

doi: 10.12029/gc20210511

王凯, 张杰, 白大为, 吴新刚, 岳航羽, 张保卫, 王小江, 张凯. 2021. 雄安新区地热地质模型探究: 来自地球物理的证据[J]. 中国地质, 48(5): 1453–1468.

Wang Kai, Zhang Jie, Bai Dawei, Wu Xingang, Yue Hangyu, Zhang Baowei, Wang Xiaojiang, Zhang Kai. 2021. Geothermal–geological model of Xiong'an New Area: Evidence from geophysics [J]. *Geology in China*, 48(5): 1453–1468(in Chinese with English abstract).

雄安新区地热地质模型探究: 来自地球物理的证据

王凯^{1,2,3}, 张杰^{1,2}, 白大为^{1,2}, 吴新刚^{1,2}, 岳航羽^{1,2}, 张保卫^{1,2}, 王小江^{1,2}, 张凯^{1,2}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查工程技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要:雄安新区内地热资源丰富, 区内有牛驼镇地热田、容城地热田和高阳地热田, 地热资源开发利用较早, 但是对其深部热源机制仍未形成统一观点。为了研究雄安新区内地热田深部热源机制, 在新区及外围进行了深反射地震和长周期大地电磁探测, 对取得的同剖面的深反射地震和大地电磁数据进行处理和综合解释, 探明了研究区从地表至莫霍面范围内地质构造和电性结构。下地壳结构在深反射地震剖面与大地电磁剖面上有很好的对应关系。电阻率低值区对应着在深反射地震剖面上存在一系列反射同相轴, 且同相轴可以延续到莫霍面, 电阻率高值区对应着在深反射地震剖面上无明显连续反射同相轴, 尤其是在莫霍面之上呈现地震反射近似“空白区”。结合区域地热资料构建了研究区深部地热地质模型, 对新区内深部地热机制进行了解释。该模型为“二元”生热模型, 其热源包含两个部分, 深部地幔热源和地壳放射性元素衰变生热。放射性元素衰变生热占地表热流的接近 30%, 而幔源热流在地表热流中的占比可达约 70%。在牛驼镇下方, 莫霍面以上, 由于地幔热物质上涌造成下地壳上隆, 幔源岩浆底侵作用于下地壳形成了局部热异常, 该热异常具有低速高导的地球物理特征, 认为是牛驼镇地热田和容城地热田的深部热源; 以区域断裂为热通道, 大地热流由深部向上传导、扩散到牛驼镇凸起和容城凸起顶部, 对碳酸盐岩储水层进行加热, 形成地热储层; 上覆新近系沉积地层是良好的热盖层。

关键词: 地热地质模型; 深反射地震; 长周期大地电磁; 地质调查工程; 雄安新区

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2021)05–1453–16

Geothermal–geological model of Xiong'an New Area: Evidence from geophysics

WANG Kai^{1,2,3}, ZHANG Jie^{1,2}, BAI Dawei^{1,2}, WU Xingang^{1,2}, YUE Hangyu^{1,2}, ZHANG Baowei^{1,2}
WANG Xiaojiang^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}

(1. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China*; 2. *National Modern Geological Exploration Technology Research Centre, Langfang 065000, Hebei, China*; 3. *College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China*)

收稿日期: 2021–03–15; 改回日期: 2021–06–23

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189133)和中国地质科学院基本科研项目(JYYWF20180302)联合资助。

作者简介: 王凯, 男, 1986 年生, 博士生, 工程师, 从事地震方法技术研究和综合地球物理解释; E-mail: cgswkai@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 张杰, 男, 1977 年生, 教授级高级工程师, 从事电磁探测技术方法研究和综合地球物理应用; E-mail: cgszjie@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: Geothermal resources are abundant in the Xiong'an New Area, including Niutuozen geothermal field, Rongcheng geothermal field and Gaoyang geothermal field. The geothermal resources in this area were developed and utilized earlier, but there is still no unified view on its deep heat source mechanism. In order to study the deep heat source mechanism, deep reflection seismic and long-period magnetotelluric survey were carried out in Xiong'an New Area and its periphery. The deep reflection seismic data and magnetotelluric data of the same section were processed and jointly interpreted. The geological structure and electrical structure in the study area from the surface to the Moho surface were explored. The lower crustal structure has a good corresponding relationship between the deep reflection seismic profile and the magnetotelluric profile. The area of low resistivity corresponds to the existence of a series of reflection events on the deep reflection seismic profile, and the event axis can continue to the Moho surface. The areas of high resistivity correspond to the absence of obvious continuous reflection events on the deep reflection seismic profile. Especially above the Moho surface, there is an approximate "blank area" of seismic reflection. Combined with regional geothermal data, a deep geothermal geological model of the study area was constructed, and the deep geothermal mechanism in the new area was explained. This model is a "dual" heat generation model, and its heat source consists of two parts, the deep mantle heat source and the heat generated by the decay of radioactive elements in the crust. The decay heat of radioactive elements accounts for nearly 30% of the surface heat flow, and the mantle-derived heat flow accounts for about 70% of the surface heat flow. Below Niutuo Town and above the Moho, the lower crust was uplifted due to the upwelling of hot mantle material, and the undercut of mantle-derived magma formed a local thermal anomaly in the lower crust. This thermal anomaly has low-speed and high-conductivity geophysical characteristics. It is considered to be the deep heat source of the Niutuozen geothermal field and the Rongcheng geothermal field. With regional faults as the heat channel, the terrestrial heat flow is conducted upward from depth and diffused to the top of the Niutuozen and Rongcheng bulges, which is a source of carbonate reservoirs. The water layer is heated to form a geothermal reservoir; the overlying Neogene sedimentary stratum is a good thermal cap layer.

Key words: geothermal geological model; deep reflection seismic; long-period magnetotelluric; geological survey engineering; Xiong'an New Area

About the first author: WANG Kai, male, born in 1986, engineer, doctoral candidate, engaged in the research of seismic method and interpretation of integrated geophysical data; E-mail: cgswkai@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: ZHANG Jie, mail, born in 1977, senior engineer, engaged in the research of electromagnetic detection technology and application of integrated geophysical method; E-mail: cgszjie@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20189133) and Chinese Academy of Geological Sciences (No. JYYWF20180302).

1 引 言

地热资源是一种可再生的绿色清洁能源,对雄安新区生态优先、绿色发展的理念具有重要意义。雄安新区是河北省地热条件最好的地区,位于该区的地热田有牛驼镇地热田、容城地热田和高阳地热田。

华北地区地热研究始于20世纪80年代,陈墨香等(1982, 1990)利用华北地区内地热井的地温数据、大地热流值等对该区的地热场特征进行了总结,并探讨了地热场的形成机制;隋少强等(2019)对天津地区内蓟县系雾迷山组岩溶型热储特征进行了系统的研究;自20世纪90年代以来,中国科学院的地热团队在华北地区开展了长期的研究,取得了突出的成就(汪集旻等, 2012; 庞忠和等, 2017),并提出了雄安新区深层地热的“二元聚热”成因模式

(Pang et al., 2015; 庞忠和等, 2017);近几年,学者们利用钻井测温资料和实测的岩石热导率数据对雄安新区所处的冀中拗陷进行了系统的研究,包括地温梯度、大地热流、热岩石圈厚度、岩石圈热结构等地热特征参数,总结了现今地热特征,提出了当前岩石圈热结构为典型的“冷壳热幔”型的观点(常健等, 2016; 邱楠生等, 2017);雄安新区水化学特征的研究表明,雄安新区地热系统的水源补给主要来自于北侧的燕山山脉和西侧的太行山山脉(Wang et al., 2013),但是关于深部热源的成因却得出了与“二元聚热”不一致的结论,认为深部热源更可能是深部放射性热源衰变生热(刘明亮等, 2019);近两年,中国地质调查局在雄安新区打了多口深部地热井,通过实测地热井数据对雄安新区内地热田热储层结构、热储特征、地热资源储量等进行了定量的研

究(胡秋韵等, 2020; 马峰等, 2020; 王贵玲等, 2020; 赵佳怡等, 2020)。以上研究多针对地热储层的分布、特征、储量及浅部热源机制进行研究, 很少针对该区地热结构深部热源机制进行详细的探讨。

研究表明, 大型盆地内部大地热流分布往往受控于基底的区域构造展布及起伏形态。基底凹陷区沉积岩厚度大, 而沉积岩相对于基底岩石热导率较低, 对来自地壳深部的地热起到屏蔽作用, 使热流在侧向上发生“热折射”, 导致盆地隆起区热流高于凹陷区(饶松等, 2013)。对雄安新区内大地热流分布的研究表明, 雄安新区内深部温度分布同样具有凹凸相间的分布特征, 凸起区相对于凹陷区温度较高(王朱婷等, 2019)。因此, 探讨深部热源机制需要将研究区放入一个大的构造格架之中, 结合多种地球探测技术的证据, 对整体构造格架特征进行研究, 从时间和空间上把握构造演化的规律, 进而得到一个相对合理的深部热源解释。

深反射地震技术原理与常规地震反射方法相同, 但其接收排列长, 震源能量大, 探测深度比常规地震勘探大得多, 具有探测深度大、分辨率高和准确可靠等优点, 是研究解决深部地质问题和探测岩石圈精细结构的有效技术手段(郭景如等, 1996; 高锐等, 2009; 卢占武等, 2009; 王海燕等, 2010; 徐泰然等, 2017)。大地电磁方法是研究地球壳幔构造的主要地球物理方法之一, 其探测原理是基于地球不同圈层的不同电性特征。一般来说, 地壳最上部的沉积层由于孔隙、裂隙发育及流体的作用而表现为低阻特征; 上地壳主要由火成岩与变质岩组成, 通常为高阻特征; 相反, 下地壳通常表现为低阻特征, 可能是与地下介质出现局部熔融、塑性、流变等物质状态的改变等有关(魏文博等, 2006), 也可能与下地壳存在水流体有关(Marquis et al., 1992)。不管哪种原因, 都与地球深部热结构密切相关, 因此可以用于深部热结构的探测。在火山地区已有利用长周期大地电磁进行深部岩浆通道探测的成功实例(詹艳等, 2006)。

本文从雄安新区深部地质构造入手, 利用深反射地震探测、长周期大地电磁等深部地球物理探测方法对雄安新区深部地质结构进行了精细探测, 并结合区域地质资料, 构建了雄安新区深部地热地质

模型, 探讨了雄安新区深部热源机制。

2 区域构造背景

雄安新区位于渤海湾盆地冀中拗陷的中部(图1), 构造单元上包括牛驼镇凸起南部、牛北斜坡南部、容城凸起、高阳低凸起北部、霸县凹陷、保定凹陷和白洋淀洼陷; 其西北部为徐水凹陷, 东南部为文安斜坡, 北部为廊固凹陷, 南部为饶阳凹陷。

作为渤海湾盆地的一部分, 雄安新区所处的最大构造事件为华北克拉通的破坏。华北克拉通破坏的动力学机制与太平洋板块俯冲密切相关, 由于深部地幔热物质的上涌, 岩石圈地幔发生大规模破坏和不同程度的减薄(朱日祥等, 2009), 在浅部主要表现为一系列变质核杂岩的形成(Liu et al., 2005)、广泛的断陷盆地的出现(朱光等, 2008)、伸展断层活动与大规模的火山喷发及岩体侵入(曹现志等, 2013; 安慧婷等, 2015)。华北克拉通东部的破坏不仅表现为岩石圈地幔的改造和破坏, 而且表现为下地壳甚至整个地壳的改造和破坏, 其破坏程度在晚中生代达到高峰, 之后华北克拉通东部已不再具有典型的克拉通属性(朱日祥等, 2012)。

收集区域重力资料并处理得到剩余重力异常图(图2), 结果显示, 该区总体构造呈NE—NNE向, 渤海湾盆地分别以太行山东麓断裂和郟庐断裂为西、东部边界。其断陷阶段从晚侏罗世延续到早白垩世, 在该时期, 渤海湾盆地开始发育, 发生强烈的伸展活动, 这一过程持续至古近纪末期, 这一时期发育了太行山山前断裂及一系列次级伸展断裂, 控制了冀中拗陷内部次级断陷盆地的发育(孙冬胜等, 2004); 在晚白垩世末期抬升剥蚀, 在古新世孔店期至渐新世东营期进入伸展裂陷阶段以及拉张断拗阶段; 新近纪以来, 伸展活动减弱, 整个渤海湾盆地进入裂后热沉降阶段(索艳慧等, 2017)。

3 地球物理数据采集及处理

3.1 数据采集

穿过雄安新区, 垂直于区域构造走向, 西起太行山隆起, 东至大城凸起布设长剖面深反射地震测线易县—大城剖面, 与深反射地震同剖面布设大地电磁测线(图1)。

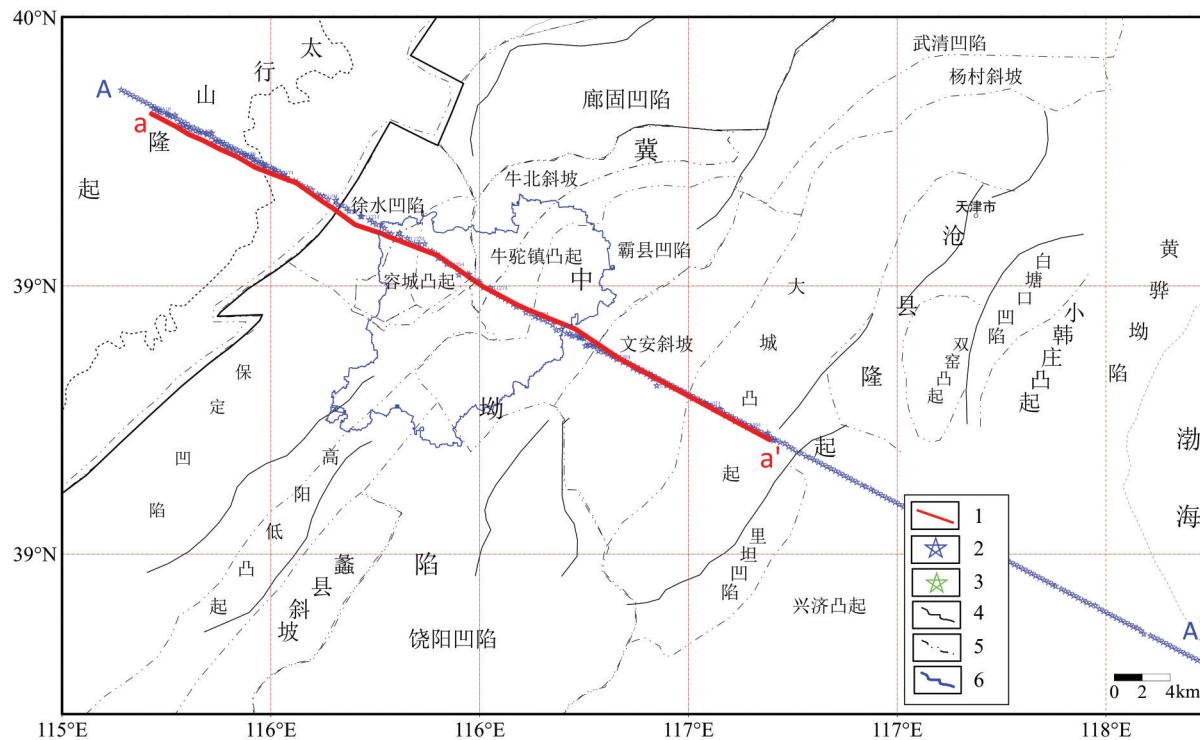


图1 雄安新区综合地球物理测线位置图

1—易县—大城深反射地震剖面; 2—宽频大地电磁测点; 3—超长周期大地电磁测点; 4—断裂; 5—构造边界; 6—雄安新区边界

Fig. 1 Location of geophysical survey lines of Xiong'an New Area and its periphery

1—Deep reflection seismic profile of Yixian—Dacheng; 2—Survey point of broadband magnetotelluric; 3—Survey point of ultra long period magnetotelluric; 4—Fault; 5—Tectonic boundary; 6—Boundary of Xiong'an New Area

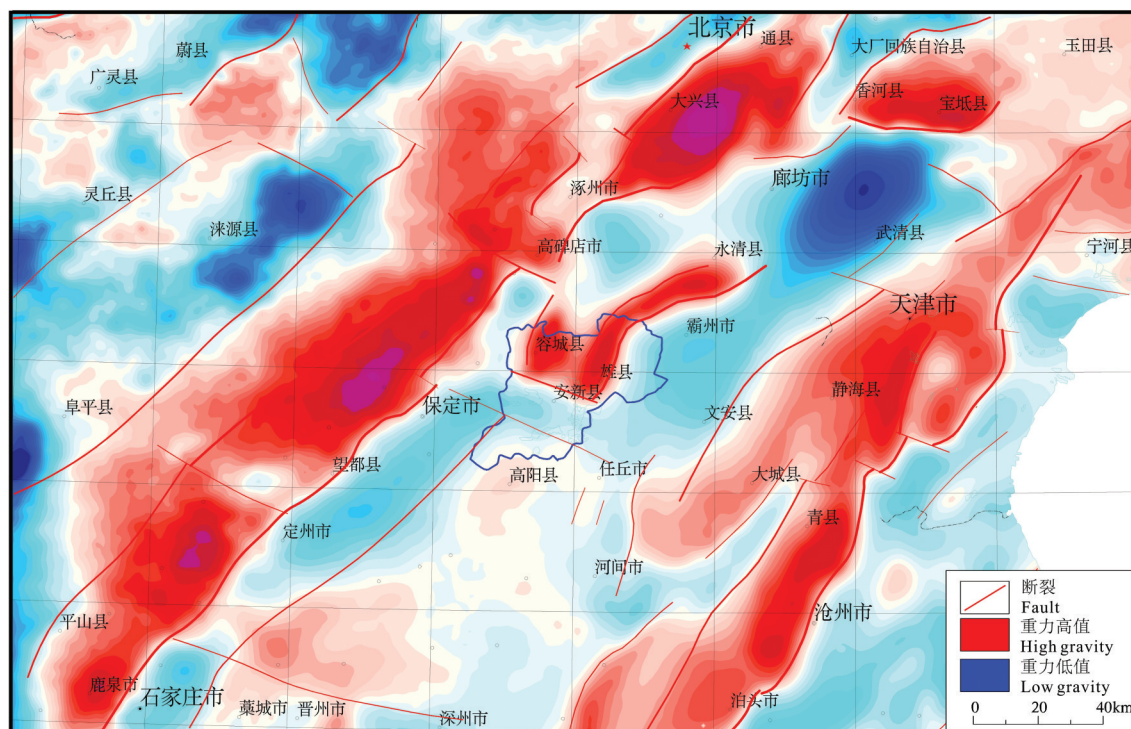


图2 雄安新区及外围剩余重力异常图

Fig.2 The residual gravity anomaly of Xiong'an New Area and its periphery

深反射地震测线满覆盖共 141.43 km(图 1 中 aa'),利用炸药震源激发,多次覆盖方式进行数据采集。在测线东部厚第四系覆盖区,震源激发井深约 50 m,激发药量 20 kg 左右;在测线西部基岩区,震源激发井深约 20 m,激发药量 16 kg 左右;采用中间激发,两边对称接收观测系统,检波器采用工业标准的 10 Hz 检波器,单点 12 只组合,道距 20 m,炮距 120 m,1440 道接收,采样间隔 4 ms,记录长度 30 s,理论覆盖次数 120 次。图 3 为深反射地震典型野外原始记录,由于工区内交通发达,村庄遍布,造成地震记录上随机噪音较发育。在双程旅行时 11 s 左右,可以看到来自莫霍面的反射信号。

大地电磁数据采集三维 MT 仪器主要采用正南北十字型布设模式,X 轴指向磁北方向,Y 轴指向东方向,电极距为 60~100 m,所有磁探头离“十”字中心大于 10 m,相互之间距离大于 5 m。配置的磁传

感器的频带为 0.001~1000 Hz,电极长度为 100 m(视实际情况可变,随时记录),记录时间大于 20 h,干扰大地区可延长至 48 h。采集大地电磁测线共长 244 km(图 1 中 AA'所示),大地电磁测点 245 个,测点间距 1 km。本次大地电磁数据采集采用新型 PbCl₂ 不极化长电极,极差小,稳定性好,适用于长时间连续观测;为确保数据处理效果,采集时利用远参考点方法,在距离工区一定距离,远离干扰源且稳定的构造单元位置(距离测线约 130 km,保定市阜平县山区内)布设远参考点,确保数据质量。图 4 为典型的野外观测记录,由野外记录可以看出,原始数据质量较高。

3.2 数据处理及解释

3.2.1 地震数据处理及解释

由于工区内地震测线较长,测线覆盖的地区表层地震地质条件不一致,造成原始地震资料品质存

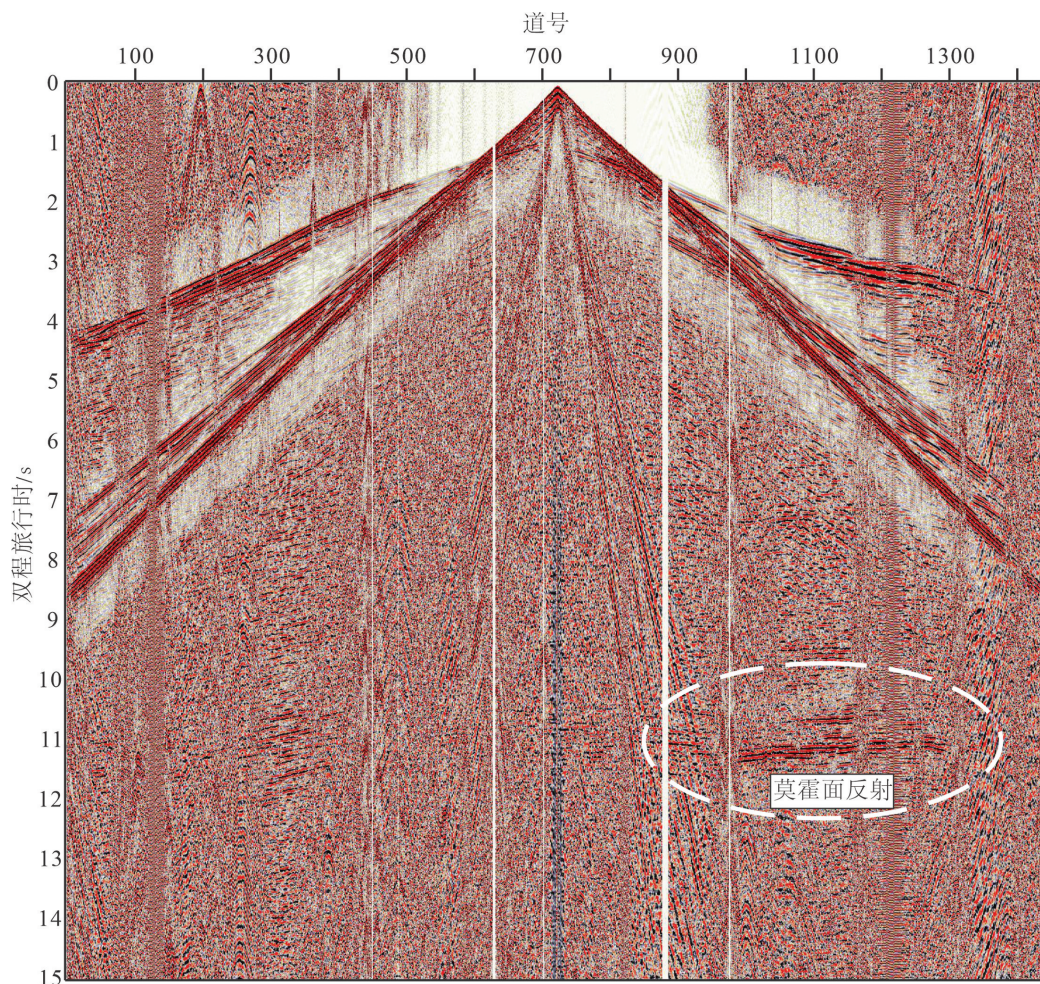


图3 深反射地震典型单炮记录(500 ms AGC)

Fig.3 Raw shot record of deep reflection seismic (with AGC of 500 ms)

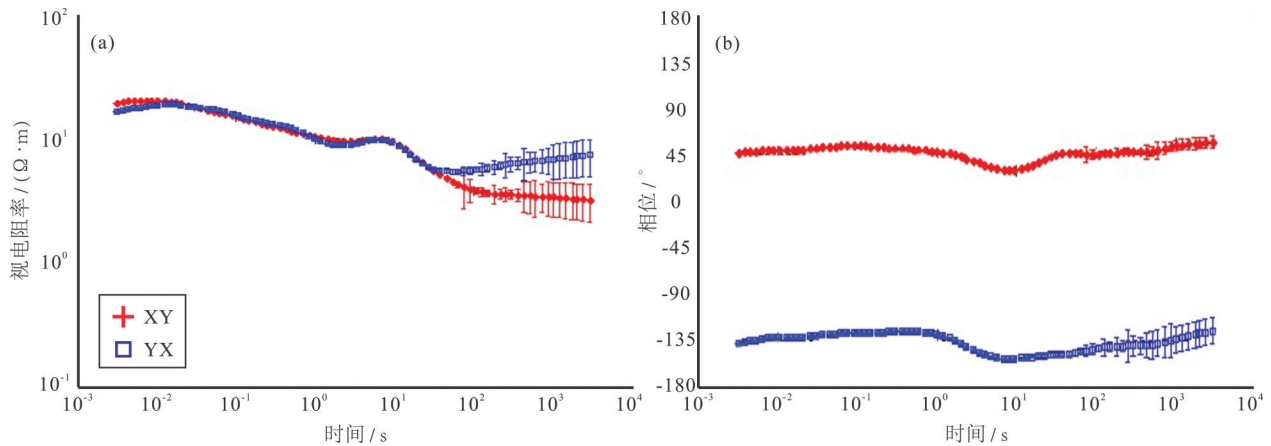


图4 大地电磁野外观测记录视电阻率曲线(a)和相位曲线(b)

Fig. 4 Apparent resistivity curve(a)and phase curve(b) of magnetotelluric raw field data

在较大差异。工区西北部山区地表出露元古宙至奥陶纪地层,以灰岩为主,激发的资料品质相对较差,噪音较强;工区东南区地表主要为第四系黄土出露,激发的资料品质较好。对原始资料进行品质分析,地震数据存在静校正复杂、各种噪声干扰严重、不同炮振幅和相位不一致、构造凸起区存在多次波、深层反射信号弱等难点。针对各处理难点,数据处理关键技术采用:①高程加层析静校正;②多域多方法叠前保幅去噪;③多道集域地表一致性振幅补偿、地表一致性反褶积;④精细速度分析消除多次波;⑤利用自适应技术、多级中值滤波技术,并与二维中值滤波技术相结合进行叠前随机噪声衰减,以此来增强深层反射弱信号。

利用精细速度扫描的方式得到地震剖面叠加速度谱,对叠加速度谱进行平滑并利用DIX公式将

叠加速度谱转换成平均速度谱,得到沿线的地壳平均速度剖面,如图5所示。牛驼镇凸起在CMP点位7576~8034,下方纵波速度较低。张学民(2005)给出的华北地区壳幔剪切波速度结构特征,在雄安新区附近地壳约15 km处出现剪切波低速异常,与纵波速度低速异常相对应。

对处理后的CMP道集进行叠加、偏移处理,得到时间域偏移剖面(图6a),利用平均速度将时间域剖面转换到深度域(图6b),并对剖面进行构造解释。由于深反射地震测线没有完全穿过太行山隆起构造和大城凸起构造,所以对太行山隆起西端点、大城凸起东端点的位置不做说明,对太行山隆起只做了沿测线东端点位置的说明,对大城凸起只做了沿测线西端点位置的说明。对凸起构造的底界面和凹陷构造的顶界面也不做说明。沿易县—

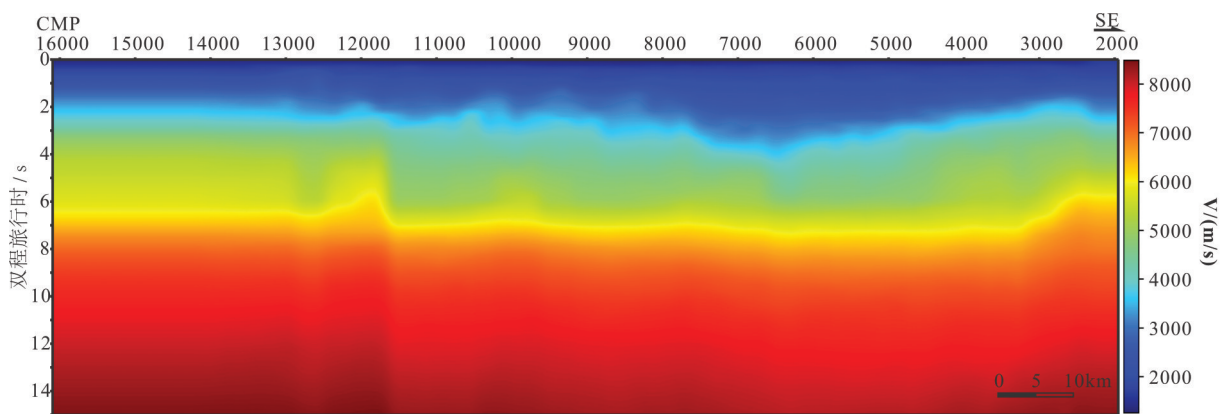


图5 雄安新区及外围深反射地震剖面平均速度分布

Fig. 5 The average velocity distribution of deep reflection seismic profile of Xiong'an New Area and its periphery

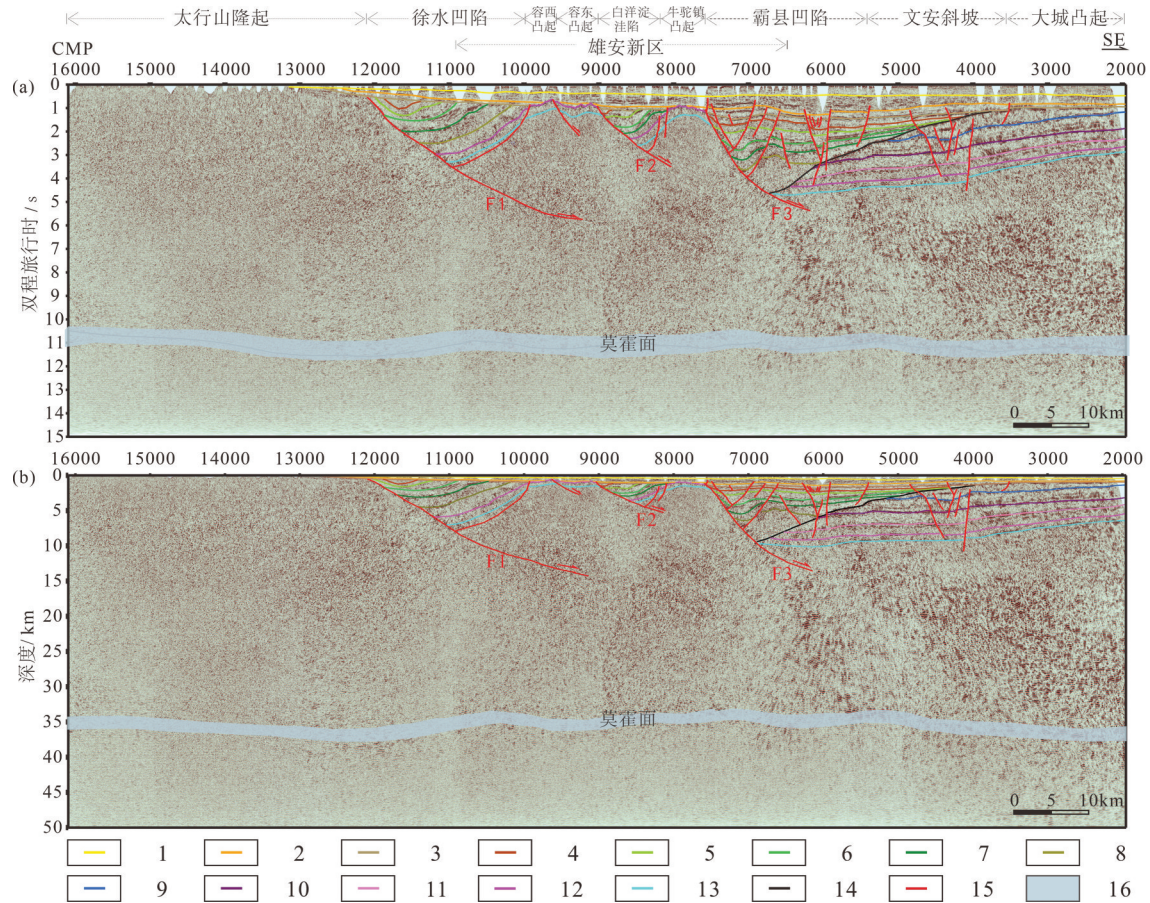


图6 深反射地震时间域(a)和深度域(b)偏移剖面及浅部地层解释

F1—太行山山前断裂;F2—容东断裂;F3—牛东断裂;1—第四系底界面;2—明化镇组底界面;3—馆陶组底界面;4—东营组底界面;5—沙河街组一段底界面;6—沙河街组二段底界面;7—沙河街组三段底界面;8—沙河街组四段底界面;9—中生界底界面;10—二叠—石炭系底界面;11—奥陶—寒武系底界面;12—新元古界顶界面;13—古元古界顶界面;14—不整合面;15—断裂;16—莫霍面

Fig.6 Deep reflection seismic profile in time-domain (a) and depth-domain (b), with the interpretation in shallow subsurface
 F1 - Taihang piedmont fault; F2 - Rongdong fault; F3 - Niudong fault; 1 - Bottom of Quaternary; 2 - Bottom of Minghuazhen Formation; 3 - Bottom of Guantao Formation; 4 - Bottom of Dongying Formation; 5 - Bottom of Section 1 of Shahejie Formation; 6 - Bottom of Section 2 of Shahejie Formation; 7 - Bottom of Section 3 of Shahejie Formation; 8 - Bottom of Section 4 of Shahejie Formation; 9 - Bottom of Mesozoic; 10 - Bottom of Permian-Carboniferous; 11 - Bottom of Ordovician- Cambrian; 12 - Top of Neoproterozoic; 13 - Top of Paleoproterozoic; 14 - Unconformity; 15 - Fault; 16 - Moho

大城深反射地震剖面划分的区域构造单元的边界如表1所示。

雄安新区范围内中浅部地层结构主要包括第四系、新近系明化镇组、新近系馆陶组、古近系及元古界。

第四系(Q)区内均有分布,岩性由灰黄、黄棕、棕红色黏土、亚黏土、亚砂土与灰黄、灰白色细砂、粉细砂、粉砂组成,不等厚互层,呈上粗下细的沉积韵律,结构松散。雄安新区第四系底界埋深自西向东,由薄增厚,与下伏新近系明化镇组地层平行不整合接触。从aa'深反射地震剖面上,第四系底界

面表现为从上至下第一套可连续追踪的强反射同相轴,第四系内部反射同相轴较少,且振幅较弱。地震剖面可以较清楚地划分出第四系的底界面,其沿测线变化较缓。从南东向至北西向,第四系厚度逐渐减薄,直至测线西北端太行山区附近,基岩出露。在雄安新区范围内,第四系平均厚度约400 m。

新近系明化镇组(Nm)在全区广泛沉积,上段为浅紫红色、褐紫色、杂色泥岩,灰绿色与灰黄色砂岩和含砾砂岩;下段为泥岩和灰绿色砂岩。该地层广泛分布,沉积厚度变化较大。从aa'深反射地震剖面上,可以清楚地划分出新近系明化镇组(Nm)的底

表 1 沿易县—大城深反射地震剖面的区域构造单元边界

Table 1 The Regional tectonic unit boundaries along the Yixian-Dacheng deep reflection seismic profile

| 构造单元 | 沿测线西端点 | 沿测线东端点 | 沿测线范围/ km | 顶界面深度(m)及最浅处 | | 底界面深度(m)及最深处 | |
|-------|-----------|-----------|--------------|--------------|--|--------------|--|
| | (地震CMP点位) | (地震CMP点位) | | 位置(CMP点位) | | 位置(CMP点位) | |
| 太行山隆起 | - | 12270 | - | - | | - | |
| 徐水凹陷 | 12270 | 9900 | 23.7 | - | | 6440(11148) | |
| 容西凸起 | 9900 | 9324 | 5.76 | 600(9637) | | - | |
| 容东凸起 | 9324 | 9014 | 3.1 | 760(9114) | | - | |
| 白洋淀洼陷 | 9014 | 8034 | 9.8 | - | | 3538(8549) | |
| 牛驼镇凸起 | 8034 | 7576 | 4.58 | 870(7927) | | - | |
| 霸县凹陷 | 7576 | 5406 | 21.7 | - | | 7543(6996) | |
| 文安斜坡 | 5406 | 3922 | 14.84 | 1275 | | 3780 | |
| 大城凸起 | 3922 | - | - | 1010(3348) | | - | |

界面,沿测线南东向北西逐渐减薄,变化较缓。在大城凸起上方,明化镇组较薄,平均厚度为 16 m,在霸县凹陷内部,该套地层厚度增加,平均厚度为 800 m,在牛驼镇凸起和容城凸起范围内,底部与新元古界不整合接触,平均厚度约为 500 m,徐水凹陷内,该套地层平均厚度约为 500 m,至太行山方向地层逐渐减薄,直至尖灭。在霸县凹陷,白洋淀洼陷范围内,该套地层内部分布多组较强的地震同相轴,是由于地层内部泥岩和砂岩互层引起的强反射。

新近系馆陶组(Ng)岩性以砂岩、砂砾岩为主,呈微固结—半固结。从 aa' 深反射地震剖面上,可

以清楚地划分出新近系馆陶组(Ng)的底界面。除了在牛驼镇凸起和容城凸起顶部全部剥蚀外,其他区域均有分布。在霸县凹陷内部分布较厚,平均厚度约为 600 m,且在霸县凹陷内,该套地层发育多组断裂;在白洋淀洼陷内,该套地层厚度较小,平均约为 200 m,向下与古近系角度不整合接触。在徐水凹陷内,该套地层由南东向至北西向逐渐减薄,直至尖灭。与下伏古近系不整合接触。

古近系(E)在容城凸起、牛驼镇凸起已经全部剥蚀,主要分布在徐水凹陷、霸县凹陷、饶阳凹陷及高阳低凸起内,且沉积厚度巨大,一般为 4000~

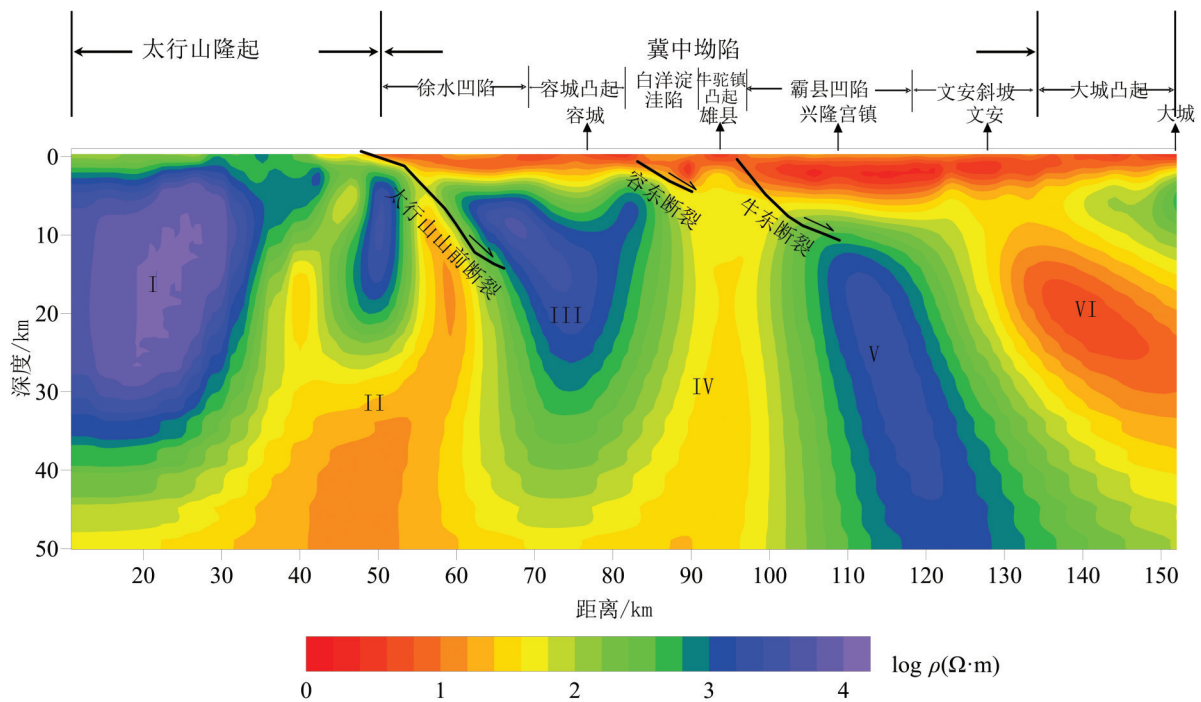


图 7 大地电磁电阻率反演断面图(截取与深反射地震剖面同长度部分)
Fig.7 The inverted resistivity of magnetotelluric(consistent part with the seismic survey line)

5000 m,岩性以砂岩、泥岩、泥质砂岩为主。从aa'深反射地震剖面上,可以清楚地划分出古近纪地层,其内部又可以根据不同的同相轴自上而下划分为东营组,沙河街组一段、二段、三段、四段和孔店组。从地震剖面同相轴形态上可以推测出,该套地层为河湖相沉积。

元古宙(Pt)地层在全区均有分布。从aa'深反射地震剖面上可以看出中—新元古界地层界面不是非常清楚,但是可以推断。这是因为新元古界顶部岩性与上覆沉积地层之间的波阻抗差较大,导致透射波能量较小,所以在新元古界地层顶界面之下的地层界面不容易反映出来。在霸县凹陷内中—新元古界埋深最深,顶界面约为10000 m,徐水凹陷内埋深最深处约为6100 m,容城凸起和牛驼镇凸起埋深较浅,最浅处分别为600 m和760 m。

由剖面可以看出,浅部地层地震同相轴连续性较好,便于沉积地层和基岩构造解释,中深部无明显层状反射地震同相轴。至11 s左右(深度约35 km),存在一组连续反射同相轴,此为该区域莫霍面地震波反射。深部莫霍面整体较平缓,平均深度在35 km左右,在牛驼镇凸起下方,莫霍面呈稍微隆升的状态,最浅深度约为33 km,在容东凸起和容西凸起下方呈稍微下凹的状态,在太行山山前断裂下方又呈稍微隆升的状态,在太行山隆起下方呈稍微下凹的状态,最深处为约38 km。莫霍面隆升和下凹的趋势不大,呈小波浪形状,但是区域整体呈平缓趋势。

3.2.2 大地电磁数据处理及解释

大地电磁数据处理采用:①Robust处理方法压制噪声;②计算二维偏离度分析构造维性,该工区范围内地下介质可近似为二维构造;③为判断大地电磁数据极化模式,利用共轭阻抗法的多测点—多频点统计成像技术对抗张量进行分解,结合区域构造确定研究区构造主轴方向,将观测坐标系旋转到构造主轴方向,可以方便地判断TE或TM极化模式,研究区构造主轴方向为46°;④利用二维非线性共轭梯度方法(NLCG)对电阻率进行反演。

由图7可以看出,aa'线太行山山前断裂带地表位置在L1198号点(南合庄村)附近,在浅部呈低角度东倾(约18°),其西侧太行山隆起区电阻率较东侧凹陷区电阻率高出至少两个数量级,电阻率值一般在1000 $\Omega \cdot m$ 以上。而在深部断层(7~10 km)两

侧电性差异出现反转,西侧电阻率显著低于东侧,形成深部陡立西倾的电性边界带。对比相邻地区其他大地电磁结果(詹艳等,2011),也存在类似电性结构,笔者认为太行山山前断裂带浅部东倾的低角度滑脱断层和深部陡立西倾的电性边界带这一深、浅构造的组合,是太行山隆起带和冀中拗陷普遍存在的典型接触形态。

太行山山前断裂带东侧深(10 km以下)、浅部(10 km以上)电性结构具有相对独立的架构,浅部电性结构相对平缓,受主要断裂控制,各个主要构造单元电性差异明显。aa'线太行山隆起以东至L1236点为徐水凹陷,在剖面上长度约19 km,其基底呈中间厚两边薄的典型凹陷特征,基底以下为稳定高阻块体。容城凸起位于徐水凹陷东侧,在剖面上长度约13 km,其基底呈典型凸起特征,深部同样为稳定高阻块体。容东断裂地表位于L1256点附近,是明显的电性差异带,断裂上盘为低阻、下盘为高阻,向东延伸约10 km、深度约7 km,倾角平缓(27°),是容城凸起的东边界。牛东断裂地表位置在L1288(雄县正南)附近,向东倾并延伸到约10 km深度,倾角约39°,断裂两侧基底厚度差异明显。牛东断裂以东霸县凹陷和文安斜坡均呈现浅部低阻沉积,深部高阻稳定块体结构,基底厚度向东递减。

整体而言,太行山隆起带和冀中拗陷盆地具有完全不同的深部电性结构特征。太行山隆起带自地表到深度50 km左右都表现为高电阻体,电阻率值可达到上千欧姆·米,其形态为上部较宽、下部随深度增大逐渐向西收缩的样式,无壳内高导层发育。冀中拗陷盆地内总体为低电阻特性,但是其内浅部(10 km以上)和深部(10 km以下)的构造构架完全不同。深部电性结构显示,沿剖面aa'存在3个较大的深部隐伏电性低阻差异带。差异带II位于太行山山前断裂下方,电性上表现为一定宽度的低阻带,较陡立且深部略向SW倾斜,延伸深度可达50 km,推测切割了莫霍面,对应于深部的太行山山前断裂。差异带IV位于牛驼镇凸起下方,延伸深度约50 km,同样切割了莫霍面。地震测深结果揭示了该差异带存在明显强反射,即差异带VI高导体和地震强反射发育位置一致,在该区域地表为牛驼镇地热田,推测该区壳内高导体可能与上地幔的热物质上涌有关。差异带III位于大城凸起下方,呈近水平

层状分布,深度范围15~30 km,为典型壳内高导层。

4 雄安新区深部地球物理特征

由于深反射地震剖面时间长度较大,地震波能量衰减严重,在深层地震反射信号较弱,信噪比低,对构造解释带来一定的困难(卢占武等, 2009)。为了清楚反映深部地质构造格架,将地震波组以线条的形式表示,在视觉上一目了然,易于解释(李文辉等, 2012)。线条图制作过程包括:强振幅提取、地震剖面二值化、中值滤波和连续性滤波。分析地震叠后数据振幅分布,设定一个振幅阈值,大于该阈值的地震数据赋值1,小于该阈值的地震数据赋值0,将地震剖面二值化;对二值化的数据进行中值滤波,去除二值化剖面中的“椒盐”噪音;设定一个连续性阈值,二值数据中相通的像素大于该阈值的部分保留,小于该阈值的部分删除;最后得到深反射地震剖面线划图。从线划图上可以清楚地看出区域构造格架,如图8所示。

按地震反射同相轴特征可以将研究区由浅到深划分为3个部分:上地壳、下地壳和上地幔,上、下地壳的分界面为Tc(康拉德面)反射面,下地壳和上地幔的分界面为Tm(莫霍面)反射面。沿测线自NW至SE向,上地壳可以划分为“四凸夹三凹一斜坡”的构造格局,区域大型断裂控制了凹凸构造的

边界,其中太行山山前断裂和牛东断裂向下延伸到约6 s,该位置为上、下地壳的分界面,也有学者认为该深度的界面为华北地区强力伸展构造的滑脱面(王椿镛等, 1994;张东宁等, 1995;何登发等, 2018)。

下地壳沿测线自NW至SE向可以分为六个区域,与大地电磁高、低阻差异带有很好的对应关系。区域I位于太行山隆起下方,CMP位置在16094~12800,该区域无明显的连续地震反射同相轴,在线划图上表现为近似“空白区”,因为该区域为太行山隆起火成岩区,地下无成层结构,反射地震很难成像,对应于大地电磁剖面高阻区。

区域II位于太行山山前断裂下方,CMP位置在12800~11200,在纵向上TWT时间4~12 s存在多组呈弧形的地震反射同相轴,对应于大地电磁剖面上的低阻异常区,结合该区域地质资料推测,该异常范围可能为太行山区发育的变质核杂岩。变质核杂岩是大陆伸展构造的重要表现形式之一,中国地质工作者在太行山区先后发现了房山(宋鸿林, 1996)、阜平及赞皇(牛树银, 1994)等一系列的变质核杂岩,并对其基本特征及成因做了深入的探讨。在剖面上,变质核杂岩形态呈穹隆状,显示其形成与深部热隆作用密切相关,由于变质核杂岩的强烈上隆,盖层发生大幅度的拆离滑脱和强烈剥蚀,形成大型拆离构造(孙冬胜等, 2004)。该岩体位于太行山山

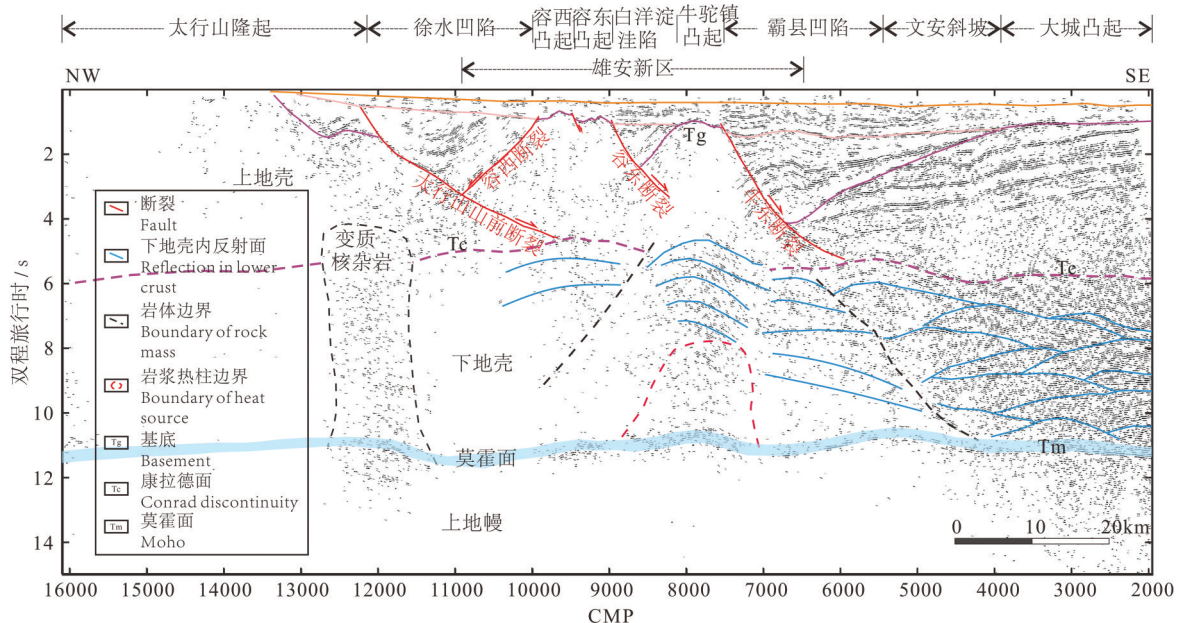


图8 深反射地震线划图及深部构造解释

Fig.8 Skeletonization diagram of deep reflection seismic and the interpretation in deep subsurface

前断裂下方,推测其与太行山山前断裂的伸展发育有关。

区域III位于徐水凹陷、容西凸起和容东凸起下方,CMP位置在11200~9000,在纵向上TWT时间在7~11 s,该区域表现为反射地震近似“空白区”,对应于大地电磁高阻区,在TWT时间6~7 s间存在较弱的地震反射同相轴。

区域IV位于牛驼镇凸起下方,CMP位置在9000~7000,在纵向上TWT时间1~5 s,地震反射同相轴较少,TWT时间5~8 s存在一系列“穹隆状”的弧形反射,在TWT时间8~11 s也存在断续的地震波反射,一直延续到莫霍面,该区域莫霍面呈向上隆起特征。对应于大地电磁剖面,该区域为低阻异常区,低阻异常从牛驼镇凸起顶界面一直延续到50 km,穿过莫霍面,呈竖条“通道”状特征。推测该区域由于上地幔热物质上涌,造成下地壳地层上隆,形成低阻“穹隆状”地震反射区域。

区域V位于霸县凹陷和文安斜坡下方,CMP位置在7000~5000,该区域TWT时间6~9 s存在多组叠层状反射同相轴,在9~11 s无明显地震同相轴,对应于大地电磁剖面上的高阻区。

区域VI位于大城凸起下方,CMP位置在5000~1951,在Tc界面至Tm界面之间,存在多组强烈的叠层状地震反射同相轴,呈交错发育特征,对应于大地电磁剖面上大面积低阻异常区。对莫霍面之上下地壳叠层状的强地震反射有多种不同的解释,如中国藏南地区15~18 km深度上的“亮点”反射被解释为岩浆熔融作用,也有解释为韧性高应变带(糜棱岩)、充满液体的裂缝的下地壳和侵入的玄武岩床(卢占武等,2014)。对中国东部地区壳-幔过渡带的研究表明,壳-幔过渡带岩性主要由榴辉岩相石榴辉石岩、辉石岩和二辉橄榄岩组成,幔源岩浆的底侵作用和堆晶作用可能是东部地区壳-幔过渡带增厚及高速低速层交互的主要机制(孙伟家等,2018)。

上地幔沿测线自NW至SE向,在区域II和区域VI莫霍面下方存在少量地震反射同相轴,其他区域无明显地震反射。综合地震剖面线划图(图8)和大地电磁反演断面图(图7)可以看出,在该区域深部,大地电磁的低阻异常区对应了深反射地震连续弧形反射同相轴且可以延续直到莫霍面的区域,而大地电磁的高阻区域对应了深反射地震莫霍面之上

近似“空白”反射的区域。

5 雄安新区地热地质模型

分析一个区域地表热流中的构成中地壳热流和地幔热流各自的比例是研究该地区岩石圈热结构的重要部分。地壳热流主要来自于地壳浅部U、Th、K等放射性元素的衰变,地幔热流主要来自深部地幔的热扩散。理论上,地幔热流可以通过实测热流与岩石生热率之间的线性关系获取,但在沉积盆地这种线性关系不一定存在。汪缉安等(1992)提出了一种基于地表热流、生热率和地层分层厚度来计算沉积盆地地幔热流的“回剥”方法,其计算公式如下:

$$q_m = q_s - q_c - q_s - \sum A_i D_i \quad (1)$$

其中, q_s 为地表热流, q_m 为地幔热流, q_c 为地表热流,单位为 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$, A_i 为第*i*层的放射性生热率($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$), D_i 为第*i*层的厚度(km)。

邱楠生等(2017)利用该“回剥”法计算了渤海湾各拗陷内的地幔热流,计算结果如图9所示。结果显示阶段渤海湾盆地岩石圈热结构为“热幔冷壳”型,由岩石圈热结构的定量计算可以发现,自中—新生代以来冀中拗陷经历了两次地幔热流高峰,分别为白垩纪中晚期和古近纪初期,与华北克拉通的两次减薄时期很好的对应,与华北克拉通东部在早白垩世岩浆、成矿作用活动最为强烈相吻合(许文良等,2004),也与冀中拗陷内裂陷型拗陷发育时期相对应。

从实测地温资料来看,冀中拗陷现今地温梯度和大地热流平面分布与基底地形起伏具有很好的对应关系(常健等,2016)。凸起区地温梯度和大地热流偏大,而拗陷区偏小,主要是因为凸起区基岩热导率相对较大,沉积盖层和基岩热导率的差异产生了“热折射”效应和热流的再分配,于是造成热流向凸起部位聚集(饶松等,2013)。

收集了牛驼镇凸起和容城凸起地表大地热流值数据,以及冀中拗陷岩石生热率和热导率数据,如表2所示。根据本次深反射地震划分的地层厚度,构建了牛驼镇凸起主要构造单元层厚度模型,如表3所示。利用公式(1)计算的牛驼镇凸起地壳热流为 $26.07 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,占地表热流的29.66%;地幔热流为 $61.83 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,占地表热流的70.34%。

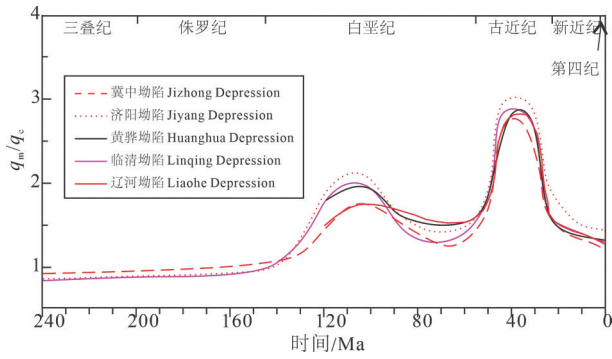


图9 渤海湾盆地主要构造单元中—新生代岩石圈热结构演化图(据邱楠生等,2017修改)

q_m 表示地幔热流, q_c 表示地壳热流;地幔热流主要是地幔中热物质上涌散热,地壳热流主要是地壳中放射性元素衰变生热

Fig.9 Meso-Cenozoic evolution of lithospheric thermal structure of the Bohai Bay Basin (Modified from Qiu Nansheng et al., 2017)

q_m - mantle heat flow, q_c - crustal heat flow; The mantle heat flow is mainly caused by the upwelling of thermal materials in the mantle, and the crustal heat flow is mainly generated by the decay of radioactive elements in the crust

结合深反射地震深部构造解释(图8)和大地电磁电阻率断面(图7),岩石圈热结构演化和大地热流平面分布,以及计算的牛驼镇凸起地壳热流和地幔热流分布,构建了雄安新区及外围深部地热地质模型(图10)。

该模型为“二元”生热模型,其热源包含两个部分,深部地幔热源和地壳放射性元素衰变生热。放射性元素衰变生热占地表热流的近30%,而幔源热流在地表热流中的占比可达约70%,因此地幔热源为雄安新区热异常的主导因素。

在牛驼镇下方,莫霍面以上,由于地幔热物质上涌造成下地壳上隆,幔源岩浆底侵作用于下地壳形成了局部热异常,该热异常具有低速高导的地球物理特征,可以认为是牛驼镇地热田和容城地热田的深部热源;大地热流由局部热源通过热传导作用向上扩散,牛东断裂和容东断裂作为优良的热物质传导通道,将深部流体热物质和热流向上传导,作用于牛驼镇凸起和容城凸起内部蓟县纪地层和长城纪地层,该两套地层内部岩溶、裂隙发育,是良好的热储层;西侧的太行山山脉和北侧的燕山山脉为该区地热储层持续不断地进行水流补给(刘明亮等,2019);牛驼镇凸起和容城凸起顶部新近纪沉积地层覆盖,该地层热导率低,是良好的热盖层。深部热源、热通道、热储层、热盖层和径向水流补给共同构

表2 雄安新区内不同构造单元地温梯度及大地热流(王朱亭等,2019)

Table 2 Geothermal heat flow value of different tectonic units in Xiong'an New Area (Wang et al., 2019)

| 构造单元 | 热流点数量 | 热流值范围/ ($mW \cdot m^{-2}$) | 热流平均值/ ($mW \cdot m^{-2}$) |
|-------|-------|---------------------------------|---------------------------------|
| 牛驼镇凸起 | 20 | 60.4~129.8 | 87.9 |
| 容城凸起 | 6 | 54.01~90 | 74.2 |

表3 牛驼镇凸起构造层厚度、岩石生热率及热导率(据常健,2016修改)

Table 3 Thicknesses, heat generations and conductivity of tectonic layers of Niutuozhen raised structural layer (Modified from Chang et al., 2016)

| 构造层 | 厚度/km | 生热率/ $(\mu W \cdot m^{-3})$ | 热导率/ $(W/(m \cdot K))$ |
|-----|-------|-----------------------------|------------------------|
| 新生界 | 1 | 0.80 | 1.72 |
| 中生界 | 0 | 1.26 | 2.04 |
| 古生界 | 0 | 0.72 | 3.26 |
| 上地壳 | 10 | 1.24 | 2.30 |
| 中地壳 | 11 | 0.86 | 2.50 |
| 下地壳 | 11 | 0.31 | 2.50 |

成了雄安新区整个地热系统。

6 结论

本文通过在雄安新区及外围收集区域重力资料,处理并解释得到了区域构造格架,布设垂直于区域构造走向的长剖面测线,开展深反射地震和长周期大地电磁勘探,对研究区深部地质结构进行了综合研究,并结合前人对该区域地热资源的研究成果构建了雄安新区深部地热地质模型,解释了牛驼镇地热田和容城地热田深部热源机制。

(1)下地壳结构在深反射地震剖面和大地电磁剖面上有很好的对应关系。沿测线自NW向SE向下地壳可以分为高低阻相间的六个电性差异带。电阻率低值区对应着在深反射地震剖面上存在一系列反射同相轴,且同相轴可以延续到莫霍面,太行山山前断裂和牛驼镇凸起下方的反射同相轴呈“穹隆状”,大城凸起下方强反射同相轴呈“叠层状分布”;电阻率高值区对应着在深反射地震剖面上无明显连续反射同相轴,尤其是在莫霍面之上呈现地震反射近似“空白区”。

(2)构建了雄安新区及外围深部地热地质模型,解释了牛驼镇凸起及容城凸起深部热源机制。雄安新区地表热流中幔源热流占主导因素,占比达70%,放射性元素生热次之,约占30%。在牛驼镇凸起下方TWT时间8~11 s,沿测线水平距离约20 km

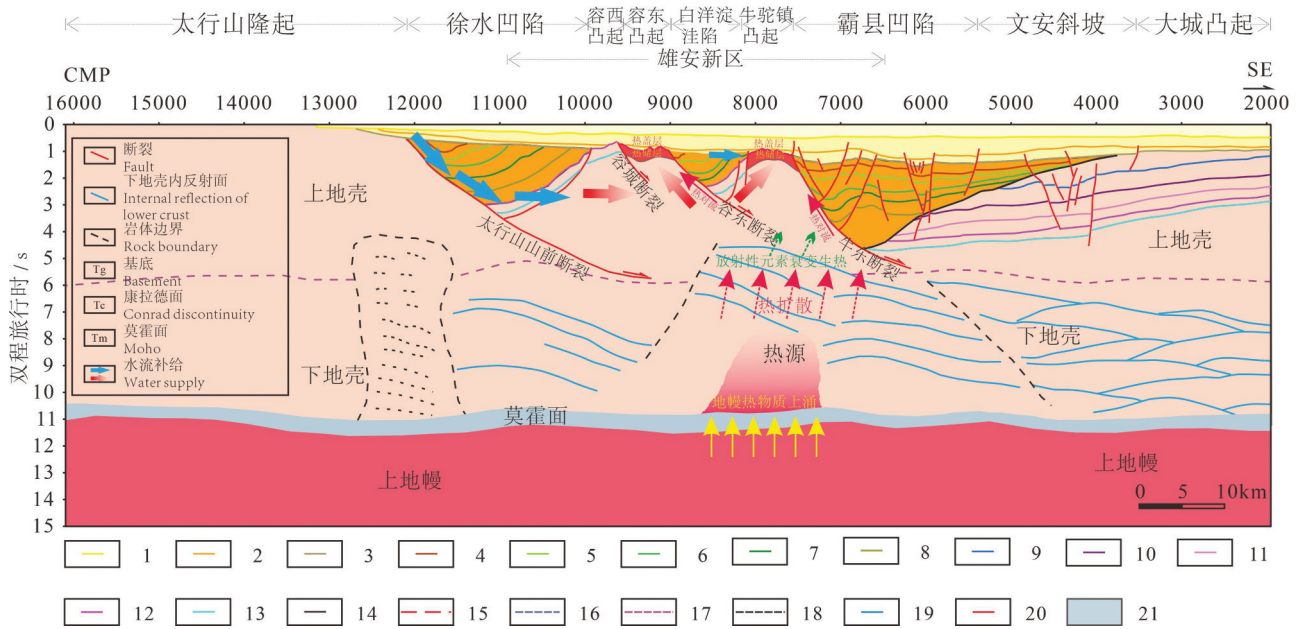


图10 雄安新区深部地热地质模型

1—第四系底界面; 2—明化镇组底界面; 3—馆陶组底界面; 4—东营组底界面; 5—沙河街组一段底界面; 6—沙河街组二段底界面; 7—沙河街组三段底界面; 8—沙河街组四段底界面; 9—中生界底界面; 10—二叠—石炭系底界面; 11—奥陶—寒武系底界面; 12—新元古界顶界面; 13—古元古界顶界面; 14—不整合面; 15—深部热源边界; 16—结晶基底; 17—中下地壳分界面; 18—下地壳岩体边界; 19—下地壳叠层状反射; 20—断裂; 21—莫霍面

Fig.10 The geothermal geological model of Xiongan New Area in the deep subsurface

1—Bottom of Quaternary; 2—Bottom of Minghuazhen Formation; 3—Bottom of Guantao Formation; 4—Bottom of Dongying Formation; 5—Bottom of Section 1 of Shahejie Formation; 6—Bottom of Section 2 of Shahejie Formation; 7—Bottom of Section 3 of Shahejie Formation; 8—Bottom of Section 4 of Shahejie Formation; 9—Bottom of Mesozoic; 10—Bottom of Permian-arboniferous; 11—Bottom of Ordovician—Cambrian; 12—Top of Neoproterozoic; 13—Top of Paleoproterozoic; 14—Unconformity; 15—Boundary of heat source; 16—Crystalline basement; 17—Interface between middle and lower crust; 18—Boundary of rock mass in lower crust; 19—Laminated reflection in lower crust; 20—Fault; 21—Moho

范围内存在一下地壳隆起区,该隆起区由于上地幔热物质上涌形成,为区域内深部热源;在电性结构上该范围呈竖条状由上地幔一直延伸到牛驼镇凸起下方,构造上,该区域两侧存在两个大型断裂,牛东断裂和容东断裂,作为深部热流向上扩散的通道;牛驼镇凸起和容城凸起内部蓟县系和长城系裂隙型白云岩为基岩型热储层;上覆新近系沉积岩为热盖层;西侧太行山脉和北侧燕山山脉为热储径向水流补给来源。

致谢:在深反射地震数据采集中中石化石油工程地球物理有限公司江汉分公司给予了帮助,文稿修改过程中审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢!

References

An Huiting, Xu Liqing, Li Sanzhong, Yu Shan, Liu Xin, Suo Yanhui,

Cao Xianzhi, Zhao Shujuan, Wang Pengcheng, Guo Lingli, Dai Liming. 2015. Meso-Cenozoic stress fields and their transition mechanisms in the Eastern Taihang Mountain Fault Zone [J]. Geotectonica et Metallogenia, 39(4): 571-586 (in Chinese with English abstract) .
 Cao Xianzhi, Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Zhao Shujuan, Xu Liqing, Dai Liming, Wang Pengcheng, Yu Shan. 2013. The intraplate morphotectonic inversion along the Eastern Taihang Mountain Fault Zone, North China and its mechanism[J]. Earth Science Frontiers, 20(4): 88-103 (in Chinese with English abstract).
 Chang Jian, Qiu Nansheng, Zhao Xianzheng, Xu Wei, Xu Qiuchen, Jin Fengming, Han Chunyuan, Ma Xuefeng, Dong Xiongying, Liang Xiaojuan. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China [J]. Chinese J. Geophys., 59(3): 1003-1016 (in Chinese with English abstract).
 Chen Moxiang, Huang Geshan, Zhang Wenren, Zhang Rongyan, Liu Bingyi. 1982. The temperature distribution pattern and the utilization of geothermal water at Niutuozen basement protrusion of Central Hebei Province[J]. Scientia Geologica Sinica, (3): 239-

- 252 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Wang Ji'an, Deng Xiao, Yang Shuzhen, Xiong Liangping, Zhang Juming. 1990. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the North China down-faulted basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 64(1): 80–91 (in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Xiong Xiaosong, Li Qiusheng, Lu Zhanwu. 2009. The Moho depth of Qinghai–Tibet Plateau revealed by seismic detection[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(6): 761–773 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jingru, Jiang Duoyuan, Tang Wenbang, Zhao Wenjing. 1996. Data acquisition of the first super-deep seismic profile in Qinghai Tibetan (Xizang) Plateau and the method of its processing [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 17(2): 202–213 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Shan Shuaiqiang, Zhang Yuying, Lu Renqi, Zhang Ruifeng, Cui Yongqian. 2018. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data [J]. *Scientia Sinica Terrae*, 48(9): 1207–1222 (in Chinese with English abstract).
- Hu Qiuyun, Gao Jun, Ma Feng, Zhao Zhihong, Liu Guihong, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Baojian, Xing Yifei. 2020. Dynamic prediction of geothermal recoverable resources in the Rongcheng uplift area of the Xiong'an New Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2013–2025 (in Chinese with English abstract).
- Li Haitao, Feng Wei, Wang Kailin, Zhao Kai, Li Gang, Zhang Yuan, Li Muzi, Sun Lu, Chen Yichao, You Bing. 2021. Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential [J]. *Geology in China*, 48(4): 1112–1126 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenhui, Gao Rui, Wang Haiyan, Li Hongqiang. 2012. Research on structure information recognition of deep seismic reflection profiles[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12): 4138–4146 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Davis G A, Lin Z, Wu F. 2005. The Liaonan metamorphic core complex, Southeastern Liaoning Province, North China: A likely contributor to Cretaceous rotation of Eastern Liaoning, Korea and contiguous areas[J]. *Tectonophysics*, 407(1/2): 65–80.
- Liu Mingliang, He Tong, Wu Qifan, Guo Qinghai. 2019. Hydrogeochemistry of geothermal waters from the Xiong'an New Area and its indicating significance [J]. *Earth Science*, 45(6): 2221–2231 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhanwu, Gao Rui, Li Qiusheng, He Rizheng, Kuang Chaoyang, Hou Hesheng, Xiong Xiaosong, Guan Ye, Wang Haiyan, Klempner L S. 2009. Testing deep seismic reflection profiles across the central uplift of the Qiangtang terrane in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(8): 2008–2014 (in Chinese with English abstract).
- Lu Zhanwu, Gao Rui, Wang Haiyan, Li Wenhui, Li Hongqiang. 2014. Bright spots in deep seismic reflection profiles[J]. *Progress in Geophysics*, 29(6): 2518–2525 (in Chinese with English abstract).
- Ma Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Yue Gaofan. 2020. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1981–1990 (in Chinese with English abstract).
- Marquis G, Hyndman R D. 1992. Geophysical support for aqueous fluids in the deep crust: Seismic and electrical relationships[J]. *Geophys J. Int.*, 110(1): 91–105.
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area [J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696 (in Chinese with English abstract).
- Niu Shuyin. 1994. Taihangshan Fuping Zhanhuang uplift are Meso-Cenozoic metamorphic core complexes [J]. *Geological Science and Technology Information*, 13(2): 15–16 (in Chinese).
- Pang Zhonghe, Kong Yanlong, Pang Jumei, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2017. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area[J]. *Science & Technology Supporting Xiong'an New Area Planning and Construction*, 32(11): 1224–1230 (in Chinese with English abstract).
- Pang Z, Pang J, Kong Y, Luo L, Duan Z, Yang F, Wang S. 2015. Large Karstic Geothermal Reservoirs in Sedimentary Basins in China: Genesis, Energy Potential and Optimal Exploitation [M]. *World Geothermal Congress 2015*. Melbourne, Australia.
- Qiu Nansheng, Xu Wei, Zuo Yinhui, Chang Jian, Liu Chunli. 2017. Evolution of Meso-Cenozoic thermal structure and thermal-geological structure of the lithosphere in the Bohai Bay Basin, Eastern North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 13–26 (in Chinese with English abstract).
- Rao Song, Hu Shengbiao, Zhu Chuanqing, Tang Xiaoyin, Li Weiwei, Wang Jiyang. 2013. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(8): 2760–2770 (in Chinese with English abstract).
- Song Honglin. 1996. Characteristics of Fangshan metamorphic core complex, Beijing and a discussion about its origin [J]. *Geoscience*, 10(2): 149–158 (in Chinese with English abstract).
- Sui Shaoqiang, Wang Xinwei, Zhou Zongying, Liu Jinxia, Mao Xiang. 2019. Study on the thermal reservoir characteristics of karst geothermal fields in Tianjin City [J]. *Geology and Resources*, 28(6): 590–594, 569 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dongsheng, Liu Chiyang, Yang Minghui, Du Jinhui, Zhang Yiming, Zhang Ruifeng. 2004. Evidences for the large-scale detachment structure in middle area of Jizhong depression in Mid-Late Mesozoic period [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 28(2):

- 126–133 (in Chinese with English abstract).
- Sun Weijia, Fu Liyun, Wei Wei, Lin Yi, Tang Qingya. 2018. The crust–mantle transition structures beneath eastern China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(3): 845–855 (in Chinese with English abstract).
- Suo Yanhui, Li Sanzhong, Cao Xianzhi, Li Xiyao, Liu Xin, Cao Huahua. 2017. Mesozoic–Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 24(4): 249–267 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chunyong, Zhang Xiankang, Wu Qingju, Zhu Zhiping. 1994. Seismic evidence of detachment in North China Basin [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 37(5): 613–619 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Gao Jun, Zhang Baojian, Xing Yifei, Zhang Wei, Ma Feng. 2020. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1970–1980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Haiyan, Gao Rui, Lu Zhanwu, Li Qiusheng, Kuang Zhaoyang, Liu Jinkai, Hou Hesheng, Feng Shaoying, Xiong Xiaosong, Li Wenhui, Deng Gong. 2010. Fine structure of the continental lithosphere circle revealed by deep seismic reflection profile [J]. *Acta Geologica Sinica*, 84(6): 818–839 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ji'an. 1992. The Geothermal Characteristics and Oil and Gas Resources of Liaohe Fault Depression[C]//*Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences*(5). Beijing: Science Press, 1–77 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoyin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhuting, Zhang Chao, Jiang Guangzheng, Hu Jie, Tang Xianchun, Hu Shengbiao. 2019. Present–day geothermal field of Xiong'an New Area and its heat source mechanism [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(11): 4313–4322 (in Chinese with English abstract).
- Wei Wenbo, Jin Sheng, Ye Gaofeng, Deng Ming, Tan Handong, Martyn Unsworth, John Booker, Alan G Jones, Li Shenghui. 2006. Features of the faults in center and north Tibetan Plateau: Based on results of INDEPTH(III)–MT [J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 257–265 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tairan, Lu Zhanwu, Wang Haiyan, Li Hongqiang, Li Wenhui. 2017. Main technology of deep seismic reflection data processing [J]. *Progress in Geophysics*, 32(2): 762–774 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wenliang, Wang Qinghai, Wang Dongyan, Pei Fuping, Gao Shan. 2004. Processes and mechanism of Mesozoic lithospheric thinning in eastern North China Craton: Evidence from Mesozoic igneous rocks and deep–seated xenoliths [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 309–317 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Jijun, Xiao Qibin, Tang Ji, Rokityansky I I. 2006. Crustal electric conductivity structure for Wudalianchi volcanic cluster in the Heilongjiang Province, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1494–1502 (in Chinese with English abstract).
- Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Lifeng, Wang Jijun, Xiao Qibin. 2011. Deep structure in Shijiazhuang and the vicinity by magnetotellurics [J]. *Seismology and Geology*, 33(4): 913–927 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Dongning, Zeng Rongsheng. 1995. Numerical simulation of decollement tectonic dynamics in Jizhong depression [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 17(4): 414–421 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jiayi, Zhang Wei, Ma Feng, Zhu Xi, Zhang Hanxiong, Wang Guiling. 2020. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field, Xiong'an New Area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1991–2001 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Hu Zhaoqi, Chen Yin, Niu Manlan, Xie Chenglong. 2008. Evolution of Early Cretaceous extensional basins in the eastern North China craton and its implication for the craton destruction [J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1594–1604 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, Zhang Hongfu, Xia Qunke, Zheng Tianyu. 2012. Destruction of the North China Craton [J]. *Science China (Earth Science)*, 42(8): 1135–1159 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Zheng Tianyu. 2009. Destruction geodynamics of the North China Craton and its Paleoproterozoic plate tectonics [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 54(14): 1950–1961 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuemin. 2005. Shear Wave Velocity Structures in Crust and Mantle of North China and Study on the Relationship with Geological Evolution since Late Cenozoic [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 安慧婷, 许立青, 李三忠, 余珊, 刘鑫, 索艳慧, 曹现志, 赵淑娟, 王鹏程, 郭玲莉, 戴黎明. 2015. 太行山东麓断裂带中、新生代构造应力场及转换机制[J]. *大地构造与成矿学*, 39(4): 571–586.
- 曹现志, 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 赵淑娟, 许立青, 戴黎明, 王鹏程, 余珊. 2013. 太行山东麓断裂带板内构造地貌反转与机制[J]. *地学*

- 前缘, 20(4): 88-103.
- 常健, 邱楠生, 赵贤正, 许威, 徐秋晨, 金凤鸣, 韩春元, 马学峰, 董雄英, 梁小娟. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征[J]. 地球物理学报, 59(3): 1003-1016.
- 陈墨香, 黄歌山, 张文仁, 张容燕, 刘炳义. 1982. 冀中牛驼镇凸起地温场的特点及地下热水的开发利用[J]. 地质科学, (3): 239-252.
- 陈墨香, 汪集暘, 汪缉安, 邓孝, 杨淑贞, 熊亮平, 张菊明. 1990. 华北断陷盆地地热场特征及其形成机制[J]. 地质学报, 64(1): 80-91.
- 高锐, 熊小松, 李秋生, 卢占武. 2009. 由地震探测揭示的青藏高原莫霍面深度[J]. 地球学报, 30(6): 761-773.
- 郭景如, 蒋多元, 唐文榜, 赵文津. 1996. 青藏高原第一条超深反射地震剖面的数据采集及其处理方法[J]. 地球学报, 17(2): 202-213.
- 何登发, 单帅强, 张煜颖, 鲁人齐, 张锐锋, 崔永谦. 2018. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. 中国科学: 地球科学, 48(9): 1207-1222.
- 胡秋韵, 高俊, 马峰, 赵志宏, 刘桂宏, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张保建, 邢一飞. 2020. 雄安新区容城凸起地区地热可采资源量动态预测[J]. 地质学报, 94(7): 2013-2025.
- 李海涛, 凤蔚, 王凯霖, 赵凯, 李刚, 张源, 李木子, 孙璐, 陈一超, 尤冰. 2021. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1112-1126.
- 李文辉, 高锐, 王海燕, 李洪强. 2012. 深地震反射剖面构造信息识别研究[J]. 地球物理学报, 55(12): 4138-4146.
- 刘明亮, 何瞳, 吴启帆, 郭清海. 2019. 雄安新区地热水化学特征及其指示意义[J]. 地球科学, 45(6): 2221-2231.
- 卢占武, 高锐, 李秋生, 贺日政, 匡朝阳, 侯贺晟, 熊小松, 管焯, 王海燕, Klempner L S. 2009. 横过青藏高原羌塘地体中央隆起区的深反射地震试验剖面[J]. 地球物理学报, 52(8): 2008-2014.
- 卢占武, 高锐, 王海燕, 李文辉, 李洪强. 2014. 深地震反射剖面上的“亮点”构造[J]. 地球物理学进展, 29(6): 2518-2525.
- 马峰, 王贵玲, 张薇, 朱喜, 张汉雄, 岳高凡. 2020. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 94(7): 1981-1990.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677-696.
- 牛树银. 1994. 太行山阜平、赞皇隆起是中新生代变质核杂岩[J]. 地质科技情报, 13(2): 15-16.
- 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 胡圣标, 汪集暘. 2017. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 32(11): 1224-1230.
- 邱楠生, 许威, 左银辉, 常健, 刘春黎. 2017. 渤海湾盆地中-新生代岩石圈热结构与热-流变学演化[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京)); 北京大学, 24(3): 013-026.
- 饶松, 胡圣标, 朱传庆, 唐晓音, 李卫卫, 汪集暘. 2013. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构[J]. 地球物理学报, 56(8): 2760-2770.
- 宋鸿林. 1996. 北京房山变质核杂岩的基本特征及其成因探讨[J]. 现代地质, (2): 149-158.
- 隋少强, 汪新伟, 周总瑛, 刘金侠, 毛翔. 2019. 天津岩溶地热田热储特征研究[J]. 地质与资源, 28(6): 590-594, 569.
- 孙冬胜, 刘池阳, 杨明慧, 杜金虎, 张以明, 张锐锋. 2004. 冀中坳陷中区中生代中晚期大型拆离滑覆构造的确定[J]. 大地构造与成矿学, (2): 126-133.
- 孙伟家, 符力耘, 魏伟, 林羿, 唐清雅. 2018. 中国东部地区的壳-幔过渡带结构[J]. 地球物理学报, 61(3): 845-855.
- 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 李玺瑶, 刘鑫, 曹花花. 2017. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 24(4): 249-267.
- 汪缉安. 1992. 辽河断陷地热特征与油气资源[C]//中国科学院地质研究所集刊(5). 北京: 科学出版社, 1-77.
- 汪集暘, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 25-31.
- 王椿镛, 张先康, 吴庆举, 祝治平. 1994. 华北盆地滑脱构造的地震学证据[J]. 地球物理学报, 37(5): 613-619.
- 王贵玲, 高俊, 张保建, 邢一飞, 张薇, 马峰. 2020. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. 地质学报, 94(7): 1970-1980.
- 王海燕, 高锐, 卢占武, 李秋生, 匡朝阳, 刘金凯, 侯贺晟, 鄯少英, 熊小松, 李文辉, 邓攻. 2010. 深地震反射剖面揭露大陆岩石圈精细结构[J]. 地质学报, 84(6): 818-839.
- 王朱亭, 张超, 姜光政, 胡杰, 唐显春, 胡圣标. 2019. 雄安新区现今地温场特征及成因机制[J]. 地球物理学报, 62(11): 4313-4322.
- 魏文博, 金胜, 叶高峰, 邓明, 谭捍东, Martyn, Unsworth, John, Booker, Aian. 2006. 西藏高原中、北部断裂构造特征: INDEPTH(III)-MT 观测提供的依据[J]. 地球科学, 31(2): 257-265.
- 徐泰然, 卢占武, 王海燕, 李洪强, 李文辉. 2017. 深反射地震剖面数据处理的主要技术方法[J]. 地球物理学进展, 32(2): 762-774.
- 许文良, 王清海, 王冬艳, 裴福萍, 高山. 2004. 华北克拉通东部中生代岩石圈减薄的过程与机制: 中生代火成岩和深源捕虏体证据[J]. 地学前缘, 11(3): 309-317.
- 詹艳, 赵国泽, 王继军, 肖骑彬, 汤吉, II R. 2006. 黑龙江五大连池火山群地壳电性结构[J]. 岩石学报, 22(6): 1494-1502.
- 詹艳, 赵国泽, 王立凤, 王继军, 肖骑彬. 2011. 河北石家庄地区深部结构大地电磁探测[J]. 地震地质, 33(4): 913-927.
- 张东宁, 曾融生. 1995. 冀中坳陷滑脱构造动力的数值模拟[J]. 地震学报, 17(4): 414-421.
- 赵佳怡, 张薇, 马峰, 朱喜, 张汉雄, 王贵玲. 2020. 雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J]. 地质学报, 94(7): 1991-2001.
- 朱光, 胡召齐, 陈印, 牛漫兰, 谢成龙. 2008. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地的发育过程及其对克拉通破坏的指示[J]. 地质通报, 27(10): 1594-1604.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 张宏福, 夏群科, 郑天愉. 2012. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学: 地球科学, 42(8): 1135-1159.
- 朱日祥, 郑天愉. 2009. 华北克拉通破坏机制与古元古代板块构造体系[J]. 科学通报, 54(14): 1950-1961.
- 张学民. 2005. 华北地区壳幔剪切波速度结构及与晚新生代地质演化关系研究[D]. 中国地质大学(北京).