2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2377-2394
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

蔡家豪,饶松,汤军,等.2026.华北宁晋地区岩石圈热结构特征:对地震活动机理的启示.地球物理学进展,41(5):2377-2394,doi:10.6038/pg2026JJ0329.

CAI JiaHao, RAO Song, TANG Jun, *et al*. 2026. Lithospheric thermal-rheological structure of the ningjin area, north china: implications for seismic mechanisms. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2377-2394,doi:10.6038/pg2026JJ0329.

华北宁晋地区岩石圈热结构特征:对地震活动机理的启示

Lithospheric thermal-rheological structure of the ningjin area, north china: implications for seismic mechanisms

蔡家豪[1],饶松[1,2*],汤军[1,2],芦佳飞[3],郭梦浩[1],陈雯雯[1],罗洋[1],汤雨聪[1]

CAI JiaHao[1], RAO Song[1,2*], TANG Jun[1,2], LU JiaFei[3], GUO MengHao[1], CHEN WenWen[1], LUO Yang[1], TANG YuCong[1]

1. 长江大学地球科学学院,武汉 430100
2. 长江大学南方复杂页岩油气地质与开发湖北省重点实验室,武汉 430100
3. 中国科学院边缘海与大洋地质重点实验室南海海洋研究所,广州 510000

1. *School of Earth Sciences, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*
2. *Hubei Key Laboratory of Complex Shale Oil and Gas Geology and Development in Southern China, Yangtze University, Wuhan* 430100, *China*
3. *Key Laboratory of Ocean and Marginal Sea Geology, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510000, *China*

摘 要 传统板块构造理论在解释大陆地震方面仍有局限,岩石圈热结构是探究板内地震机理的重要窗口.基于华北宁晋及邻区地热学数据,结合深震测深剖面揭示的地壳分层结构,运用二维有限元法对研究区深部温度场进行数值模拟,刻画岩石圈热-流变结构特征,并探讨与地震活动的关系.研究表明,从太行山隆起至临清坳陷,地幔热流呈现低→高,"热"岩石圈厚度厚→薄,莫霍面温度高→低→高的变化趋势.冀中坳陷东部与临清坳陷壳幔热流比介于 0.66 ~ 0.72,指示深部活动强烈.空间上,研究区地震集中于大地热流梯度带、莫霍面局部隆起带及深大断裂发育区;纵向上以中地壳脆-韧性转换深度为界呈双层分布.研究认为,热结构横向变化带是热应力集中区,脆-韧性转换深度划分地震双层分布,受热结构控制的深大断裂为地幔热物质上涌及应力传递核心载体.受太平洋板块俯冲影响,地幔上涌引发弧后拉张,导致岩石圈破碎并扰动壳

Abstract The traditional plate tectonic theory has limitations in explaining continental earthquakes, and the thermal structure of the lithosphere serves as a crucial window for exploring the mechanism of intraplate earthquakes. Based on geothermal data from Ningjin and its adjacent areas in North China, combined with the crustal layered structure revealed by deep seismic sounding profiles, this study employs a 2D finite element method to numerically simulate the deep temperature field of the study area, characterize the features of the lithospheric thermal-rheological structure, and explore its relationship with seismic activity. The results indicate that from the Taihangshan Uplift to the Linqing Depression, the mantle heat flow exhibits a low-to-high trend, the "thermal" lithospheric thickness shows a thick-to-thin variation, and the Moho temperature displays a high-to-low-to-high pattern. The crust-mantle heat flow ratios in the eastern Jizhong Depression and Linqing Depression range from 0.66 to 0.72, indicating intense deep-seated activities. Seismic events in the study area are spatially concentrated in terrestrial heat flow gradient zones, local Moho uplift zones, and areas with well-developed deep and large faults. Vertically, they display a two-layer distribution, with the boundary defined by the Brittle-Ductile Transition Depth (BDTD) in the middle crust. Lateral variation

收稿日期 2025-11-27; **修回日期** 2026-04-13. **投稿网址** http://www.progeophys.cn

基金项目 国家自然科学基金(42372350,42572398)、深地国家科技重大专项子课题(2025ZD1010101-3)和中国石油科技创新基金(2024DQ02-0401)和湖北省教育厅科学研究项目重点项目(D20241306)联合资助.

第一作者简介 蔡家豪,男,2002 年生,硕士研究生,从事地热地质学方向研究.E-mail:2894046490@qq.com

***通讯作者** 饶松,男,1985 年生,博士,教授,主要从事地热地质学与油气地质学的教学和科研工作.E-mail:raosong08@163.com

内温度场与应力场,热应力与构造应力耦合,形成双层地震破裂模式.

关键词 岩石圈热-流变结构;地震活动性;地震活动机理;宁晋地区

中图分类号 P315

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2026JJ0329

CSTR:32085.14.pg2026JJ0329

zones of the thermal structure are concentration areas of thermal stress; BDTD demarcates the two-layer distribution of earthquakes; and deep and large faults controlled by the thermal structure serve as the key carriers for the upwelling of mantle thermal materials and stress transfer. Under the influence of the subduction of the Pacific Plate, mantle upwelling triggers back-arc extension, which results in lithospheric fragmentation and disturbs the intracrustal temperature and stress fields. The coupling of thermal stress and tectonic stress further forms the two-layer seismic fracture pattern.

Keywords Lithospheric thermal-rheological structure; Seismic activity; Seismogenic mechanism; Ningjin area

0 引 言

板块构造理论成功解释了全球板块边界地震活动规律与机理,但在解释大陆板块内部发生的地震(又称大陆地震)遇到困难(Wang *et al*.,2017;郑文俊等,2022).近年研究显示,板内地震多发于中低温地热区周缘,且伴随地热区域异常变化(杨修信等,1992;何案华等,2012;Lai *et al*.,2023),表明地热状态与深部动力学过程密切关联,进而影响地震活动.

国内外学者对地壳内地热活动与地震的相关性进行了广泛研究,主要涵盖两个方面:一是地热分布特征与地震活动性的空间关联(吴乾蕃等,1993;曹新来等,1997;Pasquale *et al*.,1997;王云等,2014;王健等,2016;李其林等,2019;王博等,2022),二是热力源在孕震过程中的物理机制(安镇文和朱传镇,1985;蔡永恩等,1992;车用太等,2001;刘耀炜等,2007;Ito,1999;Im and Avouac,2021;Zhu *et al*.,2023).代表性的工作有,吴乾蕃等(1993)对山西断裂带的研究表明,高热流区对应频繁且破坏性强的地震活动,低热流区则地震活动性较弱;Pasquale 等(1997)通过分析北地中海地区的热流、地震和岩石圈数据,发现高热流区对应浅源地震,低热流区对应深源地震;王云等(2014)基于青藏高原东南缘温泉水化学与热储温度的研究认为,强震主要集中于地热梯度带或高低热异常过渡区域,深部流体运移与岩石圈热结构的空间不均一性在地震触发中起关键作用.王博等(2022)通过分析滇西北地区温泉水化学组分及地热特征发现,地震活动与热储温度分布密切相关,在高、低热储温度的交界区域,地震发生频率显著升高.Lai 等(2023)通过分析 2022 年宁蒗 M_S5.5 地震显著地表沉降变形及特定断裂交汇处的热异常,揭示了地震活动与地表热变化的潜在关联.安镇文和朱传镇(1985)通过理论模型与实验揭示,热液上涌、热应力积累等热-力学机制通过降低断层摩擦强度、促进应力集中,可直接触发地震;Ito(1999)研究发现日本西南部震源层厚度受热结构控制,厚层易触发大型地震,火山附近薄层抑制强震;Im 和 Avouac(2021)针对加州 Brawley 地热田的 2012 年地震群,利用数值模拟揭示热应力通过储层冷却引发的热收缩与断层滑动协同作用,触发了深部地震及无震滑动.Zhu 等(2023)通过构建三维热机械模型揭示,瓦努阿图俯冲带的地震活动与板块界面的动态热脱水作用密切相关,强震频繁发生于高温脱水带内.

华北宁晋及邻区自 1966 年邢台地震以来,地震持续活跃,其地震活动与岩石圈热结构的相关性尚需进一步研究.本文以实测大地热流数据、岩石圈分层结构模型及岩石热物性参数为基础,通过设定边界条件与初始参数进行正演,获取岩石圈内部温度场与热流分布特征;结合区域地震的空间分布、震级及震深等数据,探究岩石圈热-流变结构与地震活动的内在关联,进而阐明宁晋地区深部地震的孕育与发生机制,为该地区热-震相关关系研究提供科学依据.

1 区域地质背景

华北宁晋县位于河北省中南部,大地构造属于渤海湾盆地冀中坳陷南部与临清坳陷的接合部位,毗邻太行山隆起,核心构造单元包括宁晋凸起、束鹿凹陷、新河凸起及邢衡隆起和巨鹿凹陷局部.该区域自太古界结晶基底之上发育中—上元古界碳酸盐岩与碎屑岩地层、下古生界寒武系—奥陶系灰岩与白云岩地层、上古生界石炭系—二叠系泥岩及煤层地层和新生界古近纪—新近纪碎屑岩地层(高楠安等,2022).

渤海湾盆地作为华北克拉通东部发育的新生代裂谷盆地,自太古宙以来构造演化划分为四个主要

的阶段:中新元古代至古生代的稳定沉积阶段、中生代的隆起褶皱阶段、古近纪的断裂发育阶段以及新近纪以来的区域坳陷阶段(刘琼颖和何丽娟,2019; Qiu *et al.*,2014). 受印支期和燕山期构造运动及新生代太平洋板块俯冲作用的影响,渤海湾盆地岩石圈经历多期拉张破裂. 板块俯冲引发的地幔对流导致上覆岩石圈发生弧后拉张,促使断裂广泛发育,且主要呈 NNE-NE 向展布,走向受控于板块俯冲方向(Liang *et al.*,2016). 冀中坳陷位于渤海湾盆地西部,北依燕山隆起,南接临清坳陷,东邻黄骅坳陷,西接太行山脉,自西向东呈现凹-凸相间的构造格局(Ma *et al.*,2019),西部为石家庄凹陷、保定凹陷等凹陷区,中部为高城凸起、高阳凸起等隆起区,东部为饶阳凹陷等凹陷区(图 1). 临清坳陷位于冀中坳陷以南,西侧紧邻太行山山前断裂带,南接内黄隆起和东濮凹陷,东侧由兰聊断裂为界. 区内断层构造发育,包括堂邑断裂,鸡泽断裂,馆陶断裂等,将其划分为数十个三级构造单元(刘晨光等,2015).

太行山隆起呈 NNE 向展布,西邻山西断陷带,东以太行山山前断裂与渤海湾盆地相隔,构成华北地区重要的地貌与构造边界. 新构造运动时期,该区以间歇性整体抬升为主要特征,发育有多级夷平面;上新世至第四纪期间,河流下切形成多级宽谷阶地(吴忱等,2000).

2 基础数据

本研究选取盐城—包头深地震宽角反射/折射测深剖面(Duan *et al.*,2015)中桩号 800 ~ 1100 段(约 300 km),其西北起自太行山北段繁峙,向东南经阜平、石家庄、宁晋至南宫. 构造上,剖面涵盖西段太行山隆起区,中段冀中坳陷和东段临清坳陷(图 1). 地震数据来源于中国地震台网中心国家地震科学数据中心(http://data.earthquake.cn);地形观测数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)的 SRTM-DEM 90 m 高程数据;大地水准面高度数据取自 WGS-84 全球模型.

2.1 地震数据

华北地区是我国地震活动较为活跃的区域之一,历史上发生多次大震,特别是 1966 年邢台 M_S7.2 地震和 1976 年唐山 M_S7.8 地震. 近年来,其小震频发且分布广泛(谢卓娟等,2019). 本研究基于中国地震科学数据中心发布的地震目录,汇编了研究区(37°N—40°N,113°E—117°E)1970 年以来的 5286 次地震数据,包括中国地震台网正式目录(2009 年至今)、1970 至 2017 年 CSN 地震目录、区域子网地震目录中的华北地震子网(1975—2008 年),华北地震子网选用山东台网(1975—2008 年)、天津台网(1985—2008 年)、河北台网(1989—2008 年)、内蒙古台网(1990—2008 年)、北京台网(2002—2008 年)产出的华北地区地震目录数据. 选取 1990 年至今 $M_L \geqslant 2$ 数据质量较好地震 2429 次,结合地形观测数据及区域断裂展布,绘制了研究区地震震中分布与断裂位置关系图(图 2). 震中整体呈现 NE-NEE 向条带状分布,主要集中在西北部的山西断陷构造带及华北平原构造带(以邢台—宁晋地区为著),与以 NNE-NE 向为主的断裂体系高度吻合. 断裂带作为地壳应力集中与释放的“通道”,为地震发生提供构造条件.

2.2 现今大地热流

大地热流是地壳或岩石圈深部热状态在地表的综合量化表征. 本文汇编了宁晋及邻区现有 170 个现今大地热流数据(常健等,2016;姜光政等,2016; Wang *et al.*,2021),其中 A 类数据 79 个、B 类数据 71 个及 C 类数据 20 个. 选取质量较高的 A、B 类热流数据,绘制了研究区现今大地热流分布图(图 3). 结果显示,冀中坳陷总体呈现中等-较高热流特征,平面上呈现高低相间的分布格局,热流背景与基底构造形态总体吻合. 剖面西北段(繁峙—新乐)大地热流为 55.6 ~ 58.5 mW/m^2,平均值 57.2 mW/m^2. 受现有测点主要集中于冀中坳陷中部的限制,该段实际热流值或与估算结果存在偏差. 剖面中段(石家庄—宁晋)的现今大地热流为 59.2 ~ 63.5 mW/m^2,平均值 60.4 mW/m^2,低于冀中坳陷整体平均值(65.3 mW/m^2);剖面东南段(新河—南宫)平均热流值为 64.5 mW/m^2,与冀中坳陷整体平均值接近.

2.3 地壳分层结构模型

繁峙—南宫地壳分层结构模型(图 4)自上而下划分为沉积层、上地壳、中地壳和下地壳. G 界面以上为新生代沉积盖层,最大深度为临清坳陷下方约 6 km,地表纵波速度较低(2.0 ~ 3.0 km/s)且随深度递增,至 G 界面处达 5.8 km/s 左右. 上地壳从 G 界面到 C1 界面,深度约为 10 ~ 12 km,纵波速度从 G 界面下的 6.0 km/s 增至 C 界面上的 6.20 ~ 6.40 km/s. 中地壳以 C2 为界,分为上下两部分,整体厚度为 12 ~ 20 km. 从 C3 界面到 M 界面为下地壳,厚度约为 8 ~ 12 km,速度由 6.5 ~ 6.6 km/s 增至 M 界面上的 6.7 ~ 7.0 km/s,横向变化不大(Duan *et al.*,2015;

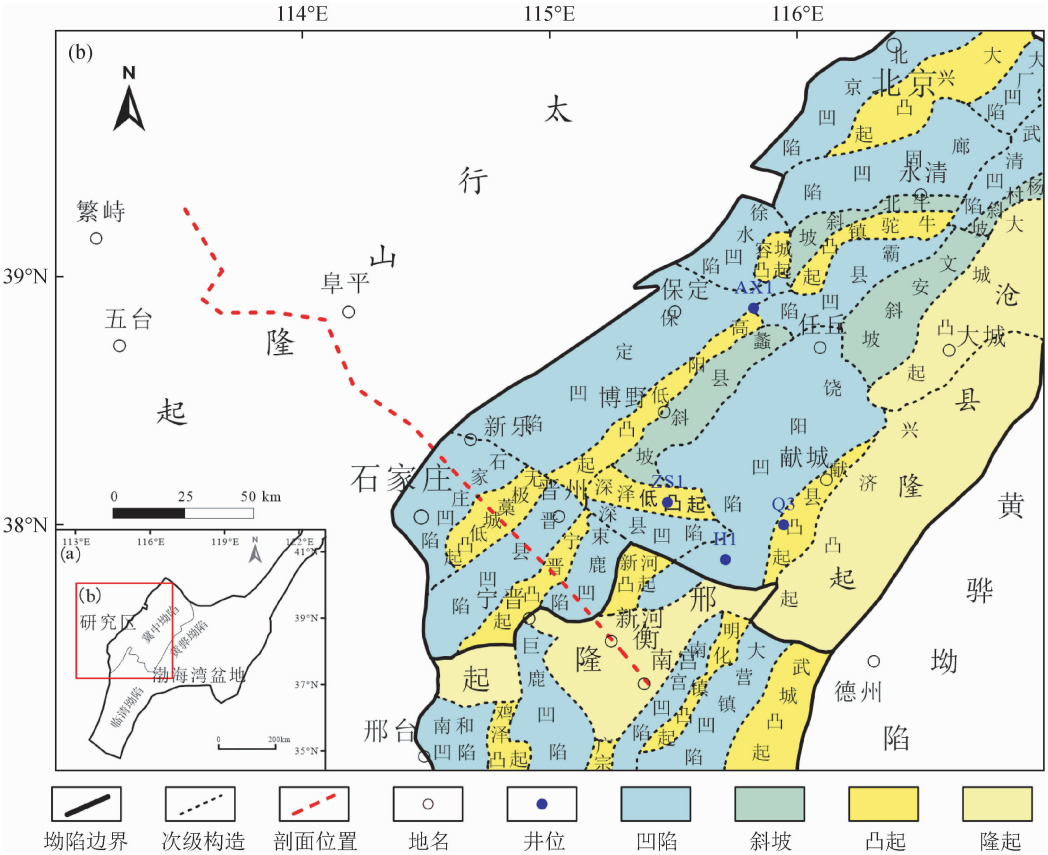


图 1 华北宁晋及邻区构造单元划分(王琦等,2024;Hu *et al*.,2025)

Fig. 1 Tectonic unit division in the Ningjin and adjacent areas, North China (Wang *et al*., 2024; Hu *et al*., 2025)

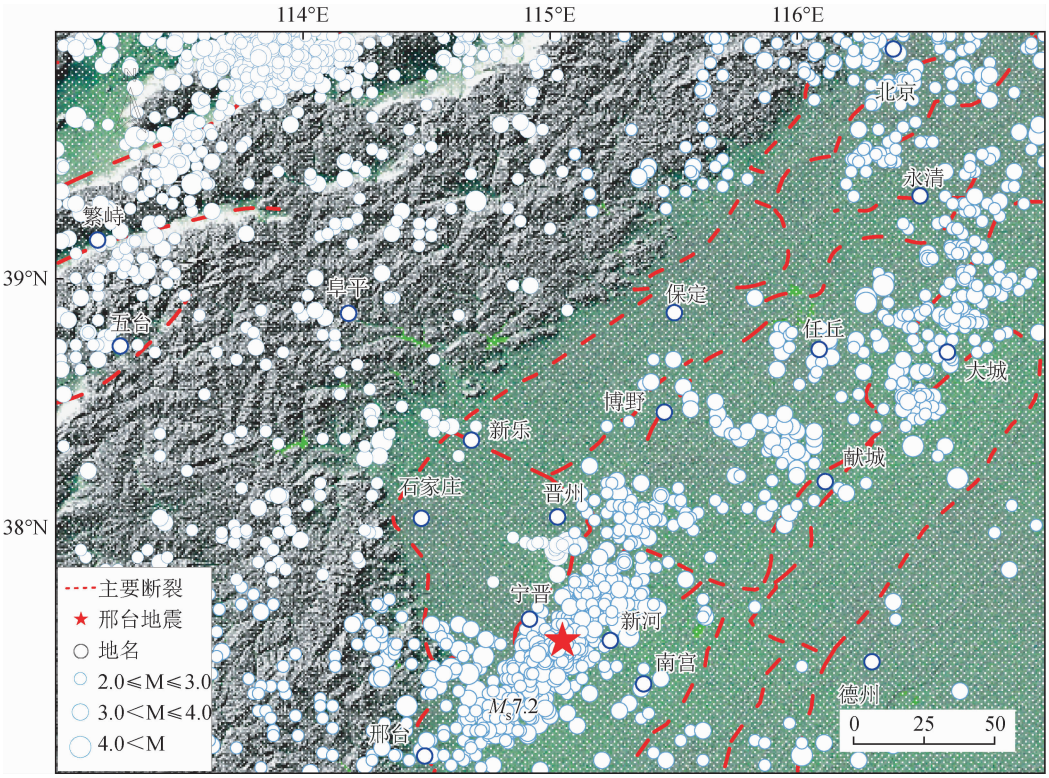


图 2 宁晋及邻区地震震中分布与断裂位置关系

Fig. 2 Distribution of earthquake epicenters in the Ningjin area relative to rupture zones

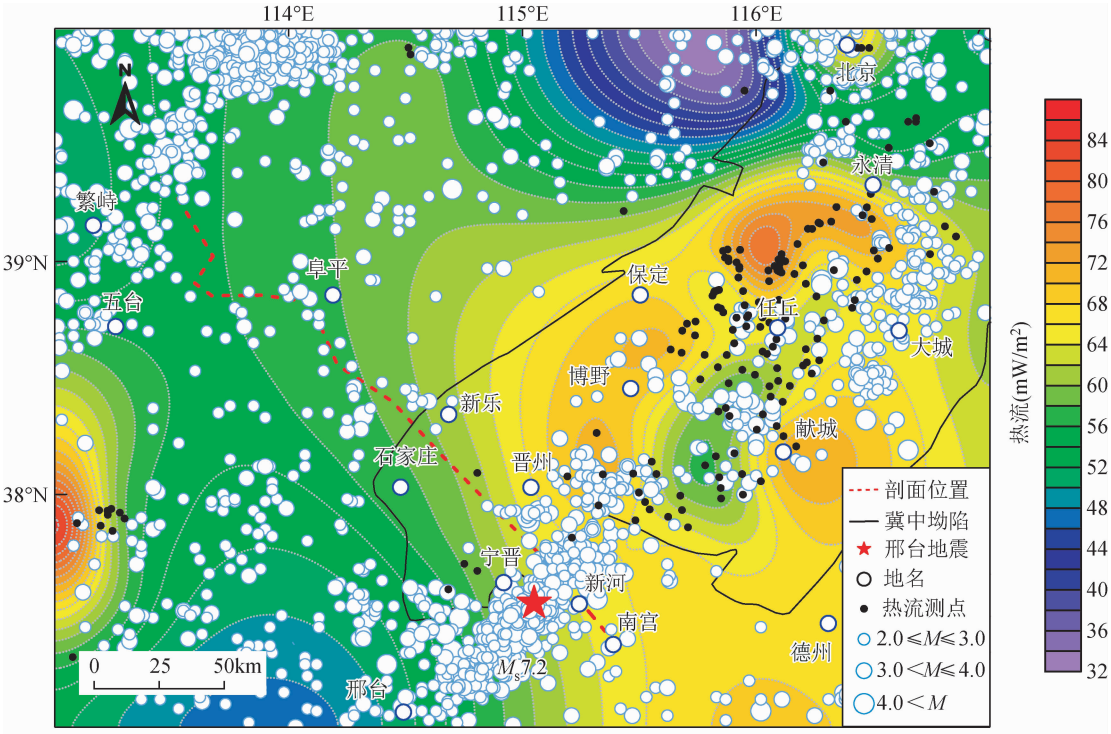


图 3 宁晋及邻区现今大地热流与地震活动性平面展布

Fig. 3 Spatial distribution of contemporary geothermal heat flow and seismic activity in the Ningjin and adjacent areas

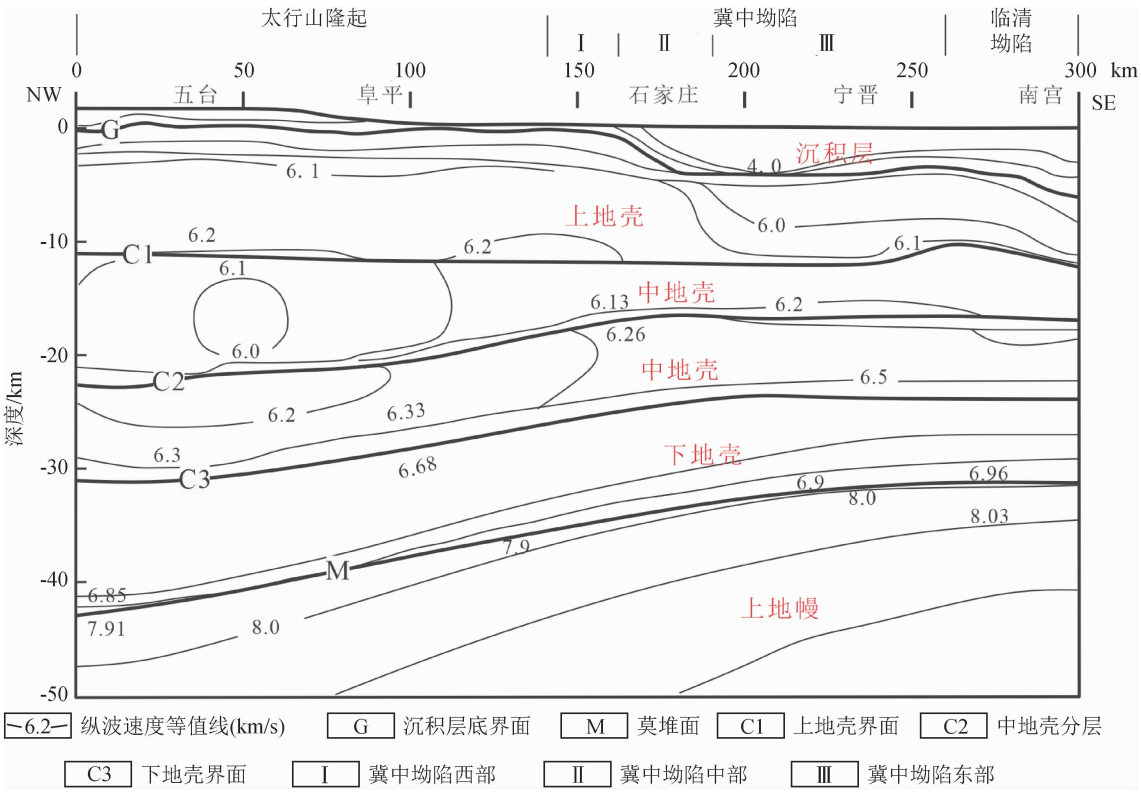


图 4 繁峙—南宫地震测深剖面地壳结构(Duan *et al.*,2015)

Fig. 4 Crustal structure along the Fanzhi—Nangong seismic and bathymetric profile(Duan *et al.*,2015)

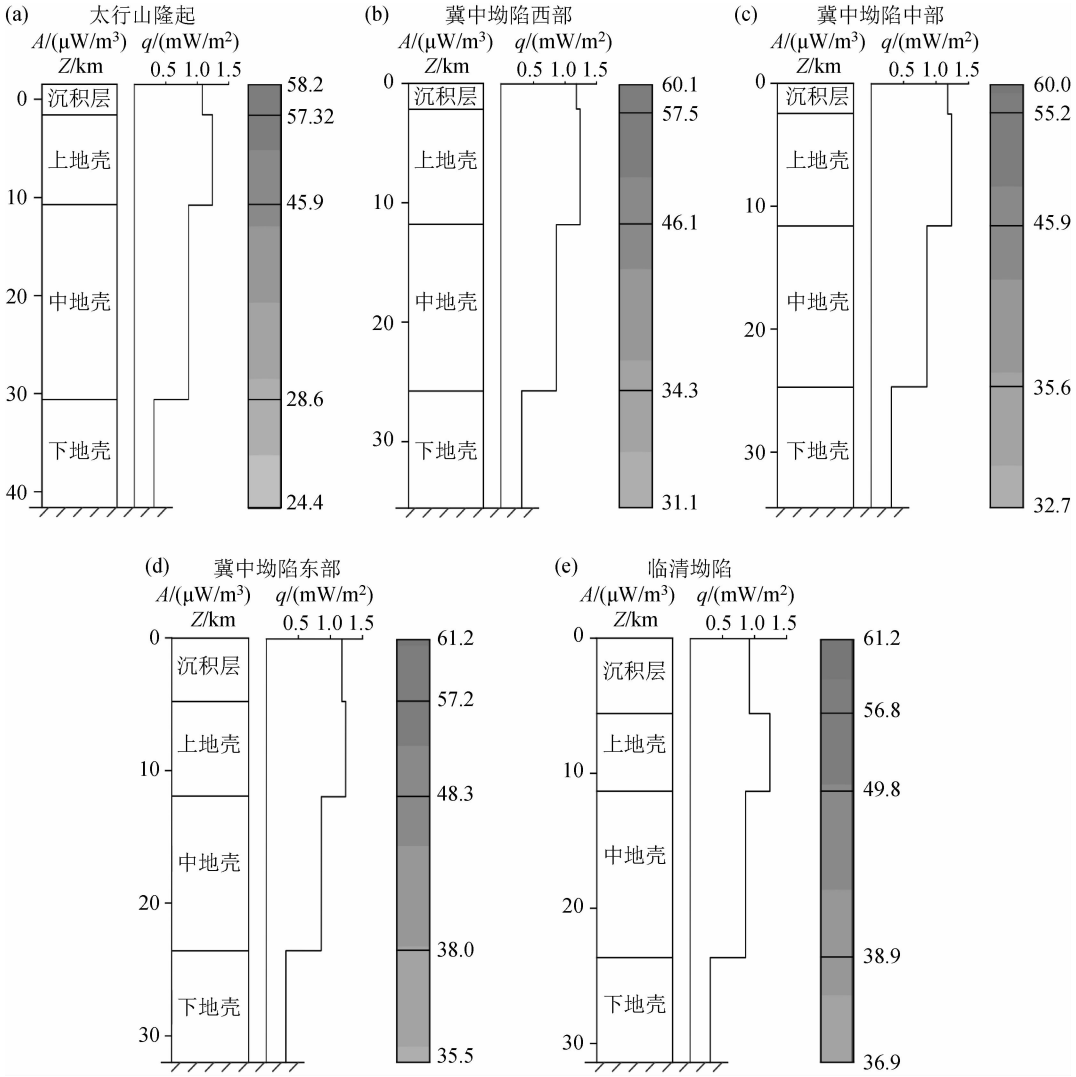


图 5 宁晋及邻区地壳结构与热结构模型

Fig. 5 Crustal and thermal structure model for the Ningjin and adjacent areas

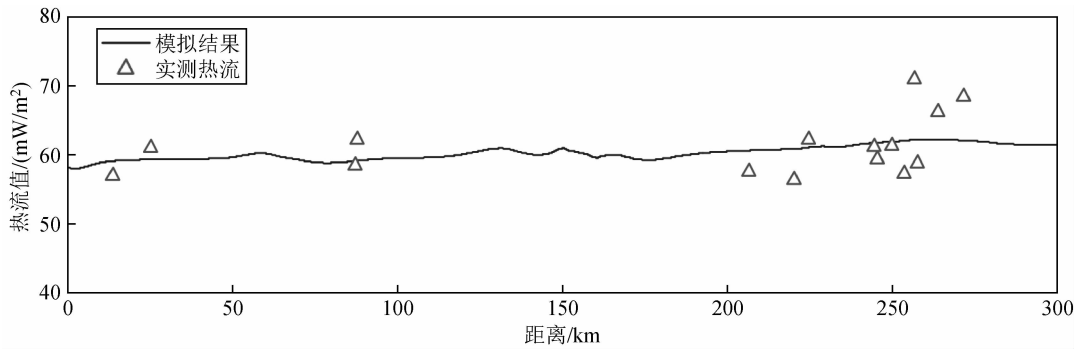


图 6 繁峙—南宫剖面大地热流实测值与模拟值对比

Fig. 6 Measured versus simulated geothermal heat flow along the Fengshi—Nangong profile

段永红等,2016). 作为地壳与上地幔的分界,莫霍面(M)在冀中坳陷与临清坳陷区域呈现显著隆起. 剖面地壳厚度差异明显,呈自西北向东南增厚趋势,最薄处为 31.5 km,最厚处达 42.5 km.

3 计算方法及参数

本文基于 COMSOL 平台,采用二维稳态热传导模型模拟宁晋及邻区岩石圈热状态. 根据傅里叶定律,在考虑岩石放射性生热时,热传导方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)+A(x,y)=0\ . \tag{1}$$

二维模型长 300 km,深度 170 km,采用有限元法进行三角网格划分(共 34555 个),边界条件设定为:顶部温度恒定、两侧绝热、底部为恒定热流,控制方程为:

$$T(x,y_0)=T_0(x)\ , \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x_1,y)=\frac{\partial T}{\partial x}(x_0,y)=0\ , \tag{3}$$

$$-k(x,y_b)\frac{\partial T}{\partial x}(x_1,y_b)=Q_b(x)\ , \tag{4}$$

式中,T 为温度(℃);A 为放射性生热率(μW/m^3);k 为岩石热导率(W/(m·K));T_0 为地表温度(℃),取研究区年平均气温(太行山隆起 10 ℃,冀中坳陷和临清坳陷 15 ℃);Q_b 为地幔热流(mW/m^2).

地壳各分层生热率采用阶状模型(左银辉等,2015;常健等,2016;Cui *et al.*,2019),地壳表层生热率通过岩石样品中 U、Th、^{40}K 元素的含量和岩石密度测得(迟清华和鄢明才,1998),公式如下:

$$A=0.01\rho(9.52C_U+2.56C_T+3.48C_K)\ , \tag{5}$$

式中,A 为生热率(μW/m^3),ρ 为密度(g/cm^3);C_U、C_T、C_K 分别为岩石中铀、钍、钾的含量,单位分别为 μg/g、μg/g 和%.

地壳深部(中、下地壳)岩石生热率采用 P 波速度换算得到生热率(Rybach and Buntebarth,1984),以下两个公式分别针对显生宙和前寒武系地层:

$$LnA=12.6-2.17v_p\ , \tag{6}$$

$$LnA=13.7-2.17v_p\ , \tag{7}$$

式中,V_P 为实验条件下(20 ℃、100 MPa)地震波速(km/s),在进行换算时需将其从原位温压校正至实验室条件(Čermák and Bodri,1991),校正公式如下:

$$v_P(T_0,P_0)=v_P(T,P)[1+C(Z)/v_P(T,P)]\ , \tag{8}$$

$$C(Z)=\int_T^{T_0}(\partial v_P/\partial T)_P\partial T+\int_P^{P_0}(\partial v_P/\partial P)_T\partial P\ , \tag{9}$$

$$(\partial v_P/\partial T)_P=aT+b\ , \tag{10}$$

$$(\partial v_P/\partial P)_T=c/(P+d)\ , \tag{11}$$

式中,T_0、P_0 为实验室测试温度(℃)和压力(MPa),T、P 为原位温度和压力,$C(z)$ 为校正函数,$a=-6.802\times10^{-7}$ km/(s·K^2)、$b=-1.686\times10^{-4}$ km/(s·K)、$c=0.135$ km/s、$d=25.0$ MPa,基于实验数据获得.

本文模型浅部地层热导率取值依据已有研究中学者对各构造单元岩石样品的测试结果确定(测量精度为 ±3%);地壳深部热导率暂无法直接测定,取值综合了研究区壳幔热物性参数已有研究成果(张林友等,2016;常健等,2016;邱楠生等,2017). 密度与比热数据引用前人研究结果;通过地震纵波速度(V_P)换算获取的生热率,与前人基于地壳放射性元素丰度的估算结果相吻合,表明生热率取值合理. 表 1 为繁峙—南宫剖面各构造单元的热物性参数.

表 1 繁峙—南宫剖面各构造单元热物性参数

Table 1 Thermophysical parameters for each tectonic unit along the Fengshi—Nangong profile

地区	地壳结构	热导率 K(W/(m·K))	密度 ρ(kg/m^3)	比热 C(J/(kg·K))	生热率 A(μW/m^3)	V_p/(km/s)	V_p 估算 A (μW/m^3)
太行山隆起	沉积层	2.20(3)	2670(3)	1000(6)	1.08(3)	5.80(7)	1.01
	上地壳	3.00(3)	2740(2)	1000(6)	1.50(2)	6.11(7)	1.55
	中地壳	2.80(3)	2880(2)	1000(6)	0.86(2)	6.50(7)	0.67
	下地壳	2.00(3)	3000(2)	1000(6)	0.25(2)	6.91(7)	0.27
	上地幔	3.40(1)	3280(1)	1200(6)	0.03(1)	7.95(7)	0.03
冀中坳陷	沉积层	2.27(4)	2650(5)	1000(6)	1.18(4)	5.75(7)	1.13
	上地壳	2.30(4)	2790(5)	1000(6)	1.24(4)	6.20(7)	1.28
	中地壳	2.50(4)	2830(5)	1000(6)	0.86(4)	6.35(7)	0.92
	下地壳	2.50(4)	2950(5)	1000(6)	0.31(4)	6.80(7)	0.35
	上地幔	3.40(1)	3280(1)	1200(6)	0.03(1)	8.00(7)	0.03

续表 1

Continued Table 1

地区	地壳结构	热导率 K(W/(m·K))	密度 ρ(kg/m^3)	比热 C(J/(kg·K))	生热率 A(μW/m^3)	V_p/(km/s)	V_p 估算 A (μW/m^3)
临清坳陷	沉积层	2.00[8]	2700[8]	1000[6]	0.92[8]	5.85[7]	0.91
	上地壳	2.30[4]	2790[5]	1000[6]	1.24[4]	6.10[7]	1.59
	中地壳	2.50[4]	2830[5]	1000[6]	0.86[4]	6.40[7]	0.83
	下地壳	2.50[4]	2950[5]	1000[6]	0.31[4]	6.90[7]	0.28
	上地幔	3.40[1]	3280[1]	1200[6]	0.03[1]	8.01[7]	0.03

注:表中数据来源自:(1)刘绍文等,2005;(2)黄方等,2015;(3)张林友等,2016;(4)常健等,2016;(5)刘占坡等,2003;(6)刘琼颖和何丽娟,2019;(7)Duan *et al*.,2015;(8)李岁岁,2023.

图 5 为宁晋及邻区地壳结构与热结构模型,模拟基底热流的初始参考值基于"回剥法"计算获取.基于华北宁晋地区活跃的构造背景,本文参考臧绍先等(2002)提出的双绝热线法定义热岩石圈厚度(上限 T_1、下限 T_2),计算公式如下:

$$T_1 = 1200\ ℃ + 0.5(℃/\mathrm{km})Z\ , \tag{12}$$

$$T_2 = 1300\ ℃ + 0.4(℃/\mathrm{km})Z\ . \tag{13}$$

在获取岩石圈热状态参数后,通过耦合浅层以脆性变形为主的线性摩擦破裂公式与深层以韧性变形为主的蠕变强度公式,构建流变剖面,计算岩石圈总强度.其中,脆性变形的屈服极限采用线性摩擦公式确定(Sibson,1974):

$$\sigma_b = (\sigma_1 - \sigma_3) = \alpha\rho g Z(1-\lambda)\ , \tag{14}$$

式中 σ_b 代表脆性变形屈服极限(MPa);σ_1 和 σ_3 为最大、最小主应力(MPa);ρ 为密度(kg/m^3),Z 为深度(km),α 为断层类型相关参数,λ 为孔隙流体因子,g 为重力加速度(m/s^2),上述参数中 α、λ 和 g 的取值分别为 0.75、0.37 和 9.8(王恺和熊熊,2012;邱楠生等,2017;王恺等,2020).

韧性变形的蠕变强度通过幂指数定律求解:

$$\sigma_d = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{M}\right)^{\frac{1}{n}} \exp\left(\frac{H}{nRT}\right)\ , \tag{15}$$

式中,σ_d 为韧性变形屈服极限(MPa),$\dot{\varepsilon}$ 为应变速率(s^{-1}),M 为流动参数(单位 MPa^{-n}/s),n 为应力指数;H 为活化能(J/mol);R 为普适气体常数,取 8.314 J/(mol·K);T 为温度(K),由岩石圈热结构模拟获得的温度场确定.

在流变剖面上,σ_b 与 σ_d 的数值相等处对应的深度即为脆-韧性转变深度(Brittle Ductile Transition Depth, BDTD).岩石圈总强度通过下述公式计算:

$$s = \int_0^D \min(\sigma_b, \sigma_d)\,\mathrm{d}Z\ , \tag{16}$$

式中,S 为岩石圈总强度(MPa),D 为岩石圈的底部边界深度(km),定义为 $\sigma_1 - \sigma_3$ 在不连续强度之下降至较低水平(1 ~ 10 MPa)时的深度.岩石流变相关参数见表 2.

表 2 岩石圈物质组成及其流变参数

(据张林友等,2016;王恺等,2020;王朱亭等,2025)

Table 2 Composition of lithospheric materials and their rheological parameters (after Zhang *et al*., 2016; Wang *et al*., 2020; Wang *et al*., 2025)

分层	代表岩石	蠕变参数		
		流动参数 M (MPa^{-n}/s)	应力指数 n	活化焓 H (J/mol)
沉积盖层	干石英岩	6.7×10^{-6}	2.4	156000
上地壳	干花岗岩	1.8×10^{-9}	3.2	123000
中地壳	斜长岩	3.2×10^{-4}	3.2	238000
下地壳	长英质麻粒岩	8.0×10^{-3}	3.1	243000
上地幔	干地幔岩	2.5×10^{4}	3.5	532000

4 模拟结果

4.1 深部温度场

图 6 显示实测大地热流与模拟结果具有良好的一致性,证实了模型的可靠性;图 7 为邻近地区典型钻孔(准)稳态测温值与模拟结果.结合宁晋地区地热地质背景分析认为,该区域具有较强烈的水热活动及复杂的地下水流系统,AX1 井的模拟温度稍高于实测值,推测其为补给区;SZ1、H1 井的模拟温度低于实测值,推测其位于排泄区,会促进深部热量向浅层传递,使得预测的浅层地温低于实测值(饶松等,2024);Q3 井的模拟温度与实测值基本一致.

4.2 岩石圈热状态与热结构

图 8 为繁峙—南宫剖面二维温度场模拟结果.

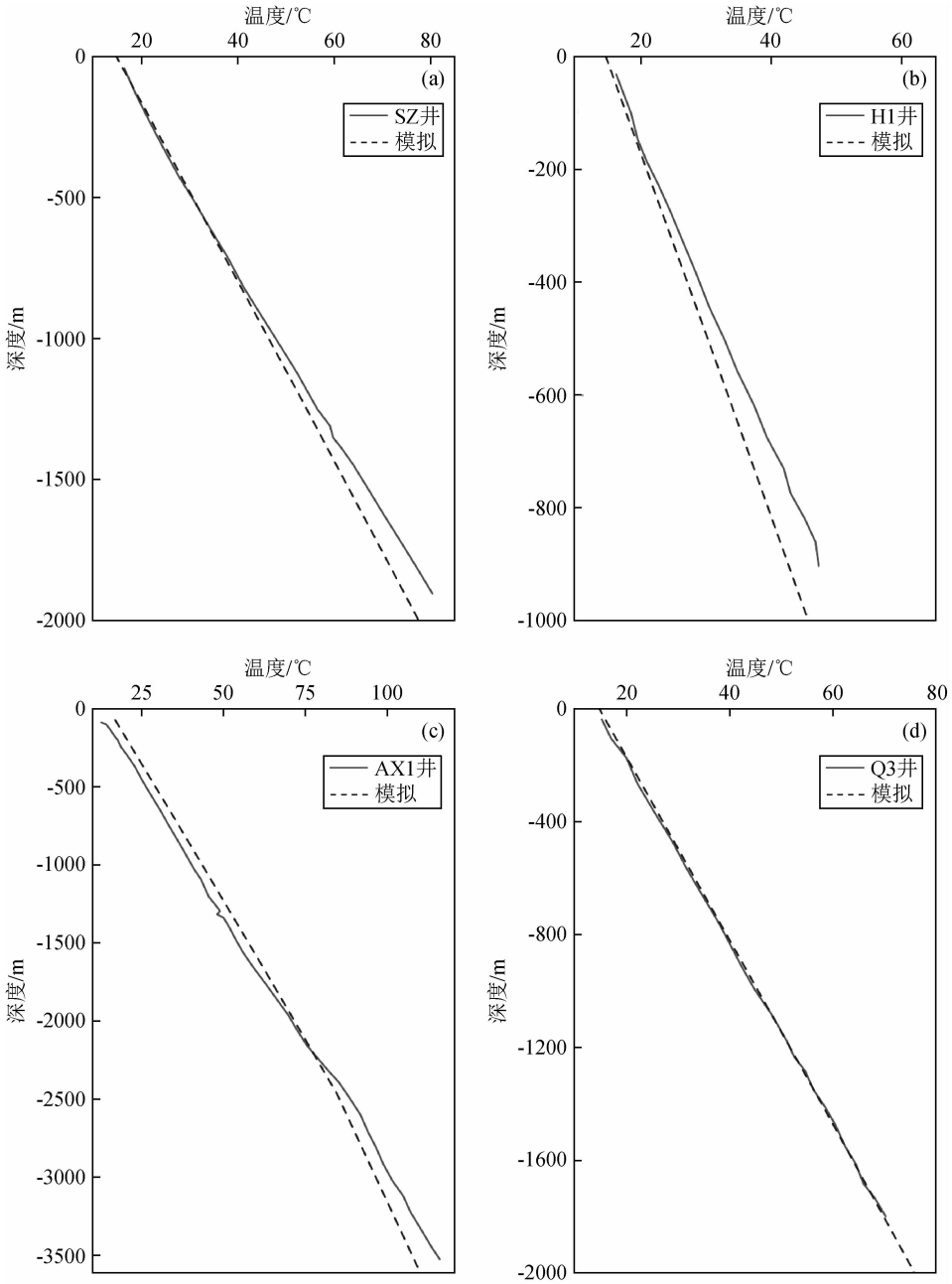


图 7 宁晋及邻区代表性钻孔模拟温度与实测温度的对比(钻井位置见图 1)

Fig. 7 Measured and modeled temperatures in representative boreholes (borehole locations shown in Fig. 1)

等温线自上而下逐渐变疏,表明地温梯度随深度递减;横向上,等温线由西北向东南趋于密集,显示深部温度呈西低东高的空间分异,冀中坳陷与临清坳陷处温度等值线明显上隆. 剖面莫霍面温度总体上变化幅度不大(图 9),介于 597 ~ 668 ℃,其中太行山隆起莫霍面温度为 597 ~ 620 ℃,冀中坳陷为 600 ~ 650 ℃,临清坳陷为 650 ~ 668 ℃,呈现先降后升的变化趋势.

表 3 为繁峙—南宫剖面各构造单元岩石圈热结构参数. 总体而言,繁峙—南宫剖面自西北至东南,各构造单元地幔热流逐渐增大,地壳热流逐渐减小,壳幔热流比亦呈逐渐减小趋势. 其中,太行山隆起地壳热流 33.8 mW/m^2,地幔热流 24.4 mW/m^2,壳幔热流比 1.39;冀中坳陷地壳热流 25.7 ~ 29.0 mW/m^2,地幔热流 31.1 ~ 35.5 mW/m^2,壳幔热流比 0.72 ~ 0.93;临清坳陷地壳热流 24.3 mW/m^2,地幔热流 36.9 mW/m^2,壳幔热流比 0.66. 冀中坳陷与临清坳陷地幔热流明显偏高,壳幔热流比低于 1,表明地幔

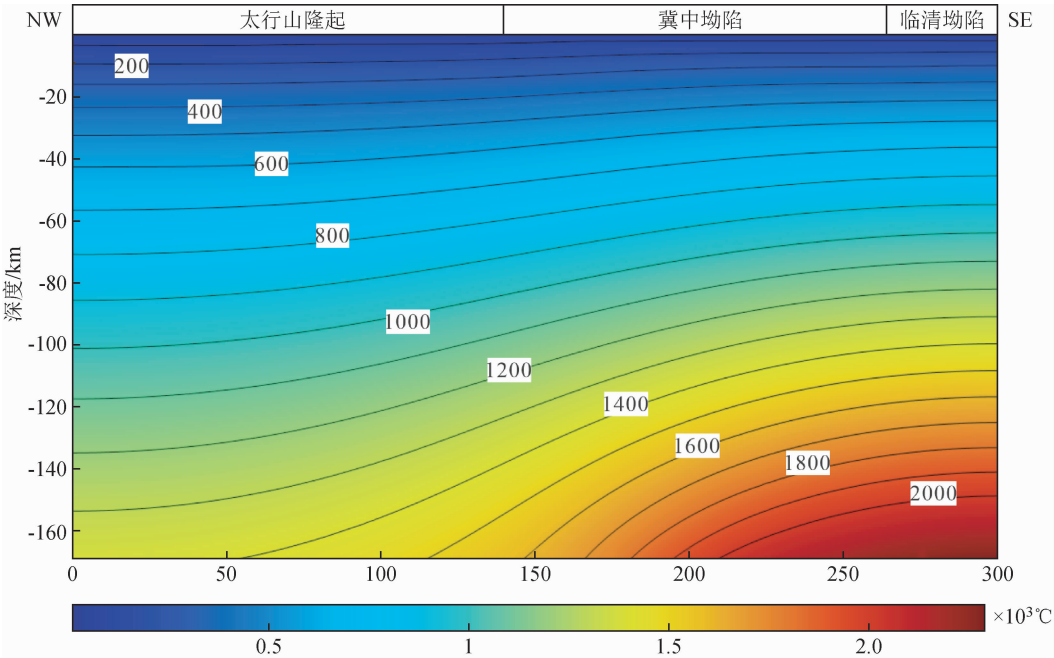


图 8 繁峙—南宫剖面二维温度场分布

Fig. 8 Two-dimensional thermal structure along the Fengshi—Nangong profile

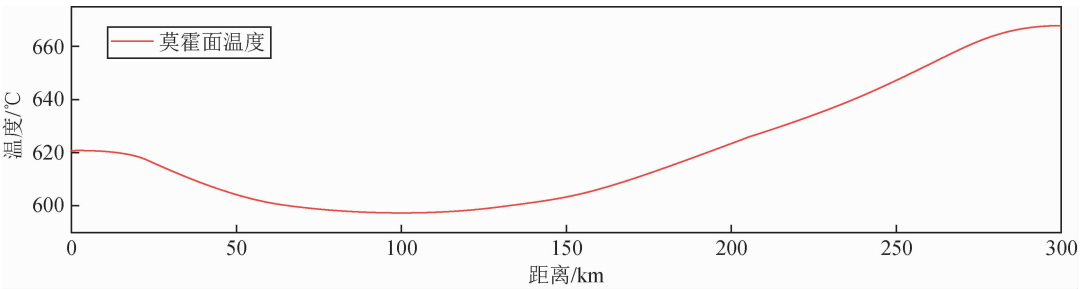


图 9 繁峙—南宫剖面莫霍面温度

Fig. 9 Moho temperature along the Fengshi—Nangong profile

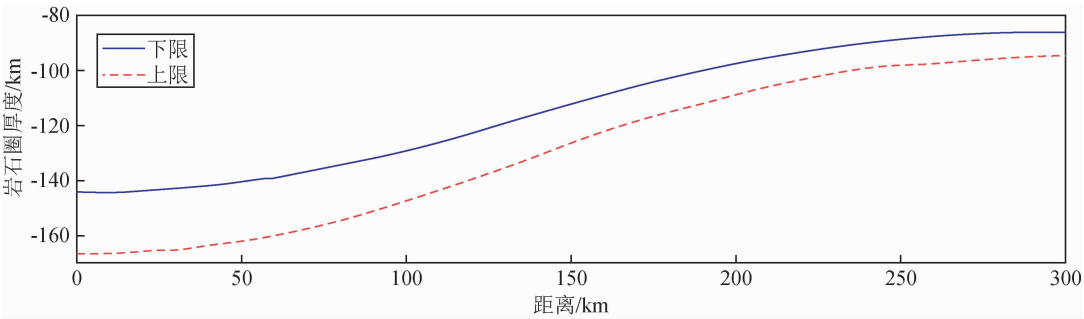


图 10 繁峙—南宫剖面“热”岩石圈厚度

Fig. 10 Thickness of the thermal lithosphere along the Fanshi—Nangong profile

热贡献占主导,符合我国东部中-新生代裂谷区"冷壳热幔"的典型热结构特征. 图 10 与表 3 显示,"热"岩石圈厚度沿剖面自西北向东南显著减薄:太行山隆起约 143 km,冀中坳陷为 98 ~ 120 km,临清坳陷为 91.5 km.

表 3 繁峙—南宫剖面各构造单元热结构参数

Table 3 Thermal structural parameters of each tectonic unit along the Fanshi—Nangong profile

构造单元	太行山隆起	冀中坳陷西部	冀中坳陷中部	冀中坳陷东部	临清坳陷
Q_0(mW/m^2)	58.2	60.1	60	61.2	61.2
Q_c(mW/m^2)	33.8	29.0	27.3	25.7	24.3
Q_m(mW/m^2)	24.4	31.1	32.7	35.5	36.9
Q_c/Q_0	1.39	0.93	0.83	0.72	0.66
Z_t/km	143	120	108.5	98	91.5

注:Q_0、Q_c、Q_m 分别为现今大地热流、地壳热流和地幔热流;Z_t 为"热"岩石圈厚度.

4.3 岩石圈流变结构

图 11 为二维温度场模拟结果计算得到的剖面内各构造单元流变结构. 垂向上,不同构造单元岩石圈具有显著软硬相间的流变分层结构. 整体来看,剖面内各构造单元上地壳与中地壳主体为脆性层,中地壳底部则发育韧性层,而冀中坳陷和临清坳陷的上地壳底部局部发育韧性层;下地壳全域为韧性层;上地幔顶部存在脆性层,且该脆性层厚度及最大应力强度自西北向东南均呈递减趋势. 水平方向上,各构造单元的岩石圈流变特征既存在整体共性,也表现出明显的局部差异. 具体而言,太行山隆起的脆-韧性转换深度分别位于 23.0 km、49.0 km 处,其岩石圈总强度为 1.60×10^{13} N/m,壳幔累积强度比为 0.38;冀中坳陷脆-韧性转换深度分布于 8.2 ~ 9.9 km、15.8 ~ 19.2 km、37.3 ~ 42.4 km 区间,岩石圈总强度介于 $7.7\sim13\times10^{12}$ N/m 之间,壳幔累积强度比为 0.33;临清坳陷脆-韧性转换深度出现在 7.4 km、14.0 km、33.6 km 处,岩石圈总强度为 5.3×10^{12} N/m,壳幔累积强度比为 0.42. 沿剖面自西北向东南方向,脆-韧性转换深度与岩石圈总强度均呈显著递减趋势,这一特征暗示区域岩石圈热-动力作用的影响程度自东向西逐渐减弱,与已有研究结论相吻合(黄方等,2015;张林友等,2016;王恺等,2020;段和肖等,2023).

5 讨 论

5.1 模型的不确定性分析

研究区大地热流数据主要源于冀中坳陷钻孔温度系统测量和沉积层热物性测试,数据受地层岩性差异、流体活动及构造背景影响,测温曲线呈现显著的分段特征. 具体表现为:(1)新生界碎屑岩层段以传导型地温场为主,温度随深度呈线性递增趋势;(2)中-上元古界与下古生界碳酸盐岩层段,因碳酸盐岩热导率较高且岩溶发育区渗透率显著提升,地下水对流作用强烈,温度分布趋于均一,地温梯度明显降低;(3)受导水断裂影响的层段,局部温度因流体扰动出现锯齿状波动(Wang *et al.*,2021;饶松等,2024). 此外,区内热流分布受构造格局控制显著,整体呈现"基岩凸起区热流值高于凹陷区"的规律(常健等,2016;江晓雪和朱传庆,2025). 但实测大地热流测点主要集中于冀中坳陷中部,西部太行山隆起与东部临清坳陷测点覆盖稀疏,即使模拟热流与实测值拟合较好,仍可能因数据空间分布不均导致深部温度及热结构计算结果存在偏差.

为量化上述因素对模型的影响,需通过敏感性分析识别关键参数的扰动效应:在误差允许范围内忽略非关键参数的微小波动,针对关键参数则需明确其不确定性以提升模拟可靠性. 本研究中影响岩石圈热结构模拟结果的关键参数为大地热流、地壳生热率与地壳热导率,三者的不确定性范围设定均基于研究区数据特征及前人研究成果:敏感性分析中大地热流的不确定性假定为 10%,即 ±6.0 mW/m^2,地壳生热率和热导率不确定性范围分别假定为 20% 和 10%(Miao *et al.*,2014;段和肖等,2023;王贵玲等,2023;芦佳飞等,2023). 由表 4 的敏感性分析数据结果可知,不同参数波动对岩石圈热结构的扰动存在显著差异,其中大地热流是影响模型结果最关键的参数:当大地热流以 ±10% 幅度变化时,对模拟结果的影响程度最大,且在区域横向的影响表现出良好一致性,具体表现为莫霍面温度波动范围达 78 ~ 101 ℃,"热"岩石圈厚度的不确定性为 18 ~ 35 km. 该现象与研究区"冷壳热幔"的热结构特征密切相关,冀中坳陷与临清坳陷地幔热流占主导(表 3),大地热流的微小变化直接反映地幔热贡献的差异,进而主导深部温度场与岩石圈厚度的计算结果. 相比之下,地壳生热率 ±20% 的波动及地壳热导率均值 ±10% 的变化,对莫霍面温度与"热"岩石圈厚度的扰动幅度较小. 当地壳生热率变化 ±20% 时,莫霍面

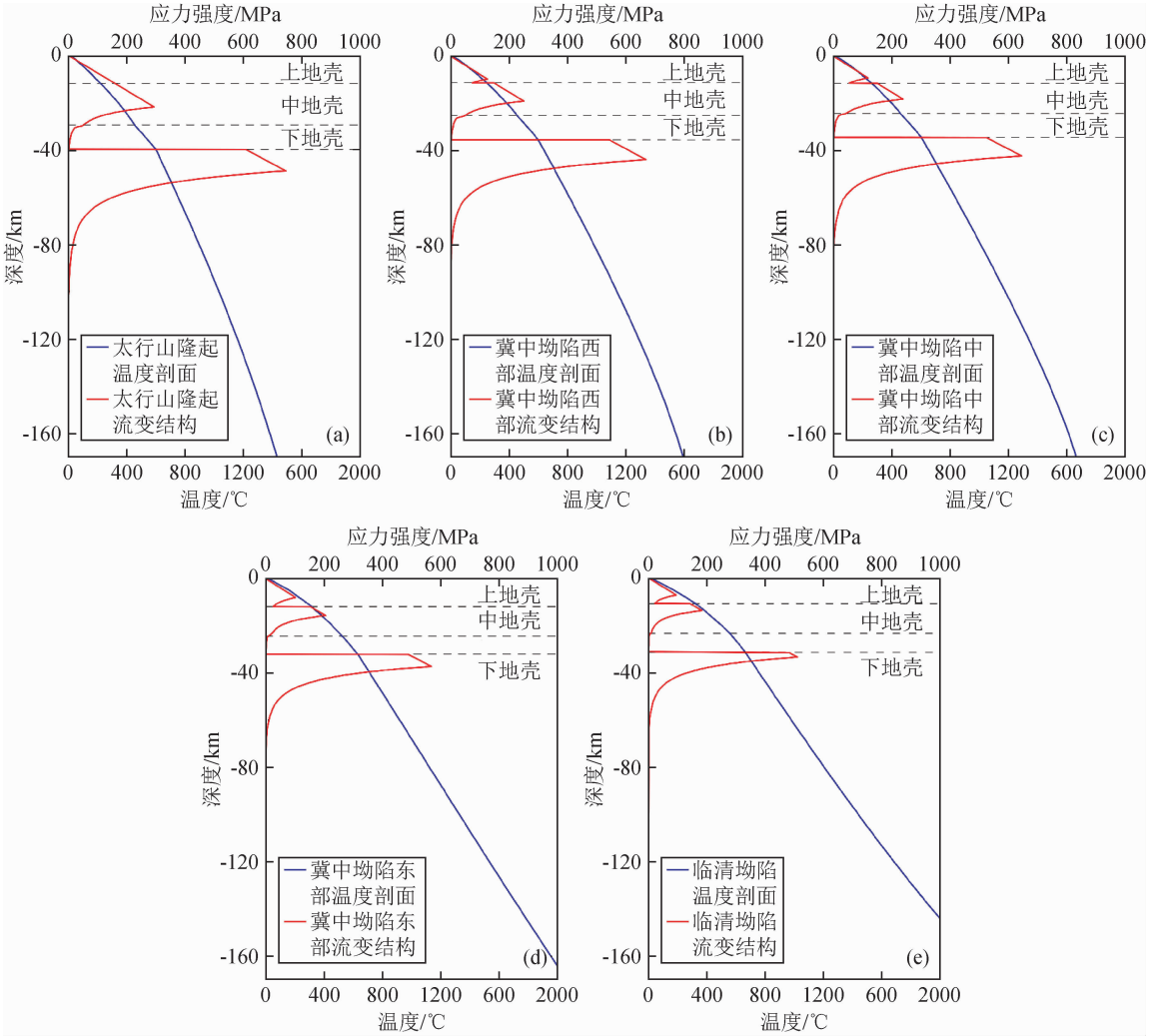


图 11 繁峙—南宫剖面各构造单元温度剖面与流变结构

Fig. 11 Temperature profiles and rheological structures of each tectonic unit along the Fanshi—Nangong profile

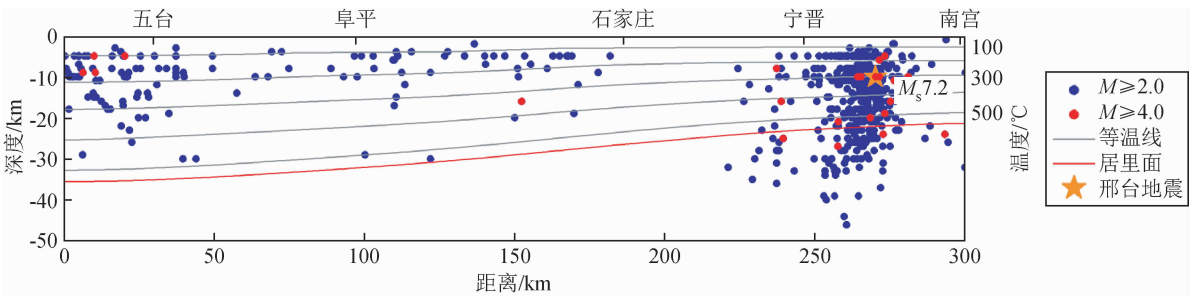


图 12 繁峙—南宫剖面地壳温度场和震源深度分布

Fig. 12 Crustal thermal structure and seismicity depth distribution along the Fengzhi—Nangong profile

温度在横向变化区间为 38 ~ 74 ℃,“热”岩石圈厚度变化区间为 10 ~ 32 km,地幔热流的横向波动幅度为 5.1 ~ 6.3 mW/m^2;地壳热导率均值波动 ±10% 时,莫霍面温度的不确定性控制在 55 ~ 72 ℃,“热”岩石圈厚度的变化区间为 10 ~ 25 km. 二者影响较弱的原因在于:地壳生热率主要贡献上地壳热流,对深部地幔热主导的温度场影响有限;而热导率通过温度校正公式与深度温度耦合,其误差

被温度场的传导特性部分抵消,固对整体热结构的扰动相对较小.

表 4 繁峙—南宫剖面地热模型的敏感性分析

Table 4 Sensitivity analysis of geothermal modeling for the Fanshi—Nangong profile

模型参数改变	莫霍面温度/℃	“热”岩石圈厚度/km	地幔热流/(mW/m^2)
大地热流升高 10%	↑76~85	↓18~33	↑6.0
大地热流降低 10%	↓83~101	↑20~35	↓6.0
地壳平均生热率升高 20%	↓42~74	↑10~30	↓5.4~6.7
地壳平均生热率降低 20%	↓38~51	↓13~32	↑5.1~5.3
地壳平均热导率升高 10%	↓55~59	↑10~25	0
地壳平均热导率降低 10%	↑65~72	↓14~24	0

5.2 岩石圈热-流变结构与地震活动

居里点深度 CPD (Curie Point Depth),亦称为磁性层底界深度 MLBD (Magnetic Layer Bottom Depth),是表征接近铁磁性矿物消磁温度(居里温度)所处的深度,对应磁性壳层的底界面. 纯磁铁矿的居里点约为 580 ℃,随着钛含量的增加而降低,地壳深部磁性矿物的居里点低至约 520 ℃ (Shuey *et al*,1977). 因此,选用磁性层底界温度 T_c = 550 ℃作为参考值,对比宁晋地区的地壳热-流变结构分析其与地震活动的相关性.

研究区地震主要分布于大地热流梯度带、异常区过渡带及断裂带附近(图 2 和图 3). 繁峙-南宫剖面 80% 以上地震位中于地壳 20 km 深度以浅区域(图 12),符合华北地区震源深度总体特征(赵博等,2013;王建等,2016). 纵向上,震源温度主要集中于 200~400 ℃;$M \geqslant 4.0$ 地震发生的位置温度多为 200~500 ℃;1966 年邢台 M_S7.2 地震震源温度约 300 ℃. 剖面上地震主要发生于居里面(550 ℃)以上,宁晋部分深源地震分布于居里面以下. 地震活动是岩石圈强度的反映,剖面区域岩石圈呈现软硬相间的流变分层特征,地震空间分布与该分层结构高度耦合(图 13). 地震主要发生层位为地壳,仅极少数在上地幔顶部脆性层;地壳内地震分布随流变层位差异显著,以上地壳和中地壳上部的脆性层为主要发生区,地震分布最为密集(0~15 km);部分地震在上地壳底部、中地壳底部及下地壳的韧性层(15~30 km). 总体而言,以中地壳脆-韧性转变深度带为界,地壳内地震呈上下双层分布,且整体集中于脆性区域. 宁晋地区地震发生层位受多重因素协同控制:一方面,岩石力学性质随深度温度的变化是核心控制因素,地壳脆-韧性转变温度一般为 300~500 ℃ (Tullis and Yund,1977,1985) 与宁晋—邢台地震带中地壳 14~19.2 km 脆-韧性转变深度带的温度范围一致. 该深度区间内,随温度升高岩石力学性质从脆性破裂主导逐渐过渡为韧性剪切主导,直接决定了地震的分层分布格局;另一方面,脆性层与韧性层的应力释放差异进一步影响地震集中程度,上地壳及中地壳上部脆性层岩石以弹性变形为主,易积累弹性应变能且能量瞬时释放时即引发地震,故成为地震集中区. 而上地壳底部、中地壳底部及下地壳韧性层岩石以塑性变形为主,应变多缓慢释放,仅局部应力集中时才引发少量地震;此外,上地幔顶部脆性层因厚度薄且应力强度低,难以有效积累足以引发地震的弹性应变能,因此极少出现地震.

横向上,深大断裂作为壳幔物质运移、能量传递通道与应力集中空间,又促进深部热物质上涌,使其成为地震“敏感区”,地震密度高于非断裂区,$M \geqslant 4$ 中强震集中于此,且因断裂切割深,震源普遍更深. 剖面最大震源深度自西北向东南呈“深-浅-深”变化,与壳幔累积强度比分布高度吻合:高比值区壳幔物质交换频繁、能量传递剧烈,应力易累积至临界状态,震源更深;低比值区壳幔相互作用弱,应力难向深部传递,震源较浅. 需特别关注的是,本研究中大地热流自西北向东南呈递增趋势,与胡圣标和汪集旸(1993)提出的“地震活动断层倾角和切割深度较大时,最大震源深度与地表热流呈负相关”的结论存在差异,推测因华北宁晋受太平洋板块俯冲弧后拉张作用,岩石圈破碎且地幔热贡献占主导,构造应力弱化了深部热状态对震源深度的控制,打破二者常规关联.

5.3 地热与地震机理

地震的孕育与发生本质上是岩石圈中弹性应变能长期积累后瞬时释放的过程. 现代华北平原受 WE-WEE 水平挤压应力场作用(Wang *et al*.,2017;王椿镛等,2016),但仅靠水平构造应力无法解释区域内广泛存在的地表伸展构造及地震时频繁出现的显著垂直形变,需引入热动力因素加以阐释.

新生代以来,华北宁晋构造活动具有“自下而上”的动力学演化模式:太平洋板块向欧亚大陆俯冲,驱动地幔对流引发弧后伸展,使岩石圈拉张减薄并破裂,地幔物质上涌,深部热源占主导;随着距离俯冲带距离的增大,太行山隆起区域构造受地幔对流的影响减小,幔源热所占据的比例降低,地壳生热

逐渐占主导地位(He *et al*.,2015;Jiang *et al*.,2019).

前人通过深部地球物理探测,揭示了邢台地震构造特征(王椿镛等,2016):浅部发育张性断裂,中下地壳内存在高角度的隐伏断裂且二者可能贯通(刘亢等,2023);震源位于深部隐伏断裂的顶部和深、浅断裂交汇区间;大震区存在中地壳的剪切滑脱面,滑脱面在震源处被隐伏深断裂所阻挡;震源下方莫霍界面局部上隆(图 14). 该构造特征与地幔对流隆升引发的构造响应高度吻合,印证了地热活动与地震的内在关联. 地幔对流隆升对上覆地壳的作用具体表现为:挤压并加热地壳,使地壳受热膨胀并形成局部应力集中区,诱发上地壳岩体发生蠕变及韧-脆性转换变形,驱动下地壳产生弯曲变形并伴生高角度隐伏断裂,同时地幔物质沿断裂侵入地壳形成低速高导体(图 14),造成区域热流抬升并形成高热流异常区. 此过程中产生的附加热应力,使上地壳处于强张应力环境,并促使中下地壳积累剪切应力(向才英和周真恒,2000). 因岩石圈热结构存在显著的横向差异,宁晋地区成为热应力集中带,引发的热应力在数值上为 10 ~ 100 MPa(田华和张之立,1992;刘耀炜等,2007),有利于弹性应变能的积累和地震的孕育. 同时,岩石圈热状态决定岩石力学性质的垂向分布,影响岩石强度随深度的变化,进而控制

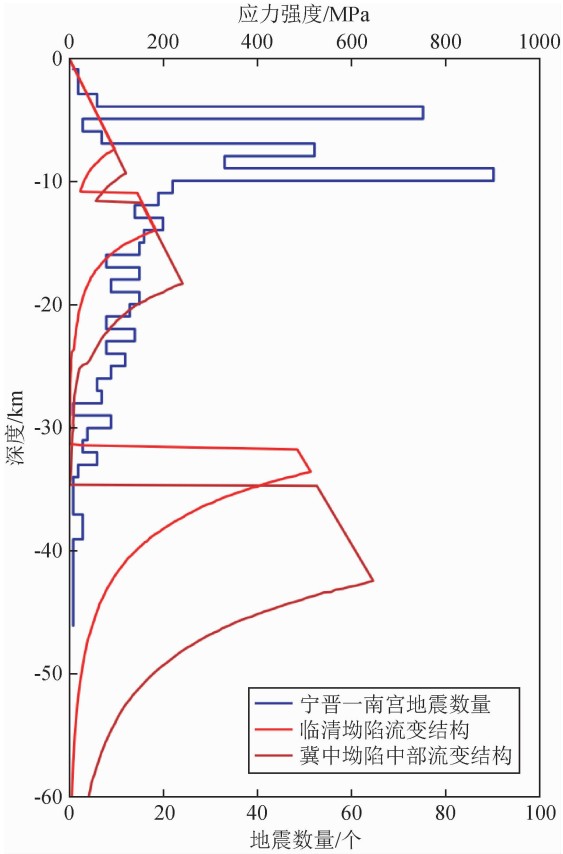


图 13 宁晋—南宫各深度地震数量与流变结构

Fig. 13 Number of earthquakes and rheological structure at different depths in the Ningjin—Nangong area

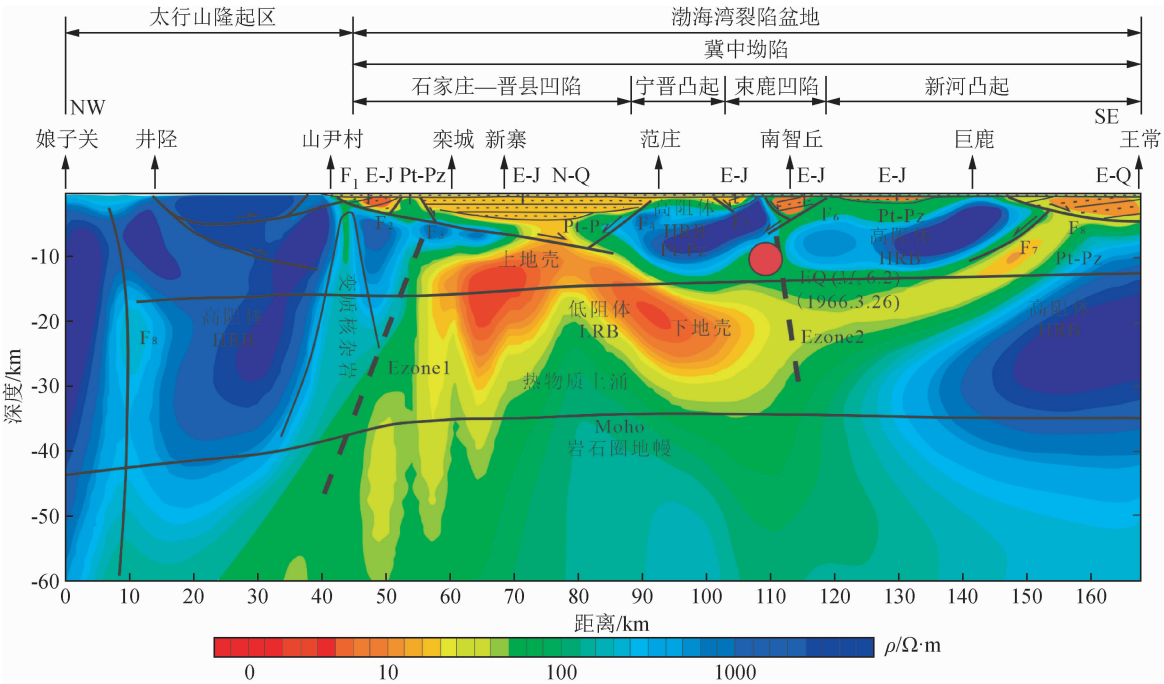


图 14 石家庄电磁剖面深部电性结构与地壳上地幔结构解释图(杨晓平等,2016)

F_1:太行山山前断裂;F_2:北席断裂;F_3:栾城断裂;F_4:晋县断裂;F_5:新河断裂;F_7:明化镇断裂;F_8:晋-获断裂;EZone1、EZone2:地壳内的电性结构过渡带;HRB:高阻体;LRB:低阻体.

Fig. 14 Deep electrical structure along the Shijiazhuang EM profile with crustal interpretation and implications for mantle structure(Yang *et al*., 2016)

F_1: Taihangshan Piedmont Fault; F_2: Beixi Fault; F_3: Luancheng Fault; F_4: Jinxian Fault; F_5: Xinhe Fault; F_7: Minghuazhen Fault; F_8: Jin-Huo Fault; EZone1, EZone2: Electrical Structural Transition Zones within the Crust; HRB: High-Resistance Body; LRB: Low-Resistance Body.

地壳脆韧性转变深度及震源的空间分布.

综合华北宁晋地区岩石圈热结构与地震活动特征,分析可知:(1)热结构横向变化带是热应力集中的核心区域.冀中坳陷东部为0.72、临清坳陷为0.66,地幔热贡献占优,热物质上涌活跃;同时,莫霍面局部上隆促进深大断裂形成,使热应力与构造应力在此叠加;(2)脆-韧性转换深度是地震双层分布的分界线.宁晋地区中地壳脆-韧性转换深度为14~19.2 km,对应地震分层的边界.转换深度以上,岩石脆性强、热应力以张性为主,地震以浅源、密集为特征;转换深度以下,岩石韧性强、热应力以剪切为主,地震以深源、零散为特征;(3)深部断裂与浅部断裂的贯通的通道,是地幔热物质上涌与应力传递的核心载体.当地幔热物质沿该通道上涌,热膨胀效应会打破原有应力平衡:一方面使上地壳张应力骤增,引发浅部断裂张性破裂;另一方面使下地壳剪切应力突破岩石强度阈值,触发深部剪切滑脱面失稳,最终形成深浅层协同破裂.综上,宁晋地区太平洋板块俯冲引发地幔对流,弧后拉张作用导致岩石圈破碎减薄,地幔物质自莫霍面的断裂上涌,扰动壳内温度场和应力场,使地壳上部产生张应力,地壳中下部产生水平剪切应力触发地震.

6 结 论

(1)宁晋地区岩石圈热结构呈现显著横向差异:从太行山隆起至临清坳陷,地幔热流从24.4 mW/m^{2}增至36.9 mW/m^2,"热"岩石圈厚度从143 km减薄至91.5 km,莫霍面温度从597 ℃升至668 ℃,该特征是太平洋板块俯冲引发地幔对流的直接响应,反映区域构造活动自西向东逐渐增强.

(2)宁晋地区地震双层分布的核心控制因素是壳内温度场对岩石力学性质的控制作用:上层(0~15 km)地震为脆性层张性破裂,受地幔热膨胀引发的上地壳张应力与区域构造应力叠加驱动;下层(15~30 km)地震为韧性层局部脆性破裂,由中地壳低速体的热应力集中与剪切滑脱面的蠕变失稳共同触发.

(3)岩石圈热结构横向不均定位孕震区,脆-韧性转换深度划分地震层位,深、浅断裂为地震发生核心载体,其可为华北地区地震监测与预测提供理论依据,即重点关注热流梯度带、莫霍面隆起区及深、浅断裂交汇带的应力-温度变化.

致 谢 感谢中国地震台网中心 国家地震科学数据中心(http://data.earthquake.cn)、中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)提供的数据支持!

References

An Z W, Zhu C Z. 1985. Relationship between geothermal anomaly and earthquake development and occurrence. Journal of Seismological Research (in Chinese), 8(4): 541-549.

Cai Y E, Yin Y Q, Wang R. 1992. The influence of thermal state on earthquake occurrence. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 35(2): 204-213.

Cao X L, Zhang Z G, Li F L. 1997. Abnormal variations of meteorological element before the Tangshan *M*7.8 earthquake. North China Earthquake Sciences (in Chinese), 15(2): 50-59.

Čermák V, Bodri L. 1991. A heat production model of the crust and upper mantle. Tectonophysics, 194(4): 307-323.

Chang J, Qiu N S, Zhao X Z, *et al*. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(3): 1003-1016, doi: 10.6038/cjg20160322.

Che Y T, Wang J H, Yu J Z, *et al*. 2001. Character of thermal fluids in upper crust and relationship with seismicity in Yanqing-Huailai Basin. Seismology and Geology (in Chinese), 23(1): 49-54, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2001.01.006.

Chi Q H, Yan M C. 1998. Radioactive elements of rocks in North China Platform and the thermal structure and temperature distribution of the modern continental lithosphere. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 41(1): 38-48.

Cui Y, Zhu C Q, Qiu N S, *et al*. 2019. Radioactive heat production and terrestrial heat flow in the Xiong'an area, North China. Energies, 12(24): 4608, doi: 10.3390/en12244608.

Duan H X, Liu Y G, Wang G L, *et al*. 2023. Characteristics of the terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in central Cangxian Uplift: a case study of Xianxian Geothermal Field. Earth Science (in Chinese), 48(3): 988-1001, doi: 10.3799/dqkx.2022.070.

Duan Y H, Liu B J, Zhao J R, *et al*. 2015. 2-D P-wave velocity structure of lithosphere in the North China tectonic zone: constraints from the Yancheng-Baotou deep seismic profile. Science China Earth Sciences, 58(9): 1577-1591, doi: 10.1007/s11430-015-5081-y.

Duan Y H, Wang F Y, Zhang X K, *et al*. 2016. Three-dimensional crustal velocity structure model of the middle-eastern North China Craton (HBCrust1.0). Science China Earth Sciences, 59(7): 1477-1488, doi: 10.1007/s11430-016-5301-0.

Gao N A, Wang X W, Liang H J, *et al*. 2022. Genetic mechanism of the geothermal system in Shulu Sag, Jizhong Depression. Geological Journal of China Universities (in Chinese), 28(6): 920-932, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2021014.

He A H, Zhao G, Liu C L, *et al*. 2012. The anomaly characteristics before Wenchuan earthquake and Yushu earthquark in Qinghai Yushu and Delingha geothermal observation wells. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 55(4): 1261-1268, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.021.

He L J. 2015. Thermal regime of the North China Craton: implications for craton destruction. Earth-Science Reviews, 140: 14-26, doi: 10.1016/j.earscirev.2014.10.011.

Hu H Y, Ye G F, Li B C, *et al*. 2025. The geothermal field genesis mechanism in the central uplift of the Jizhong depression: a study based on magnetotelluric imaging. Geothermics, 127: 103240, doi: 10.1016/j.geothermics.2024.103240.

Hu S B, Wang J Y. 1993. Relationship between maximum focal depth of earthquake and surface heat flow in Fujian and Taiwan Regions. Seismology and Geology (in Chinese), 15(1): 66-68.

Huang F, He L J, Wu Q J. 2015. Lithospheric thermal structure of the Ordos Basin and its implications to destruction of the North China

Craton. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 58(10): 3671-3686, doi: 10.6038/cjg20151020.

Im K, Avouac J P. 2021. On the role of thermal stress and fluid pressure in triggering seismic and aseismic faulting at the Brawley Geothermal Field, California. Geothermics, 97: 102238, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102238.

Ito K. 1999. Seismogenic layer, reflective lower crust, surface heat flow and large inland earthquakes. Tectonophysics, 306(3-4): 423-433, doi: 10.1016/S0040-1951(99)00069-4.

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, Shi Y Z, *et al*. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: updated dataset and tectonic implications. Tectonophysics, 753: 36-48.

Jiang X X, Zhu C Q. 2025. Different distribution of deep and shallow geothermal resources in Jizhong Depression under complex heat transfer. Earth Science (in Chinese), 50(4): 1485-1498, doi: 10.3799/dqkx.2024.031.

Lai Z B, Chao J Q, Zhao Z F, *et al*. 2023. Relationship between Crustal Deformation and Thermal Anomalies in the 2022 Ninglang M_S5.5 Earthquake in China: clues from InSAR and RST. Remote Sensing, 15(5): 1271, doi: 10.3390/rs15051271.

Li Q L, Wang Y, Zhou Y Y, *et al*. 2019. Geothermal anomalies in the Jianchuan-Deqin region: constraints on the northwest boundary of Sichuan-Yunnan Rhombic Block and seismic activity. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry (in Chinese), 38(1): 90-102, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.012.

Li S S. 2023. Evaluation and cause analysis of geothermal resources in Linqing Depression[Master's thesis](in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).

Liang J T, Wang H L, Bai Y, *et al*. 2016. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin and its coupling relationship with Pacific Plate subduction. Journal of Asian Earth Sciences, 127: 257-266, doi: 10.1016/j.jseaes.2016.06.012.

Liu C G, Zhou Y Q, Liang Z, *et al*. 2015. Influences of the tectonic evolution in Taihang Mountains on Upper Paleozoic Hydrocarbon in Linqing Depression. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing (in Chinese), 34(5): 12-17, doi: 10.3969/J.ISSN.1000-3754.2015.05.003.

Liu K, Yang T, Li H G, *et al*. 2023. Deep structural characteristics in the Xingtai seismic zone revealed by precise relocation of small earthquakes and tomography. Seismology and Geology (in Chinese), 45(6): 1328-1348, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2023.06.005.

Liu Q Y, He L J. 2019. Tectono-thermal modeling of the Bohai Bay Basin since the Cenozoic. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 62(1): 219-235, doi: 10.6038/cjg2019M0637.

Liu S W, Wang L S, Gong Y L, *et al*. 2005. Thermal-rheological structure of the lithosphere beneath Jiyang Depression: its implications for geodynamics. Science in China Series D: Earth Sciences, 48(10): 1569-1584, doi: 10.1360/02yd0286.

Liu Y W, Gao A T, Shi J, *et al*. 2007. Prilimary study of temperature distribution and associated thermal stress in crust in Tianshui, China. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 29(6): 605-617, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2007.06.005.

Liu Z P, Gao X L, Li Y S. 2003. Density structure of the Taihang Mountains gravity anomaly zone and its geological interpretation. Seismology and Geology (in Chinese), 25(2): 266-273, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2003.02.011.

Lu J F, Rao S, Huang S D, *et al*. 2023. Simulation of lithospheric thermal structure and its implications for heat source mechanism of geothermal system in Weihe Basin. Acta Geoscientica Sinica (in Chinese), 44(1): 33-44, doi: 10.3975/cagsb.2022.101704.

Ma B S, Qi J F, Ge J W. 2019. Development of two-phase transfer zones during multiphase rifting and their influence on sedimentation in the Baxian Sag, Bohai Bay Basin, northern China. Geological Magazine, 156(11): 1821-1838, doi: 10.1017/S0016756819000190.

Miao S Q, Li H P, Chen G. 2014. The temperature dependence of thermal conductivity for lherzolites from the North China Craton and the associated constraints on the thermodynamic thickness of the lithosphere. Geophysical Journal International, 197(2): 900-909, doi: 10.1093/gji/ggu020.

Pasquale V, Verdoya M, Chiozzi P, *et al*. 1997. Rheology and seismotectonic regime in the northern central Mediterranean. Tectonophysics, 270(3-4): 239-257, doi: 10.1016/s0040-1951(96)00211-9.

Qiu N S, Zuo Y H, Chang J, *et al*. 2014. Geothermal evidence of Meso-Cenozoic lithosphere thinning in the Jiyang sub-basin, Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. Gondwana Research, 26(3-4): 1079-1092, doi: 10.1016/j.gr.2013.08.011.

Qiu N S, Xu W, Zuo Y H, *et al*. 2017. Evolution of Meso-Cenozoic thermal structure and thermal-rheological structure of the lithosphere in the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. Earth Science Frontiers (in Chinese), 24(3): 13-26, doi: 10.13745/j.esf.2017.03.002.

Rao S, Luo Y, Huang S D, *et al*. 2024. Heat accumulation effect of groundwater convective activity in karst geothermal reservoir in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 67(8): 3075-3088, doi: 10.6038/cjg2024S0016.

Rybach L, Buntebarth G. 1984. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere. Tectonophysics, 103(1-4): 335-344, doi: 10.1016/0040-1951(84)90095-7.

Shuey R T, Schellinger D K, Tripp A C, *et al*. 1977. Curie depth determination from aeromagnetic spectra. Geophysical Journal International, 50(1): 75-101.

Sibson R H. 1974. Frictional constraints on thrust, wrench and normal faults. Nature, 249(5457): 542~544, doi: 10.1038/249542a0.

Tian H, Zhang Z L. 1992. Study on the crustal thermal structure and thermal stress field in the Bohai Sea and its adjacent areas. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 14(1): 29-35.

Tullis J, Yund R A. 1977. Experimental deformation of dry westerly granite. Journal of Geophysical Research, 82(36): 5705-5718.

Tullis J, Yund R A. 1985. Dynamic recrystallization of feldspar: a mechanism for ductile shear zone formation. Geology, 13(4): 238-241, doi: 10.1130/0091-7613(1985)13<238:DROFAM>2.0.CO;2.

Wang B, Zhou Y S, Zhong J, *et al*. 2022. Tectonic geothermal feature of Northwest Yunnan and the influence on seismic activity. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 65(9): 3419-3433, doi: 10.6038/cjg2022P0938.

Wang C Y, Duan Y H, Wu Q J, *et al*. 2016. Exploration on the deep tectonic environment of strong earthquakes in North China and relevant research findings. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 38(4): 511-549, doi: 10.11939/jass.2016.04.002.

Wang C Y, Wu Q J, Duan Y H, *et al*. 2017. Crustal and upper mantle structure and deep tectonic genesis of large earthquakes in North China. Science China Earth Sciences, 6(5): 821-857, doi: 10.1007/s11430-016-9009-1.

Wang G L, Liu F, Lin W J, *et al*. 2023. The crustal heat production rate and crustal and mantle heat flow distribution in the land areas of China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 66(12): 5041-5056, doi: 10.6038/cjg2022Q0877.

Wang J, Li C F, Lei J S, *et al*. 2016. Relationship between seismicity and crustal thermal structure in North China. Acta Seismologica Sinica (in Chinese), 38(4): 618-631, doi: 10.11939/jass.2016.04.008.

Wang K, Xiong X. 2012. Refining thermal structure of the lithosphere in eastern section of Heishui-Quanzhou Geotransect with geodetic observations. Progress in Geophysics (in Chinese), 27(4): 1366-1376, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.04.010.

Wang K, Xiong X, Zhou Y M. 2020. Three-dimensional thermo-rheological structure of the lithosphere in the North China Craton determined by integrating multiple observations: implications for the

formation of rifts. Science China Earth Sciences, 63(7): 969-984, doi: 10.1007/s11430-019-9566-1.

Wang Q, Sun Y H, Fu X F, *et al*. 2024. Mesozoic-Cenozoic tectonic transition and its significances for petroleum exploration in the Southern Jizhong Depression. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) (in Chinese), 54(2): 447-460, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220175.

Wang Y, Zhao C P, Liu F, *et al*. 2014. Research on relationship between geochemical characteristics of thermal springs and seismic activity in Xiaojiang fault zone and its adjacent area. Journal of Seismological Research (in Chinese), 37(2): 228-243, doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2014.02.010.

Wang Z T, Rao S, Xiao H P, *et al*. 2021. Terrestrial heat flow of Jizhong depression, China, Western Bohai Bay basin and its influencing factors. Geothermics, 96: 102210, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102210.

Wang Z T, Hu S B, Zheng L B, *et al*. 2025. Present-day geothermal field and thermo-rheological structure of Dabie orogenic belt and surrounding areas. Acta Geologica Sinica (in Chinese), 99(5): 1743-1754, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024144.

Wu C, Zhang X Q, Zhao Y K. 2000. Stratiform geomorphology and Himalayan tectonic movement on the North China Mountains. Geography and Territorial Research (in Chinese), 16(3): 82-86, doi: 10.3969/j.issn.1672-0504.2000.03.017.

Wu Q F, Zu J H, Lian Y F, *et al*. 1993. The geothermal field characteristics and seismic activities in Shanxi fault depression area. North China Earthquake Sciences (in Chinese), 11(2): 14-22.

Xiang C Y, Zhou Z H. 2000. Relationship between seismicity and geothermal structure of the lithosphere in Yunnan Province, China. Earthquake Research in China (in Chinese), 16(3): 263-272, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2000.03.008.

Xie Z J, Lü Y J, Fang Y, *et al*. 2019. Research on the seismic activity of the Beijing-Tianjin-Hebei region. Progress in Geophysics (in Chinese), 34(3): 961-968, doi: 10.6038/pg2019AA0624.

Yang X P, Liu B J, Zhan Y, *et al*. 2016. Survey of crustal structure and fault activity around southern Shijiazhuang in the eastern margins of Taihangshan Mts. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(2): 528-542, doi: 10.6038/cjg20160212.

Yang X X, Chen Y J, Yi Z G, *et al*. 1992. Response of geothermal dynamic observation in Sanmafang to nearby seismic activity. Earthquake (in Chinese), (2): 75-77.

Zang S X, Liu Y G, Ning J Y. 2002. Thermal structure of the lithosphere in North China. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 45(1): 56-66.

Zhang L Y, Liu Q Y, He L J. 2016. The different lithospheric thermal structure of North China Craton and its implications. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 59(10): 3618-3626, doi: 10.6038/cjg20161009.

Zhao B, Gao Y, Shi Y T. 2013. Relocation of small earthquakes in north china using double difference algorithm. Earthquake (in Chinese), 33(1): 12-21, doi: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.01.002.

Zheng W J, Zhang Z Q, Hao M, *et al*. 2022. Physical basis for prediction of continental strong earthquakes: development and prospect of active tectonic block theory. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 67(13): 1352-1361, doi: 10.1360/TB-2021-1025.

Zhu Y, Ji Y F, Liu L J, *et al*. 2023. Heterogeneous slab thermal dehydration driving warm subduction zone earthquakes. Scientific Reports, 13(1): 21157, doi: 10.1038/s41598-023-48498-3.

Zuo Y H, Li J W, Li W Z. 2015. Mesozoic and Cenozoic "thermal" lithospheric thickness evolution in the Tarim basin. Progress in Geophysics (in Chinese), 30(4): 1608-1615, doi: 10.6038/pg20150415.

附中文参考文献

安镇文, 朱传镇. 1985. 地热异常与地震孕育和发生的关系. 地震研究, 8(4): 541-549.

蔡永恩, 殷有泉, 王仁. 1992. 热状态对地震发生的影响. 地球物理学报, 35(2): 204-213.

曹新来, 张子广, 李福来. 1997. 1976 年唐山 7.8 级地震前气象要素的异常变化. 华北地震科学, 15(2): 50-59.

常健, 邱楠生, 赵贤正, 等. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征. 地球物理学报, 59(3): 1003-1016, doi: 10.6038/cjg20160322.

车用太, 王基华, 鱼金子, 等. 2001. 延怀盆地上地壳热流体特征及其与地震活动的关系. 地震地质, 23(1): 49-54, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2001.01.006.

迟清华, 鄢明才. 1998. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布. 地球物理学报, 41(1): 38-48.

段和肖, 刘彦广, 王贵玲, 等. 2023. 沧县隆起中部大地热流及岩石圈热结构特征—以献县地热田为例. 地球科学, 48(3): 988-1001, doi: 10.3799/dqkx.2022.070.

段永红, 王夫运, 张先康, 等. 2016. 华北克拉通中东部地壳三维速度结构模型(HBCrust1.0). 中国科学: 地球科学, 46(6): 845-856, doi: 10.1360/N072015-00447.

高楠安, 汪新伟, 梁海军, 等. 2022. 冀中坳陷束鹿凹陷地热系统成因模式. 高校地质学报, 28(6): 920-932, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2021014.

何案华, 赵刚, 刘成龙, 等. 2012. 青海玉树与德令哈地热观测井在汶川与玉树地震前的异常特征. 地球物理学报, 55(4): 1261-1268, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.021.

胡圣标, 汪集旸. 1993. 闽台地区最大震源深度与地表热流的关系. 地震地质, 15(1): 66-68.

黄方, 何丽娟, 吴庆举. 2015. 鄂尔多斯盆地深部热结构特征及其对华北克拉通破坏的启示. 地球物理学报, 58(10): 3671-3686, doi: 10.6038/cjg20151020.

江晓雪, 朱传庆. 2025. 复杂热传递作用下冀中坳陷深、浅部地热资源差异分布. 地球科学, 50(4): 1485-1498, doi: 10.3799/dqkx.2024.031.

姜光政, 高堋, 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.

李其林, 王云, 周艺颖, 等. 2019. 剑川—德钦一带的地热异常: 对川滇菱块西北边界和地震活动性的意义. 矿物岩石地球化学通报, 38(1): 90-102, doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2019.38.012.

李岁岁. 2023. 临清凹陷地热资源评价及成因分析[硕士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).

刘晨光, 周瑶琪, 梁钊, 等. 2015. 太行山构造演化对临清坳陷上古生界油气的影响. 大庆石油地质与开发, 34(5): 12-17, doi: 10.3969/J.ISSN.1000-3754.2015.05.003.

刘亢, 杨婷, 李红光, 等. 2023. 小地震精定位与层析成像揭示的邢台地震区深部构造特征. 地震地质, 45(6): 1328-1348, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2023.06.005.

刘琼颖, 何丽娟. 2019. 渤海湾盆地新生代以来构造-热演化模拟研究. 地球物理学报, 62(1): 219-235, doi: 10.6038/cjg2019M0637.

刘绍文, 王良书, 龚育龄, 等. 2005. 济阳坳陷岩石圈热-流变学结

构及其地球动力学意义. 中国科学 D 辑 地球科学, 35(3): 203-214, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2005.03.002.

刘耀炜, 高安泰, 施锦, 等. 2007. 天水地区地壳结构热分布与热应力特征初步研究. 地震学报, 29(6): 605-617, doi: 10.3321/j.issn:0253-3782.2007.06.005.

刘占坡, 高祥林, 黎益仕. 2003. 太行山重力梯级带的密度结构及其地质解释. 地震地质, 25(2): 266-273, doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2003.02.011.

芦佳飞, 饶松, 黄顺德, 等. 2023. 渭河盆地岩石圈热结构模拟及其对地热系统热源机理的启示. 地球学报, 44(1): 33-44, doi: 10.3975/cagsb.2022.101704.

邱楠生, 许威, 左银辉, 等. 2017. 渤海湾盆地中—新生代岩石圈热结构与热-流变学演化. 地学前缘, 24(3): 13-26, doi: 10.13745/j.esf.2017.03.002.

饶松, 罗洋, 黄顺德, 等. 2024. 冀中坳陷岩溶热储地下水对流活动的聚热效应. 地球物理学报, 67(8): 3075-3088, doi: 10.6038/cjg2024S0016.

田华, 张之立. 1992. 渤海及其邻区地壳热结构和热应力场的研究. 地震学报, 14(1): 29-35.

王博, 周永胜, 钟骏, 等. 2022. 滇西北构造地热特征及对地震活动的影响. 地球物理学报, 65(9): 3419-3433, doi: 10.6038/cjg2022P0938.

王椿镛, 段永红, 吴庆举, 等. 2016. 华北强烈地震深部构造环境的探测与研究. 地震学报, 38(4): 511-549, doi: 10.11939/jass.2016.04.002.

王贵玲, 刘峰, 蔺文静, 等. 2023. 我国陆区地壳生热率分布与壳幔热流特征研究. 地球物理学报, 66(12): 5041-5056, doi: 10.6038/cjg2022Q0877.

王健, 李春峰, 雷建设, 等. 2016. 华北地区地震活动与地壳热结构关系研究. 地震学报, 38(4): 618-631, doi: 10.11939/jass.2016.04.008.

王恺, 熊熊. 2012. 利用大地测量和地热资料联合确定黑水—泉州地学断面东段岩石圈热及强度结构. 地球物理学进展, 27(4): 1366-1376, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.04.010.

王恺, 熊熊, 周宇明, 等. 2020. 联合多种资料确定华北岩石圈三维热-流变结构: 对裂陷形成的意义. 中国科学: 地球科学, 50(7): 946-961, doi: 10.1360/SSTe-2019-0139.

王琦, 孙永河, 付晓飞, 等. 2024. 冀中坳陷南部中-新生代构造转换及其油气地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 54(2): 447-460, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220175.

王云, 赵慈平, 刘峰, 等. 2014. 小江断裂带及邻近地区温泉地球化学特征与地震活动关系研究. 地震研究, 37(2): 228-243, doi: 10.3969/j.issn.1000-0666.2014.02.010.

王朱亭, 胡圣标, 郑立博, 等. 2025. 大别造山带及周边地区现今地温场特征与岩石圈热-流变学结构. 地质学报, 99(5): 1743-1754, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024144.

吴忱, 张秀清, 赵英魁. 2000. 中国华北山地的层状地貌与喜马拉雅构造运动. 地理学与国土研究, 16(3): 82-86, doi: 10.3969/j.issn.1672-0504.2000.03.017.

吴乾蕃, 祖金华, 廉雨方, 等. 1993. 山西断陷带地热特征与地震活动性. 华北地震科学, 11(2): 14-22.

向才英, 周真恒. 2000. 云南地震活动与岩石圈热结构的关系. 中国地震, 16(3): 263-272, doi: 10.3969/j.issn.1001-4683.2000.03.008.

谢卓娟, 吕悦军, 方怡, 等. 2019. 京津冀地区的地震活动性研究. 地球物理学进展, 34(3): 961-968, doi: 10.6038/pg2019AA0624.

杨晓平, 刘保金, 詹艳, 等. 2016. 太行山东缘石家庄南部地壳结构及断裂活动性探测. 地球物理学报, 59(2): 528-542, doi: 10.6038/cjg20160212.

杨修信, 陈沅俊, 易志刚, 等. 1992. 三马坊地热动态观测对附近地震活动的反应. 地震, (2): 75-77.

臧绍先, 刘永刚, 宁杰远. 2002. 华北地区岩石圈热结构的研究. 地球物理学报, 45(1): 56-66.

张林友, 刘琼颖, 何丽娟. 2016. 华北克拉通热结构差异性特征及其意义. 地球物理学报, 59(10): 3618-3626, doi: 10.6038/cjg20161009.

赵博, 高原, 石玉涛. 2013. 用双差定位结果分析华北地区的地震活动. 地震, 33(1): 12-21, doi: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.01.002.

郑文俊, 张竹琪, 郝明, 等. 2022. 强震孕育发生的大陆活动地块理论未来发展与强震预测探索. 科学通报, 67(13): 1352-1361, doi: 10.1360/TB-2021-1025.

左银辉, 李佳蔚, 李文正, 等. 2015. 塔里木盆地中、新生代'热'岩石圈厚度演化. 地球物理学进展, 30(4): 1608-1615, doi: 10.6038/pg20150415.