

宋佳霖, 邱楠生, 冯乾乾等. 2025. 中国东北长白山地区高温地热分布特征. 地球物理学报, 68(10): 3938-3955, doi: 10.6038/cjg2025S0626.

Song J L, Qiu N S, Feng Q Q, et al. 2025. High temperature geothermal distribution characteristics in Changbai Mountain area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 68(10): 3938-3955, doi: 10.6038/cjg2025S0626.



中国东北长白山地区高温地热分布特征

宋佳霖^{1,2}, 邱楠生^{1,2,3*}, 冯乾乾^{1,3}, 唐博宁^{1,2}, 廖珂琰^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油大学(北京)碳中和示范性能源学院, 北京 102249

摘要 长白山地区位于太平洋俯冲前缘, 具有广泛温泉出露, 是中国东北最大的活跃火山系统, 具有良好的地热资源潜力. 受钻井数量及岩石热物性数据制约, 该地区深部高温地热资源分布特征的系统认识尚不明确. 本文根据居里面深度分布, 结合岩石热物性实测数据及热导率温度校正方法, 基于一维热传导方程计算了长白山地区大地热流与深部温度. 研究表明, 长白山地区进行温度热导率校正计算的大地热流比不进行温度热导率校正计算的大地热流平均低约 24.8%. 根据温度校正热导率计算, 长白山地区大地热流介于 72.9 ~ 86.5 mW·m⁻², 热流高值主要分布于西部居里面较浅地区及北西向张性断裂周边, 150℃ 高温地热等温面埋深介于 3216.9 ~ 4228.1 m, 埋深较浅地区主要分布在长白山地区西部以及北部, 与热流高值分布特征具有良好对应性. 本研究补充了长白山地区大地热流的计算数据, 精细了长白山地区大地热流及 150℃ 高温地热等温面的分布, 为该区深部地温预测和地热资源评价提供了更加准确的参数.

关键词 地热资源; 现今地温场; 热导率; 长白山; 大地热流; 居里面

中图分类号 P314

收稿日期 2024-10-28, 2025-01-09 收修定稿

DOI: 10.6038/cjg2025S0626

CSTR: 32084.14.cjg2025S0626

High temperature geothermal distribution characteristics in Changbai Mountain area

SONG JiaLin^{1,2}, QIU NanSheng^{1,2,3*}, FENG QianQian^{1,3}, TANG BoNing^{1,2}, LIAO KeYan^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3 College of Carbon Neutral Energy, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract The Changbai Mountain region is located at the forearc of the Pacific subduction zone and is characterized by widespread hot springs exposure. It is the largest active volcanic system in Northeast China, with significant geothermal resource potential. However, due to limitations in the number of drillings and rock thermal property data, a comprehensive understanding of the distribution of deep high-temperature geothermal resources in the region remains unclear. In this study, based on depth distribution of the Curie depth, combined with measured rock thermal property data and temperature correction methods for thermal conductivity, the surface heat flow and deep temperatures of the Changbai Mountain region were calculated using by one-dimensional heat conduction equation. The study shows that the geothermal heat flow calculated with temperature-corrected thermal conductivity is on average about 24.8% lower than that calculated without such

基金项目 国家重点研发计划项目“中国东部深层高温地热的形成机制、分布特征和资源评价”(2021YFA0716003) 及中国石油大学(北京)科研基金(2462024YJRC027)资助.

第一作者简介 宋佳霖, 男, 2000 年生, 博士研究生, 主要从事高温地热勘探研究. E-mail: songjialin202409@163.com

***通讯作者** 邱楠生, 男, 1968 年生, 教授, 主要从事沉积盆地构造-热演化和油气成藏机理方面的教学和研究. E-mail: qiunsh@cup.edu.cn

correction. Based on the temperature-corrected thermal conductivity, the surface heat flow in the Changbai Mountain region ranges from 72.9 to 86.5 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. High heat flow values are primarily distributed in the shallower regions of the Curie surface in the western part of the area and around northwest-striking extensional faults. The depth of the 150°C isothermal surface of the high-temperature geothermal resource ranges from 3216.9 to 4228.1 meters. Shallower depths are mainly found in the western and northern parts of the Changbai Mountain region, which correspond well to the distribution pattern of high surface heat flow values. This study supplements the surface heat flow calculation data for the Changbai Mountain region and refines the distribution of geothermal heat flow and the 150°C isothermal surface for high-temperature geothermal resources. It provides more accurate parameters for deep temperature predictions and geothermal resource assessments in the region.

Keywords Geothermal resources; Current geothermal field; Thermal conductivity; Changbai Mountain; Surface heat flow; Curie Surface

0 引言

中国高温地热资源主要分布在地中海-喜马拉雅地热带藏南、川西和滇西地区及环太平洋地热带东部沿海地区(汪集暘等, 2019; 王贵玲等, 2017; 庞忠和等, 2014; 胡圣标等, 2013)。在东部区域中, 长白山地区由于广泛的温泉出露及活跃的火山活动, 被认为具有良好的地热资源潜力。长白山地区主要有天池、望天鹅和胞胎(朝鲜)等火山, 其中天池火山是长白山地区唯一的活火山(Wei F X et al., 2016; Wei H Q et al., 2013)(图 1)。长白山地区火山活动活跃, 并具有大量的温泉出露, 显示出较好的高温地热潜力(黄继军等, 2020; 张福坤, 2016; 刘英杰, 2014)。针对长白山地区现今地温场, 前人开展了系列研究。长白山地区 0~3 km 的地温梯度介于 1.75~2.35°C/100 m(姜梓萌, 2013)。第 4 版中国大陆地区大地热流数据汇编, 长白山地区新增两个高质量大地热流数据, 两数据点均位于长白山天池火山以西, 实测大地热流分别为 79.9 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 与 70.9 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (姜光政等, 2016)。基于全球 4000 余个大地热流点及深度学习算法, 估算长白山地区大地热流在 84 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 左右(姜丹丹, 2021)。根据长白山地区周边四口钻井实测数据, 揭示出长白山地区大地热流最高点位于天池火山口, 约为 270 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 逐渐向四周下降, 周边地区热流约为 75 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (Jiang et al., 2023)。然而, 受限于长白山地区稀少的钻井温度资料以及岩石热物性数据, 该地区大地热流分布缺少精细的刻画, 高温地热资源分布特征尚不明确。

居里等温面(称为居里面)是由地壳岩石中的铁磁性矿物在温度达到居里点时成为顺磁界面而形成的。居里面是地磁地壳厚度的下界面, 也是地球内

部重要的热力学界面。居里面因地区而异, 主要取决于区域地质、地热分布和岩石中的矿物成分(Bilim et al., 2016; Gao et al., 2019; Aydın et al., 2005; Manea and Manea, 2011; Salazar et al., 2017; Tsvetkov et al., 2018)。居里面的深度可以为地热、石油、天然气勘探提供有价值的参考(Nyabeze and Gwavava, 2016), 国内外已有学者利用居里面数据进行热流计算(邱楠生等, 2024; 张健等, 2023; Maule et al., 2005; 焦立果, 2014; Martos et al., 2017; 唐晗晗等, 2020)。长白山地区受钻孔数量有限影响, 目前实测大地热流数据很少, 稀少的地热钻井的数据难以支撑长白山地区的地热解释。本文将基于居里面深度与温度, 根据一维热传导方程计算长白山地区大地热流分布与高温地热资源分布, 补充长白山地区大地热流数据, 为该区深部地温预测和地热资源评价提供更加精细的参数。

1 区域地质概况

长白山地区位于中朝边界, 太平洋板块的俯冲前缘, 是东北亚大陆内最大的活跃火山系统(图 1)。其大地构造位置位于华北克拉通北部东缘, 欧亚板块与太平洋板块相互作用的活动大陆边缘构造环境, 属于环西太平洋岩浆构造带的一部分。长白山的形成与太平洋板块俯冲欧亚板块紧密相关(Kyong-Song et al., 2016), 自新生代以来太平洋板块经历了重要的构造演化, 55~25 Ma 太平洋板块以浅角度俯冲; 25~15 Ma 发生海沟回撤, 板片回转; 15 Ma 以来太平洋板块最终进入地幔过渡带, 到达底界, 留下滞留板块增厚变平, 并在上方形成大地幔楔(Zhang et al., 2018)。

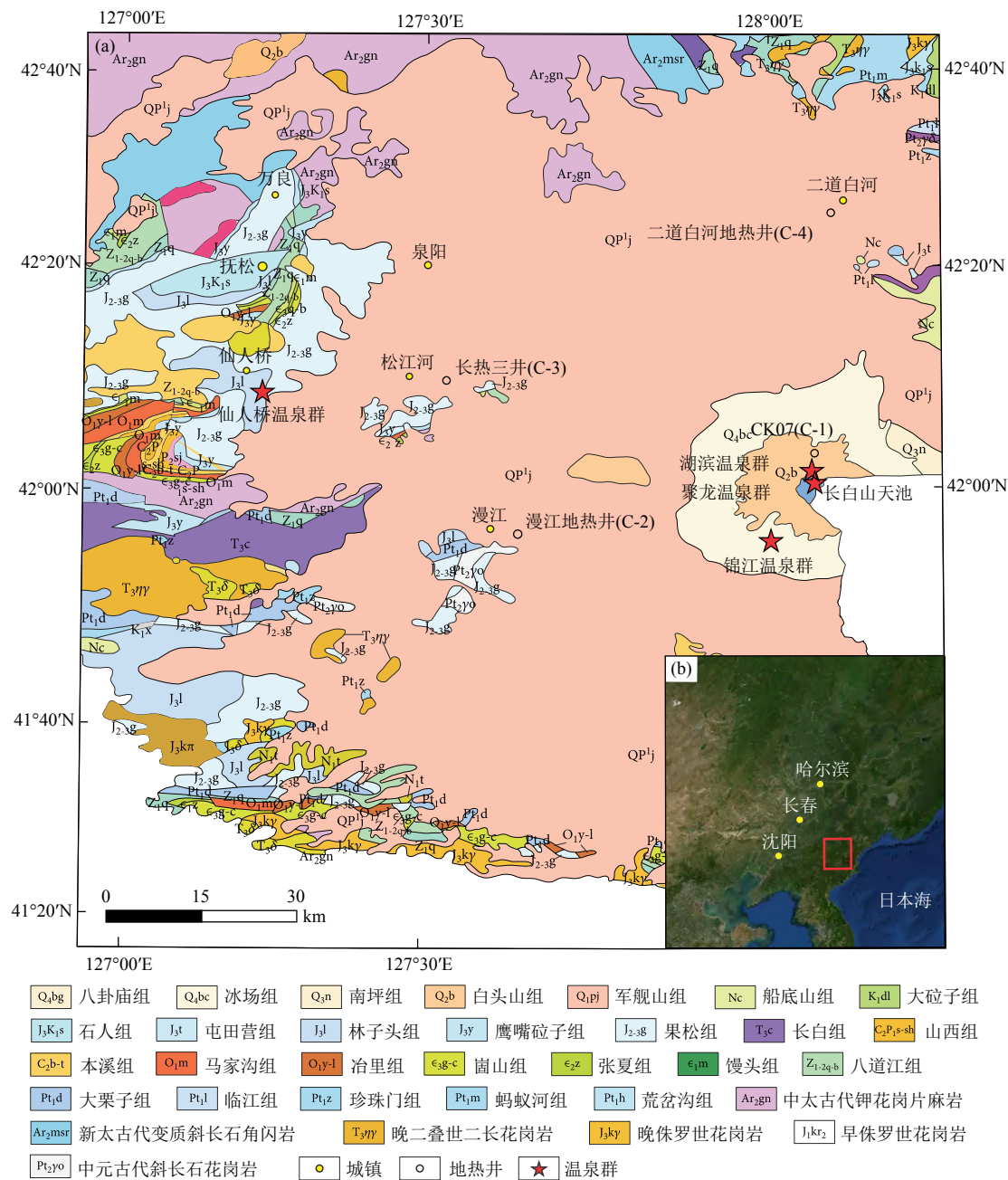


图 1 (a) 长白山地区地质图; (b) 研究区区域分布 (Yan et al.,2018)

Fig. 1 (a) Geological map of Changbai Mountain Area; (b) Regional map of the study area (Yan et al.,2018)

长白山地区地层发育完全, 周边均有地表出露。其中, 长白山地区基底主要为太古宙至中晚元古代变质岩和中生代花岗岩。基底之上古生界发育震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系, 中生界发育三叠系、侏罗系、白垩系, 新生界发育第三系与第四系, 具体地层岩性分布如表 1 所示。

温泉是地热在地表的直接显示之一, 长白山地区温泉发育广泛, 存在众多的温泉群, 主要有六处温泉群, 分别为湖滨温泉群、聚龙温泉群、锦江温泉群、十八道沟温泉群、仙人桥温泉群、老三队温泉

群, 温泉的相关信息见表 2。其中湖滨、聚龙、锦江温泉群分布在长白山天池火山锥上, 均出露于以中新统粗面为主的火山岩中, 温度总体较高, 分别在 42 ~ 73℃、40 ~ 82℃、45 ~ 60℃。十八道沟、仙人桥、老三队温泉群距离天池火山稍远, 出露于不同的岩性中, 温度稍低一点, 主要在 60℃ 以内。

仅凭借温泉出露温度无法直接揭露长白山地区深部热储温度, 因此前人在长白山地区以地球化学温标方法对温泉水样进行了水化学分析, 从而估计热储温度数据, 得到的结果如表 3 所示。

表 1 长白山地区地层简表(赵容生, 2019; 姜丹丹, 2021)

Table 1 Brief stratigraphic table in Changbai Mountain area (Zhao, 2019; Jiang, 2021)

组	代号	厚度(m)	地层岩性
河床河漫滩及 I 级阶地堆积物	Q ₄ ^{al}	3 ~ 12.4	河床河漫滩及 I 级阶地堆积物, 主要为砂砾石及砂壤土; 白头山一带为粗面质火山灰
八卦庙组	Q ₄ bg	11.95	碱流质角砾凝灰岩, 熔岩凝灰岩
白云峰组	Q ₄ by	10.0 ~ 78	灰白色碱性浮岩
冰场组	Q ₄ bc	51.55 ~ 100	熔岩角砾岩, 凝灰岩, 角砾凝灰岩
南坪组	Q ₃ n	95.7	黑斑和巨斑状玄武岩
II 级阶地堆积物	Q ₃ ^{pal}	4	冲洪积砂砾岩, 亚粘土
气象站组	Q ₂ q	824.58	碱流岩
老虎洞组	Q ₂ l	100.264	熔结角砾岩、火山熔岩、火山集块岩、橄榄玄武岩
白头山组	Q ₂ b	449	粗面岩, 晶屑凝灰岩, 熔结凝灰岩, 浮岩
漫江组	Q ₁ m	47.92	气孔状玄武岩, 薄板状玄武岩
III 级阶地堆积物	Q ₁ ^{pal}	3	冲洪积砾, 粗砂, 浮岩
军舰山组	N ₂ j	188.97	气孔状玄武岩, 薄板状玄武岩
船底山组	N ₁₋₂ c	72	橄榄玄武岩, 气孔状玄武岩, 玄武质集块岩
土门子组	N ₁₋₂ t	15	半固结的砂岩, 砾岩, 粉砂岩夹玄武岩
大拉子组	K ₁ dl	875.25	砂岩, 砂砾岩粉砂岩夹页岩、油页岩
石人组	J ₃ K ₁ s		下部砾岩、砂砾岩; 下部砂岩、粉砂岩、泥岩、页岩
屯田营组	J ₃ t	1074.2	安山质角砾熔岩, 安山岩, 凝灰岩
林子头组	J ₃ l	400 ~ 500	以凝灰质砾岩、砂岩、粉砂岩及中酸性凝灰岩为主
鹰嘴砬子组	J ₃ y		砾岩、砂岩、粉砂岩、页岩夹煤
果松组	J ₂₋₃ g	600	下部以砾岩、砂岩为主; 上部以安山岩、安山质凝灰熔岩为主
小河口组	T ₃ x	1073	砾岩, 砂岩、粉砂岩、页岩夹煤
长白组	T ₃ c	1200 ~ 1500	上部流纹岩、流纹质火山碎屑岩; 下部安山岩、安山质火山碎屑岩
孙家沟组	P ₂ sj		红色、砖红色泥岩、粉砂质泥岩夹长石砂岩
天宝山组	C ₂ t	1282	结晶灰岩、黑色粉砂岩、沙屑灰岩
马家沟组	O ₁ m	354	浅灰色白云质灰岩为主, 及竹叶状灰岩、豹皮灰岩
冶里组, 亮甲山组并层	O ₁ y-l	250	灰色白云质灰岩中薄层灰岩、黄绿色页岩及竹叶状灰岩
崮山组、炒米店组并层	Є ₃ g-c	85.4	紫色粉砂岩, 页岩夹薄层灰岩
张夏组	Є ₂ z	203.44	青灰色, 厚层鲕状生物碎屑灰岩, 灰色薄层状灰岩夹少量页岩
馒头组	Є ₁ m	191.56	紫红色白云岩、暗紫色粉砂岩、粉砂质页岩
八道江组	Z ₂ b	528	上部以灰黑色厚层灰岩为主, 夹薄层灰岩和粉砂岩, 下部为中薄层灰岩夹泥岩及钙质页岩、粉砂岩
万隆组	Z ₂ w	85	灰白色厚层石英砂岩, 夹薄层石英砂岩, 具铁质斑点
桥头组	Z ₁ q	82 ~ 129	杂色粉砂岩夹薄层石英砂岩
南芬组	Z ₁ n	50 ~ 82	紫红色、青灰色板状页岩, 夹薄层泥灰岩
钓鱼台组	Z ₁ d	180	灰、黄灰及灰紫色厚层夹薄层石英砂岩、有赤铁矿凸镜体
四岔子岩组	Pt ₂ s ²		中基性-中性火山岩为主, 上段以酸性火山岩、黑云斜长糜棱片岩为主
大栗子组	Pt ₁ d	> 1948	灰色、灰绿色及灰褐色绢云母片岩、绿泥石千枚岩、石英绢云母绿泥石千枚岩、夹薄层大理岩

续表 1

组	代号	厚度(m)	地层岩性
临江组	Pt ₁ l	500 ~ 550	上部为绢云母石英片岩、绿泥绢云母片; 下部以黄绿色、灰色千枚岩、变质砂岩为主
珍珠门组	Pt ₁ z	>270	灰白色薄层至厚层白云质大理岩,
蚂蚁河岩组	Pt ₁ m	599.46	斜长角闪岩, 含电气石变粒岩, 二云片岩
荒岔沟岩组	Pt ₁ h	524.9	含石墨大理岩, 炭质板岩及变粒岩
三道沟组	Ar ₂ s	1012	绢云石英片岩、绿泥角闪片岩、 夹斜长角闪岩及磁铁石英岩
杨家店组	Ar ₂ y	<100	黑云角闪变粒岩、斜长角闪岩
四道砬子组	Ar ₁ s	865 ~ 1435	混合岩、混合花岗岩、 麻粒岩、片麻岩、变粒岩、片岩和斜长角闪岩

表 2 长白山地区温泉统计 (陈昌亮, 2015; 李白希童, 2018; 李鹤, 2015; 闫佰忠, 2016; 赵容生, 2019)

Table 2 Table for hot spring in Changbai volcanic area (Chen, 2015; Li, 2018; Li, 2015; Yan, 2016; Zhao, 2019)

温泉	数量	出露岩性	经度(E)	纬度(N)	海拔(m)	温度(℃)
湖滨温泉群	—	中更新统粗面岩	128°03'45"	42°01'12"	2193	42 ~ 73
聚龙(长白)温泉群	165	中更新统粗面岩	128°03'30"	42°02'27"	约2000	40 ~ 82
锦江温泉群	108	中更新统粗面岩	127°59'33"	41°56'22"	1700	45 ~ 60
十八道沟温泉群	4	下更新统玄武岩和奥陶系灰岩	128°07'00"	41°25'04"	760	34 ~ 40
仙人桥(大营)温泉群	7	花岗斑岩岩脉和侏罗系流纹岩	127°11'12"	42°08'56"	630 ~ 640	44 ~ 62
老三队(临江)温泉群	26	老岭群变质岩	126°48'15"	41°57'29"	约600	30 ~ 35

表 3 长白山地区温泉热储地球化学温标估计温度 (陈昌亮, 2015; 闫佰忠, 2016; 单玄龙等, 2019; 刘慧等, 2015; 张希友和李国政, 2006; 祖金华等, 1999; Na et al., 2020)

Table 3 Estimated temperature of hot spring reservoir in Changbai Mountain area by geochemical temperature scale (Chen, 2015; Yan, 2016; Shan et al., 2019; Liu et al., 2015; Zhang and Li, 2006; Zu et al., 1999; Na et al., 2020)

水样来源	地球化学地热温标(℃)							平均值
	石英	玉髓	Na-K	Na-K-Ca	K-Mg	CO ₂ /H ₂	H ₂ /Ar	
聚龙温泉群	155 ~ 194.3	135.4 ~ 162.7	189.5 ~ 189.8	157	94	251.2	245	164.8
锦江温泉群	147.5 ~ 180.5	124.4 ~ 160.2	208.7 ~ 217.3	172.5	77.5	234.5	129.7	158.2
十八道沟温泉群	103.5 ~ 130.3	73.8 ~ 102.3	157.6 ~ 158	137.3	68.3	246.1	—	125.1
仙人桥镇温泉群	117.6 ~ 136	89 ~ 109	152	132	66	—	—	117.8

2 数据及方法

2.1 居里面设置

长白山地区地球物理数据丰富, 航磁数据精细, 学者们在此开展了一定数量的居里面深度计算, 对于长白山地区居里面深度目前存在两种认识, 一是认为长白山地区居里面深度在 20 ~ 27 km (Wang et al., 2018; 孙帮民, 2016; 田甜等, 2017; 胡旭芝等, 2006; 熊盛青等, 2016), 二是认为居里面深度在 15 km 以内 (苏晓轶等, 2019; 姜丹丹, 2021). 考虑到多种地球物理方法已经证实在长白山地区地壳中存在部分熔融体, 被解释为岩浆囊, 构成了异常热源 (张先康等, 2002; 杨卓欣等, 2005; Yan et al., 2023; Yi

et al., 2021). 居里面是温度的界面, 本身受异常热源影响, 能够一定程度上反映壳内岩浆囊的位置与温度. 根据长白山天池火山周围四口深井热测量数据 (Jiang et al., 2023), 研究推断岩浆囊深度 8 ~ 14 km, 大地电磁测深表明 (汤吉等, 2001; 仇根根等, 2014; 阮帅等, 2020), 长白山地区岩浆囊中心埋深深度约为 12 km. 基于以上不同地球物理方法, 估计长白山地区岩浆囊深度约为 10 ~ 20 km (Cheng et al., 2024). 岩浆囊长期的高温烘烤为地壳带来了额外的热源, 因此长白山地区应具有较高的地温梯度与大地热流分布. 较浅的居里面分布与该地区高热背景更加符合, 因此本文选取较浅的居里面深度结果作为大地热流计算参数并绘制居里面深度分布图 (图 2). 由图

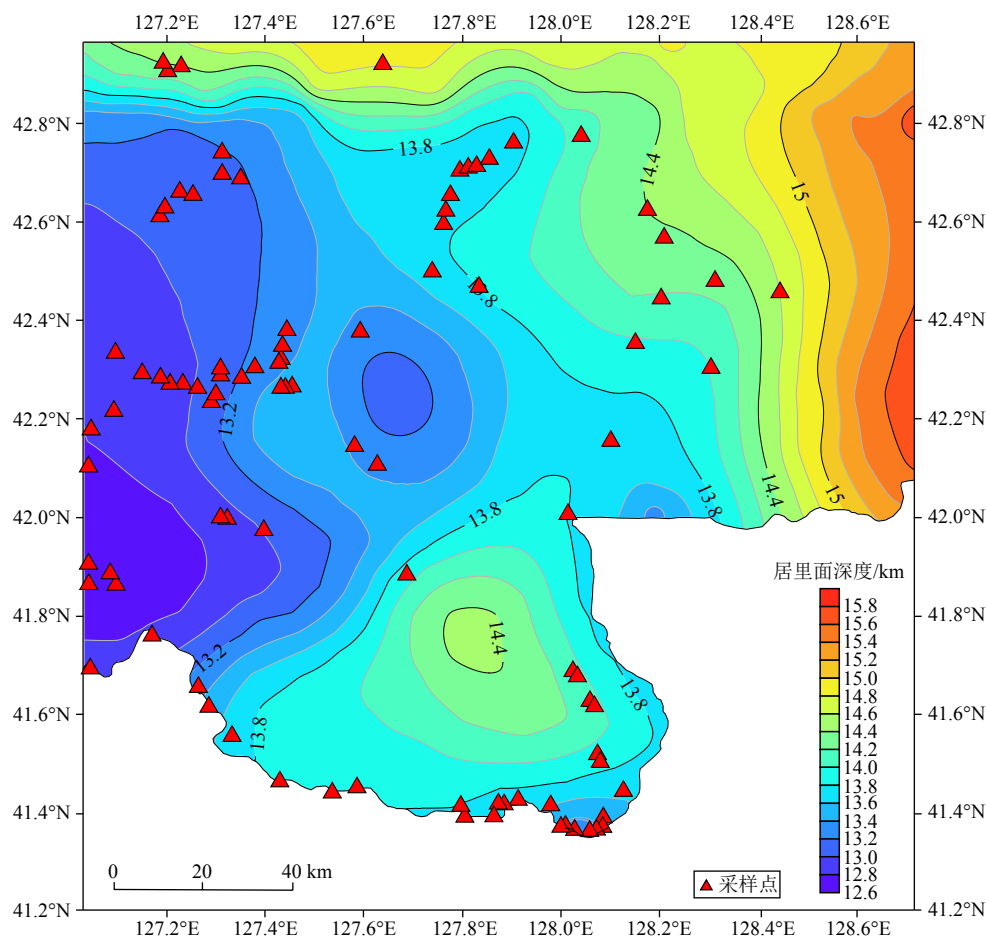


图2 长白山地区居里面深度及采样点分布(居里面深度引自苏晓轶等, 2019; 姜丹丹, 2021)

Fig. 2 Curie depth of Changbai Mountain area and distribution of sampling points
(Curie depth is quoted from Su et al., 2019; Jiang, 2021)

可以看出, 长白山地区居里面约为 12.8 ~ 15.8 km, 较全球平均居里面深度 20 km 较浅, 显示出较好的地热潜力。

居里面温度为地壳岩石中的铁磁性矿物因温度升高而由铁磁性变为顺磁性时的温度, 不同地区对应的居里面温度往往不同, 本文选取 550℃ 作为长白山地区居里面温度 (Li et al., 2017)。

本文选取 127.0°E—128.7°E、41.3°N—42.9°N 的中国境内区域作为研究区, 面积约为 36842.90 km² (面积根据软件 Arcgis pro 圈定选区计算得出)。在研究区范围中, 均匀获取共计 1068 个数据点所对应坐标、居里面深度及居里面温度, 作为本文大地热流计算数据。

2.2 岩石热物性

为补充长白山地区岩石热物性数据, 本文共测试了 93 个野外露头样品热导率 (图 2), 并对其中 42 个样品进行了生热率测试。岩石热导率测试于中国石油大学 (北京) 油气资源与工程全国重点实验室

采用瞬态平面热源法进行测试, 测试结果如表 4 所示。

样品生热率测试在核工业北京地质研究院分析测试研究中心进行, 铀和钍含量通过 NexION300D 等离子体质谱仪测试, 测试温度为 20.1℃, 相对湿度为 19%; 钾含量通过 Z-2000 原子吸收分光光度计测试, 测试温度为 21.1℃, 相对湿度为 28%。岩石生热率测试结果如表 5 所示。

2.3 居里面深度计算热流的方法与原理

本文根据长白山地区居里面温度及深度变化, 结合不同构造单元岩石热导率生热率等参数, 遵循一维傅里叶热传导定律, 进行一维热传导计算:

$$T = T_0 + \frac{q_0 Z}{K} - \frac{AZ^2}{2K}, \quad (1)$$

式中, T 为计算段底部温度, 单位为 ℃; Z 为计算段的地层厚度, 单位为 m; T_0 为计算段顶部温度, 单位为 ℃; K 为计算段平均热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; A 为计算段平均生热率, $\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$; q_0 为计算段顶部热流, 单位为 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 其余各地层顶部热流 q 计算公式如下:

表 4 长白山地区热导率柱
Table 4 Thermal conductivity column
in Changbai Mountain area

地层	岩性 (样品数量)	热导率 (W/(m·K))	地层平均热导率 (W/(m·K))
Q(第四系)	玄武岩(4)	1.3 ~ 2.1	2.65
	石英砂岩(6)	1.85 ~ 7.03	
	粉砂岩(1)	3.58	
	泥页岩(3)	1.75 ~ 3.65	
	粗面岩(1)	1.75	
N(新近系)	玄武岩(11)	1.37 ~ 2.88	1.63
K(白垩系)	砂岩(6)	1.30 ~ 2.61	2.19
	花岗岩(4)	2.76 ~ 2.92	
J(侏罗系)	安山岩(3)	1.54 ~ 2	2.44
	凝灰岩(4)	2.16 ~ 3.05	
	砂岩(4)	2.0 ~ 3.74	
	泥岩(1)	2.22	
	花岗岩(1)	2.88	
T(三叠系)	火山岩(3)	1.92 ~ 4.27	2.56
	砂岩(1)	2.31	
P(二叠系)	花岗岩(6)	1.86 ~ 3.16	2.83
	粉砂岩(1)	3.36	
C(石炭系)	粉砂岩(1)	3.16	2.82
	煤炭(1)	2.47	
O(奥陶系)	灰岩(1)	4.98	4.98
Є(寒武系)	白云岩(2)	2.15 ~ 2.94	2.82
	灰岩(2)	3.18 ~ 3.46	
	粉砂岩(1)	3.5	
	页岩(1)	1.9	
Z(震旦系)	灰岩(3)	2.63 ~ 4.62	3.41
基底	片麻岩(7)	1.32 ~ 3.09	2.91
	花岗岩(9)	2.44 ~ 3.16	
	片岩(1)	2.56	
	大理岩(2)	4.37 ~ 5.09	
	辉长岩(1)	2.8	
	千枚岩(1)	2.14	

$q = q_0 - ZA,$ (2)

式中, q_0 , Z 及 A 值与公式 (1) 相同, (2) 式是假定岩石热导率与生热率在整个计算段中均匀分布, 未考虑由于岩性与深度的不同导致的热导率及生热率的变化. 为获取精度更高的温度及热流数据, 本研究对每个地层结构层赋予对应的常温热导率及生热率 (图 3), 之后进行各地层底界的温度及热流计算. 图 3

表 5 长白山地区生热率柱
Table 5 Heat generation rate column
in Changbai Mountain area

地层	岩性 (样品数量)	平均密度 (kg·m ⁻³)	生热率 (μW·m ⁻³)	平均生热率 (μW·m ⁻³)
Q(第四系)	玄武岩(1)	2690	0.73	1.65
	石英砂岩(2)	2620	0.42 ~ 1.82	
	泥页岩(1)	2680	2.02	
	粗面岩(1)	2540	3.24	
N(新近系)	玄武岩(2)	2480	0.27 ~ 0.98	0.63
K(白垩系)	砂岩(3)	2720	0.82 ~ 1.56	1.86
	花岗岩(2)	2540	1.28 ~ 4.08	
J(侏罗系)	安山岩(1)	2710	0.64	1.09
	凝灰岩(1)	2710	0.91	
	砂岩(1)	2380	0.3	
	花岗岩(1)	2670	2.51	
T(三叠系)	火山岩(1)	2610	2.18	2.04
	砂岩(1)	2680	1.9	
P(二叠系)	花岗岩(5)	2585	0.78 ~ 2.57	1.42
	粉砂岩(1)	2500	0.93	
C(石炭系)	粉砂岩(1)	2730	2.57	2.57
O(奥陶系)	灰岩(1)	2820	0.18	0.18
Є(寒武系)	灰岩(2)	2710	0.32 ~ 2.91	1.98
	粉砂岩(1)	2720	1.84	
	页岩(2)	2790	1.91 ~ 2.91	
	灰岩(1)	2550	0.88	
Z(震旦系)	灰岩(1)	2550	0.88	0.88
基底	片麻岩(1)	2590	1.69	1.43
	花岗岩(5)	2600	0.54 ~ 2.81	
	片岩(1)	2810	2.35	
	大理岩(1)	2830	0.04	
	辉长岩(1)	2630	1.16	
	千枚岩(1)	2800	0.18	

中, 设地表温度 T_0 为 15℃, T_1 、 T_{n-1} 、 T_n 及 q_1 、 q_{n-1} 、 q_n 计算公式如下:

$T_1 = T_0 + \frac{q_0 Z_1}{K_1} - \frac{A_1 Z_1^2}{2K_1},$ (3)

$T_{n-1} = T_{n-2} + \frac{q_{n-2} Z_{n-1}}{K_{n-1}} - \frac{A_{n-1} Z_{n-1}^2}{2K_{n-1}},$ (4)

$T_n = T_{n-1} + \frac{q_{n-1} Z_n}{K_n} - \frac{A_n Z_n^2}{2K_n},$ (5)

$q_1 = q_0 - Z_1 A_1,$ (6)

$q_{n-1} = q_{n-2} - Z_{n-1} A_{n-1},$ (7)

$q_n = q_{n-1} - Z_n A_n,$ (8)

式中, T_n 、 Z_n 、 A_n 、 K_n 、 q_n 为对应计算段底部所对应

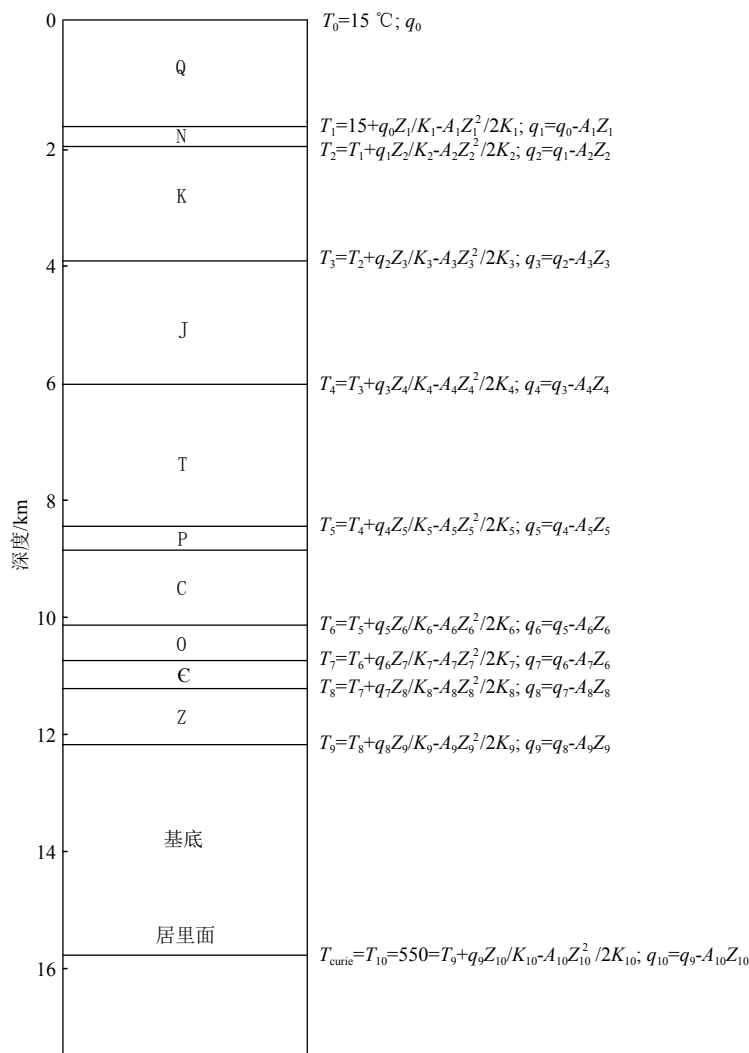


图 3 长白山地区基于居里面的热流计算过程

Fig. 3 Heat flow calculation process based on Curie surface in Changbai Mountain area

的温度, 厚度, 生热率, 热导率及热流, 单位分别如下:

为 $^\circ\text{C}$, m, $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$. 对于热流, 将公式 (7) 代入公式 (8), 得到如下公式:

$$q_n = q_{n-2} - (Z_{n-1}A_{n-1} + Z_nA_n), \quad (9)$$

再根据公式 (2) 将 q_{n-2} 逐级降阶至 q_0 , 得到公式

对于温度, 将公式 (4) 代入公式 (5), 再将公式 (10) 代入公式 (5) 以将 q 降阶至 q_0 , 得到公式如下:

$$q_n = q_0 - \sum_{i=1}^n Z_i A_i. \quad (10)$$

$$T_n = T_{n-2} + \left(q_0 - \sum_{i=1}^{n-1} Z_i A_i \right) \frac{Z_n}{K_n} + \left(q_0 - \sum_{i=1}^{n-2} Z_i A_i \right) \frac{Z_{n-1}}{K_{n-1}} - \left(\frac{A_n Z_n^2}{2K_n} + \frac{A_{n-1} Z_{n-1}^2}{2K_{n-1}} \right), \quad (11)$$

化简, 得

$$T_n = T_{n-2} + q_0 \cdot \left(\frac{Z_n}{K_n} + \frac{Z_{n-1}}{K_{n-1}} \right) - \left(\frac{Z_n}{K_n} \sum_{i=1}^{n-1} Z_i A_i + \frac{Z_{n-1}}{K_{n-1}} \sum_{i=1}^{n-2} Z_i A_i \right) - \left(\frac{A_n Z_n^2}{2K_n} + \frac{A_{n-1} Z_{n-1}^2}{2K_{n-1}} \right), \quad (12)$$

重复上述计算流程, 将 T_{n-2} 降阶至 T_0 , 得

$$T_n = T_0 + q_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{K_i} - \left(\frac{Z_n}{K_n} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} Z_i \cdot A_i + \frac{Z_{n-1}}{K_{n-1}} \sum_{i=1}^{n-2} Z_i \cdot A_i + \dots + \frac{Z_2}{K_2} \cdot Z_1 A_1 \right) - \sum_{i=1}^n \frac{A_i Z_i^2}{2K_i}, \quad (13)$$

其中, T_n 为居里面温度, 本文取 550°C , T_0 为地表温度, 本文取 15°C , 全公式只有地表热流 q_0 为未知数, 将公式 (13) 移项, 得

$$q_0 = \frac{\left(T_n - T_0 + \left(\frac{Z_n}{K_n} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} Z_i \cdot A_i + \frac{Z_{n-1}}{K_{n-1}} \cdot \sum_{i=1}^{n-2} Z_i \cdot A_i + \dots + \frac{Z_2}{K_2} \cdot Z_1 A_1\right) + \sum_{i=1}^n \frac{A_n Z_n^2}{2K_n}\right)}{\sum_{i=1}^n \frac{Z_n}{K_n}}. \quad (14)$$

由此, 本文得到了适用于任意数据完备的热物性柱的地表热流 q_0 计算公式, 计算地表热流 q_0 后, 根据公式 (14) 计算出每一层对应温度. 根据温度计算结果, 以每层的平均温度及地层压力对每个地层结构进行地层热导率校正, 之后以校正后的热导率重新计算各层底部温度及热流, 得到经过校正的各层底部温度及热流, 作为本研究最后得到的结果.

2.4 热导率值校正

准确了解地热背景对于地热勘探及资源评价有着关键作用, 学者们常用从地热钻井中获取的大量深部实测温度来刻画研究区地热资源分布. 然而, 利用钻井数据来评价研究区地热资源往往有较强的地区局限性. 长白山地区缺乏地热钻井, 难以获取足够的地下温度数据, 因此, 稳态导热条件下, 获取准确可信的岩石热导率、生热率数据来计算地下温度及大地热流尤为重要. 但目前, 通常的岩石热导率数据是于实验室中常温常压条件下测出. 为得到原位热导率, 需要根据样品原位温度及压力对热导率进行校正 (Norden et al., 2020).

随着深度的增加, 岩石的原位温度及压力均会增加. 通常而言, 热导率随温度的增加而减少, 随压力的增加而增加. 由于随着深度的增加, 热导率因压力与温度的变化趋势是截然相反的, 故在热模拟中很容易忽视原位热导率校正. 但在大部分热导率校正方法中, 热导率对温度与压力的依赖性并不相同, 仅因为热导率因压力与温度的变化趋势相反而不进行原位热导率校正的热导率数据是不准确的. 随着温度与压力的增加, 温度对热导率的影响往往远大于压力对热导率的影响 (Vosteen and Schellschmidt, 2003; Rühaak et al., 2010; Fuchs and Balling, 2016; Lemenager et al., 2018), 故本文对岩石热导率的校正仅进行温度热导率校正.

由于不同岩性及矿物的热导率对温度的敏感性不同, 温度的热导率校正往往需要根据不同岩性应用不同的热导率校正公式. 本文考虑到长白山地区地层复杂的岩性, 选择将岩样分为沉积岩、火成岩、变质岩分别进行热导率温度校正. 考虑到本次

岩样常温热导率范围及热导率校正公式适用的温度范围, 最终选择 (Vosteen and Schellschmidt, 2003) 提出的校正公式:

$$K_T = K_{0^{\circ}\text{C}} / \left\{ 0.99 + T \left[0.0034 - (0.0039 / K_{0^{\circ}\text{C}}) \right] \right\}, \quad (15)$$

$$K_{0^{\circ}\text{C}} = 0.54 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}} + 0.5 \cdot \sqrt{1.16 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}}^2 - 0.39 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}}}, \quad (16)$$

$$K_T = K_{0^{\circ}\text{C}} / \left\{ 0.99 + T \left[0.0030 - (0.0042 / K_{0^{\circ}\text{C}}) \right] \right\}, \quad (17)$$

$$K_{0^{\circ}\text{C}} = 0.53 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}} + 0.5 \cdot \sqrt{1.13 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}}^2 - 0.42 \cdot K_{25^{\circ}\text{C}}}, \quad (18)$$

其中公式 (15)、(16) 适用于沉积岩; 公式 (17)、(18) 适用于火成岩及变质岩. K_T 为对应温度下的热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; $K_{0^{\circ}\text{C}}$ 为温度为 0°C 时对应的热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; $K_{25^{\circ}\text{C}}$ 为 25°C 时对应的热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为对应温度, 单位为 $^{\circ}\text{C}$.

相较于温度热导率校正, 压力热导率校正公式相对简单, 本文选择 Fuchs and Förster (2014) 提出的同时适用于沉积岩、火成岩以及变质岩的压力热导率校正公式:

$$K_P = (1.095 \cdot K_{0 \text{ MPa}} - 0.172) \cdot P^{(0.0088 \cdot K_{0 \text{ MPa}} - 0.0067)}, \quad (19)$$

其中 K_P 为对应压力下的热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; $K_{0 \text{ MPa}}$ 为压力为 0 MPa 时对应的热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; P 为对应压力, 单位为 MPa .

为验证热导率校正对研究区深部温度及大地热流计算的必要性, 假定在以下理想模型中进行深部温度及大地热流对比计算 (图 4a), 在模型中, 假定存在五层地层, 每层均为热导率为 $2.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、生热率为 $1 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 、密度为 $2600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、厚度为 4000 m 的理想地层, 地表温度为 15°C , 地底温度为 550°C . 在该模型中分别应用未校正热导率、温度校正热导率、压力校正热导率、温压校正热导率进行温度热流计算, 得到对比图, 如图 4b 所示.

从图 4b 中可以看出, 除了模型设定的顶部温度与底界温度, 应用校正热导率计算的大地热流与各地层底界温度均小于应用未校正热导率计算的底界

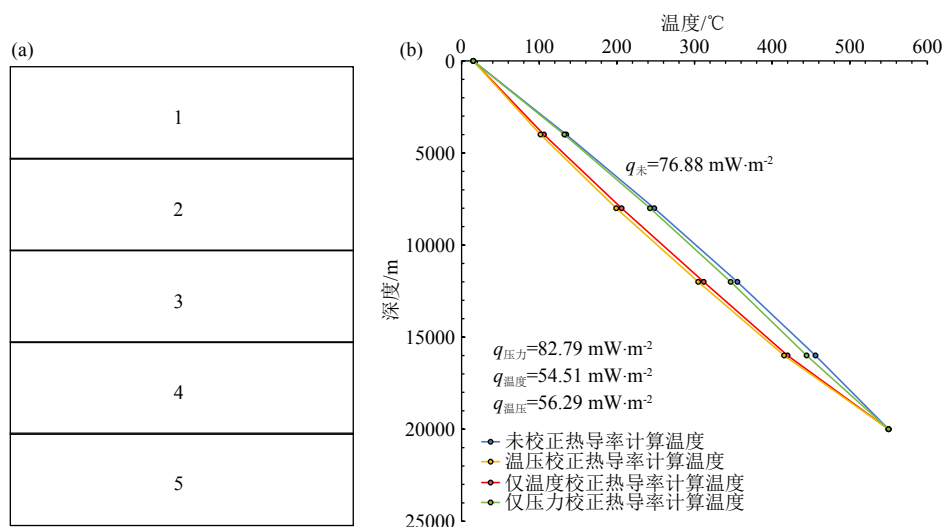


图 4 (a) 理想地层模型; (b) 应用未校正热导率、温度校正热导率及温压校正热导率计算的温度与大地热流对比
Fig. 4 (a) Hypothetical formation model; (b) Temperature and heat flow comparison calculated by uncorrected thermal conductivity, thermal conductivity corrected by temperature, thermal conductivity corrected by temperature and pressure

温度与大地热流, 其中温压校正热导率计算温度与温度校正热导率计算温度几乎一致, 压力校正热导率计算温度与未校正热导率计算温度也几乎一致。而温度校正热导率计算底界温度与未校正热导率计算底界温度相比平均降低 14.6%; 大地热流平均降低 33.8%, 与为校正热导率计算温度存在较大差距。由此可以看出, 在一维热传导计算中, 温度热导率校正会较大影响计算出的地温梯度与大地热流, 而压力校正对热导率的影响很小, 远低于温度对热导率的影响。

3 结果

3.1 热导率校正结果

根据公式 (15)–(18), 对表 4 中各层热导率进行校正 (见表 6)。

3.2 大地热流

将表 6 中各地层温度校正热导率作为地层原位热导率代入公式 (14), 即得到各计算点所对应地表热流, 结果如图 5 所示。长白山地区地表热流在 $72.9 \sim 86.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 与图 1 中 C-2 地热井实测热流 $77 \pm 5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、C-3 地热井实测热流 $76 \pm 1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、C-4 地热井实测热流 $78 \pm 4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 相吻合, 说明本研究的热流计算方法在热对流及岩浆囊供热影响较小的地区具有良好的预测效果。热流整体呈现由西向东逐渐减小的特征, 该特征与居里面深度分布特征 (图 2) 显示出良好的负相关性。

3.3 150℃ 高温地热等温面深度

根据一维热传导方程, 计算各点 150℃ 对应深度,

表 6 长白山各地层校正热导率
Table 6 Corrected thermal conductivity of different layers in Changbai Mountain

地层	平均热导率($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	温度校正热导率($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)
Q	2.65	2.65
N	1.63	1.61
K	2.19	1.90
J	2.44	1.79
T	2.56	1.78
P	2.83	1.87
C	2.82	1.68
O	4.98	2.63
Є	2.82	1.63
Z	3.41	1.80
基底	2.91	1.69

计算结果如图 6。长白山地区 150℃ 高温地热等温面埋深在 3216.9 ~ 4228.1 m 之间, 总体呈现西浅东深、北浅南深的特征, 其中, 西浅东深的整体特征与大地热流分布特征具有良好相关性, 北浅南深的整体特征可能与长白山地区南部较高的海拔高度有关。长白山地区整体 150℃ 高温地热等温面在 5000 m 以浅, 显示出较好的地热资源开采条件及潜力。

4 讨论

4.1 热导率校正对热流及温度计算的影响

在热流计算中, 若地壳中热量传递符合一维稳

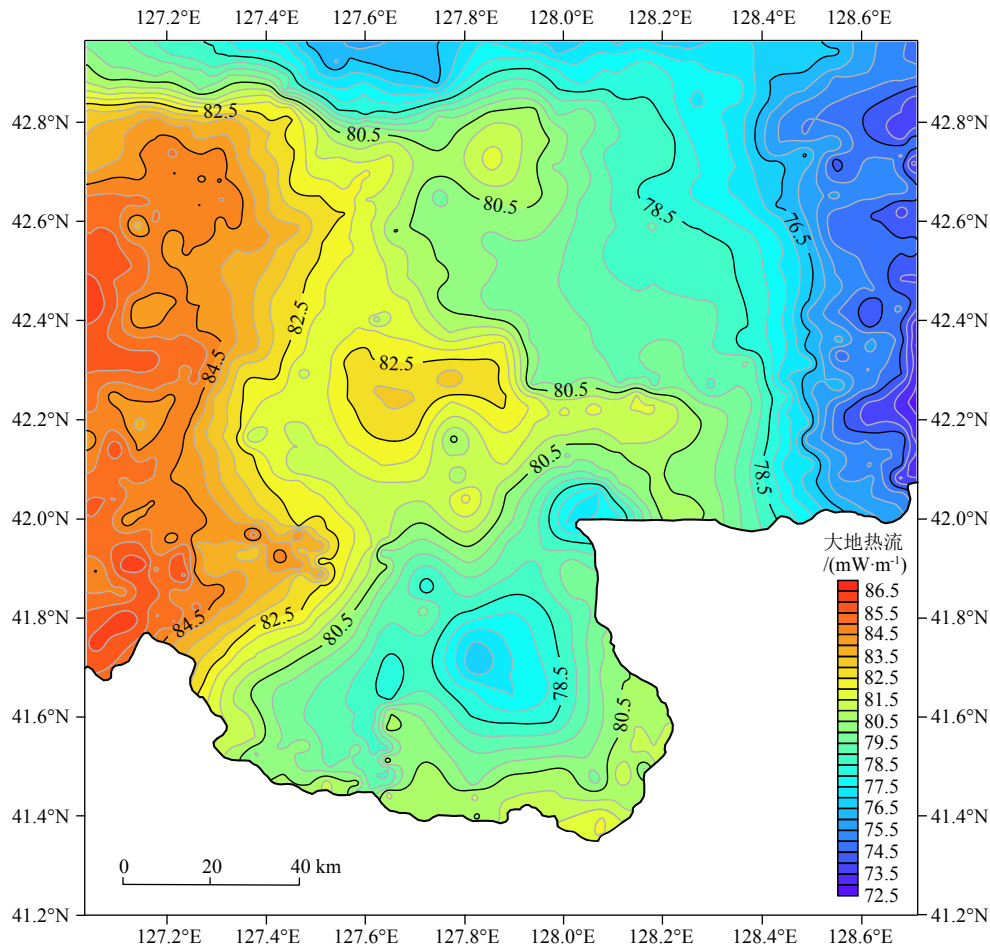


图 5 长白山地区地表热流分布图

Fig. 5 Surface heat flow distribution in Changbai Mountain area

态热传导的傅里叶定律则热流 q 的计算可以适用如下公式:

$$q = K \cdot G, \quad (20)$$

其中, q 为大地热流, 单位为 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$; K 为测温段平均热导率, 单位为 $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$; G 为测温段平均地温梯度, 单位为 $^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$. 假设整个岩石热物性柱为一整段, 这整段的顶部温度为固定值地表温度, 底部温度为固定值居里面温度, 故在这一整段中, 地温梯度 G 为固定值. 在 G 为固定值的情况下, 岩石平均热导率 K 与大地热流 q 成正相关. 在一般情况下, 温度对热导率的影响会大于压力对热导率的影响, 从而导致热导率随温压的增加会出现与温度相似的相关性, 即随着温度与压力的增加, 温压校正热导率会使热导率减小. 因此, 根据温压校正热导率计算出的地表热流会小于根据常温热导率所计算的大地热流.

根据常温热导率计算, 长白山地区地表热流在 $96.4 \sim 115.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 整体上远大于根据温压校正热

导率计算出的地表热流范围 $72.9 \sim 86.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 为了比较两项结果的准确性, 本文将以实测数据与计算数据进行对比. 长白山地区共有四口钻井测温数据 (Jiang et al., 2023), 分别为位于长白山天池火山附近的 C-1 井以及其周边的 C-2、C-3、C-4 井, 其测温曲线如图 7.

从图中测温曲线可以看出, 这四口钻井均具有一定热对流效应, 其中 C-1 井热通量为 $270 \pm 16 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 热对流效应远超其他三口钻井, C-2、C-3、C-4 井虽然也存在一定热对流效应, 但仍以热传导为主. 大地热流一般指单位面积, 单位时间内由地球内部以热传导的方式传输至地表, 而后散发到太空中的热量, 其中并不包括热对流带来的额外热通量, 故本文并未选择 C-1 井进行对比, 而是选取 C-2、C-3、C-4 井温度曲线与实测大地热流与计算结果进行对比, 结果如图 8(a,b,c) 所示.

从图 8 可以看出, 以校正热导率计算的地温梯度及热流更接近与钻井实测地温梯度及热流, 其中 C-2 井实测热流为 $77 \pm 5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 校正热导率计算

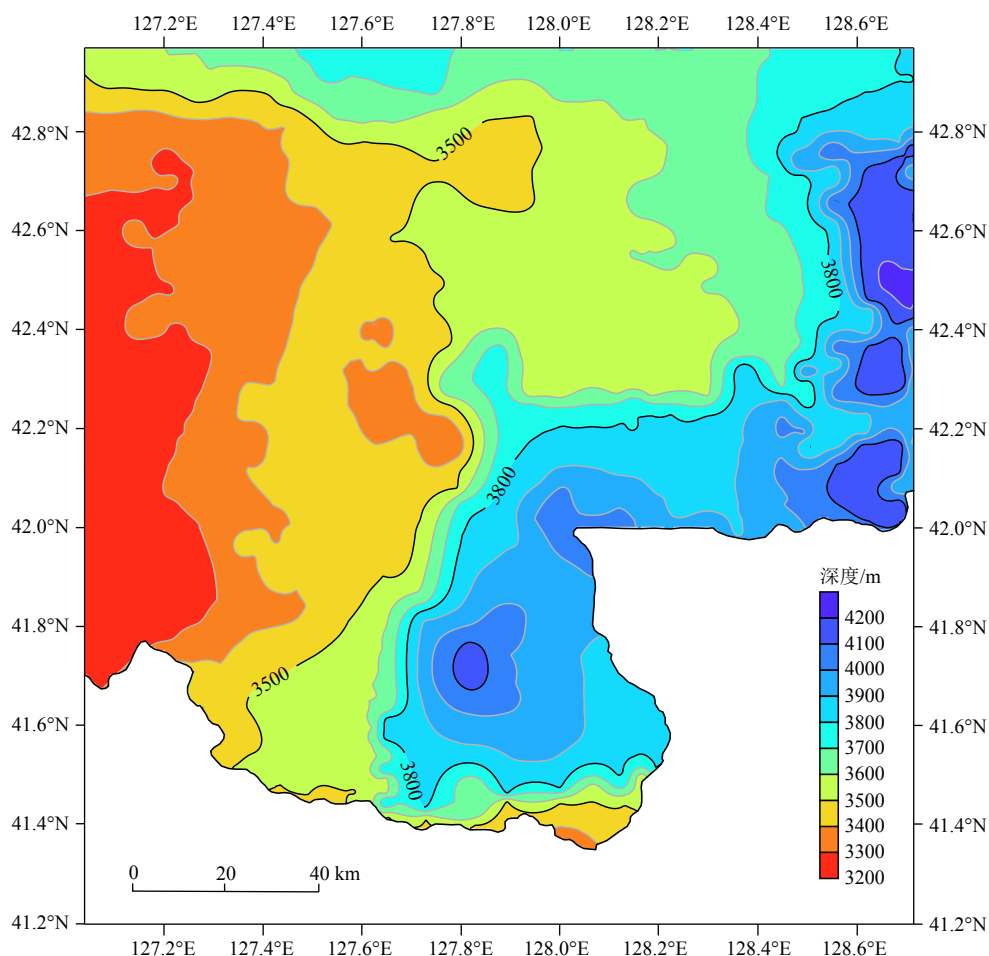


图 6 长白山地区 150℃ 高温地热等温埋深分布图

Fig. 6 Distribution map of 150°C temperature geothermal isothermal buried depth in Changbai Mountain area

热流为 $80.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 常温热导率计算热流为 $109.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; C-3 井实测热流为 $76 \pm 1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 校正热导率计算热流为 $81.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 常温热导率计算热流为 $109.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; C-4 井实测热流为 $78 \pm 4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 校正热导率计算热流为 $78.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 常温热导率计算热流为 $106.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 在这三个井测数据中, 校正热导率所引起的平均热流校正量约为 24.8%, 在进行热导率校正后, 计算出大地热流与实测大地热流几乎一致; 对于温度曲线, 本文分别计算校正热导率温度曲线及常温热导率计算温度曲线与实测温度曲线的平均拟合优度 (R^2), 以衡量两种计算温度曲线与实测温度曲线的拟合程度. 结果显示, 校正热导率计算温度曲线与实测数据平均拟合优度约为 0.847, 常温热导率计算温度曲线与实测数据平均拟合优度约为 0.712, 两者具有较大差异, 由此可以看出准确的热导率温度校正对温度热流计算具有较大的影响. 而校正热导率所计算的温度曲线无法完全与测温曲线相拟合是因为在该三井均存在一定程度

热对流效应, 导致温度曲线发生一定波动, 无法与根据热传导方法计算的温度曲线完全拟合.

4.2 不同居里面深度对地层温度计算的影响

居里面深度的选择对于地区温度分布与大地热流值的计算十分重要. 在同样条件下, 选取不同的居里面深度计算温度分布与大地热流会带来巨大差异, 为验证本文选取居里面深度所计算的可信度, 本文选取 C-2、C-3、C-4 井作为计算点, 对比其在居里面深度为 20 km 时的温度热流计算结果与本文得出计算结果的差异 (图 9). 结果显示, 在居里面深度为 20 km 的条件下, C-2 井大地热流约为 $63.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; C-3 井大地热流约为 $63.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; C-4 井大地热流约为 $63.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 三井计算结果均小于前文提到的实测大地热流数据, 而本文所选居里面深度计算出的大地热流值与实测数据几乎一致; 而该条件下的计算温度曲线较本文计算温度更低, 在实测范围内, 其与实测温度曲线拟合优度约为 0.896, 较本文计算结果更高, 但由于其地温梯度较低, 随着

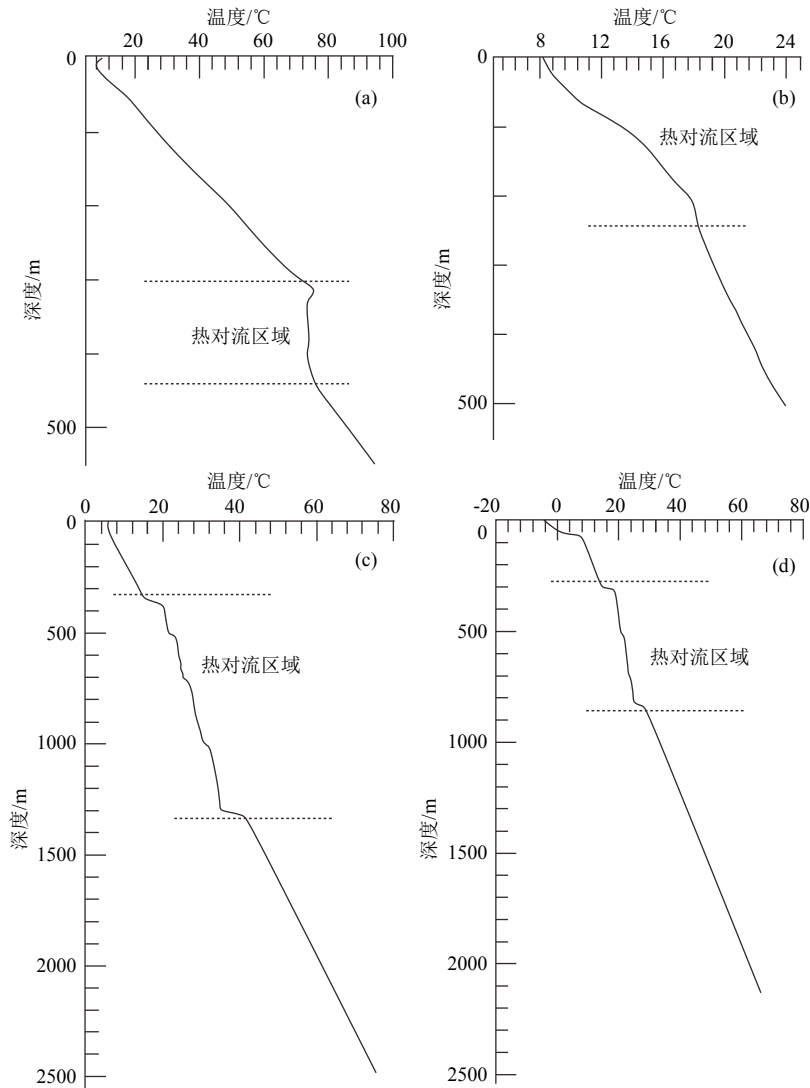


图 7 长白山地区钻井实测测温曲线 (Jiang et al.,2023)

(a) C-1 井; (b) C-4 井; (c) C-2 井; (d) C-3 井.

Fig. 7 Temperature measurement curve of drilling in Changbai Mountain area (Jiang et al.,2023)

(a) C-1; (b) C-4; (c) C-2; (d) C-3.

深度的加深,该温度曲线与实测温度曲线延伸的温度曲线拟合度逐渐减小,直到低于本文所选居里面深度所计算的温度曲线.由此可见,本文选取的居里面深度与长白山地区的实际背景更加吻合,结果具有较好的可信度.

4.3 热流分布与断裂分布的关系

在地热系统中,断裂常被视作热量从深部向上运移的良好通道,但由于断层性质的不同,断裂对大地热流的分布的影响也不尽相同,其中张性断裂可作为导热导水通道,而压性断裂则可以起到隔绝作用.长白山地区发育有大量断裂带,其产状以 NW 向,NE 向为主 (图 10).前人在长白山地区开展了地应力测量,其测量结果表明长白山地区现今最大水

平主应力方向为 NW 向,并存在随着深度的增大而增大的趋势 (张春山等,2016).同时,从区域动力学背景来看,由于太平洋板块古近纪晚期以来的持续俯冲,长白山地区整体处于由 SE 向 NW 方向的构造挤压背景 (赵容生,2019; Zhao et al.,2023; Tang et al.,2014),从而使与之垂直的 NE 向断裂大多为压性断裂,而 NW 与 N 向断裂大多为张性断裂 (F1-F6).

图 10 中,在整体热流由西向东逐渐减小的大地热流分布下,F8、F9、F10 将整个研究区分为 4 个热流分布区,其中区域 1 平均热流约为 $83.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$;区域 2 平均热流约为 $80.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$;区域 3 平均热流约为 $78.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$;区域 4 平均热流约为 $75.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$.在区域 2 中,F1 与 F2 分布的区域 6 与

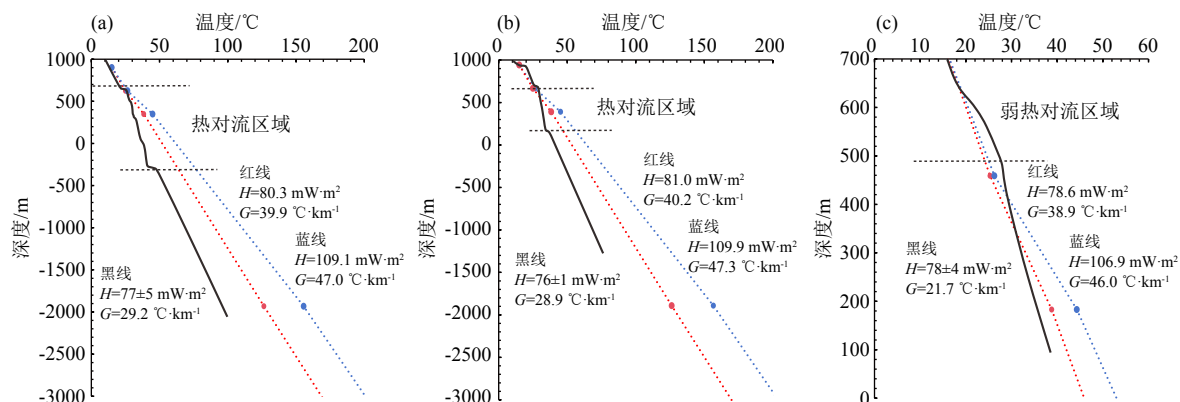


图 8 长白山地区井测温度及热流与计算热流对比

其中红线为以校正热导率计算的温度及热流; 蓝线为以常温热导率计算的温度及热流; 黑线为测温曲线。黑线测温曲线引用自 Jiang 等 (2023)。

Fig. 8 Comparison of well measured temperature and heat flow with calculated heat flow in Changbai Mountain area

The red line is the temperature and heat flow calculated based on the corrected thermal conductivity. The blue line is the temperature and heat flow calculated by the thermal conductivity at room temperature. The black line is the well temperature line. Well temperature line quoted from Jiang et al (2023).

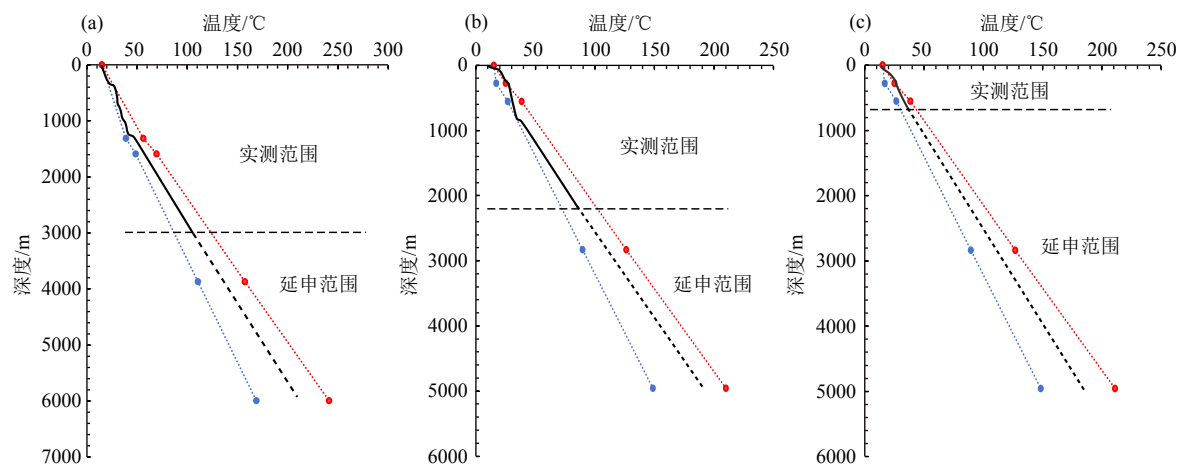


图 9 (a) C2 井不同居里面温度曲线对比; (b) C3 井不同居里面温度曲线对比; (c) C4 井不同居里面温度曲线对比

图中红色虚线为本文计算温度曲线, 蓝色虚线为居里面深度为 20 km 时计算的温度曲线,

黑色实线为实测温度曲线, 黑色虚线为实测温度曲线延伸。

Fig. 9 (a) Comparison of temperature curves in different Curie depth of well C2; (b) Comparison of temperature curves in different Curie depth of well C3; (c) Comparison of temperature curves in different Curie depth of well C4

Red dashed line represents the temperature curve calculated in this paper, blue dashed line represents the temperature curve calculated when Curie depth is 20 km, black solid line is the measured temperature curve, and the black dashed line is the extension of the measured temperature curve.

F3 至 F6 分布的区域 5 存在热流异常高值, 其中区域 6 的平均热流约为 $80.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; 区域 5 平均热流约为 $81.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 这些数值均高于区域 2 平均热流 $80.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 以及长白山地区整体平均热流值 $80.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。由此可见, 本文计算热流分布与断层性质相耦合, 其中张性断层分布区域具有较高热流, 闭合断层作为热流分布界限分割热流区域。

5 结论

(1) 本文根据长白山地区样品实测数据, 建立了

长白山地区岩石热导率柱与生热率柱, 并采用温度热导率校正方法对长白山岩石热导率柱进行了校正, 在假定的理想模型中, 温度校正热导率计算底界温度与未校正热导率计算底界温度相比平均降低 14.6%; 大地热流平均降低 33.8%; 温压校正热导率计算结果与温度热导率计算结果几乎相同, 显示出热导率的温度校正对计算地下温度及大地热流具有较大影响, 以及温度对热导率的影响远大于压力对热导率的影响。

(2) 本文依据一维稳态热传导方程, 代入温度校正热导率, 计算得出长白山地区大地热流在 $72.9 \sim$

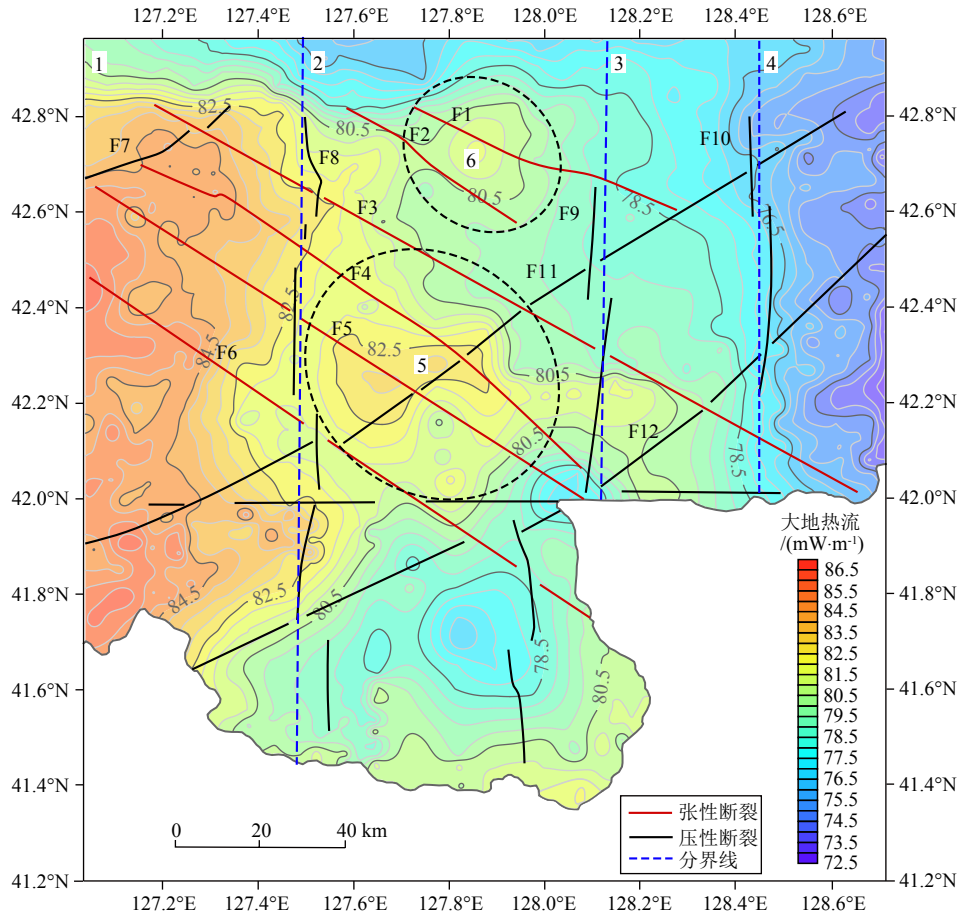


图 10 长白山地区热流分布及断裂分布 (断裂分布引用自赵容生, 2019)

Fig. 10 Heat flow distribution and fault distribution in Changbai Mountain area (Fault distribution quoted from Zhao, 2019)

86.5 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间, 150°C 高温地热等温面埋深在 3216.9 ~ 4228.1 m, 大地热流较高的同时 150°C 高温地热等温面埋深较浅, 显示出较好的地热潜力, 计算结果与井测数据相符, 具有较好可信度。

(3) 长白山地区地温整体较高, 有利高温地热资源主要分布于长白山地区西部以及长白山地区北西向断裂周边, 分布与张性断裂分布及居里面分布具有较强相关性。

References

- Aydın O, Karat H O, Koçak A. 2005. Curie-point depth map of turkey. *Geophys. J. Int.*, 162(2): 633-640.
- Bilim F, Akay T, Aydemir A, et al. 2016. Curie point depth, heat-flow and radiogenic heat production deduced from the spectral analysis of the aeromagnetic data for geothermal investigation on the Menderes massif and the Aegean region, western Turkey. *Geothermics*, 60: 44-57.
- Chen C L. 2015. Study on the reserve regularity and hydrochemical characteristics of geothermal resources in Changbai mountain basalt region [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Cheng C J, Liu R C, Wu H, et al. 2024. Geothermal resource potential from intraplate magmatic-volcanic activities: a case study of Mt. Changbai in northeast China. *Geothermics*, 122: 103053, doi: 10.1016/j.geothermics.2024.103053.
- Fuchs S, Balling N. 2016. Improving the temperature predictions of subsurface thermal models by using high-quality input data. Part 2: a case study from the danish-german border region. *Geothermics*, 64: 1-14.
- Fuchs S, Förster A. 2014. Well-log based prediction of thermal conductivity of sedimentary successions: A case study from the North German basin. *Geophys. J. Int.*, 196(1): 291-311.
- Gao G M, Hou J, Kang G F, et al. 2019. Crustal thickness and lithospheric thermal state beneath the Junggar Basin and adjacent mountain ranges, northwest China. *J. Asian Earth Sci.*, 184: 103802, doi: 10.1016/j.jseas.2019.02.024.
- Hu S B, Huang S P, He L J, et al. 2013. The lithospheric thermal structure and geothermal resource potential in Mainland China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 87(S1): 36.
- Hu X Z, Xu M J, Xie X A, et al. 2006. A characteristic analysis of aeromagnetic anomalies and curie point isotherms in northeast China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 49(6): 1674-1681.
- Huang J J, Xu Z H, Sun N R, et al. 2020. Evaluation of geothermal resource potential in the Shiqidaogou area of Changbai Mountain, basalt-

- covered region of Changbai Mountain, Jilin Province. *Scientific and Technological Innovation Information* (in Chinese), (34): 157-158.
- Jiang D D. 2021. Inversion of gravity and magnetic data and geothermal genesis in Changbai mountain volcanic area [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(8): 2892-2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- Jiang G Z, Hu S B, Cui T R, et al. 2023. Thermal structure beneath Changbaishan Volcano, northeastern Asia: New insights from temperature logging and numerical modelling. *Geophys. J. Int.*, 235(2): 1228-1239.
- Jiang Z M. 2013. The study of integrated geophysics for geothermal resources exploration in Changbai Mountain [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Jiao L G. 2014. Study seismicity by satellite lithospheric magnetic field and Curie isotherm depth inversion [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration.
- Kyong-Song R, Hammond J O S, Chol-Nam K, et al. 2016. Evidence for partial melt in the crust beneath Mt. Paektu (Changbaishan), democratic People's Republic of Korea and China. *Sci. Adv.*, 2(4): e1501513, doi: 10.1126/sciadv.1501513.
- Lemenager A, O'Neill C, Zhang S, et al. 2018. The effect of temperature-dependent thermal conductivity on the geothermal structure of the Sydney basin. *Geotherm. Energy*, 6(1): 6.
- Li B X T. 2018. Study on the evaluation and exploitation of geothermal resources in Changbai Mountain basalt area [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Li C F, Lu Y, Wang J. 2017. A global reference model of Curie-point depths based on EMAG2. *Sci. Rep.*, 7: 45129, doi: 10.1038/srep45129.
- Li H. 2015. Application of CSAMT to geothermal exploration in Songjianghe area [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Liu H, Zhao Y, Rao W D, et al. 2015. Geothermal resource evaluation of Julong spring group in Changbai mountains of Jilin province. *Jilin Geology* (in Chinese), 34(3): 126-130.
- Liu Y J. 2014. Development, Utilization, and Protection of Geothermal Resources in Changbai Mountain from the Perspective of China's Geothermal Resources. *Scientific Chinese*(3X).
- Liu Z J, Han S L, Shi Y Z. 1996. Geothermal resources and development of geothermal power generation technology in China. *Electric Power* (in Chinese), 29(12): 33-37.
- Manea M, Manea V C. 2011. Curie point depth estimates and correlation with subduction in Mexico. *Pure Appl. Geophys.*, 168(8-9): 1489-1499.
- Martos Y M, Catalán M, Jordan T A, et al. 2017. Heat flux distribution of Antarctica unveiled. *Geophys. Res. Lett.*, 44(22): 11417-11426.
- Maule C F, Purucker M E, Olsen N, et al. 2005. Heat flux anomalies in Antarctica revealed by satellite magnetic data. *Science*, 309(5733): 464-467.
- Na J, Yan B Z, Chi B M, et al. 2020. The estimation of reservoir temperature for thermal springs using the integrated multicomponent geothermometry method at Changbai mountain, northeastern Songliao basin, China. *Geofluids*, 2020: 6418215, doi: 10.1155/2020/6418215.
- Norden B, Förster A, Förster H J, et al. 2020. Temperature and pressure corrections applied to rock thermal conductivity: impact on subsurface temperature prognosis and heat-flow determination in geothermal exploration. *Geothermal Energy*, 8(1): 1, doi: 10.1186/s40517-020-0157-0.
- Nyabeze P K, Gwavava O. 2016. Investigating heat and magnetic source depths in the Soutpansberg basin, South Africa: exploring the Soutpansberg basin geothermal field. *Geothermal Energy*, 4(1): 8, doi: 10.1186/s40517-016-0050-z.
- Pang Z H, Huang S P, Hu S B, et al. 2014. Geothermal studies in China: Progress and prospects 1995-2014. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 49(3): 719-727.
- Qiu G G, Fang H, Zhong Q, et al. 2014. Study for MT 3D Inversion in the middle and lower reaches of the Yangtze River important mineralization zones and its adjacent area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(6): 2730-2737, doi: 10.6038/pg20140639.
- Qiu N S, Xu Q, Zhu C Q, et al. 2024. Study on heat flow in Northeast China based on the depth of Curie surface. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 98(3): 680-691.
- Ruan S, Tang J, Dong Z Y, et al. 2020. Electric structure model of Tianchi volcano in Changbai mountains based on three-dimensional AR-QN magnetotelluric inversion. *Seismology and Geology* (in Chinese), 42(6): 1282-1300.
- Rühaak W, Rath V, Clauser C. 2010. Detecting thermal anomalies within the Molasse basin, southern Germany. *Hydrogeol. J.*, 18(8): 1897-1915.
- Salazar J M, Vargas C A, Leon H. 2017. Curie point depth in the SW Caribbean using the radially averaged spectra of magnetic anomalies. *Tectonophysics*, 694: 400-413.
- Shan X L, Cai Z, Hao G L, et al. 2019. Estimation of thermal storage temperature of geothermal system in Changbai Mountain by Geothermometers. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 49(3): 662-672.
- Su X Y, Li F W, Qu X J, et al. 2019. Calculation and geological significances of aeromagnetic anomaly Curie surface in Changbai mountain area. *Global Geology* (in Chinese), 38(2): 492-498.
- Sun B M. 2016. Curie point depth from spectral analysis of aeromagnetic data in Northeast China [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Tang H H, Guo L H, Fang Y. 2020. Estimation of heat flow in southeastern margin of Tibetan Plateau and its analysis of the correlation with earthquake activity. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 63(3): 1056-1069, doi: 10.6038/cjg2019N0045.
- Tang J, Deng Q H, Zhao G Z, et al. 2001. Electric conductivity and magma chamber at the Tianchi volcano area in Changbaishan Mountain. *Seismology and Geology* (in Chinese), 23(2): 191-200.
- Tang Y C, Obayashi M, Niu F L, et al. 2014. Changbaishan volcanism in northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling. *Nature Geoscience*, 7(6): 470-475.
- Tian T, Zhang J F, Jiang W L, et al. 2017. Using gravity and magnetic data to study the crustal structure characteristics of microplates in Yanbian, Jilin, China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 91(9): 1905-1924.
- Tsvetkov Y P, Novikov K V, Ivanov A A, et al. 2018. Sources of the

- lithosphere magnetic field based on magnetic data obtained at different heights. *Earth Planets Space*, 70(1).
- Vosteen H D, Schellschmidt R. 2003. Influence of temperature on thermal conductivity, thermal capacity and thermal diffusivity for different types of rock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(9-11): 499-509.
- Wang G L, Zhang W, Liang J Y, et al. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 38(4): 449-459.
- Wang J Y, Kong Y L, Cheng Y Z. 2019. Geothermal resource distribution and utilization in China. //International Forum for Clean Energy (in Chinese). Macao, China, 81-88.
- Wei F X, Xu J D, Shangguan Z G, et al. 2016. Helium and carbon isotopes in the hot springs of Changbaishan Volcano, northeastern China: A material connection between Changbaishan Volcano and the West Pacific plate?. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 327: 398-406.
- Wei H Q, Liu G M, Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: Implications for possible future eruptions. *Bull. Volcanol.*, 75(4): 706, doi: [10.1007/s00445-013-0706-5](https://doi.org/10.1007/s00445-013-0706-5).
- Wang J, Li C. 2018. Curie point depths in northeast china and their geothermal implications for the songliao basin. *J. Asian Earth Sci.*, 163: 177-193.
- Xiong S Q, Yang H, Ding Y Y, et al. 2016. Characteristics of Chinese continent curie point isotherm. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(10): 3604-3617, doi: [10.6038/cjg20161008](https://doi.org/10.6038/cjg20161008).
- Xu J Q, Bai C J, Liu J Y. 2008. Geothermal resource prognosis based on remote sensing technology in Changbaishan volcanic area. *Remote Sensing for Land & Resources* (in Chinese), (1): 68-71.
- Yan B Z. 2016. Study on the formation mechanism of geothermal water resources in Changbai Mountain basalt area [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Yan B Z, Liang X J, Xiao C L. 2018. Hydrogeochemical characteristics and genesis model of Jinjiang and Julong hot springs in Changbai mountain, northeast China. *Geofluids*, 2018: 1694567, doi: [10.1155/2018/1694567](https://doi.org/10.1155/2018/1694567).
- Yan D, Tian Y, Zhao D P, et al. 2023. Seismicity and magmatic system of the Changbaishan intraplate volcano in East Asia. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 128(9): e2023JB026853, doi: [10.1029/2023JB026853](https://doi.org/10.1029/2023JB026853).
- Yang Z X, Zhang X K, Zhao J R, et al. 2005. Tomographic imaging of 3-D crustal structure beneath Changbaishan-Tianchi volcano region. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48(1): 107-115.
- Yi J, Wang P J, Shan X L, et al. 2021. Modeling the multi-level plumbing system of the Changbaishan caldera from geochemical, mineralogical, SR-ND isotopic and integrated geophysical data. *Geosci. Front.*, 12(5): 101171, doi: [10.1016/j.gsf.2021.101171](https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101171).
- Zhang C S, Wu M L, Zhang C Y, et al. 2016. Measurement of present-day stress and analysis of stress state in the Changbaishan mountains of Jilin province. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(3): 922-930, doi: [10.6038/cjg20160314](https://doi.org/10.6038/cjg20160314).
- Zhang F K. 2016. Remote prediction of geothermal resource potential in the Changbai Mountain area [Master's thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Zhang J, He Y B, Fan Y X. 2023. Crustal thermal structure and deep heat source conditions in Songliao basin, NE China. *Journal of Earth Sciences and Environment* (in Chinese), 45(2): 157-167.
- Zhang M L, Guo Z F, Liu J Q, et al. 2018. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): a review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards. *Earth-Sci. Rev.*, 187: 19-52.
- Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, et al. 2002. Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan Tianchi volcanic region. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 24(2): 135-143.
- Zhang X Y, Li G Z. 2006. The geologic and geochemical characteristics of the Changbai mountain geothermal field. *Jilin Geology* (in Chinese), 25(1): 25-30.
- Zhao R S. 2019. The mechanism and genetic model of vapor-liquid circulation processes in Changbai mountain two-phase geothermal system [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changchun: Jilin University.
- Zhao Y, Zhang Y G, Ni D D. 2023. Dynamic evolution of Changbaishan volcanism in northeast China illuminated by machine learning. *Frontiers in Earth Science*, 10: 1084213, doi: [10.3389/FEART.2022.1084213](https://doi.org/10.3389/FEART.2022.1084213).
- Zu J H, Lian Y F, Zhao G Z, et al. 1999. The estimating for the temperature gradient and heat flow of Julongquan springs area in Tianchi Lake, Changbai Mountains. *Geological Review* (in Chinese), 45(S1): 226-230.

附中文参考文献

- 陈昌亮. 2015. 长白山玄武岩区地热资源赋存规律及其水化学特征研究 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 胡圣标, 黄少鹏, 何丽娟等. 2013. 中国大陆地区岩石圈热结构与地热资源潜力. *地质学报*, 87(S1): 36.
- 胡旭芝, 徐鸣洁, 谢晓安等. 2006. 中国东北地区航磁特征及居里面分析. *地球物理学报*, 49(6): 1674-1681.
- 黄继军, 许志河, 孙念仁等. 2020. 吉林省长白山玄武岩覆盖区长白山十七道沟地热资源潜力评价. *科学技术创新*, (34): 157-158.
- 姜丹丹. 2021. 长白山火山区域重磁数据反演与地热成因机理 [博士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 姜光政, 高棚, 饶松等. 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, doi: [10.6038/cjg20160815](https://doi.org/10.6038/cjg20160815).
- 姜梓萌. 2013. 长白山地区地热资源综合地球物理研究 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 焦立果. 2014. 由卫星岩石圈磁场研究地震活动性及居里等温面反演 [博士学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- 李白希童. 2018. 长白山玄武岩区地热资源评价与开发利用研究 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 李鹤. 2015. 可控源音频大地电磁法在松江河某区地热勘查中的应用 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 刘慧, 赵阳, 饶文迪等. 2015. 吉林省长白山区聚龙泉群地热资源评价. *吉林地质*, 34(3): 126-130.
- 刘英杰. 2014. 从我国地热资源看长白山地热资源的开发利用与保护. *科学中国人* (3X).

- 庞忠和, 黄少鹏, 胡圣标等. 2014. 中国地热研究的进展与展望 (1995 ~ 2014). 地质科学, 49(3): 719-727.
- 仇根根, 方慧, 钟清等. 2014. 长江中下游重要成矿区带及邻区大地电磁测深三维反演研究. 地球物理学进展, 29(6): 2730-2737, doi: 10.6038/pg20140639.
- 邱楠生, 许晴, 朱传庆等. 2024. 基于居里面深度对中国东北部大地热流的研究. 地质学报, 98(3): 680-691.
- 阮帅, 汤吉, 董泽义等. 2020. 基于三维大地电磁 AR-QN 反演的长白山天池火山区电性结构. 地震地质, 42(6): 1282-1300.
- 单玄龙, 蔡壮, 郝国丽等. 2019. 地球化学温标估算长白山地热系统热储温度. 吉林大学学报 (地球科学版), 49(3): 662-672.
- 苏晓轶, 李福文, 屈旭钧等. 2019. 长白山地区航磁异常居里面计算及其地质意义. 世界地质, 38(2): 492-498.
- 孙帮民. 2016. 航磁数据反演居里面及在东北地区的应用 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 唐晗晗, 郭良辉, 方圆. 2020. 青藏高原东南缘热流估算及与地震活动相关性分析. 地球物理学报, 63(3): 1056-1069, doi: 10.6038/cjg2019N0045.
- 汤吉, 邓前辉, 赵国泽等. 2001. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统. 地震地质, 23(2): 191-200.
- 田甜, 张景发, 姜文亮等. 2017. 基于重磁场的延边微板块地壳结构特征研究. 地质学报, 91(9): 1905-1924.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运等. 2017. 中国地热资源潜力评价. 地球学报, 38(4): 449-459.
- 汪集暘, 孔彦龙, 程远志. 2019. 中国地热资源分布与开发利用. // 第八届国际清洁能源论坛. 澳门, 中国, 81-88.
- 熊盛青, 杨海, 丁燕云等. 2016. 中国陆域居里等温面深度特征. 地球物理学报, 59(10): 3604-3617, doi: 10.6038/cjg20161008.
- 闫佰忠. 2016. 长白山玄武岩区地热水资源成因机制研究 [博士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 杨卓欣, 张先康, 赵金仁等. 2005. 长白山天池火山区三维地壳结构层析成像. 地球物理学报, 48(1): 107-115.
- 张春山, 吴满路, 张重远等. 2016. 长白山地区现今地应力测量结果与应力状态分析. 地球物理学报, 59(3): 922-930, doi: 10.6038/cjg20160314.
- 张福坤. 2016. 长白山地区地热资源潜力预测遥感研究 [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 张健, 何雨蓓, 范艳霞. 2023. 松辽盆地地壳热结构与深部热源条件. 地球科学与环境学报, 45(2): 157-167.
- 张先康, 张成科, 赵金仁等. 2002. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究. 地震学报, 24(2): 135-143.
- 张希友, 李国政. 2006. 长白山地热田地质及地球化学特征. 吉林地质, 25(1): 25-30.
- 赵容生. 2019. 长白山地热系统汽-液两相循环机理及成因模式 [博士学位论文]. 长春: 吉林大学.
- 祖金华, 廉雨方, 赵国泽等. 1999. 长白山聚龙泉温泉地温梯度和热流的估算. 地质论评, 45(Z1): 226-230.

(本文编辑 胡素芳)