

doi: 10.12029/gc20190513

王天琪, 韩江涛, 侯贺晟, 刘文玉, 管彦武, 马国庆, 周子琨. 2019. 综合物探剖面揭示松辽盆地基底地质与地球物理特征——以过松科二井剖面为例[J]. 中国地质, 46(5): 1126–1136.

Wang Tianqi, Han Jiangtao, Hou Hesheng, Liu Wenyu, Guan Yanwu, Ma Guoqing, Zhou Zikun. 2019. The utilization of integrated geophysical profiles to reveal the basement geology and geophysical characteristics of the Songliao Basin: A Case study of the profile of Well SK-2 [J]. *Geology in China*, 46(5): 1126–1136(in Chinese with English abstract).

## 综合物探剖面揭示松辽盆地基底地质与地球物理特征 ——以过松科二井剖面为例

王天琪<sup>1</sup>, 韩江涛<sup>1</sup>, 侯贺晟<sup>2</sup>, 刘文玉<sup>3</sup>, 管彦武<sup>1</sup>, 马国庆<sup>1</sup>, 周子琨<sup>1</sup>

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 中国地质调查局-中国地质科学院地球深部探测中心, 北京 100031; 3. 东华理工大学, 江西 南昌 330013)

**摘要:**松辽盆地是中国东北部中—新生代陆相沉积盆地, 本文在深入分析东北地区古生代地层特征、沉积环境及构造演化基础之上, 以过松科二井地区综合地球物理资料解译为基础, 开展基底的属性和地球物理特征研究。松科二井南北剖面发现: 布格重力异常具有中间高两边低的特点; 磁异常呈现出与重力异常负相关的趋势; 电性表现为浅部分层、高一低阻交叉重叠和深部分区的特征。东西剖面发现: 布格重力异常具有西高东低的趋势; 磁异常形态呈“碗状”; 电性结构与南北剖面相比深部出现了高阻异常。结合地球物理特征与岩相古地理分析, 得到以下结论: (1) 上古生界晚石炭世至晚二叠世期间, 具有浅海相、陆相、河湖相多种沉积环境, 相应岩性组合具有不同的物性特征; (2) 重磁地球物理特征揭示了研究区基底主要由泥砂岩、大理岩和侵入岩组成, 基底顶面埋深位于7 km左右, 上古生界和侵入岩共同组成了研究区基底; (3) 识别出了滨州断裂带、孙吴—双辽断裂带、海伦—任民断裂带以及深层次断裂体系的位置和走向, 断裂构造主要以SN和EW向为主, 它们作为构成古生代构造骨架的重要组成部分, 控制着深部油气运移和贮藏。

**关键词:**浅基底属性; 电性结构; 上古生界; 花岗岩; 油气盆地; 深地资源探测工程; 松辽盆地

中图分类号: P631; P545 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2019) 05-1126-11

## The utilization of integrated geophysical profiles to reveal the basement geology and geophysical characteristics of the Songliao Basin: A case study of the profile of Well SK-2

WANG Tianqi<sup>1</sup>, HAN Jiangtao<sup>1</sup>, HOU Hesheng<sup>2</sup>, LIU Wenyu<sup>3</sup>,  
GUAN Yanwu<sup>1</sup>, MA Guoqing<sup>1</sup>, ZHOU Zikun<sup>1</sup>

(1. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China; 2. SinoProbe Center, Chinese Academy of Geological Sciences and China Geological Survey, Beijing 100031, China; 3. East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

收稿日期: 2019-04-03; 改回日期: 2019-09-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20160207); 国家重点研发专项(2017YFC0601305)及国家自然科学基金青年科学基金项目(41504076)联合资助。

作者简介: 王天琪, 女, 1994年生, 硕士生, 主要从事综合地球物理调查研究工作; E-mail: 641149482@qq.com。

通讯作者: 韩江涛, 男, 1982年生, 副教授, 主要从事深部地球物理勘查工作; E-mail: hanjt@jlu.edu.cn。

**Abstract:** Songliao Basin is a Meso-Cenozoic continental sedimentary basin in Northeast China. Based on a detailed analysis of the Paleozoic stratigraphic characteristics, sedimentary environment and tectonic evolution in Northeast China, the authors conducted the interpretation of the comprehensive geophysical data across Well SK-2 to investigate the properties and geophysical characteristics of the basement in this paper. On the SN profile, the authors have found some phenomena: the Bouguer gravity anomaly in Well SK-2 is high in the middle and low on both sides; the magnetic anomaly shows a negative correlation with gravity anomaly; magnetotelluric properties are characterized by partial layers and high-low resistance crossover in the shallow part and partial regions in the deep part. On the EW profile, the gravity anomaly curve has the trend high in the west and low in the east; the magnetic anomaly curve is “bowl-shaped”; there exists a high resistance structure compared with features of the SN-trending profile. Combining geophysical characteristics with lithofacies palaeogeography, the authors have reached the following conclusions: 1. From the Late Carboniferous to Late Permian in the Upper Paleozoic, there were many sedimentary environments such as shallow marine facies, continental facies, rivers and lakes. The corresponding lithologic combinations had different physical characteristics; 2. The geomagnetic characteristics of the gravity, magnetic method and magnetotelluric sounding's results reveal that the basement of the study area is mainly composed of mudstone, marble and intrusive rocks, and the burial depth of the roof of the basement is about 7km. The base of the study area is formed by the Upper Paleozoic and intrusive rocks. 3. The location and orientation of the Binzhou fault zone, the Sunwu-Shuangliao fault zone, the Helen-Renmin fault zone and the deep fault system are identified. The fault structures are mainly dominated by SN and EW trending structures. They are important components of the Paleozoic structural skeleton and control the migration and storage of deep oil and gas.

**Key words:** basement property; magnetotelluric structure; Upper Paleozoic; granite; oil and gas basin; deep resource exploration engineering; Songliao Basin

**About the first author:** WANG Tianqi, female, born in 1994, master candidate, mainly engages in comprehensive geophysical investigation and research work; E-mail: 641149482@qq.com.

**Fund support:** Supported jointly by China Geological Survey (No. DD20160207), National Key Research and Development Special Project (No. 2017YFC0601305) and National Natural Science Youth Fund Project (No. 41504076).

## 1 引言

松辽盆地是中国油气相对富集的大型陆相含油气盆地,随着钻采深度的增加,已知的油气资源地层的保有量不断下降,为了保证油气资源的供应,探究深部结构、寻找深部油气是大势所趋。传统认为,松辽盆地基底深度在10 km以内(杨宝俊等,1996),泰康—安达间的基底面较深(大庆附近最深,接近8 km),向西侧逐渐变浅,东侧变化平缓(傅维洲等,1998)。松辽盆地基底以石炭—二叠系为主,主要由浅变质和未变质的古生代地层、花岗岩和片麻岩组成(吴福元等,2000)。中侏罗世花岗质岩石构成了基底花岗岩的主体(高福红等,2007)。

从构造层次的观点来看,基底下部构造层次由前古生代深变质的结晶岩系组成,基底上部构造层次由晚古生代浅变质岩系和海西期花岗岩体组成(罗笃清等,1993)。基底骨架断裂共12条,在空间上和时代上主要分为3期,由老到新依次为近东西向断裂、北东向断裂和北西向断裂(邢大全,

2015)。基底断裂导致古中央隆起带基底岩性具有东西分带、南北分块、受基底断裂控制明显的特征。在古中央隆起带上花岗岩大面积分布,总体上呈南北向展布,具有弱磁异常和重力负异常特征;其次是千枚岩+板岩混合发育和花岗岩+千枚岩混合发育,其他岩性分布范围很小,如:片岩、石英变质岩等,散落在隆起带上(张元高等,2006)。综合分析石炭—二叠系基底厚度、埋藏深度、有机质丰度及生烃过程,认为松辽盆地徐家围子凹陷、莺山凹陷、大庆长垣西部及黑鱼泡凹陷南部是石炭—二叠系二次生气有利区(任战利等,2011)。

已有的松辽盆地地球物理探测资料囊括重磁电震等多种地球物理方法。1996年,穿越松辽盆地的满洲里—绥芬河地学断面结合地质资料,给出了断面岩石层构造的地球物理解释模型,讨论了松辽盆地基底和莫霍界面的性质(杨宝俊等,1996)。2006年松南—辽北地区大地电磁测深(MT)资料揭示了在松辽盆地内存在有厚度较大的低阻层(刘国兴等,2006)。目前,“地壳一号”万米钻机已完成松

科二井 7018 m 的钻井新记录,成功建立通往白垩纪时代的“时光隧道”,但仍未确切钻遇到的晚古生代地层又留下许多悬而未决的问题,如:松科二井区域基底顶界面深度是多少?基底由哪些岩性组成?这些岩性的空间分布又是如何?在地球物理方法中,重力勘探可以确定基底起伏、大规模断裂构造;磁测结果在研究基底岩性变化方面效果显著;大地电磁测深法勘探深度大、横向分辨率高,恰好可以与纵向分辨率优越的深反射地震方法相辅相成。所以本次基于松科二井深反射地震的结果,以松科二井基底地球物理特征研究为目标,开展重、磁、电勘查,对松辽盆地浅部基底深度、结构、构造和盆地深部断陷分布做进一步的研究。

## 2 区域地质概况

松辽盆地位于中亚造山带的东段,地处西伯利亚、华北和西太平洋板块所辖持的构造区域内,是中国东北部中—新生代陆相沉积盆地(杨继良等, 1983),因多期构造演化形成了较复杂的镶嵌和叠加构造带,故形成中生代陆相地层。构造上表现为北北东向,其构造特征具有“上拗、下断”的构造模式(邢大全, 2015)。

松辽盆地边界有两条控盆断裂,分别是嫩江—白城断裂和依兰—伊通断裂。嫩江—白城断裂位于松辽盆地的西缘(图1),呈北北东向延伸,与现今盆地出露的花岗岩体和沉积的界限展布方向大体

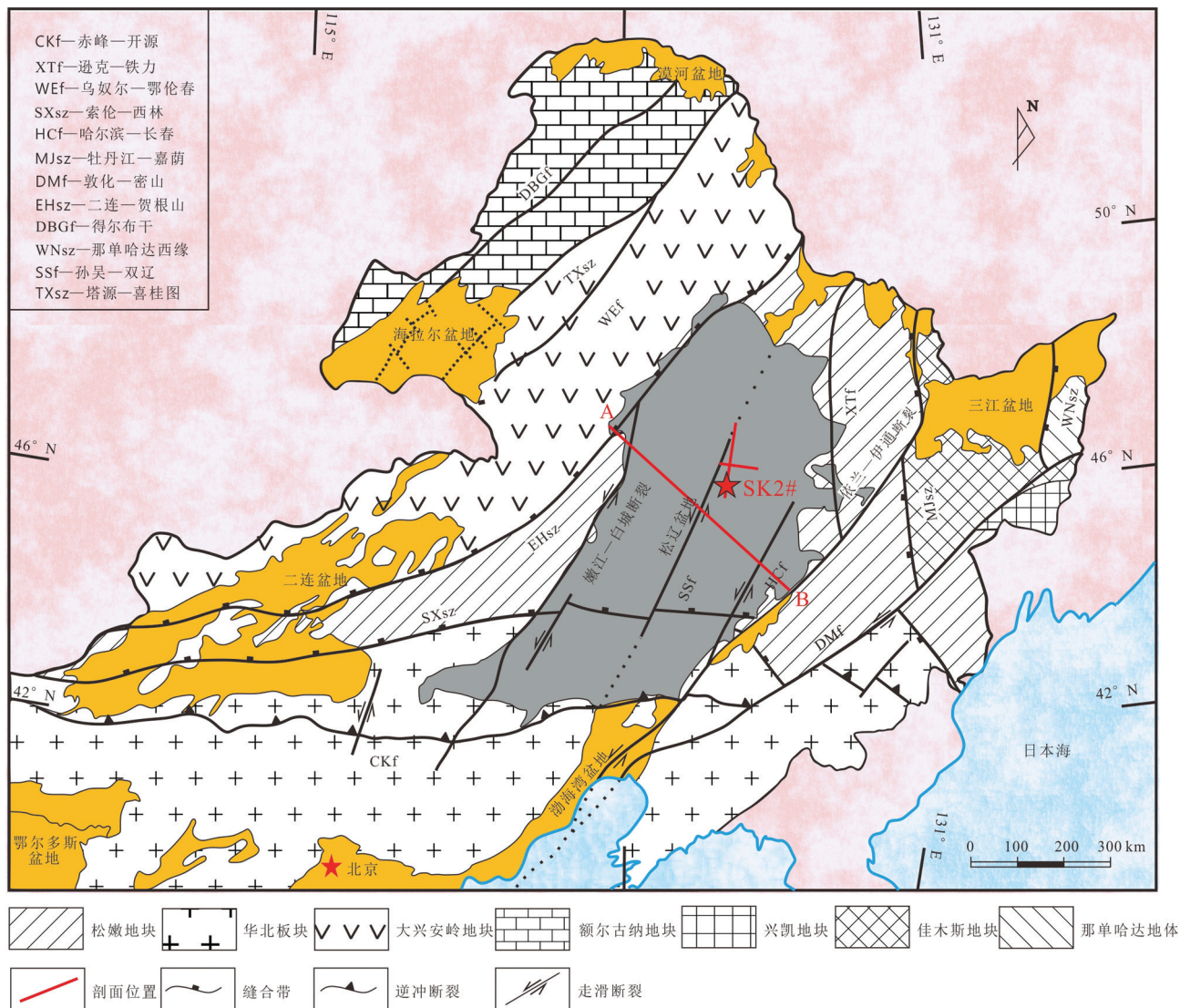


图1 研究区构造位置图(据葛荣峰等, 2010; 王璞珺等, 2015)

Fig.1 The structural location map of the study area (after Ge et al., 2010; Wang et al., 2015)



一致,显示左旋走滑拉张的特征(吉林省地质矿产局,1988;内蒙古自治区地质矿产局,1991)。主要形成于中生代,控制了松辽盆地中西部断陷的形成、构造样式和分布特征,也是松辽盆地与大兴安岭的盆山界线。依兰—伊通断裂属于松辽盆地东部控盆断裂,途经佳木斯—舒兰—伊通—铁岭一线,呈北东45°方向展布,与敦化—密山断裂共同组成了著名的郯—庐断裂北段,在早白垩世表现为左旋走滑,嫩江组末期为挤压逆冲,古新世右旋断陷,渐新世末期挤压反转。控制了中东部断陷形成的构造样式、分布特征以及伊通地堑、汤原地堑和方正地堑的形成(孙晓猛等,2006)。

从剖面结构上看(图2),盆地自下而上可分为基底构造层、断陷层和拗陷层,每个构造层之间均以明显的区域不整合为界。基底构造层泛指裂陷成盆以前的各种岩石与构造变形,主要包括石炭—二叠纪的浅变质岩和各个时期的花岗岩(葛荣峰等,2010)。基底之上的断陷层和拗陷层被称之为“水火二元结构”(王璞珺等,2003)。断陷层由多期火山建造组成,是指从晚侏罗世—早白垩世的火山岩与陆相碎屑岩组合,具体包括晚侏罗世火石岭组( $J_3h$ )、早白垩世沙河子组( $K_1s$ )、营城组( $K_1y$ )。其中,火石岭组主要为中基性熔岩(安山岩和玄武岩)和火山碎屑岩,含少量的湖相沉积;沙河子组处于火山间歇期,主要特点是含煤碎屑沉积为主;营城组为大套酸性、中性和基性熔岩和火山碎屑岩组合,有时夹少量湖相沉积。登娄库组( $K_1d$ )是断—拗转换的产物,火山活动减弱,以砾岩和砂泥岩为主;拗陷层具体包括早

白垩世泉头组( $K_1q$ )和晚白垩世青山口组( $K_2q$ )、姚家组( $K_2y$ )、嫩江组( $K_2n$ ),主要是大型拗陷湖盆中的河流相、三角洲相和湖相沉积,在该套地层中发现了中国最大的油田——大庆油田,油气资源量超过100亿t。自下而上划分为6个油层组,包括杨大城子、扶余、高台子、葡萄花、萨尔图、黑帝庙。

### 3 形成环境、物质组成与物性特征

地质与钻探资料表明:松辽盆地晚古生代地层层序与中国东北地区区域上是一致的,上古生界在松辽盆地广泛分布,以石炭—二叠纪沉积为主,自下而上分别与吉林东部地区石炭系通气沟组( $C_1t$ )、鹿圈屯组( $C_1l$ )及磨盘山组( $C_2m$ )和内蒙古地区中二叠统大石寨组( $P_2d$ )、哲斯组( $P_2z$ )及上二叠统林西组( $P_3l$ )对应。岩性主要为砂岩、泥岩、灰岩、粉砂质泥岩、碎屑砂岩及火山岩。岩相组合及古生物研究表明,松辽盆地晚古生代以来具有由海相向陆相逐渐转化的沉积特征。中国东北地区早石炭世主体为海相,主要发育三角洲相、碳酸盐岩台地相和浅海相(张满利等,2015),研究区以浅海相为主;晚石炭世东北地区形成北陆南海沉积格局,研究区以陆相沉积为主(张兴洲等,2008);早二叠世主要发育有三角洲相、碳酸盐岩台地相、浅海—半深海相,以海相火山岩沉积为主(谢宏坤等,2012),中二叠世以碳酸盐岩、碎屑岩沉积为主,随着西拉木伦河缝合带的形成,至晚二叠世中国东北地区晚二叠世沉积初期为海陆交互环境,主体为陆相湖泊沉积环境(图3)。

研究表明,上古生界灰岩、生物碎屑灰岩、

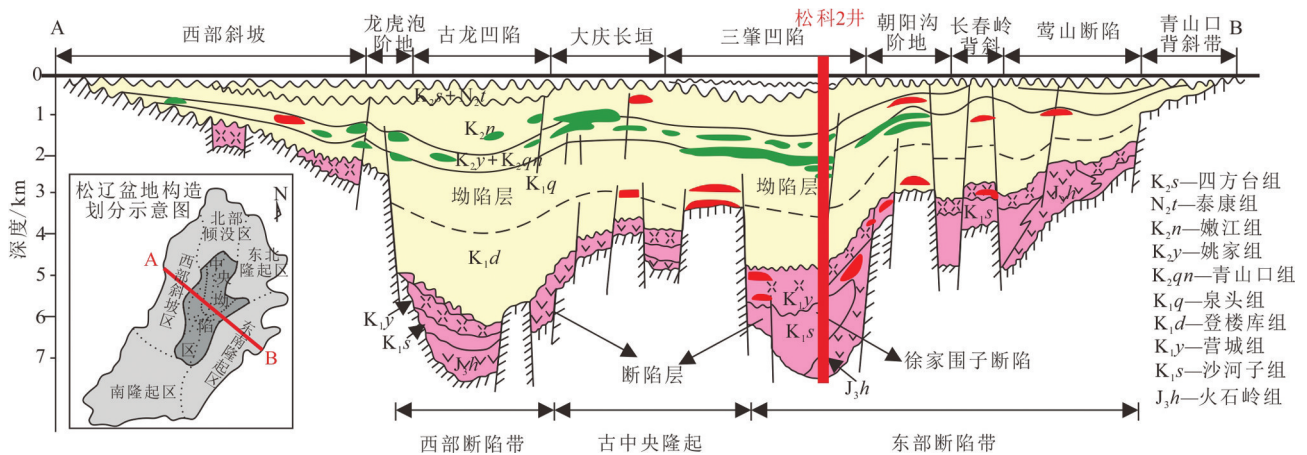


图2 松辽盆地中生界双层结构剖面示意图(据周庆华等,2007)  
 Fig.2 Schematic diagram of the double-layer structure of the Mesozoic in the Songliao Basin (after Zhou et al., 2007)



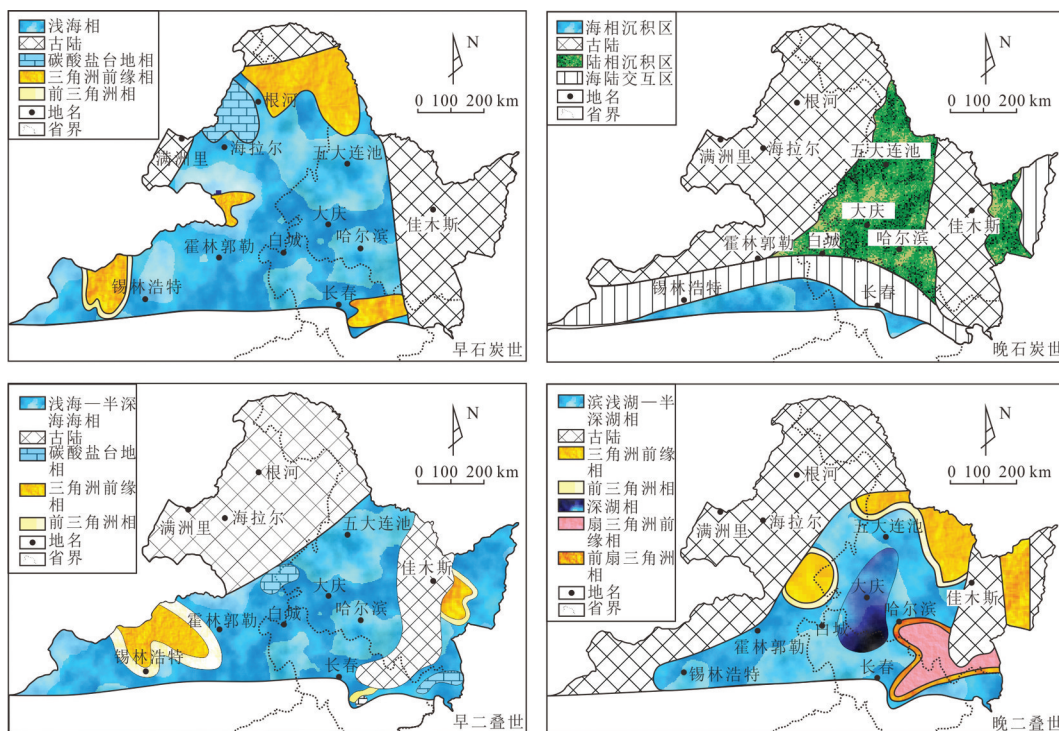


图3 东北地区上古生界岩相古地理图

(据张兴洲等, 2008; 谢宏坤等, 2012; 曲希玉等, 2013; 张满利等, 2015; 吴亮君等, 2017)

Fig.3 Lithofacies-paleogeographical map of the Upper Paleozoic in Northeast China  
(after Zhang et al., 2008; Xie et al., 2012; Qu et al., 2013; Zhang et al., 2015; Wu et al., 2017)

碳酸盐岩等海相沉积建造具有高密度、负磁性、高电阻率的特征; 灰色砂岩、细砂岩等陆相沉积建造具有中—低密度、正磁性、中等电阻率的特征; 泥岩、暗色泥岩等陆相沉积建造则具有低密度、正弱磁性、低电阻率的特征。侵入岩物性特征一般表现为: 低密度、中—高磁性和高电阻率的特征(李春成提供)。这些物性特征是识别松辽盆地上古生界的重要标志, 根据以上物性及古地理分布特征, 可以逐步建立上古生界晚石炭世至晚二叠世的物性结构模型, 即以陆相碎屑岩沉积建造为主的晚石炭世呈现中—低阻、低密度、弱磁或无磁的特征, 以海相火山碎屑岩沉积建造为主的早二叠世呈现中—高阻、中—低密度、中—高磁特征, 以海相碳酸盐沉积建造为主的中二叠世呈现高阻、高密度、负磁特征, 以陆相碎屑岩沉积建造为主的晚二叠世呈现中—低阻、低密度、弱磁或无磁的特征。

#### 4 数据采集与处理方法

本次数据采集在2017年6—7月间进行, 研究区位于黑龙江省安达市, 在松科二井地区部署150

km十字综合地球物理剖面(图4), SN剖面自南向北途径羊草镇、任民镇、老虎岗镇和太平庄镇, 剖面长度100 km; EW剖面自西向东途径升平镇和宋庄镇, 剖面长度50 km。地面重力、磁法点距为100 m; 大地电磁测深点距为2 km, 共计77个物理点。

重力数据采集使用加拿大生产的CG-5型高精度相对重力仪。对观测值进行零漂改正, 改正误差 $\pm 0.0576 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; 利用高程数据对全区进行地形改正, 改正误差为 $\pm 0.034 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; 正常场改正误差为 $\pm 0.00001 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; 布格改正误差为 $\pm 0.0591 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ; 布格重力异常总误差为 $\pm 0.0893 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。经过以上各项改正后, 获得了布格重力异常。

磁法数据采集使用加拿大GEM公司生产的GSM-19T型质子磁力仪, 野外观测总均方根误差为2.16 nT; 基点、高程及正常场改正总误差为1.96 nT; 磁测总误差为2.92 nT。经过化到磁极消除斜磁化的影响, 再进行向上延拓突出深部较大地质体乃至基底的异常、削弱浅部局部异常, 最终获取深部磁异常。

MT数据采集采用加拿大凤凰地球物理公司

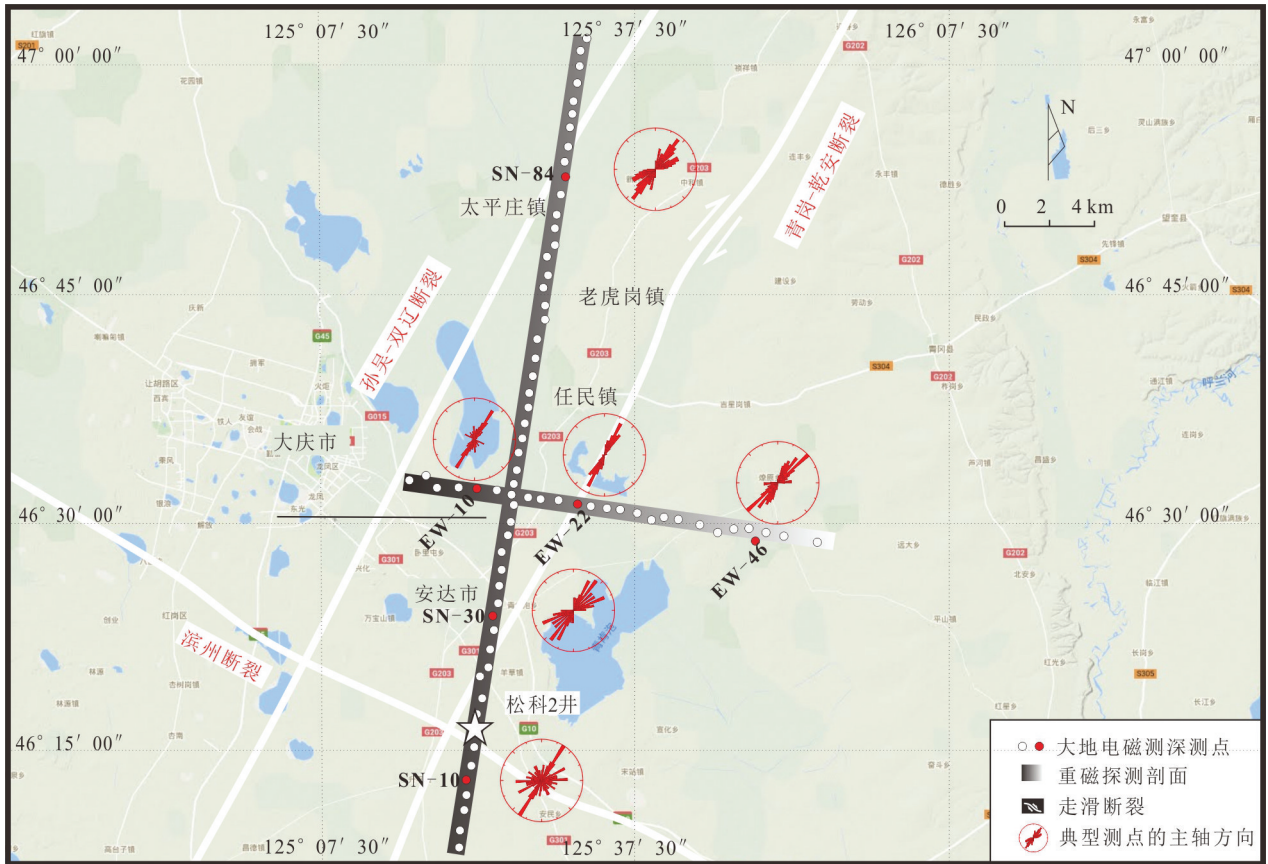


图4 重磁电剖面测点分布图

Fig.4 Measuring point distribution of gravity, magnetic method and magnetotelluric sounding's profiles

V5-2000型大地电磁测深仪,采集过程中使用GPS同步观测,采集时间约20 h。将采集到的数据进行主轴分析、维性分析后,进行非线性共轭梯度TETM模式反演,反演初始模型选择背景电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 的均匀半空间,TE视电阻率误差级数100%,TE相位误差级数5%,TM视电阻率误差级数10%,TM相位误差级数5%,横纵光滑比 $\alpha=1$ ,迭代次数200次。使用多个正则化因子( $\tau$ )进行多次反演计算。使用 $\tau=15$ 反演得到的结果综合了数据拟合差和模型光滑程度,最后确定使用 $\tau=15$ 的反演结果。SN线和EW线最终拟合差分别为2.2和2.9(图5)。

## 5 地球物理特征

布格重力异常值在SN剖面上总体呈现两端低中间高的特征,南部松科二井附近布格重力异常值较为平稳,在 $(30\sim 35) \times 10^{-5} m/s^2$ 变化。中部布格重力异常值最高,达到 $40 \times 10^{-5} m/s^2$ 。向北布格重力异常值逐渐下降至 $23 \times 10^{-5} m/s^2$ ,后回升至 $28 \times 10^{-5} m/s^2$

左右。而在EW剖面上呈现西高东低的特征(图6)。通过重力异常特征可以推断由于营城组之上地层基本呈层状分布,说明区域性布格重力异常变化主要反映的是营城组之下的地层,故高布格重力异常指示了上古生界碳酸盐岩的分布特征,而低布格重力异常指明了泥岩、砂岩的分布情况,布格重力异常高低转换带可能证明了中生代次级断陷盆地的存在。

磁异常自南向北则呈现从200 nT高磁异常迅速降低至-35 nT,后回升至100~150 nT的变化。极大值出现在最南边起点附近(异常不完整),极小值出现在20~40 km段。东西剖面中,整个曲线都出现了一个范围较大的低值异常区域,整个异常值的范围在-70.82~199.26 nT。但西部异常不是十分完整,异常的上升趋势未达极大值,东部已经达到了异常的极值点。EW剖面上磁异常呈现两边高中间低的特征可能与嫩江组一、二段含有磁铁矿(李海燕等,2017)有关。而区域磁异常变化则反映了火



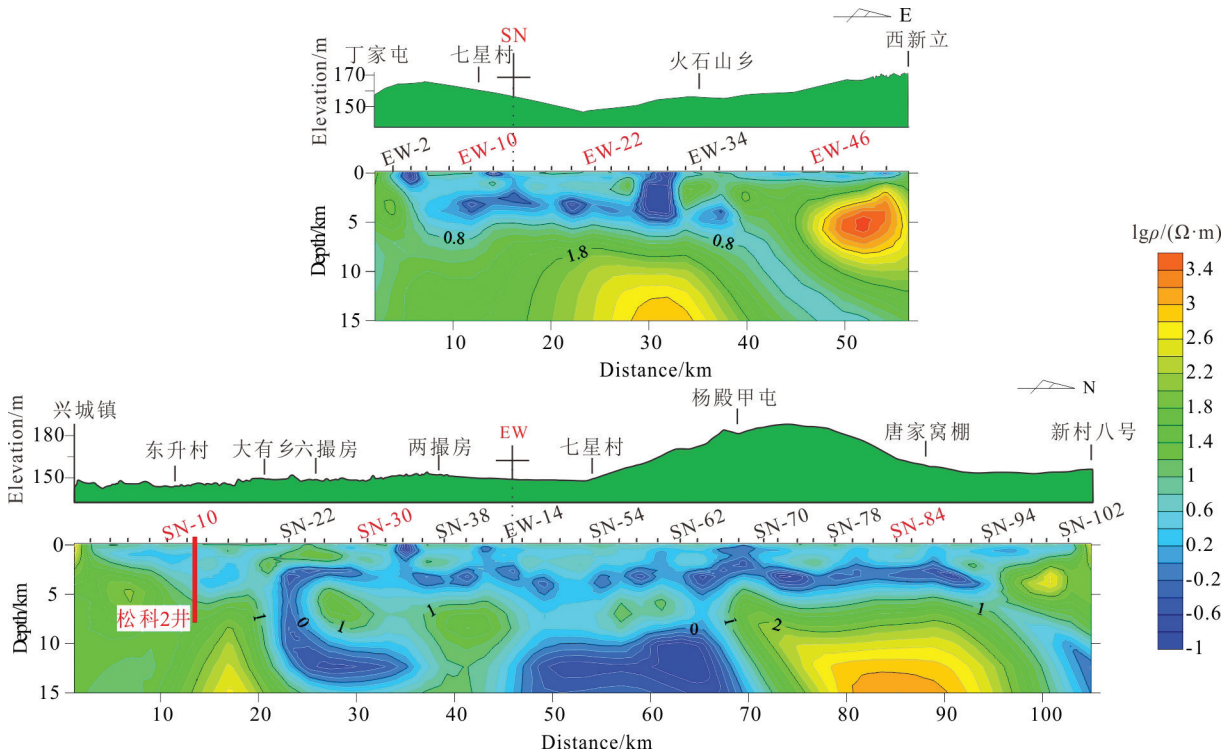


图5 大地电磁测深剖面二维电性结构

Fig.5 Two-dimensional electrical structure of magnetotelluric sounding's profiles

山岩的分布情况,松科二井揭示出中生界火山岩主要分布在营城组,搜集到的地震资料显示本区域营城组连续性好,沉积厚度也基本稳定,故剖面上区域异常指示了火山岩的分布特征。同样,区域性低磁异常可能指示了古生界砂泥岩的分布特征,区域负磁异常亦可能指示灰岩和大理岩的分布特征。

电性剖面总体呈现浅部分层、深部分区的特点。浅部呈现高-低相间的变化特征,根据松科二井所揭示信息,为营城组以上地层的反映。下部存在不连续的中阻层,与地震剖面深部层状反射对应较好,推测为侏罗系、三叠系以及上古生界的反映(图6)。不连续的中阻之间存在低阻异常,推测为中生代断陷盆地,内部沉积为沙河子组与火石岭组,边缘电性梯度带为控陷断裂。深部南北两侧各存在一个低密度且高阻的异常体,研究区北部出露小面积侵入岩,据此推测两处可能为隐伏岩体。SN向剖面中部呈现低异常区,该异常在EW剖面没有反映,地质研究结果表明此区域对应NW向滨州断裂带,区域磁异常显示该异常对应磁异常梯度带,所以深部低阻异常区可能是滨州断裂带局部呈现南北延伸所致。

重磁地球物理特征分析显示:研究区浅部基底主要由泥砂岩、大理岩和侵入岩组成,基底顶面埋深位于7 km左右。已知盆地的基底主要由浅变质的寒武—二叠纪地层及花岗岩组成(陈章明等,2000;刘晓艳等,2001;王成文等,2008),结合岩性对比,推断研究区泥砂岩和大理岩属于浅部基底的石炭—二叠纪地层,证明了上古生界和侵入岩共同组成了研究区浅部基底。

## 6 断裂构造的识别

褶皱构造的主要特点是地质层位发生弯曲变化,在大地电磁剖面上呈现异常体或异常层的抬升或下降;在重磁场上呈上升或下降。断裂构造的主要特点是岩石发生破碎,岩石破碎会导致电阻率和密度降低及磁性变化,故断裂构造在重、磁、电法上常以梯度带的形式表现,在平面上也存在异常走向的突变或串珠状小异常体分布现象。

研究区主要存在NE向滨州断裂带、SN向孙吴—双辽断裂带和NNE向海伦—任民断裂带,3条断裂带在重磁电上均以梯度带的形式存在(图7)。同时区内还存在深层次断裂体系,为控陷断裂,如控制

徐家围子断陷盆地的徐西、徐东断裂带(图6),该断裂体系空间呈现为“U”型结构,内部填充着中等密度、高磁异常体。滨州断裂带在电性结构剖面上表现为中—高阻地质体不连续现象,并呈现电性梯度带。

## 7 结论

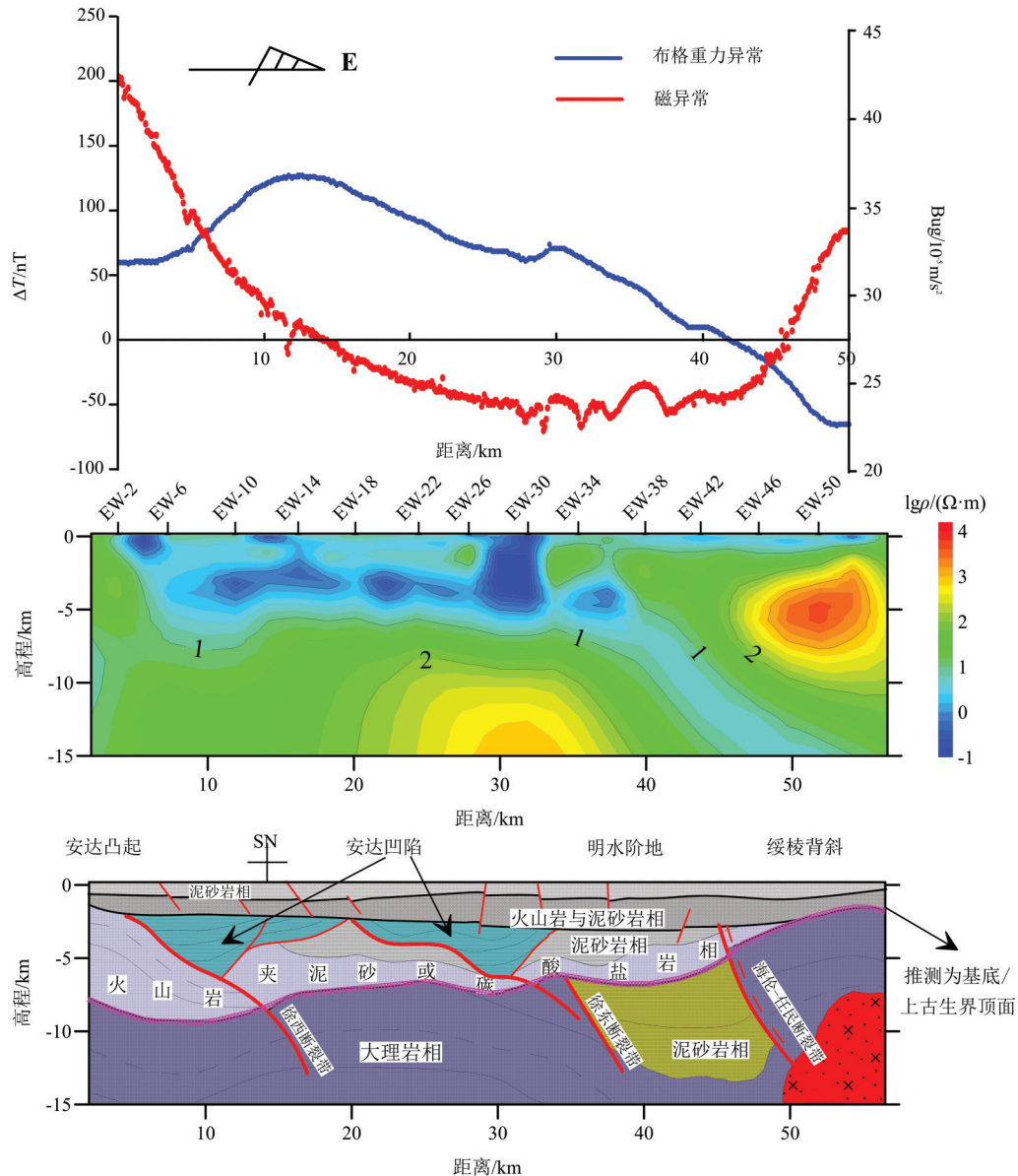
通过对松辽盆地浅部基底进行综合地球物理特征分析,得到以下结论:

(1)建立了上古生界晚石炭世至晚二叠世的物性结构模型,即晚石炭世呈现中—低阻、低密度、弱磁或无磁的特征,早二叠世呈现中—高阻、中—低

密度、中—高磁特征,中二叠世呈现高阻、高密度、负磁特征,晚二叠世呈现中—低阻、低密度、弱磁或无磁的特征。

(2)重磁电地球物理特征显示了研究区浅部基底主要由泥砂岩、大理岩和侵入岩组成,上古生界和侵入岩共同组成了研究区基底。结合深反射地震资料,夯实了基底顶面深度在7 km左右的认识,并通过地球物理资料共同指示了中生代断陷盆地的位置。

(3)识别了NE向滨州断裂带、SN向孙吴—双辽断裂带和NNE向海伦—任民断裂带,以及深层次断裂体系的控陷断裂。断裂构造主要以SN和EW向为主,它们作为构成古生代构造骨架的重要部





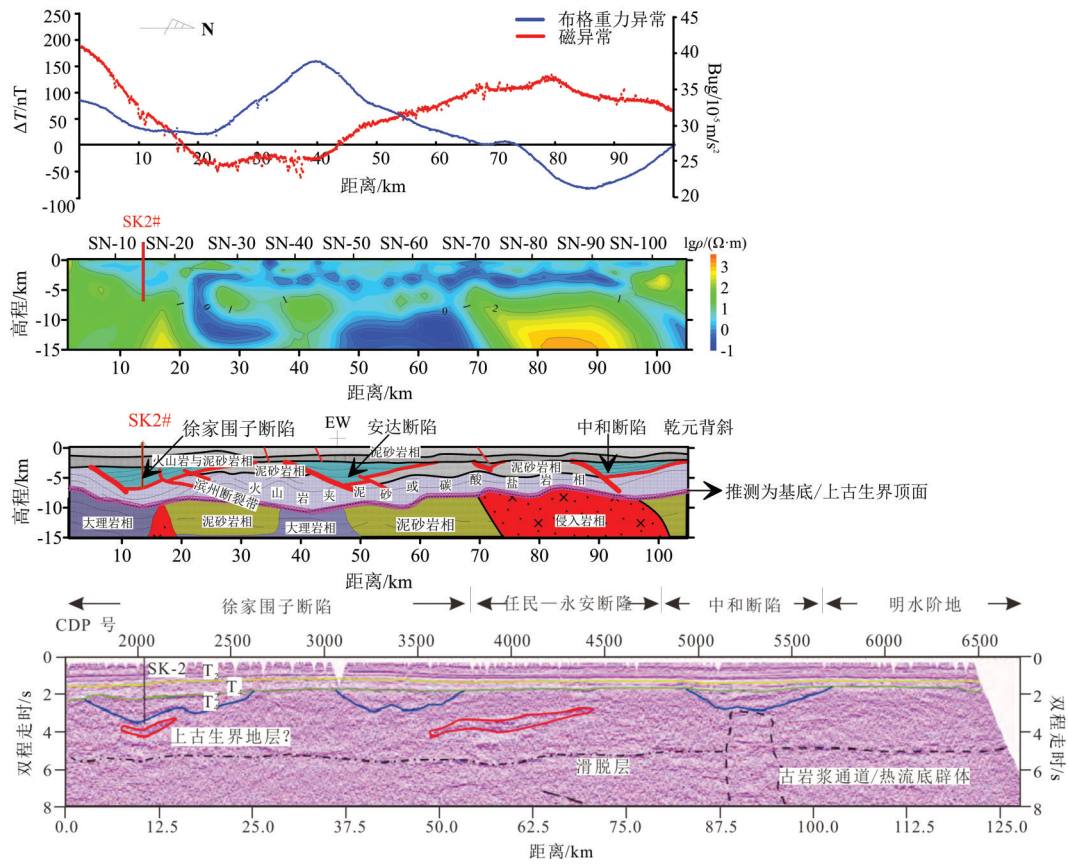


图6 过松科二井重磁异常曲线、电性剖面及基于地震剖面的综合解释(地震剖面引自符伟等,2019)

Fig.6 Gravity and magnetic anomaly curves, electrical profiles and comprehensive interpretation based on seismic profiles through Well SK-2 (seismic profile after Fu et al., 2019)

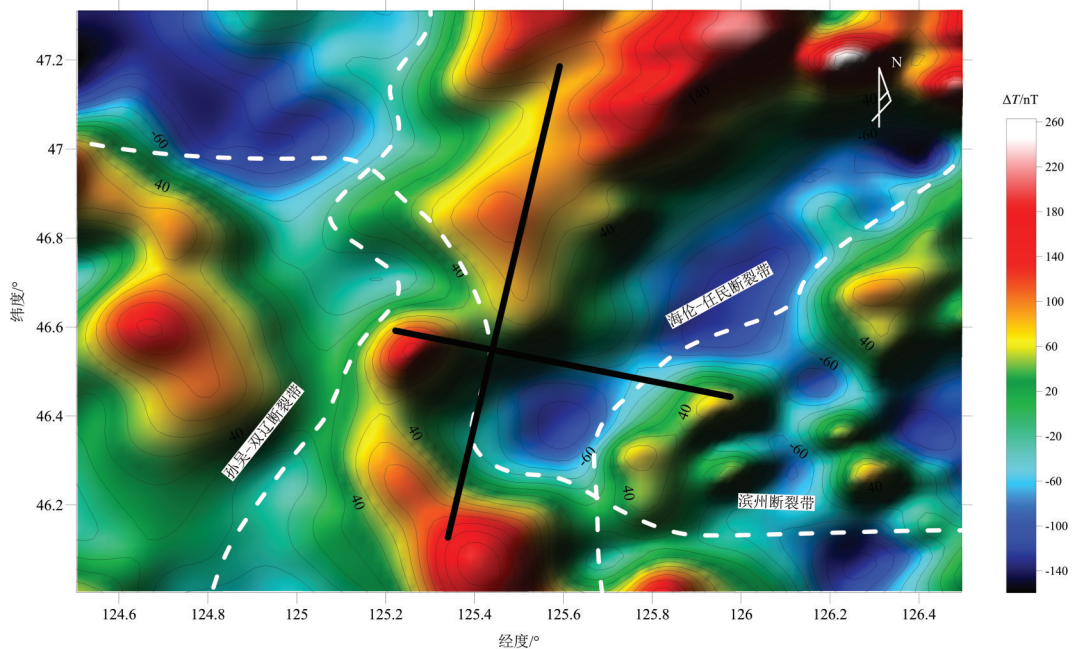


图7 松科二井地区磁异常解译的主干断裂位置

Fig.7 The main fracture location of the magnetic anomaly interpretation of Well SK-2 area

分,控制着深部油气运移和贮藏。

**致谢:**成文过程中得到了杨宝俊教授的建议,在此表示衷心的感谢!

## References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jilin Province. 1988. Jilin Province Regional Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 553–575.
- Chen Zhangming, Guan Deshi. 2000. Comprehensive Research and Target Evaluation of Deep Petroleum Geology in Northeast China[M]. Anda: Daqing Petroleum Institute Press, 115–128 (in Chinese).
- Fu Wei, Hou Hesheng, Gao Rui, Liu Cai, Yang Jin, Guo Rui. 2019. Fine structure of the lithosphere beneath the Well SK-2 and its adjacent: Revealed by deep seismic reflection profile[J]. Chinese J Geophys, 62(4): 1349–1361 (in Chinese).
- Fu Weizhou, Yang Baojun, Liu Cai, C.B.КГЫЛJOB. 1998. Seismic study of the geoscience section of Manzhouli–Suifenhe, China[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2: 87–93 (in Chinese).
- Gao Fuhong, Xu Wenliang, Yang Debin, Pei Fuping, Liu Xiaoming, Hu Zhaochu. 2007. Granitoid zircon LA–ICP–MS U–Pb age of basement in the southern Songliao Basin: Constraints on the era of basin basement's transformation[J]. Science in China Press, 37(3): 331–335 (in Chinese with English abstract).
- Ge Rongfeng, Zhan Qinglong, Wang Liangshu, Xie Guoai, Xu Shiyin, Chen Juan. 2010. Tectonic Evolution of Songliao Basin and the Prominent Tectonic Regime Transition in Eastern China[J]. Geological Review, 56(2): 180–195 (in Chinese with English abstract).
- Han Guoqing, Liu Yongjiang, Jin Wei, Wen Quanbo, Li Wei, Liang Chenyue, Liang Daojun. 2009. The distribution of Xar moron river fault under Songliao basin[J]. Geology in China, 36(5), 1010–1020 (in Chinese with English abstract).
- Han Jiangtao, Guo Zhenyu, Liu Wenyu, Hou Hesheng, Liu Guoxing, Han Song, Liu Lijia, Wang Tianqi. 2018. Deep dynamic process of lithosphere thinning in Songliao basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(6): 2265–2279 (in Chinese with English abstract).
- Hou Hesheng, Wang Chengshan, Zhang Jiaodong, Ma Feng, Fu Wei, Wang Pujun, Huang Yongjian, Zou Changchun, Gao Youfeng, Gao Yuan, Zhang Laiming, Yang Jin, Guo Rui. 2018. Deep continental scientific drilling engineering in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. Geology in China, 45(4): 641–657(in Chinese with English abstract).
- Li Haiyan, Zhou Tinghong, Zhang Shihong, Liu Guanghong, Wu Huaichun, Yang Tianshui, Zhao Kunling. 2017. Magnetic records from the Nenjiang Formation of core SK-1s and their implications[J]. Earth Science Frontiers, 24(1): 143–153 (in Chinese with English abstract).
- Liu Guoxing, Zhang Zhihou, Han Jiangtao, Tang Junhui. 2006. Features of the electric structure of the lithosphere beneath the Hinggan–Inner Mongolia and Jilin–Heilongjiang regions[J]. Geology in China, 33(4): 824–831(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoyan, Du Honglie, Chen Zhangming, Guan Deshi, Fu Guang, Li Chun, Zhao Debing. 2001. Show of petroleum of C–P systems on the earth's surface at the edge of Songliao basin and its geological significance[J]. Geochimica, 30(4): 390–394(in Chinese with English abstract).
- Luo Zhuqing, Jiang Guizhou. 1993. Meso–Cenozoic tectonic evolution in the Songliao Basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 17(1): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- Qu Xiyu, Zhang Manli, Liu Li, Wang Dehai, Qiu Longwei. 2013. Lithofacies palaeogeography characteristics of the Late Permian in Northeast China[J]. Journal of Palaeogeography, 2013. 15(5): 679–692 (in Chinese with English abstract).
- Ren Zhanli, Xiao Deming, Chi Yuanlin, Ren Yanguang, Liang Yu. 2011. Restoration of the rmalhistory of the Permo–Carboniferousbasement in the Song liao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 32(03): 430–439 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaomeng, Long Shengxiang, Zhang Meisheng, Liu Xiaoyan, Hao Fujiang. 2006. Discovery and timing of major thrustbelt in Jiamusi–Yitong fault zone[J]. Oil & Gas Geology, (5): 637–643 (in Chinese with English abstract).
- Sun Xiaomeng, Long Shengxiang, Zhang Meisheng, Liu Xiaoyan, Hao Fujiang. 2006. Discovery and timing of major thrustbelt in Jiamusi–Yitong fault zone[J]. Oil & Gas Geology, (5): 637–643 (in Chinese with English abstract).
- The Inner Mongolia autonomous region bureau of geology and mineral resources. 1991. The Inner Mongolia Autonomous Region Regional Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 597–617.
- Wang Chengwen, Ma Zhihong, Sun Yewu, Liu Li. 2008. Late Paleozoic marine strata: Anew layer foroil–gas exploration in Northeast China[J]. Global Geology, (2): 113–118 (in Chinese with English abstract).
- Wang Pujun, Chi Yuanlin, Liu Wanzhu, Cheng Rihui, Shan Xuanlong, Ren Yanguang. 2003. Volcanic facies in the Songliao Basin: type, characteristics and reservoir significance[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), (4): 449–456 (in Chinese).
- Wang Pujun, Zhao Ranlei, Meng Qi'an, Qu Xuejiao, Zhu Defeng Gao Youfeng et al. 2015. The Cretaceous Songliao Basin: Dynamic background from volcanic fift to interior sag basin[J]. Earth Science Frontiers, 22(3): 99–117 (in Chinese with English abstract).
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Li Huiming, Wang Xiaolin. 2000. Zircon U–Pb age of basement rocks in the Songliao Basin[J]. Chinese Science Bulletin, (6): 656–660 (in Chinese).
- Wu Liangjun. 2017. Study on the Middle Permian Lithofacies Palaeogeography in Songliao Basin and Its Adjacent areas[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese).
- Xie Hongkun. 2012. Research of Lith of Aciespalaeo Geography of Early Permian in Northeast Area[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Xing Daquan. 2015. Research on Upper Paleozoic Tectonic



- Framework of Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract).
- Yang Baojun, Mu Shimin, Jin Xu, Liu Cai. 1996. A comprehensive study of geophysical sections of the Suifenhe geoscience section in Manzhouli, China[J]. Acta Geophysica Sinica, (6): 772–782 (in Chinese).
- Yang Jiliang. 1983. Tectonic development characteristics and hydrocarbon accumulation in the Songliao Basin, China[J]. Journal of Changchun Institute of Geology, (3): 9–20 (in Chinese).
- Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Yu Xing, Xiao Jun, Pang Yanming, Cao Ruicheng, Zhu Defeng. 2008. Evidence for the existence of Precambrian basement under the northern Songliao basin[J]. Geology in China, 35(3):421–428(in Chinese with English abstract).
- Zhang Manli. 2015. Characteristics of Early Carboniferous Lithofacies– palaeogeography in Northeast China[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (in Chinese).
- Zhang Xingzhou, Zhou Jianbo, Chi Xiaoguo, Wang Chengwen, Hu Daqian. 2008. Late Paleozoic tectonic– sedimentation and petroleum resources in northeastern China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), (5): 719–725 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuangao. 2006. Structural Research and Basement Lithology Prediction of the Paleo– central Uplift Belt in Northern Songliao basin[D]. Northeast Petroleum University (in Chinese).
- Zhou Qinghua, Feng Zihui, Men Guangtian. 2007. Current geothermal characteristics of the Xujiaweizi fault depression in the northern Songliao Basin and its relationship with natural gas generation[J]. Science in China (Series D), (S2): 177–188 (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈章明, 关德师. 2000. 东北地区深层石油地质综合研究与目标评价[M]. 安达: 大庆石油学院出版社, 115–128.
- 符伟, 侯贺晨, 高锐, 刘财, 杨璠, 国瑞. 2019. “松科二井”邻域岩石圈精细结构特征及动力学环境——深地震反射剖面的揭示[J]. 地球物理学报, 62(4): 1349–1361.
- 傅维洲, 杨宝俊, 刘财, С.В.КГЫЛЮВ. 1998. 中国满洲里—绥芬河地学断面地震学研究[J]. 长春科技大学学报, 2: 87–93.
- 高福红, 许文良, 杨德彬, 裴福萍, 柳小明, 胡兆初. 2007. 松辽盆地南部基底花岗岩锆石 $LA-ICP-MSU-Pb$ 定年: 对盆地基底形成时代的制约[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (3): 331–335.
- 葛荣峰, 张庆龙, 王良书, 解国爱, 徐士银, 陈娟, 王锡勇. 2010. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J]. 地质论评, 56(2): 180–195.
- 韩国卿, 刘永江, 金巍, 温泉波, 李伟, 梁琛岳, 梁道俊. 2009. 西拉木伦河断裂在松辽盆地地下部的延伸[J]. 中国地质, 36(5):1010–1020.
- 韩江涛, 郭振宇, 刘文玉, 侯贺晨, 刘国兴, 韩松, 刘立家, 王天琪. 2018. 松辽盆地岩石圈减薄的深部动力学过程[J]. 地球物理学报, 61(6):2265–2279.
- 侯贺晨, 王成善, 张交东, 马峰, 符伟, 王璞珺, 黄永建, 邹长春, 高有峰, 高远, 张来明, 杨璠, 国瑞. 2018. 松辽盆地大陆深部科学钻探地球科学研究进展[J]. 中国地质, 45(4): 641–657.
- 吉林省地质矿产局. 1988. 吉林省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 553–575.
- 李海燕, 周庭红, 张世红, 刘光泓, 吴怀春, 杨天水, 赵坤玲. 2017. 松科1井南孔嫩江组磁性矿物组合特征及其意义[J]. 地质前缘, 24(1):143–153.
- 刘国兴, 张志厚, 韩江涛, 唐君辉. 2006. 兴蒙、吉黑地区岩石圈电性结构特征[J]. 中国地质, (4): 824–831.
- 刘晓艳, 杜鸿烈, 陈章明, 关德师, 付广, 李椿, 赵德斌. 2001. 松辽盆地边缘石炭–二叠系地表石油显示及其地质意义[J]. 地球化学, (4): 390–394.
- 罗笃清, 姜贵周. 1993. 松辽盆地中新生代构造演化[J]. 大庆石油学院学报, 17(1): 8–15.
- 内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 597–617.
- 曲希玉, 张满利, 刘立, 王德海, 邱隆伟. 2013. 中国东北地区晚二叠世岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 15(5): 679–692.
- 任战利, 萧德铭, 迟元林, 任延广, 梁宇. 2011. 松辽盆地基底石炭–二叠系热演化史[J]. 石油与天然气地质, 32(3): 430–439.
- 孙晓猛, 龙胜祥, 张梅生, 刘晓燕, 郝福江. 2006. 佳木斯–伊通断裂带大型逆冲构造带的发现及形成时代[J]. 石油与天然气地质, (5): 637–643.
- 王成文, 马志红, 孙跃武, 刘立. 2008. 晚古生代海相地层—东北地区油气勘查的一个新层系[J]. 世界地质, (2): 113–118.
- 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 程日辉, 单玄龙, 任延广. 2003. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (4): 449–456.
- 王璞珺, 赵然磊, 蒙启安, 瞿雪姣, 朱德丰, 高有峰. 2015. 白垩纪松辽盆地: 从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J]. 地质前缘, 22(3): 99–117.
- 吴福元, 孙德有, 李惠民, 汪筱林. 2000. 松辽盆地基底岩石的锆石 $U-Pb$ 年龄[J]. 科学通报, (6): 656–660.
- 吴亮君. 2017. 松辽盆地及周缘地区中二叠世岩相古地理研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 谢宏坤. 2012. 东北地区早二叠世岩相古地理研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 邢大全. 2015. 松辽盆地上古生界构造特征探究[D]. 长春: 吉林大学.
- 杨宝俊, 穆石敏, 金旭, 刘财. 1996. 中国满洲里——绥芬河地学断面地球物理综合研究[J]. 地球物理学报, (6): 772–782.
- 杨继良. 1983. 中国松辽盆地的构造发育特征与油气聚集[J]. 长春地质学院学报, (3): 9–20.
- 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 庞彦明, 曹瑞成, 朱德丰. 2008. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据[J]. 中国地质, 35(3): 421–428.
- 张满利. 2015. 中国东北地区早石炭世岩相古地理特征[D]. 青岛: 中国石油大学(华东).
- 张兴洲, 周建波, 迟效国, 王成文, 胡大千. 2008. 东北地区晚古生代构造–沉积特征与油气资源[J]. 吉林大学学报(地球科学版), (5): 719–725.
- 张元高. 2006. 松辽盆地北部古中央隆起带深层构造研究及基底岩性预测[D]. 大庆石油学院.
- 周庆华, 冯子辉, 门广田. 2007. 松辽盆地北部徐家围子断陷现今地温特征及其与天然气生成关系研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (S2): 177–188.