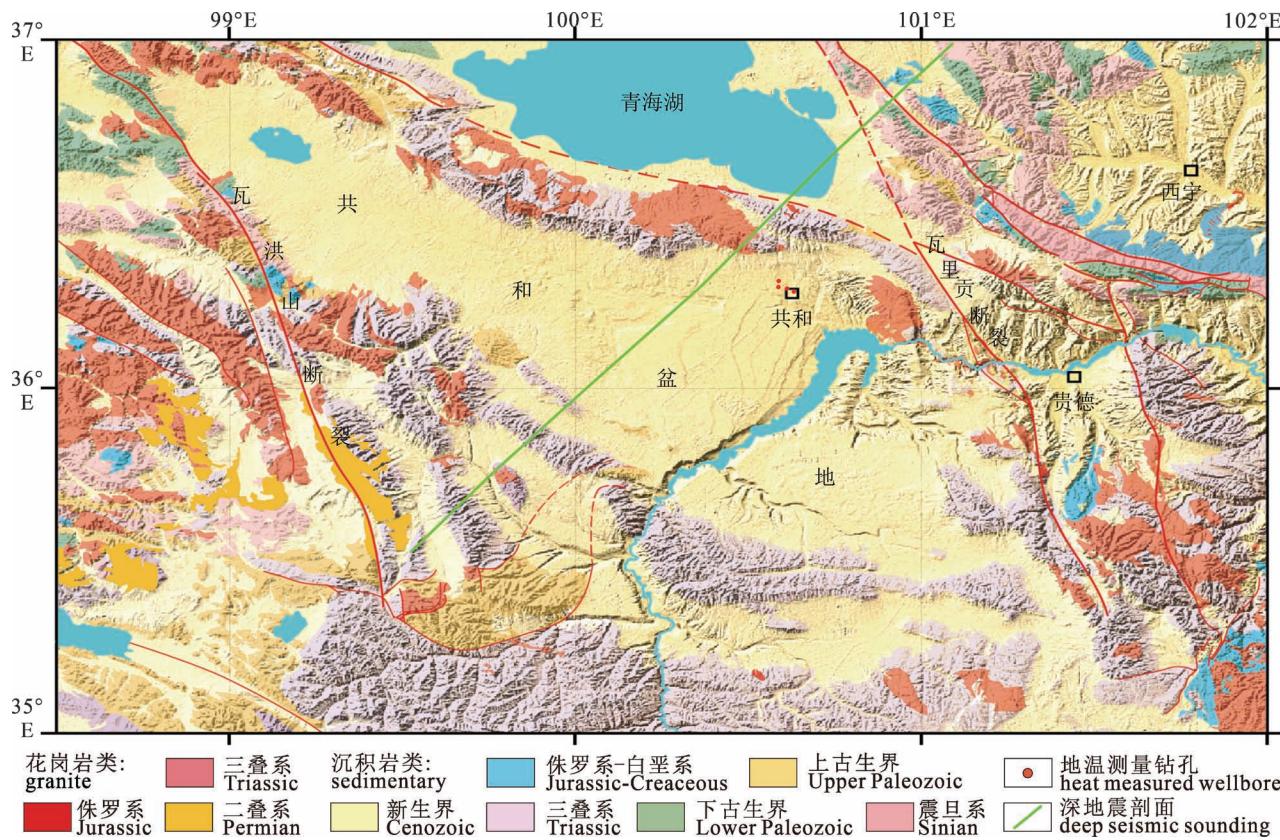


图 1 青藏高原的东北缘共和盆地及周缘地质构造简图(修改自张超等, 2018; Jia Shixu et al., 2019; 唐显春等, 2020)

Fig. 1 Simplified geological map of Gonghe Basin(modified from Zhang Zichao et al., 2018&;
Jia Shixu et al., 2019; Tang Xianchun et al., 2020&)

据深部探测结果认为共和盆地的高热异常与深部中下地壳的低速高导层有关(Jia Shixu et al., 2019; 张超等, 2020)。尽管深部探测结果表明共和—贵德盆地中下地壳的确存在低速高导层,但低速高导层在青藏高原中下地壳是普遍存在的(Nelson et al., 1997; Li Shenghui et al., 2003; Li Hongyi et al., 2014; Wang Qiang et al., 2016),而青藏高原的高热异常却不具有普遍性,高热异常并没有中下低速高导层相伴生,显然中下地壳的低速高导层并不是共和盆地高热异常的直接因素。唐显春等(2020)结合共和盆地最新探测成果,在综合以上4种认识的基础上提出了共和盆地存在高热异常的3种可能有利因素:中下地壳高温(低速高导层)提供主要热源,具有高热导率的深部花岗岩促进热流向浅部运移,而具有低热导率的浅部新生代沉积盖层阻碍热流在近地表散失。但这些因素是否足以形成如今共和盆地的高热流呢?对共和盆地进行热模拟数值计算是寻求该问题答案的理想途径。

因此,笔者等拟利用共和盆地已有的地质和地

球物理资料,结合最新获取的盆地热物理参数,对共和盆地进行热模拟数值计算,分析不同因素对共和盆地高热异常的影响和控制作用。

1 地质概况

共和盆地是中新生代形成的断陷盆地(图1)(徐叔鹰等, 1984; Wang Erchie et al., 2004; 袁道阳等, 2004b),沉积了一套巨厚的以细粒岩系为主的中、新生界地层。中生界地层主要是以砂砾岩为主的三叠系地层。在中下三叠系地层中广泛发育印支—燕山期的以花岗岩和花岗闪长岩为主的侵入岩。新生界地层主要包含湖泊沉积相泥岩、泥质粉砂岩和砂砾岩(图1),主要由古近系—新近系的西宁组、中新世的咸水河组、上新世临夏组和早中更新世共和组组成(张森琦等, 2018)。古近系—新近系为一套砂质泥岩、泥岩、砂岩、砾岩互层河湖相沉积岩。第四系地层覆盖整个共和盆地(杨利荣等, 2016),下部为下中更新统共和组河湖相沉积,由黄褐色或蓝灰或绿色亚黏土和砂、砾组成,上部为中上

更新统和全新统灰褐、黄褐色的粗砂细砾、中粗砂、细砂、亚粘土、亚砂土粗细相间的互层状地层，整体上粒度细、渗透性极差。新生界地层整体热导率低，只有 $1\sim2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Zhang Chao et al., 2018; 唐显春等, 2020)，特别是上部浅表中更新统和全新统地层，以河湖相砂砾泥岩为主，是一套松散的砂砾、粘土，处于弱成岩状态，近地表 $500\sim600 \text{ m}$ 热导率极低，只有 $0.2\sim0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Zhang Chao et al., 2018; 唐显春等, 2020)。

最新的深部探测结果 (Gao Ji et al., 2018, 2020; Jia Shixu et al., 2019) 显示，共和盆地乃至整个青藏高原东北缘中下地壳普遍存在低速高导体。青藏高原东北缘速度结构剖面清晰地给出了盆地沉积地层及地壳结构特征(图 2)，为本文数值模拟提供了有力的深部约束条件。

2 有限元数值模拟

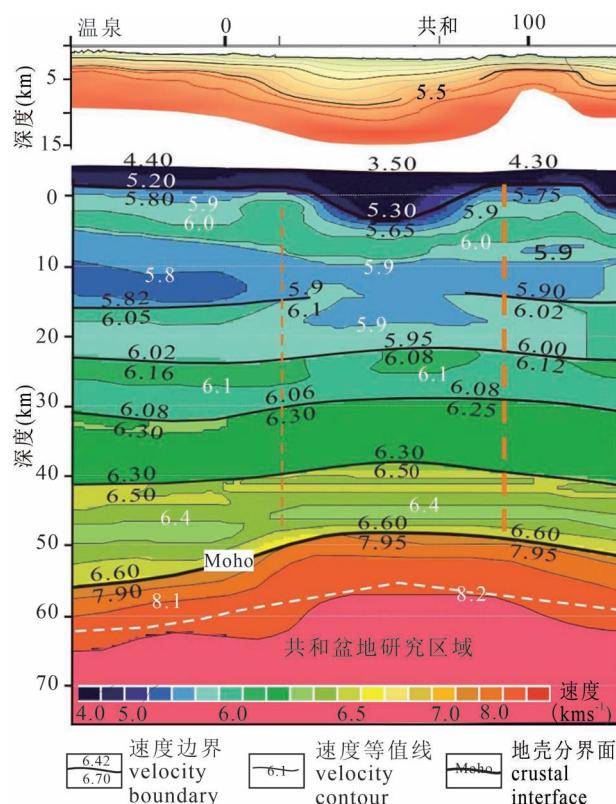


图 2 青藏高原的东北缘共和盆地深部地壳结构

(据 Jia Shixu et al., 2019; 图 1 所示深地震剖面。图中速度为地震纵波速度)

Fig. 2 The stratum and crust structure from Deep Seismic sounding (reference to Jia Shixu et al., 2019; Deep Seismic Sounding in Fig. 1. The velocities in fig. are P-wave velocities)

2.1 模拟方法

沉积盆地热状态是其所在岩石圈整体热结构的一部分，岩石圈热结构主要受岩石圈厚度、岩石圈各圈层生热率、比热容和岩石热导率等的控制(郭飒飒等, 2020; 任战利等, 2020; 王贵玲等, 2020)，可以通过热扩散关系确定岩石圈热结构：

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = K\nabla^2 T + Q \quad (1)$$

其中 c 为比热容, ρ 为密度, T 为温度, t 为时间, K 为热导率, Q 为产热率(主要是放射性元素的生热率)。

2.2 模拟参数设置

以共和盆地地层格架为基础，结合青藏高原东北缘深部探测地壳结构模型(图 2 中的研究区范围)和地震热学岩石圈厚度，建立了共和盆地热演化有限元网格模型(图 3)。根据深部探测结果，地壳分为上地壳、中地壳和下地壳三层，其中每层又分为两层。根据共和盆地的沉积特征，新生界地层分为上部松散第四纪沉积层和下部古近系—新近系河湖相碎屑岩层；新生界地层下面为印支期花岗岩侵入岩体层。

顶部边界温度设置为共和盆地地表年平均温度 2.5°C (胡梦珺等, 2019)。共和盆地位于秦—祁—昆构造结合部位，岩石圈厚度较青藏高原主体偏薄，

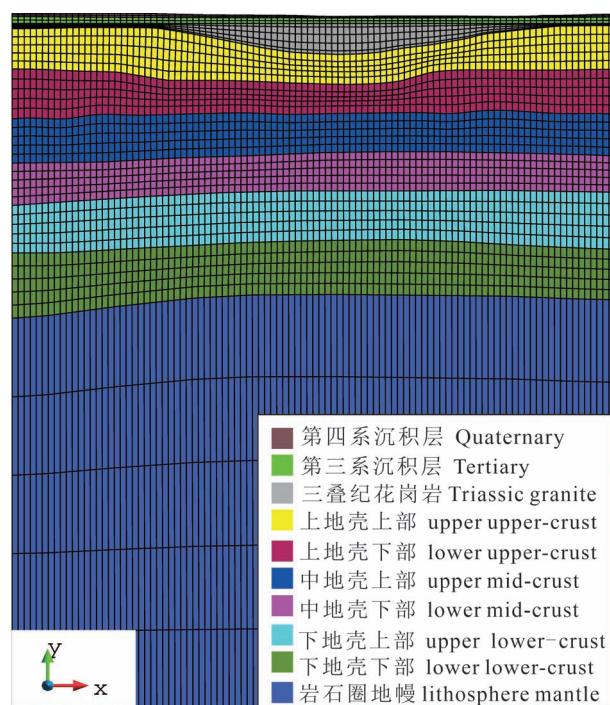


图 3 有限元网格模型

Fig. 3 FEM mesh model of Gonghe Basin

表 1 共和盆地地层及岩石圈分层岩石物理参数

Table 1 The thermo-physical parameters of stratum and lithosphere of the Gonghe basin

	沉积层		花岗岩侵入体	上地壳		中地壳		下地壳		岩石圈地幔
	第四系	古近系—新近系		上	下	上	下	上	下	
比热容 [c , J/(kg · K)]	600	650	750	730	760	800	830	860	890	1100
密度 [ρ , kg/m ³]	2200	2200	2700	2600	2650	2700	2750	2800	2850	3300
热导率 [k , W/(m · K)]	0.3~2.0	0.5~2.0	2.2	K_{ue}	K_{me}	K_{le}	K_m			
产热率 [Q , $\mu\text{W}/\text{m}^3$]	1.8	1.8	3.5	1.6	1.5	1.2	1.0	0.5	0.3	0.03

K_{ue} : 上地壳的热导率随深度和温度变化,由下式给出: $K_{ue} = K_0(1 + cz)/(1 + b\Delta T)$, 其中 $K_0 = 3.0$, $c = 1.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$, $b = 1.5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; K_{me} : 中地壳的热导率随深度和温度变化,由下式给出: $K_{me} = K_0(1 + cz)/(1 + b\Delta T)$, 其中 $K_0 = 2.8$, $c = 1.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$, $b = 0.8 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; K_{le} : 下地壳的热导率随深度和温度变化,由下式给出: $K_{le} = K_0(1 + cz)/(1 + b\Delta T)$, 其中 $K_0 = 2.6$, $c = 1.5 \times 10^{-3} \text{ km}^{-1}$, $b = 1.5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; K_m : 岩石圈地幔热导率随深度变化,由下式给出: $K_m = 0.368 \times 10^{-9} \times T^3 + 1/(0.174 + 0.000265 \times T)$; 温度的单位均为 K。

表 2 不同模型新生界地层热导率 [k , W/(m · K)]

Table 2 the thermal conductivity of Cenozoic stratum

模型 1	模型 2	模型 3	模型 4	模型 5
新生界	新生界	新生界	新生界	新生界
2.0	1.8	1.5	1.0	0.5
模型 6		模型 7		模型 8
第四系	古近系—新近系	第四系	古近系—新近系	第四系 古近系—新近系
0.5	1.5	0.3	1.2	0.4 1.3

该区地震热学岩石圈厚度约为 125 km (An Meijan et al., 2006, 2007), 所以建模时采用 125 km 作为岩石圈厚度。底部边界温度设置为 1330 °C (Jaupart and Mareschal, 1999; Turcotte and Schubert, 2014)。模型两侧为绝热边界。

岩石热物理参数是热演化模拟定量分析的主要参数(表 1),近年来在共和盆地内开展了大量沉积层和侵入花岗岩热物理参数的测试(Liu Feng et al., 2017; 张超等, 2018, 2020; 唐显春等, 2020),包括岩石热导率、生热率、比热容等。共和盆地的基底花岗岩被认为是该区地热异常和干热岩地热资源形成的主要原因之一(李林果等, 2017),但是最新的岩石放射性生热率测试结果表明:基底花岗岩放射性生热率平均值为 3.2 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,与全球中新生代花岗岩的放射性生热率基本持平(张超等, 2020)。壳幔岩石圈热导率和比热容随温度压力变化均有不同程度变化,不同岩石矿物组分也有着不同变化特征(Chapman et al., 1992; Doin et al., 1996; Wang Yang, 2001; Mottaghy et al., 2008; Sun Yujun et al., 2013),由于不同深度岩石具有不同的矿物组

分和温压条件,所以地壳地幔热导率和比热容随深度而变化。地壳地幔岩石生热率综合参考了周边块体深部岩石生热率测试分析结果(Wang Yang, 2001)。

在热模拟时,主要对盆地新生界地层热导率,特别是第四系地层热导率对共和盆地热结构的影响进行了定量分析。根据共和盆地新生界地层结构,分别把新生代地层作为一个整体或分为古近系—新近系和第四系两层这两种情况分别进行了模拟。根据实测岩石热物理参数分布特征,在第一种情况下,建立了 5 组具有不同新生界地层热导率的模型(表 2)。模型 1 至模型 5 的热导率分别设置为① 2.0 W/(m · K)、② 1.8 W/(m · K)、③ 1.5 W/(m · K)、④ 1.0 W/(m · K)、⑤ 0.5 W/(m · K)。在第二种情况下,建立了三组古近系—新近系和第四系具有不同热导率组合模型(模型 6—模型 8)(表 2)。模型 6 中第三和第四系热导率分别设置为 1.5 和 0.5 W/(m · K);模型 7 中古近系—新近系和第四系热导率分别设置为 1.2 和 0.3 W/(m · K);模型 8 中古近系—新近系第四系热导率分别设置为 1.3 和 0.4 W/(m · K)。

3 模拟结果

模型 6 采用了实测新生界地层热导率(Zhang Chao et al., 2018; 唐显春等, 2020),其二维剖面模型结果见图 4。热模拟结果(图 4)与实测近地表地温梯度观测基本一致。从整个深部来看,由于各圈层岩石热学参数不同导致了各圈层地温梯度具有一

定差异,其中近地表地温梯度极高,这是由于近地表的热导率异常低所致,第四系地层极低热导率影响了其下覆地层的温度结构。

图5显示了将共和盆地浅部新生界地层作为一个整体,并采用5种不同热导率(表2中模型1~5)进行模拟得到的地温曲线。为了对比,图中也显示了盆地内4个钻孔实测地温曲线(张超等,2018)(图4中虚线)。模拟结果显示新生界地层热导率是影响共和盆地热结构的重要因素。随着新生界地层热导率逐渐减小,共和盆地地温梯度逐渐增加。模型1~3对应的热导率分别为2.0、1.8和1.5 W/(m·K),模拟地温梯度明显低于实测地温梯度(图5)。虽然模型3中新生界地层整体等效热导率(1.5 W/(m·K))与实测1.5 W/(m·K)的算术平均热导率基本一致(Zhang Chao et al., 2018; 唐显春等,2020),但共和盆地整体的模拟地温梯度仍低于实测地温梯度,说明共和盆地深部存在比模型3更强的热源。所以,推测除了浅部地层覆盖聚热效果外,共和盆地高热异常还应该有深部热源的贡献。

为了更准确地分析浅部热导率对共和盆地热结构可能的影响,将新生界地层细分为第四系和古近系—新近系地层,各层等效热导率设为各地层单元实测平均值(Zhang Chao et al., 2018; 唐显春等,2020),并进行了进一步模拟计算(模型6~8),结果显示于图6。其中模型6古近系—新近系和第四系地层等效热导率分别为实测热导率算术平均值1.5和0.5 W/(m·K),模型7和模型8各层热导率值均比模型6偏低一些,与各层最低实测热导率值更接近。模拟结果显示模型7和8的地温梯度比模型6偏高,但在一定范围内,3个模型的地温结构与实际地温观测基本一致,模拟地温曲线与实测地温曲线具有较好的一致性。特别是在近地表,模拟结果与实测曲线基本吻合,表明近地表极高的地温梯度带与浅部第四系松散覆盖层超低热导率相关。分层模拟结果(图6)能够大致反映古近系—新近系和第四系地层对共和盆地地温的控制作用。不同模型模拟结果表明近地表地温梯度大是近地表第四系地层热导率异常低所致。

4 讨论

模拟结果说明了,共和盆地高热异常形成的主要控制因素是浅层松散沉积层的极低热导率。考虑到共和盆地处秦岭—祁连—昆仑造山带衔接处,岩石圈之下的深部构造过程对岩石圈底界状态有所影

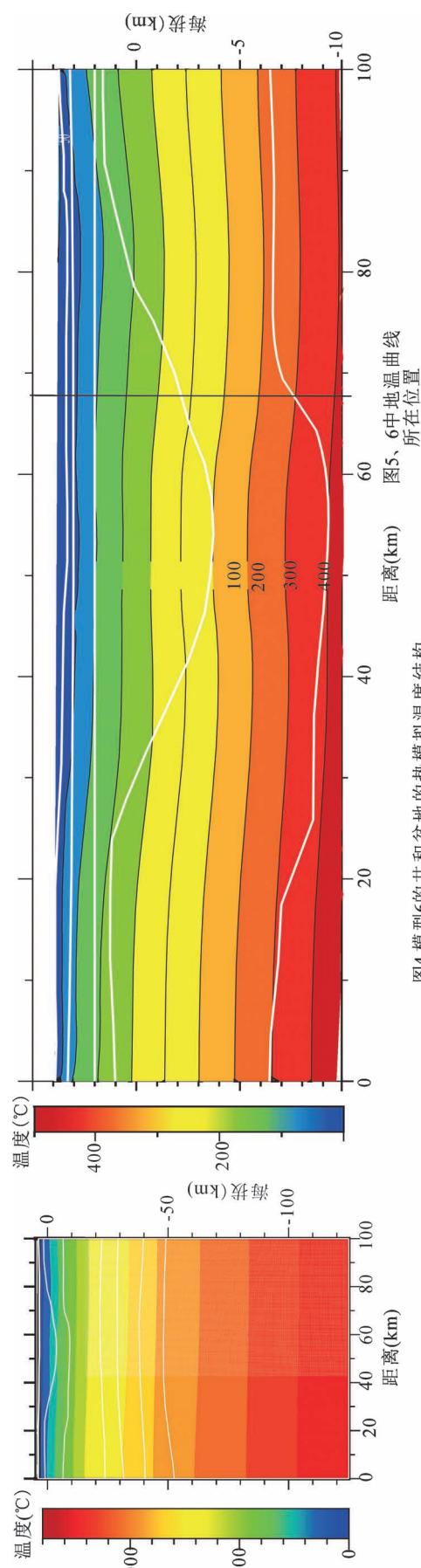


Fig. 4 The thermal modeling temperature of Model 6 of Gonghe Basin

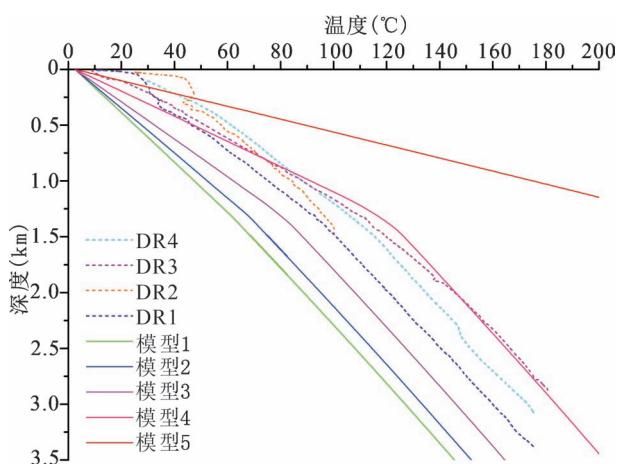


图 5 模型 1~5 的温度—深度曲线

Fig. 5 Temperature—depth curves from numerical modelling for Models 1~5 and from borehole measurements

DR3、DR4、GR1 和 GR2 是位于共和县恰卜恰镇 4 口钻孔(见图 1)内所测得的地温曲线(张超等,2018)

DR3, DR4, GR1 and GR2 are borehole temperatures measured in the Gonghe Basin (Zhang Chao et al., 2018&)

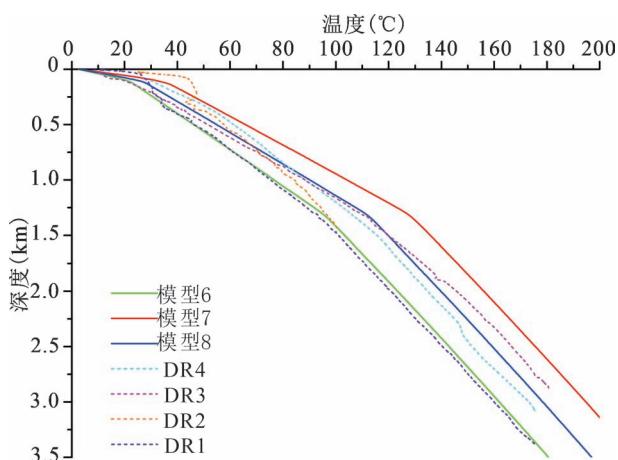


图 6 模型 6~8 的温度—深度曲线

Fig. 6 The measured and modeling temperature—depth curves of Model 6~8

DR3、DR4、GR1 和 GR2 是位于共和县恰卜恰镇四口钻孔内所测得的对应的地温曲线(张超等,2018)

DR3, DR4, GR1 and GR2 are the four boreholes in which temperature was measured(Zhang Chao et al. 2018&)

响,且该区岩石圈厚度与周边地区相比存在不同程度减薄(An Meijian et al., 2006, 2007; Feng Mei et al., 2020),这可能为共和盆地高热异常提供了一定程度的区域热异常深部背景。中下地壳的深部过程对于共和盆地的热异常可能也有一定的影响,但影响程度相对较弱。共和盆地的高热异常不仅是超

高温干热岩存在的基础,也为活动断裂附近形成高温热水资源提供了高热环境,使其成为地热资源开发主要远景区。

本研究利用已有的热传导机制的成熟方法,结合共和盆地新生界盖层的实测热学参数和地温曲线,从数值模拟角度分析了新生界盖层的对共和盆地高热机制的作用。研究采用非稳态的方法开展模拟,在模拟过程中,在设定的边界条件下当时间 t 足够长时岩石圈热结构达到稳态状态。采用非稳态的开展研究,是为了便于分析岩石圈热结构由非稳态到稳态的变化。结果主要对岩石圈达到稳态状态时的热结构特征进行分析,主要是考虑到,一方面,花岗岩入侵时间距今时间太长,已对共和盆地不构成热扰动,另一方面,热稳态岩石圈的模拟结果与实测的地温变化曲线相一致。从模型中可以看到,新生界盖层的热学参数的选取,对共和盆地的热结构的影响很大。当新生界的盖层采用模型 3 的参数,这组参数是与实际观测数据基本一致,其结果就是仅靠新生界地层的覆盖,是不足以形成共和盆地的高热,必然有深部热源的影响。笔者等所采用的热学参数都来源于近几年共和盆地的实测数据,基本能够反映共和盆地各主要地层岩石热学参数特征。在模拟过程中,为了模拟方便,所采用的参数主要近似为算术平均等效值。热学参数对热结构的影响,并非是简单的算术平均过程。比如,很大程度上,热传导受具有最低热导率的岩层控制,因此最低热导率在等效热导率选取过程中的影响因子会更大,此外,由于地下热源来自深部,上覆极低热导率地层并不需要特别厚就能够对下覆地层起到聚热效果。进一步对地温曲线进行分析研究,特别是近地表的高地温梯度的特征,对应着近地表的新生界地层的低热导率,第四系地层热导率影响的模拟结果正说明了这一点。

按照模型 6 的地温模拟曲线,在深度 20 km 左右,温度可达 660°C,达到含水花岗岩的熔融温度,这与共和盆地地球物理探测所得到的 20~30 km 之间存在有部分熔融层(即低阻高导层)相对应(Gao Ji et al., 2018; 张森琦等, 2018, 2021),也就是说,共和盆地的部分熔融层可以在浅表新生界地层的低热导率所影响的高地温梯度结构下形成。同时,晚近地质时期深部的近水平的韧性拆离滑脱推覆构造活动所产生的动态剪切摩擦生热,会进一步使得强化部分熔融层的形成向浅层扩展(张森琦等, 2021)。

尽管本次研究完全按照实测热学参数开展,但是实测资料仍然非常有限,尚缺乏全面细致的区域性地层分层热学参数数据。随着共和盆地地热探测和研究工作的不断深入,通过开展更为细致的共和盆地热模拟分析,将有助于进一步明确高热机制和地温特征。

5 结论

笔者等通过对共和盆地热模拟的数值计算,探究了该盆地高热异常的形成机制。如果对新生界地层作为一个整体考虑,数值分析结果表明,实测的热导率参数不足以形成共和盆地的高热,必然有深部热源,如中下地壳熔融体的影响。而结合地温曲线,对新生界地层进行分层数值计算分析,显示盆地高热异常形成的主要控制因素是浅表层松散的新生界沉积层的极低热导率。同时共和盆地处在秦岭—祁连—昆仑造山带衔接处,岩石圈以下的深部过程影响为共和盆地高热异常提供一定程度的区域热异常背景。

致谢:感谢安美建研究员为本研究提供了岩石圈深部数据,并为本文提供了诸多宝贵建议。感谢国家超级计算天津中心提供的数值模拟计算环境。感谢审稿专家提出的建设性意见!

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

- 范桃园,石耀霖,周炎如. 1999. 沉积盆地热演化过程中的岩浆作用. 中国科学院研究生院学报, 16(1): 63~69.
- 高山,张本仁. 1993. 秦岭造山带及其邻区岩石的放射性与岩石圈的现代热结构和热状态. 地球化学, 22(3): 241~251.
- 郭飒飒,朱传庆,邱楠生,唐博宁,崔悦. 2020. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测. 地质学报, 94(7): 10.
- 胡梦珺,冯淑琴,李向峰. 2019. 马四剖面揭示的共和盆地 12 ka 以来的环境演变. 地层学杂志, 43(1): 101~108.
- 姜光政,高珊,饶松,张林友,唐晓音,黄方,赵平,庞忠和,何丽娟. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). 地球物理学报, 59(8): 2892~2910.
- 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. 物探与化探, 41(1): 29~34.
- 任战利,刘润川,任文波,祁凯,杨桂林,崔军平,杨鹏,张园园. 2020. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素. 地质学报, 94(7): 12.
- 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. 地质学报, 94(7): 2052~2065.
- 王贵玲,蔺文静. 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报, 94(7): 15.
- 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. 兰州大学学报, 20(01): 146~157.
- 许天福,胡子旭,李胜涛,姜振蛟,侯兆云,李凤昱,梁旭,冯波. 2018. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状. 地质学报, 92(9): 1936~1947.
- 严维德. 2015. 共和盆地干热岩特征及利用前景. 科技导报, 33(19): 54~57.
- 杨利荣,岳乐平,王洪亮,张睿,郭怀军,朱小辉,张云翔,弓虎军. 2016. 祁连山及邻区第四纪地层区划与沉积序列. 中国地质, 43(3): 1041~1054.
- 袁道阳,张培震,刘百篪,甘卫军,毛风英,王志才,郑文俊,郭华. 2004a. 青藏高原东北缘晚第四纪活动构造的几何图像与构造转换. 地质学报, 78(2): 270~278.
- 袁道阳,张培震,刘小龙,刘百篪,郑文俊,何文贵. 2004b. 青海鄂拉山断裂带晚第四纪构造活动及其所反映的青藏高原东北缘的变形机制. 地学前缘, 11(4): 393~402.
- 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. 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. 地球物理学报 61(11): 4545~4557.
- 张森琦,李旭峰,宋健,文冬光,牛兆轩. 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. 地球科学, 46(4): 1416~1436.
- 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. 中国地质, 45(6): 1087~1102.
- An Meijian, Shi Yaolin. 2006. Lithospheric thickness of the Chinese continent. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 159(3): 257~266.
- An Meijian, Shi Yaolin. 2007. Three-dimensional thermal structure of the Chinese continental crust and upper mantle. Science in China Series D: Earth Sciences, 50(10): 1441~1451.
- 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 GRANITE2017. Earth-Science Reviews, 172: 1~26.
- Chapman D S, Furlong K P. 1992. Thermal State of the Continental Lower Crust. Amsterdam, Elsevier.
- Chen D, Wyborn D. 2009. Habanero field tests in the Cooper Basin, Australia: A proof-of-concept for EGS. Transactions—Geothermal Resources Council, 33: 140~145.
- Doin M P, Fleitout L. 1996. Thermal evolution of the oceanic lithosphere: an alternative view. Earth and Planetary Science Letters, 142(1): 121~136.
- Fan Taoyuan, Shi Yaolin, Zhou Yanru. 1999&. Effect of magma intrusion on the thermal evolution in a sedimentary basin. Journal of Graduate School, Academia Sinica, 61(1): 63~69.
- Feng Mei, An Meijian, Mechier J, Zhao Wenjin, Xue Guangqi, Su Heping. 2020. Lithospheric structures of and tectonic implications for the central - east Tibetan plateau inferred from joint tomography of receiver functions and surface waves. Geophysical Journal International, 223: 1688~1707.
- Feng Yanfang, Zhang Xiaoxu, Zhang Bo, Liu Jiangtao, Wang Yanggang, Jia Delong, Hao Lirong, Kong Zhaoyu. 2018. The geothermal formation mechanism in the Gonghe Basin: Discussion and analysis from the geological background. China Geology, 1(3):

- 331~345.
- Gao Ji, Zhang Haijiang, Zhang Senqi, Chen Xiaobin, Cheng Zhengpu, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Fu Lei, Gao Lei, Xin Haoliang. 2018. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the geothermal system beneath the Gonghe Basin, Northeast Tibetan Plateau. *Geothermics*, 76: 15~25.
- Gao Ji, Zhang Haijiang, Zhang Huiping, Zhang Senqi, Cheng Zhengpu. 2020. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the SE Gonghe Basin: Implication for the orogenic uplift in the northeastern margin of the Tibetan plateau. *Tectonophysics*, 789: 228525.
- Gao Shan, Zhang Benren. 1993&. Radioactivity of rocks in the Qinling Orogenic belt and adjacent areas and the current thermal structure and state of the lithosphere. *Geochimica*, 22(3): 241~251.
- Guo Sasa, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, Tang Boning, Cui Yue. 2020&. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an new area. *Acta Geological Sinica*, 94(7): 2026~2035.
- Hu Mengjun, Feng Shuqin, Li Xiangfeng. 2019&. The environmental evolution of the Gonghe basin since the 12Ka revealed by magnetic susceptibility data. *Journal of Stratigraphy*, 43(1): 101~108.
- Jaupart C, Mareschal J C. 1999. The thermal structure and thickness of continental roots. In: R. D. v. d. Hilst, W. F. McDonough (eds), *Developments in Geotectonics*, Elsevier, 93~114.
- Jia Shixu, Guo Wenbin, Mooney W D, Wang Fuyu, Duan Yonghong, Zhao Junmeng, Lin Jiyan, Liu Zhi. 2019. Crustal structure of the middle segment of the Qilian fold belt and the coupling mechanism of its associated basin and range system. *Tectonophysics*, 770: 128154.
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016&. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892~2910.
- Li Hongyi, Shen Yang, Huang Zhongxian, Li Xinfu, Gong Meng, Shi Danian, Sandvol E, Li Aibing. 2014. The distribution of the mid-to-lower crustal low-velocity zone beneath the northeastern Tibetan Plateau revealed from ambient noise tomography. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, doi: 10.1002/2013JB010374.
- Li Lingguo, Li Baixiang. 2017&. A discussion on the heat source mechanism and geothermal system of Gonghe—Guide basin and mountain geothermal field in Qinghai Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 41(1): 29~34.
- Li Shenghui, Unsworth M J, Booker J R, Wei Wenbo, Tan Handong, Jones A G. 2003. Partial Melt Or Aqueous Fluid in the Mid-Crust of Southern Tibet? Constraints from INDEPTH magnetotelluric data. *Geophysical Journal International* 153(2): 289~304.
- Liu Feng, Lang Xujuan, Lu Chuan, Lin Wenjing Lin, Tong Jue, Wang Guiling. 2017. Thermophysical parameters and lithospheric thermal structure in Guide Basin, Northeast Qinghai—Tibet Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 76(5): 191~199.
- Mottaghy D, Vosteen H D, Schellschmidt R. 2008. Temperature dependence of the relationship of thermal diffusivity versus thermal conductivity for crystalline rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 97(2): 435~442.
- Nelson K, Zhao W J, Brown L, Kuo J, Che J K, Liu X W, Klemperer S, Makovsky Yizhaq, Meissner R, Mechle J, Kind R, Wenzel F, Ni James, Nabelek John, Leshou Chen, Tan Handong, Wei Wyfly, Jones Alan, Booker John, Edwards M. 1997. Partially Molten Middle Crust Beneath Southern Tibet: Synthesis of Project INDEPTH Results. *Science (New York, N. Y.)*, 274: 1684~1688.
- Ren Zhangli, Liu Runchuan, Ren Wenbo, Qi Kai, Yang Guilin, Cui Junping, Yang Peng, Zhang Yuanyuan. 2020&. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1938~1949.
- Sun Yujun, Dong Shuwen, Zhang Huai, Li Han, Shi Yaolin. 2013. 3D thermal structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 697~704.
- 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, northern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052~2065.
- Turcotte D L, Schubert G. 2014. *Geodynamics*. Cambridge University Press.
- Wang Erchie, Burchfiel B C. 2004. Late Cenozoic Right-Lateral Movement along the Wenquan Fault and Associated Deformation: Implications for the Kinematic History of the Qaidam Basin, Northeastern Tibetan Plateau. *International Geology Review*, 46(10): 861~879.
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020&. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923~1937.
- Wang Qiang, Hawkesworth C J, Wyman D, Chung Sunlin, Wu Fuyuan, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Gou Guoning, Zhang Xiuzheng, Tang Gongjian, Dan Wei, Ma Lin, Dong Yanhui. 2016. Pliocene—Quaternary crustal melting in central and northern Tibet and insights into crustal flow. *Nature Communications*, 7(1): 11888, doi: 10.1038/ncomms11888.
- Wang Yang. 2001. Heat flow pattern and lateral variations of lithosphere strength in China mainland: constraints on active deformation. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126(3): 121~146.
- Weinert S, Bär K, Scheuvens D, Sass I. 2021. Radiogenic heat production of crystalline rocks in the Gonghe Basin Complex (northeastern Qinghai-Tibet plateau, China). *Environmental Earth Sciences*, 80(7): 270.
- Xu Shuying, Xu Defu, Shi Shengren. 1984&. A discussion on the development of landforms and evolution of environments in the Gonghe basin. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 20(1): 146~157.
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Feng Bo. 2018&. Enhanced geothermal system: international progresses and research status of China. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936~1947.
- Xu Tianfu, Yuan Yilong, Jia Xiaofeng, Lei Yude, Li Shengtao, Feng Bo, Hou Zhaoyun, Jiang Zhenjiao. 2018. Prospects of power generation from an enhanced geothermal system by water circulation through two horizontal wells: A case study in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China. *Energy*, 148: 196~207.
- Yan Weide. 2015&. Characteristics of Gonghe basin hot dry rock and its utilization projects. *Science & Technology review*, 33(19): 54~57.
- Yang lirong, Yue Leping, Wang Hongliang, Zhang Rui, Guo Huaijun, Zhu Xiaohui, Zhang Yunxiang, Gong Hujun. 2016&. Quaternary stratigraphic realm and sedimentary sequence of the Qilian Mountain and adjacent areas. *Geology in China*, 43(3): 1041~1054.

Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Baichi, Gan Weijun, Mao Fengying, Wang Zhicai, Zheng Wenjun, Guo Hua. 2004a&. Geometrical imagery and tectonic transformation of Late Quaternary Active tectonic in northeastern margin of Qinhai—Xizang Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 78(2) : 270~278.

Yuan Daoyang, Zhang Peizhen, Liu Xiaolong, Liu Baichi, Zheng Wenjun, He Wengui. 2004b&. The tectonic activity and deformation features during the Late Quaternary of Elashan Mountain active fault zone in Qinghai Province and its implication for the deformation of the northeastern margins of Qinghai—Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 11(4) : 393~402.

Zhang Chao, Jiang Guangzheng, Shi Yizuo, Wang Zhuting, Wang Yi, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Hu Shengbiao. 2018. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure of the Gonghe—Guide area, northeastern Qinghai—Tibetan plateau. *Geothermics*, 72: 182 ~ 192.

Zhang Chao, Hu Shengbiao, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Zhang Linyou, Kong Yanlong, Zuo Yinhui, Song Rongcai, Jiang Guangzheng, Wang Zhuting. 2020. Radiogenic heat production variations in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau: Implications for the origin of high-temperature geothermal resources. *Renewable Energy*, 148: 284~297.

Zhang Chao, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Jiang Guangzheng, Gao Peng, Wang Yibo, Hu Shengbiao. 2018&.

Geothermal characteristics of Qiabuqia geothermal area in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11) : 4545~4557.

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. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(7) : 2697~2709.

Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dungpeng, 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. *Geology in China*, 45(6) : 1087 ~ 1102.

Zhang Senqi, Li Xufeng, Song Jian, Wen Dongguang, Li Zhiwei, Li Dungpeng, 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. *Earth Science*, 46(4) : 1416~1436.

Zhao Xueyu, Zeng Zhaofa, Huai Nan, Wang Kun. 2020. Geophysical responses and possible geothermal mechanism in the Gonghe Basin, China. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6(1) : 1~12.

Numerical modeling of mechanism of high heat flux in the Gonghe Basin, Qinghai Province

FAN Taoyuan¹⁾, LI Bing¹⁾, YAN Zhen²⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;

2) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

Objectives: Gonghe Basin is located in the northeast margin of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau, in the intersection area of Qinling—Qilian—Kunlun orogenic belt. The heat flow in Gonghe Basin range from 93. 3 mW/m² to 111. 0 mW/m², with an average heat flow of 102. 2 mW/m², which is significantly higher than the other area of China Mainland, about 60. 4 mW/m² and its surrounding tectonic units. There are different understandings about the genetic mechanism of high heat flow in Gonghe Basin, such as crust—mantle magma intrusion, radioactive heat generation, fault tectonic activities and the influence of low-velocity layers in the middle and lower crust. This paper intends to use the existing geological and geophysical data of Gonghe Basin, combined with the newly acquired basin thermophysical parameters, to carry out thermal numerical modeling of Gonghe Basin, and clarify the main factors of influence and control on the high thermal anomaly of Gonghe Basin.

Methods: Based on the stratigraphic framework of the Gonghe Basin, the finite element grid model of thermal evolution of the Gonghe Basin is established by combining the deep crustal structure model of the northeastern margin of the Tibetan Plateau and the seismic thermal lithosphere thickness. According to the deep exploration results, the Earth's crust is divided into three layers: upper crust, middle crust and lower crust, each of which is divided into two layers. According to the sedimentary characteristics of the Ghe Basin, the Cenozoic strata are divided into loose Quaternary sedimentary layers in the upper part and Paleogene—Neogene fluvial lacustrine clastic layers in the lower part. Below the Cenozoic strata is the Indosinian granite intrusive rock layer. The boundary conditions and rock thermal parameters are determined according to the actual detection results.

Results: It can be seen from the modeling results that the selection of thermal parameters of the Cenozoic cap

layer has a great influence on the thermal structure of Gonghe Basin. By comparing the simulated geothermal temperature curve with the observed geothermal temperature curve, it can be seen that the characteristics of the high geothermal gradient near the surface correspond to the low thermal conductivity of the Cenozoic strata near the surface, indicating that the low thermal conductivity of the quaternary strata is an important factor controlling the high geothermal gradient. At the same time, Gonghe Basin is located at the junction of Qinling—Qilian—Kunlun orogenic belt, and the influence of deep processes below the lithosphere provides a certain degree of regional thermal anomaly background for the high thermal anomaly in Gonghe Basin.

Conclusions: The mechanism of the high thermal anomaly is explored by the numerical thermal modeling of Gonghe Basin. If the Cenozoic strata are considered as a whole, the numerical analysis results show that the measured thermal conductivity parameters are not enough to form the high heat in the Gonghe Basin, and there must be the influence of deep heat sources, such as middle and lower crust melt. If the Cenozoic strata are divided Quaternary and Paleogene—Neogene, the modeling results shows the main controlling factor of the formation of high thermal anomalies in the basin is the very low thermal conductivity of the loose Cenozoic sediments, which is consistent actual measured with the geothermal curve.

Keywords: Gonghe Basin; Qinghai—Xizang (Tibetan) Plateau; hot dry rock; thermal numerical modelling

Acknowledgements: This article is preliminary research achievement of a project entrusted by NSFC (No. 41574090, 42174068) and Chinese Geological Survey Project (No. DD20190132).

First author: FAN Taoyuan, male, born in 1971, professor engineer, is mainly engaged in geodynamical modeling; Email: fantly@cags.ac.cn

Manuscript received on: 2022-03-28; **Accepted on:** 2022-08-28; **Network published on:** 2022-09-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2022. 09. 021

Edited by: LIU Zhiqiang

