doi: 10.11720/wtyht.2019.0090

张鹏辉,张小博,袁永真,等.辽河外围北部秀水盆地大地电磁测深研究[J].物探与化探,2019,43(5):986-996.http://doi.org/10.11720/wtyht. 2019.0090

Zhang P H, Zhang X B, Yuan Y Z, et al. A study of magnetotelluric sounding of Xiushui Basin in the northern periphery of Liaohe[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5):986-996.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.0090

辽河外围北部秀水盆地大地电磁测深研究

张鹏辉^{1,2},张小博^{1,2},袁永真^{1,2},方慧^{1,2},刘建勋^{1,2},姜春香^{1,2} (1.国家现代地质勘查技术研究中心,河北廊坊 065000; 2.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)

摘要:自秀 D1 并在火山岩储层中钻遇良好的油气显示以来,秀水盆地成为近年来备受关注的一个中生代断陷,其 以往地质工作主要集中在中生界煤田勘探,油气基础地质工作程度较低。为查明秀水盆地边界、内部构造格架和 地层展布特征,通过2条大地电磁测深和重力、磁力剖面测量,获得了秀水盆地及东西两侧重磁异常曲线和8km 以 浅的电性结构;以钻井、地质、岩石物性等资料为约束,确定了不同年代地层的电性结构特征,综合建立了区域地质 -地球物理剖面模型。结果表明秀水盆地盖层整体具有较低的电阻率特征,与下伏基底具有明显的电阻率差异;秀 水盆地基底为上古生界地层,且南北基底组成不同,盆地东西两侧基底为前寒武变质岩系。盆地内部呈两凹夹一 隆的构造格局,东侧规模较大。这些认识为秀水盆地及松辽外围中生代盆地的油气资源评价提供了可靠的地球物 理依据。

关键词:大地电磁测深;秀水盆地;盆地结构;地层展布;油气资源评价

中图分类号: P622; P631.3+25 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2019) 05-0986-11

0 引言

松南断陷群位于松辽盆地南缘,由 24 个沿松 南—辽北—辽西—线排列的中生代断陷组成,断陷 结构特征由西北的断坳盆地向东南的断陷盆地过 渡^[1]。自 1981 年以来,先后在奈曼、张强、陆东、彰 武等凹陷陆续发现规模油气藏^[2],揭示松南断陷群 具有较大的资源前景。目前已探明该区主力烃源岩 层为中上白垩系九佛堂组和沙海组,对于强烈改造 的断陷初期沉积建造及其油气资源研究程度较 低^[3]。秀水盆地位于张强断陷以南、彰武断陷以东 和大民屯凹陷以北所夹持区域,是海西褶皱基底和 前寒武纪基底上发育起来的中生代断坳型盆地,其 内部沉积建造以下白垩系火山—沉积相为主,规模 较小,以往仅有少量煤田地质钻孔工作,未引起油气 勘探工作的重视,属于典型的低勘探程度区域^[56]。 2015年,沈阳地质调查中心在盆地南部的东蛇子山 凹陷实施了秀 D1 油气调查井,钻遇义县组厚层暗 色泥岩和多层火山岩储层油气显示^[7],后续研究表 明区域存在下白垩系、中侏罗系两套生烃层 系^[5,6,8],这些成果不仅指示秀水盆地可能具有一定 的油气资源前景,也对松南断陷群新层系油气资源 评价提供了一个新的视角。

秀水盆地内的油气勘探程度低,前人主要围绕 煤层、古生物、岩心有机地球化学开展了系列工 作^[4-8],而对于盆地边界、构造特征、地层展布等认 识不清,制约了盆地内的油气勘探^[8]。秀水盆地虽 然距彰武、张强等断陷较近,但两者盆地内部的沉积 建造具有明显的差异,如秀水盆地缺失中上白垩系 地层,而该套地层是张强、彰武断陷内的主要生烃层 和储层^[4-6],因此开展秀水盆地的构造特征研究也 可为区域断陷的差异性演化提供地球物理依据。因 此,本文拟通过盆地的两条大地电磁测深剖面构建

收稿日期: 2019-02-20; 修回日期: 2019-04-30

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160164;DD20190030);中国地质科学院基本科研业务费课题(JYYWF20180902,AS2017Y05) 作者简介:张鹏辉(1987-),男,工程师,从事地球物理应用和研究工作。Email:zhangpenghui@igge.cn 浅部介质的电性结构特征,结合重力资料、岩石物性 测试结果、钻井、测井数据等对盆地的构造格局、地 层展布、断裂等主要信息进行解译,为秀水盆地及周 缘油气基础地质调查提供参考和支撑。

1 地质背景

研究区位于沈阳以北与法库以南所夹持区域, 周缘被赤峰开原断裂、依兰—伊通断裂、柳河断裂等 所围限。在大地构造上位于华北板块和兴蒙造山带 接壤部位,该区域古亚洲洋闭合时间尚存在争议,部 分学者认为该区于早海西期古亚洲洋闭合形成增生 褶皱带,晚古生代处于伸展拉张环境,沿赤峰—开原 等早期东西向断裂发生裂陷活动,形成一套海相沉 积^[9],晚二叠世末至早三叠世早印支运动使海盆消 失^[10]。部分学者则提出该地区在早-中三叠世洋壳 消失,早古生代以来一直处于海相沉积^[11]。印支期 以来的区域构造背景争议较小,受印度—澳大利亚 板块快速北东向运移和北美板块西向碰撞西伯利亚 着大规模的花岗岩类侵入活动,在法库地区形成了 一套晚古生代变质安山岩—英安岩—理岩夹变质碎 屑岩建造所组成的层状变质岩系地层^[12]。侏罗纪 时期受伊佐奈岐板块的 NW 向俯冲影响,处于 NW-WNW 向挤压作用,早白垩世随着古太平洋板块向 欧亚板块俯冲速度的减小,东北地区出现 NW—SE 向拉张构造环境,东北地区构造性质由先前的挤压 褶皱造山转变为强烈拉伸断陷^[13-14],表现为弥散性 分布式变形,形成了众多小规模箕状断陷。早白垩 世晚期,受区域东西向挤压作用发生大规模挤压抬 升与剥蚀作用,区域九佛堂组及以上早白垩世地层 遭受剥蚀改造^[14-15]。

盆地基底主要为古生界变质程度较深的片麻岩 和变质砂岩^[3,16],盆地内发育一套复杂的内陆盆地 火山-碎屑岩沉积,主要由陆源碎屑岩、中酸性火山 岩、煤系和油页岩组成,含丰富的动植物化石^[4]。 盆地西部可见厚层中侏罗系海房沟组,秀 D1 并自 上而下钻遇地层分别为第四系、下白垩系九佛堂组、 义县组,缺失下白垩系沙海组及上覆白垩系地 层^[5,7-8]。



图 1 秀水盆地区域地质及大地电测测深点布置

Fig.1 Regional geology and magnetotelluric sounding profile location in Xiushui Basin

2 岩石物性特征

2.1 岩石及地层电性特征

地下岩石物性差异是地球物理方法应用的基础 和前提,只有正确认识和总结研究区的电性特征,才 能更好地认识电性异常,从而约束、指导电性结构解 译、获得可信的地质模型。本次工作在秀水盆地周 边采集了 168 块岩石物性标本,对其中样品形态完 好的 128 件标本进行电阻率测定,结果如表 1 所示。 碎屑岩(泥质粉砂岩)的电阻率常见值比较低,义县 组粉砂岩为 218~601 Ω · m,侏罗系泥质粉砂岩相 对较高,为 429~1 428 Ω · m;安山岩电阻率常见值 在 103~879.8 Ω · m 之间,显示相对低阻特征,而偏 基性的安山玄武岩常见电阻率为 1 166~4 832 Ω · m,显示高电阻率特征;侵入岩和浅成侵入岩电阻率 较高,安山玢岩常见电阻率为2564~6324Ω·m,花 岗岩常见电阻率为1506~4300Ω·m。前中生界地 层的石英岩、变质英安岩等显示高电阻率特征,最大 可到10764Ω·m。

对于可获得地表地质资料的大地电测测深测 点,可通过统计与所属的地层单元对应的曲线首支 电阻率值建立地层电性柱^[17]。研究区西部和东部 均有不同年代的地层出露,这为该方法的应用提供 了基础,统计后的大地电磁测深点首支曲线电阻率 结果如表1所示,各个时代地层的电阻率总体趋势 是随着地层由新至老表现为逐渐增大的趋势,其中 石炭—二叠系与侵入岩的视电阻率值相近,在应用 中需结合其他地质、地球物理资料进行约束。上述 电性变化规律,对电磁法资料处理、分析和解释提供 了物性依据。

表1 野外露头及大地电磁资料首支电阻率测试结果

Tabel 1 Analysis results of resistivity parameters for field rocks and first branch resistivityparameters

地层							
	岩性	数量	数值范围/(Ω・ m)	平均值/(Ω・m)	数量	数值范围/(Ω・m)	平均值/(Ω・m)
第四系					6	6.7~77.8	29.9
					3		
	安山玢岩	6	2564.1~6324	3980.0			
	安山岩	11	103~879.8	402.0			
白垩系义县组	安山玄武岩	6	1166~4832	2190.0	62 14.9~81.9	14.9~81.9	24.5
	辉绿岩	6	224~711	397.0			
	粉砂岩	11	218~601	372.0			
侏罗系	泥质粉砂岩	8	429~886	515.0		70 1 170 0	121.7
	花岗岩	12	1506~4300	2820.0	7	73.1~172.9	
石炭—二叠系		68	994~10764	3964.0	9	154.9~322.5	246.9
元古宇					1		105.7
侵入岩					19	105.6~543	287.4

for magnetotelluric sounding

电阻率测井能够精确揭示地层内部不同地层和 岩性的电阻率特征,为检验井旁测深反演电阻率能 否作为地层的电性参数,将井旁测深反演电阻率与 电测井电阻率测量结果进行对比,有助于区域电性 地电磁测深方法分辨率的影响,在 MT 井旁测深曲 线上未显示明显的电性界面。综合露头岩石测试、 大地电磁资料首支电阻率值和井旁测深等资料可 知,地层电阻率值随着时代变老呈逐渐增大的趋势,

层的地质标定和资料解释。研究区内目前有叶参1 井(位于L1线146测点)和秀D1井(L1线230测 点),前者主要钻遇了上白垩系义县组,未见底;后 者自上而下钻遇了白垩系九佛山组和义县组。对比 两口钻井的电阻率测井曲线(图2),九佛堂组地层 显示两高夹一低的电性结构特征,其界面位于下部 高阻层的中部,电阻率测线形态与MT井旁测深结 果具较好的一致性;义县组地层视电阻率值整体高 于上覆九佛堂组,秀D1井电测井呈薄层低阻与厚 层高阻相间的特征,在深部由于低阻层的厚度受大 白垩系地层和侏罗系地层之间电阻率差异相对较 小,两者与下伏石炭—二叠系具有较大的电性差异; 同时早白垩系义县组受多期次火山和构造活动影 响,内部具有低阻、高阻相间的特征。

2.2 岩石密度特征

在秀水盆地周缘采集部分露头岩石进行了密度 测试,结果统计见表 2。白垩系地层粉砂岩密度平 均值为 2.59 g/cm³,火山岩中基性玄武岩密度值较 大(2.67 g/cm³),安山岩密度相对较小(2.54 g/ cm³),地层整体平均密度值为 2.61 g/cm3。侏罗系



图 2 秀水盆地钻孔电测井与大地电磁测深反演结果对比



表 2	研究区露头岩石密度测试统计
-----	---------------

Tabel 2	Analysis results	of density	parameters f	for field rocks
---------	------------------	------------	--------------	-----------------

地层	主要岩性	样品数	最小值/(g・cm ⁻³)	最大值/(g・cm ⁻³)	平均值/(g⋅cm ⁻³)
	粉砂岩、泥质粉砂岩	11	2.46	2.68	2.59
占亚之	花岗岩	5	2.46	2.64	2.58
日主余	安山岩、玄武质安山岩	12	2.47	2.61	2.54
	玄武岩、安山质玄武岩	15	2.54	2.75	2.67
此四玄	泥质粉砂岩、粉砂岩	6	2.46	2.70	2.58
体夕东	花岗岩、二长花岗岩	14	2.55	2.66	2.60
	花岗岩、二长花岗岩	24	2.53	2.71	2.61
万圯 一番歹	变质英安岩	15	2.65	2.90	2.76
□灰── ☆	石英岩	14	2.70	2.81	2.74
	糜棱岩	11	2.71	2.86	2.77

碎屑岩密度为 2.58,酸性侵入岩密度为 2.60 g/cm³, 整体平均密度为 2.62 g/cm³,与白垩系地层平均密 度差异较小;石炭—二叠系以变质岩系和火山岩为 主,整体地层密度为 2.71 g/cm³,与上覆地层具有较 大的密度差异,侏罗系底界面是研究区主要的密度 界面。 条 NWW 向 90 km 长的非震地球物理测线 L1、L2,其 中 L1 线过秀 D1 井和叶参 1 井。野外资料采集使 用加拿大凤凰地球物理公司的 V5-2000 大地电磁测 深仪,采用标准"+"字形布设,*E*_x、*H*_x 方向与测线延 伸方向一致,*E*_y、*H*_y 方向与测线延伸方向垂直。测 点点距为 1 km,记录有效频率带宽为 0.01~320 Hz, 电偶极距离为 100 m,每一测站采集时间大于 20 h。 野外采集获得的视电阻率曲线可以直接反映地 下介质的电性结构特征。研究区典型视电阻率和阻 抗相位曲线如图 3 所示,其中 L2 线 120 号点位于叶 茂台凹陷内,地表出露大量的白垩系义县组火山-沉

3 数据采集及处理

3.1 MT 数据采集 为控制秀水盆地的地层和构造单元,部署了两



图 3 研究区大地电磁测深典型测点的视电阻率曲线 Fig.3 Apparent resistivity curves for MT station along the profile

积岩;L2 线 192 点位于秀水盆地内部,地表覆盖第 四系。L1 线 190 点位于秀水盆地西侧古隆起处,地 表出露石炭—二叠系地层;L2 线 256 位于秀水盆地 东部,地表出露蓟县系石门组。这些视电阻率曲线 表明不同构造单元的电性结构具有明显的差异,凹 陷内测点浅部的一维性较强,视电阻率整体相对较 低,且叶茂台凹陷的基底埋深明显大于秀水盆地;在 古隆区视电阻率普遍较高,且向深部呈逐渐增大后 减小的趋势。

3.2 地电走向分析

电性主轴方位对于大地电磁二维反演结果影响 很大,因此获取研究区准确的地电走向是获得真实 地电结构的重要前提^[18]。目前,阻抗张量分解是应 用较多的电性主轴方位分析技术,如 Bahr 法^[20]、 CBB 相位张量分解法^[21]、多测点多频点分解算 法^[22]等。本文应用基于共轭阻抗法(CCZ)的多测 点-多频点统计成像分析技术提取地电主轴方 位^[18],该方法是在多测点多频点统计分析基础上利 用最优化技术提取占优的电性走向,分解结果与单 点相比较稳定。从全频点电性主轴统计结构玫瑰图 (图 4)上可看出,研究区两条测线的电性主轴方位 角为 43°或 133°。考虑到区域在中生代以来主要受 东侧滨太平洋板块西向俯冲影响,周边主要发育中 生代 NE 向展布深大断裂,可以确定区域内的地电 结构走向应为 43°(NE 向),此后确定极化模式时应 将测点阻抗张量顺时针旋转到 43°地电走向上。



图 4 大地电磁剖面全频点电性主轴统计结果玫瑰图

Fig.4 Statistical rose diagrams of multi-measuring point multi-frequency point major electrical axis based on decomposition of the impedance tensor

3.3 MT 反演

本文使用目前较成熟的非线性共扼梯度法 (NLCG)^[23]进行反演,该方法具有计算速度快、所需 存储量小、结果稳定性好等优点。由于该方法属于 局部最优化方法,易受初始电阻率模型影响^[24],要 求所选择的电阻率模型应接近实际的地质模型,因 此反演时选择一维 Occam 反演结果作为初始模型。 这一技术基本保留了一维反演结果中层状介质模型 的宏观轮廓信息,对深部的低阻异常体光滑效应影 响小。通过不同模式进行反演对比后,选取 TM 模 式进行反演计算。反演深度为 8 km,反演参与频点 60 个,频段为 320~0.01 Hz,反演结果见图 5、图 6。





Fig.5 Gravity anomaly curve(a), Magnetotelluric sounding two-dimensional inverted electrical section(b)

and geological interpretation(c) of L1 line

4 地质—地球物理综合解释

4.1 宏观地球物理特征

研究区二维电性结构整体具有典型的"纵向分 层、横向分块"的特征(图 5、图 6)。浅部 3 km 以上 基本呈低阻—中阻—低阻分层特征,横向上电性层 形态起伏小,但不同的区域其电阻率变化差异不同。 发育程度等有关。区域内已知基底包括侵入岩体、 上古生界和前寒武系等,从区域岩石电阻率特征上 可知侵入岩电阻率最高,上古生界次之,前寒武纪变 质岩介于两者之间。

4.2 地质解释

依据区域内电测井、露头岩石物性和大地电磁 测深曲线首支统计等资料,结合区域地质特征,对电 性层进行标定和综合推断。为方便描述,本文自西

中生代碎屑岩沉积厚度较大的地区,纵向上电阻率 差异较小,如测线西部 L1 测线 110 测点;在火山-沉 积岩较发育的地区,受火山岩高电阻率性质的影响, 呈中等视电阻率与低阻相间的特征,如叶参 1 井所 在的 L1 测线 146 测点处。测线中部出露或钻遇中 侏罗系地层的区域电阻率纵向差异中等,而在上古 生界地层出露区域,电阻率纵向差异较大,这种差异 主要和大地电磁测深方法的体积效应和岩石电阻率 差异有关。横向电性结构分块性与区域地质上构造 单元有较好的对应关系,这与基底物质的差异、断裂 向东结合不同构造单元进行讨论,其中考虑到第四 系厚度较小,且与下伏地层的电阻率差异较小,将其 和下伏第一套电性层作为一个整体讨论。 4.2.1 叶茂台凹陷

测线西段位于彰武断陷叶茂台凹陷的东部,浅 部呈低阻—高阻—低阻相间,在深2.5~3km之间出 现视电阻率值大于1000Ω·m、断续分布的高阻层, 该深度与以往油田工作推测的盖层厚度(约2.7 km)基本一致,推测为义县组火山—沉积地层的电 性响应。凹陷西段早白垩世时可能远离火山活动区



Fig.6 Gravity anomaly curve(a), Magnetotelluric sounding two-dimensional inverted electrical section(b)

and geological interpretation(c) of L2 line

域,火山岩相对不发育,向东部出现两层横向连续分 布高阻层,钻至2391 m 的叶参1 井揭示其主要为大 套火山岩层夹薄的泥岩层。凹陷深部基底呈高阻、 低阻相间的块状特征,其中高阻块体显示低重力异 常,推断该高阻块体是高阻、低密度的中酸性侵入岩 体;低阻块体自盆内向盆缘重力异常逐渐升高,与盆 地基底的变化形态相似,推测是前寒武纪变质岩系 基底,低阻成因与区域频繁构造运动导致基底地层 挤压、破碎、富水等作用有关。

4.2.2 叶茂台凹陷外围东部隆起

叶茂台凹陷东部与秀水盆地之间发育一个 NE 向展布的隆起,其南部和北部出露地层不同,南部 L1线178~186测点之间主要出露西倾的侏罗系海 房沟组地层,煤田钻孔(图1中标注10)揭示主要为 海房沟组下段,是一套厚487 m的灰色砾岩夹含砾 粗砂岩、细砂岩及薄层粉砂岩建造,不整合覆盖在古 生界变质岩基底岩系之上。该套地层在电性结构剖 面中浅部呈相对低阻的电阻率特征,可能是该套地 层中富含有机质和高孔隙度有关;东部186~196测 点之间大面积出露二叠系佟家屯岩组,电性结构上 显示中高阻特征,横向上较连续。区域地质调查显 示二叠系地层呈背斜展布,西侧与侏罗系地层呈断 层接触,电性结构上可见低阻的侏罗系海房沟组的 下部发育西倾的高阻体,推测是二叠系地层,向东部 则延伸至秀水盆地深部。此外,学者在海房沟组地 层西侧识别一套逆冲推覆断裂系^[25],上盘为上古生 界变质岩,在电性结构上也具有与二叠系佟家屯岩 组具有相似的特征,推测叶茂台凹陷东侧深部发育 小规模上古生界地层。北部L2线158~160测点之 间地表出露石炭系盘岭岩组,对应的电性结构特征 显示上部相对中阻、下部中高阻的叠合电性结构特 征,盘岭岩组东侧地表出露大套中二叠世二长花岗 岩,电性结构上呈低阻且向西侧深部延伸的特征,推 测该段可能发育有断裂破碎带。煤田钻孔(图1中 标注28)在约357 m钻遇古生界地层,推断其向东 部延伸至秀水盆地下部。

4.2.3 秀水盆地

秀水盆地区域电性结构呈西侧高阻、东侧低阻 复合块状特征,重力异常曲线在盆地范围内自西向 东逐渐降低,反映盆地基底东、西两段的电阻率、密 度均有所差异。L1 测线上秀水盆地外围西侧(测点 184~212 之间)发育较大规模的东倾二叠系佟家屯 岩组,呈高重力异常特征,反映高密度基底埋深较 浅。电性结构呈中高阻特征,横向上高阻层形态与 重力异常曲线相似,推断该套电性结构层向盆地深 部延伸,且重力异常呈下降趋势,反映高密度老地层 埋深逐渐增大,因此推断该区域基底为上古生界, L1 测线的 226~232 测点之间发育一小规模的低阻

条带,对应着低重力异常区,推断该处发育一个规模 较大的断裂,内部可能富集低阻流体。L2 测线上在 盆地西侧和北侧出露大套的石炭系盘岭岩组(测点 158~172),该段呈高重力异常且向东侧至188测点 均保持该特征,反映高密度地层在横向上分布较广, 向东侧盆地内部延伸。在电性结构剖面上,浅地表 以下呈低阻--高阻的电性结构特征,与二叠系相似, 在盆地内部(测点 180~190 之间)显示了和石炭系 出露区相似的电性结构,考虑重力异常的一致性,进 一步推断该套石炭系地层可能向盆地内部延伸,但 由于下伏高阻地质体的影响,其高阻的底界面难以 识别。该测线在盆地范围的东段(测点 190~202) 附近发育一低阻带,规模较 L1 线 230 测点处大,在 重力异常曲线的陡降带,可能是断裂形成的破碎带 的响应。因此,整体上盆地基底在北部(L2测线)以 石炭系地层为主,南部(L1测线)则主要为二叠系地 层;基底西段高阻体可能发育侵入岩体,东段低阻体 可能反映了断裂或破碎带的发育。

盆地盖层电性结构特征整体上表现为三段式, 反映盆地"两凹夹一隆"的构造格局。L1 测线上西 次凹位于 200~204 测点之间, 呈高重力异常背景上 局部低重力异常,电性特征显示局部低阻,基于地表 地质、电性特征和钻孔结果,推测次凹内部主要填充 义县组地层;西次凹在 L2 测线上位于 178~182 测 点之间,规模略大于南部,重力异常宽缓,电性结构 为上部低阻、下部相对中等电阻率特征。西侧煤田 48 号钻孔(测点 174) 在义县组下钻遇了侏罗系炭 质泥岩,相应深度内的电性响应为低电阻率特征,且 向东埋深逐渐变浅,西次凹浅部出现具有相似的电 性结构,其是否是侏罗系海防沟组地层的响应?本 文倾向于其并未进入西次凹,一是区域地质调查表 明侏罗系地层分布主要围限在两条 NNE 向展布的 相向逆冲断层之间,东侧逆冲断层分布在秀水盆地 的西缘;二是西次凹浅部电性结构与白垩系地层也 具有相似性,因此推断西次凹的低阻层应该是白垩 系地层的响应,包括义县组、九佛堂组和沙海组。盆 地内中部凸起在南部(L1线 202~212 测点)规模较 大,视电阻率较高,与二叠系地层视电阻率、重力异 常等特征相似,推测该凸起上部主要为二叠系地层, 上覆可能发育较薄的白垩系地层;北部凸起范围 (L2线182~186测点)较小,视电阻率中等,与西侧 石炭系、侏罗系地层的电性结构、重力异常可对比, 推测其浅部主要由石炭系地层。盆地东次凹在南部 显示低阻层规模较小,秀 D1 井钻井结果揭示了南 部主要发育白垩系九佛堂组、义县组地层,且以后者 为主,底界埋深约 1.8 km;北部东次凹埋深较大,约 2.2 km,推测主要发育侏罗系、义县组、九佛堂组和 沙海组等地层。

4.2.4 秀水盆地外围东部隆起

秀水盆地东部呈大套的高阻体状特征,局部发 育低阻条带或低阻块体,浅部发育层状中等视电阻 率。L1 测线 236~254 测点之间的高阻块体呈宽缓 的重力异常,其值低于石炭系地层出露区。L2 测线 的高阻体规模较大,位于206~252测点之间,对应 相对低重力异常区,反映高阻体的密度普遍较低,结 合区域地质调查在盆地东侧发现的大套中侏罗世二 长花岗岩、中二叠世二长花岗岩,推测大套高阻体是 多期次酸性侵入岩体的电性响应。高阻体东侧相邻 低阻块体规模较小,呈带状或条带状展布,推断是断 裂或破碎带电性响应。在 L1 测线重力异常变化较 小,仅在低阻东侧发育一个局部低重力异常,可能浅 部是小规模凹陷,L2 测线上低阻带对应高重力异常 区,推测是密度较大的前寒武纪变质岩系局部发生 断裂、破碎、富水等影响而呈低电阻率特征。浅部呈 层状的中等视电阻率层可能是古风化面或滑脱面的 电性响应。

5 讨论

5.1 区域整体构造格架

研究区两条电性结构剖面清晰地指示了边界断 裂、叶茂台凹陷和秀水盆地的基底形态、双断式断陷 及古隆起特征,划分了区域主要地质单元。西部叶 茂台凹陷基底主要是前寒武系变质岩,东边界受西 倾断裂的控制,该断裂向深部可能聚敛至深部的低 角度逆冲断层之上,后者电性结构上为中等视电阻 率背景上的西倾低阻条带。秀水盆地的基底是海西 褶皱地层,其中南部北部基底年代较老;秀水盆地东 部主要发育太古宙深变质岩,局部出露地表。整体 上,秀水盆地内部基底组成南北不同、盆地内部与盆 地外围的基底组成也不同,这种差异受区域构造作 用控制。区域构造演化研究表明海西末期—印支期 内区域主要处于挤压构造环境,该时期主要形成了 以东西构造格架为主体的构造形迹[3,11,13,27],北部 法库断凸上可看到近东西走向的逆冲推覆构造,韧 性剪切带发生时间为 262~194 Ma, 主体发生在三叠 世[25]。早中侏罗世时期该地区进入剥蚀阶段,北部 二叠系被完全剥蚀,南部秀水河子—登仕堡子镇以 南残留部分二叠系地层,造成秀水盆地南北基底存 在差异。

燕山运动时期,在南北左旋对扭加上东西挤压 的总体地壳运动影响下,研究区受 NWW—SEE 挤 压体制控制^[27],形成了侏罗纪山间坳陷盆地并接受 中侏罗世沉积,现今在秀水盆地西部可见到近 NE 向展布的侏罗系地层。晚侏罗世末至早白垩世的地 壳活动引发了区域裂陷,大地热流值升高^[1],形成 盆地雏形^[26],并发育一系列 NNE 或近 SN 向的控盆 断裂,沿断裂发生多次岩浆侵入和火山喷发,沉积巨 厚的义县组;岩性主要为中基性火山岩,可见火山集 块岩、火山角砾岩、凝灰岩等^[5],该套地层在北部的 叶茂台凹陷和秀水盆地中普遍存在,在电性结构上 呈低阻、中高阻相间的特征。此时,盆地构造格架基 本形成,西部叶茂台凹陷东部呈断陷构造特征,东部 秀水盆地具有两隆夹一凹的构造格局,呈双断式地 堑结构。

5.2 区域地层分布特征

区域地质资料表明秀水盆地西部发育中侏罗系 海房沟组,盆地北部西缘煤田钻孔也揭示该套地层 的发育,其岩性主要以砾岩、泥岩和炭质泥岩为主, 中段夹有可采煤层,粒度自上而下呈粗粒—细粒— 粗粒的变化特征。在区域分布上,主要沿围限于两 条 NNE 向展布的对冲逆断层之间的区域属于燕山 运动早期形成的山间凹陷盆地,内部中侏罗系地层 发育同方向向斜构造,轴面倾向 NW^[25],北部至卧 牛山隆起,向南至三家子南部。

研究区内义县组广泛发育,地层厚度在西部叶 茂台凹陷较大,主体为一套以安山岩—玄武岩等中 基性火山岩层,局部夹有泥岩等碎屑沉积岩。该套 地层在秀水盆地内发育规模相对较小,且北部的厚 度和埋深普遍大于南部,钻井揭示其岩性主要为中 性火山岩夹细粒陆源碎屑岩,并见多期岩脉侵 入[6-7];随着伸展作用加强,盆地进入强烈断陷期, 湖泊水体深,沉降速率大,区域上形成一套以深色细 粒陆源碎屑岩为主的九佛堂组地层。该套地层在北 部张强断陷,西部彰武断陷厚度大,是主要的烃源岩 层^[3,14,16],而研究区叶茂台凹陷中未见该套地层,秀 水盆地内部厚度较小,秀 D1 井仅钻遇约 300 m 厚[4-7]。基于电性结构解译的地质—地球物理模型 可见该套地层在盆地北部的厚度和埋深均大于南 部,地层分布明显受控盆断裂控制,可能指示沉积中 心在盆地北部。沙海组地层主要在盆地北部,盆地 边缘可见露头,是一套夹有煤线沉积的粉砂质泥岩、 砂岩地层,南部则未发育该套地层。

陷,前人围绕该区油气勘探历程总结了"下洼找油 气"的勘探思路,在奈曼等凹陷相继取得了较大的 突破。该勘探思路认为凹陷的洼陷区烃源岩已进入 成熟阶段、储集层物性较好,气候地层剥蚀程度较 低,盖层较发育,油气以短距离运移为主^[28]。秀水 盆地在北部紧邻张强断陷,其沉积填充、构造演化等 与张强断陷具有相似性^[29]。目前,张强凹陷主力烃 源岩主要为九佛堂组和沙海组,油气主要赋存在义 县组顶部中性安山岩类和九佛堂组、沙海组渗透性 水下分流河道砂体。

秀水盆地与张强断陷在地层展布等存在一定的 差异,前者主要发育义县组地层和九佛堂组地层,沙 海组仅在盆地北部发育。岩心有机地球化学研究表 明义县组上部具有一定的生烃潜力且已进入成熟阶 段,九佛堂组以低成熟为特征^[6,8]。基于下洼找油 气的理论,秀水盆地东次凹规模相对较大,且基底埋 深较深,有利于烃源岩热成熟演化,横向上电性结构 连续,反映该区域后期可能未遭受强烈的构造改造, 是盆地内寻找油气的有利区带。盆地北部(L2测 线)与南部(L1测线)相比,沉积中心偏向北侧,义 县组、九佛堂组均有沉积,且发育一定厚度的沙海 组,可形成良好的生储盖组合,若后期的保存条件有 利,将具有良好的勘探前景。

6 结论

 研究区白垩系义县组整体具有较低的电阻 率特征,与下伏的石炭—二叠系、前寒武系等具有明 显的电性结构差异,为区域内应用大地电磁测深开 展盆地构造格架调查提供了基础。

2) 叶茂台凹陷基底主要是前寒武系变质岩,东边界受西倾断裂的控制,该断裂向深部可能聚敛至深部的低角度逆冲断层之上;盆地内部沉积了厚层的火山-沉积岩层,东侧受火山活动影响较大。

3) 秀水盆地呈双断式地堑结构,具有两隆夹一

5.3 油气远景区

秀水盆地属于辽河外围的一个小规模中生代断

凹的构造格局,东次凹规模较大,沉积中心位于盆地 北部;盆地内主要发育义县组、九佛堂组和沙海组地 层,南部缺乏沙海组地层。盆地南部基底是二叠系 地层,北部为石炭系地层。

4) 基于"下洼找油气" 思路, 参考北部张强断陷 的油气富集因素, 提出秀水盆地的东次凹是寻找油 气的有利区带, 且北部的基底埋深大, 发育义县组、 九佛堂组和沙海组等, 可形成良好的生储盖组合, 具 有良好的勘探前景。 [1] 王东坡,许敏,薛林福,等.沉积盆地地球动力学系统的研究——以辽西—辽北—松辽盆地南部为例[J].石油与天然气地质,1999,20(4):273-278.

Wang D P, Xu M, Xue L F, et al. Studies on geodynamic systems of sedimentary basins: taking west liaoning, north liaoning and south songliao basin for example [J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(4):273-278.

[2] 李晓光,高险峰,等.辽河探区油气勘探潜力与前景[J].特种油 气藏,2011,18(5):1-5.

Li X G, Gao X F, et al. Oil and gas exploration potential and prospect in the Liaohe exploration area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2011,18(5):1-5.

- [3] 陈为佳,何登发,等.松南地区构造-地层层序与盆地演化[J]. 地质学报,2014,88(5):932-942.
 Chen W J, He D F, et al. Tectono-stratigraphic sequence and basin evolution in southern Songliao basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5):932-942.
- [4] 丁秋红,陈树旺,李晓海,等.辽宁北部秀水盆地秀 D1 井孢粉 组合及其地层意义[J].地质通报,2017,36(8):1305-1318.
 Ding Q H, Chen S W, Li X H, et al. Spore-Pollen assemblages of Xiu D1 well in Xiushui basin, northern Liaoning Province and their stratigraphic singnificance [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(8):1305-1318.
- [5] 丁秋红,陈树旺,李晓海,等.辽宁北部秀水地区中侏罗系地层的厘定及其地质意义[J]. 地质通报,2016,35(08):1223-1229.

Ding Q H, Chen S W, li X H, et al. The determination of the middle Jurassic strata in Xiushui area, northern Liaoning Province, and its geological significance [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(8):1223-1229.

 [6] 孙鹏,唐友军,张健,等.松辽盆地南部秀水断陷油砂地球化学 特征[J].地质论评,2017,63(S1):131-132.
 Sun P, Tang Y J, Zhang J, et al. Geochemical characteristics of

oil sands in Xiushui depression, Southern Songliao Basin [J].Geological Review, 2017,63 (S1):131-132.

[7] 陈树旺,公繁浩,杨建国,等.松辽盆地外围油气基础地质调查
 工程进展与未来工作方向[J].中国地质调查,2016,3(6):1 9.

Chen S W, Gong F H, Yang J G, et al. Progress and orientation of the project about fundamental geological survey on oil and gas re-

- [10] 张兴洲,乔德武,迟效国,等.东北地区晚古生代构造演化及其石油地质意义[J].地质通报,2011,30(2-3):205-213.
 Zhang X Z, Qiao D W, Chi X G, et al. Late-Paleozoic tectonic e-volution and oil-gas potentiality in northeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3):205-213.
- [11] 刘永江,张兴洲,迟效国,等.大兴安岭地区上古生界变形特征
 及构造层划分[J].吉林大学学报:地球科学版,2011,41(5):
 1304-1313.

Liu Y J, Zhang X Z, Chi X G, et al. Deformation and tectonic layer division of the upper paleozoic in Daxing anling area [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(5): 1304-1313.

[12] 刘杰,杨中柱,陈树良,等.辽北法库地区层状变质岩系锆石
 SHRIMP 年龄及其地质意义[J].地质与资源,2016,25(1):22
 -25.

Liu J, Yang Z Z, Chen S L, et al. Zircon SHRIMP age of the stratified metamorphic rocks in Faku area, Northern Liaoning province: Geological Implication[J]. Geology & Resources, 2016, 25 (1):22-25.

- [13] 葛荣峰,张庆龙,王良书,等.松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J].地质评论,2010,56(2):180-195.
 Ge R F, Zhang Q L, Wang L S, et al. Tectonic evolution of Songliao basin and the prominent tectonic regime transition in Eastern China[J]. Geological Review, 2010, 56(2):180-195.
- [14] 胡望水,吕炳全,张文军,等.松辽盆地构造演化及成盆动力学 探讨[J].地球科学,2005,40(1):16-31.
 Hu W S, Luy B Q, Zhang W J, et al. An approach to tectonic evolution and dynamics of the Songliao Basin[J]. Scientia Geologica Sinica, 2005, 40(1):16-31.
- [15] 郝福江,杜继宇,等.深大断裂对松辽断陷盆地群南部的控制作用[J].世界地质,2010,29(4):553-560.
 Hao F J, Du J Y, et al. Control of deep-large fault to southern Songliao fault basin group[J]. Global Geology, 2010, 29(4):553-560.
- [16] 严丽萍,孙连昌,张庆堂.张强凹陷南部地区构造特征研究[J]. 长江大学学报:自然科学版,2011,8(2):14-16.
 Yan L P, Sun L C, Zhang Q T. Study on structural characteristics of southern Zhangqiang depression[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2011,8(2):14-16.
- [17] 郭友钊,胡平,林天亮,等.利用大地电磁测深曲线首支建立地 层电性模型的方法初研[J].地质与勘探,2005,41(S):171-

- sources in the periphery area of Songliao Basin[J]. Geological Survey of China, 2016,3(6):1-9.
- [8] 姚玉来,李晓海,司江福,等.辽宁北部秀水盆地秀 D1 井烃源 岩评价[J].地质与资源,2018,27(2):186-191.
 Yao Y L, Li X H, Si J F, et al. Evaluation on the source rocks from X-D1 well in Xiushui basin, Northern Liaoning province[J].
 Geology and Resources, 2018, 27(2):186-191.
- [9] 陈发景,汪新文.中国中、新生代含油气盆地成因类型、构造体系及地球动力学模式[J].现代地质,1997,11(4):409-424.
 Chen F J, Wang X W. Genetic types, tectonic systems and geody-namic models of Mesozoic and Cenozoic oil and gas bearing basins in China[J]. Geoscience, 1997,11(4):409-424.

173.

- Guo Y Z, Hu P, Lin T L, et al. A preliminary study on establishment of formation electrical model by using the first segment of MT sounding curve[J]. Geology and Prospecting, 2005, 41(S):171-173.
- [18] 陈小斌,蔡军涛.大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(四)——阻抗张量分解的多测点-多频点统计成像分析
 [J].地球物理学报,2014,57(6):1946-1957.
 - Chen X B, Cai J T. Refined techniques for magnetotelluric data processing and two-dimensional inversion (IV) : Statistical image method based on multi-site, multi-frequency tensor decomposition [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(6):1946-1957.

- [19] Groom R W, Bailey R C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94 (B2): 1913-1925.
- [20] Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: Regional induction and local telluric distortion [J]. Journal of Geophysics, 1989, 62(2):119-127.
- [21] Bibby H M, Caldwell T G, Brown C. Determinable and non-determinable parameters of galvanic distortion in magnetotellurics [J]. Geophysical Journal International, 2005, 163 (3):915-930.
- [22] McNeice G W, Jones A G. Multisite, multifrequency tensor decomposition of magnetotelluric data [J]. Geophysics, 2001, 66 (1):158-172.
- [23] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for
 2-D magnetotelluric inversion [J]. Geophysics, 2001, 66(1):174
 187.
- [24] 叶涛,陈小斌,严良俊.大地电磁资料精细处理和二维反演解释 技术研究(三)——构建二维反演初始模型的印模法[J].地球 物理学报,2013,56(10):3596-3606.

Ye T, Chen X B, Yan L J. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric (III). Agnetotelluricues for data processing and two-dimensional inversmagnetotelluric inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56 (10):3596-3606.

[25] 蔡厚安,徐德斌,李宝芳,等.辽西彰武—黑山区逆冲推覆构造的发现及找煤意义[J].煤田地质与勘探,2010,38(5):1-6.

Cai H A, Xu D B, Li B F, et al. The discovery of thrust nappe structure in Zhangwu-Heishan area, Liaoning province and its significance for coal-searching [J]. Coal Geology & Exploration, 2010,38(5):1-6.

- [26] 杨晓波,高恩忆.法库地区大型韧性剪切带特征及成因机制
 [J].国土资源,1996(2):109-117.
 Yang X B, Gao E Y. Features and genetic mechanism of large scale ductile shear zone in Faku area[J]. Liaoning Geology, 1996 (2):109-117.
- [27] 王万贵,程爱国.辽宁张强盆地聚煤与构造特征[J].中国煤炭 地质,2005,17(1):4-7.
 Wang W G, Cheng A G. Coal accumulation and structural features in Zhangqiang basin, Liaoning[J]. Coal Geology of China, 2005, 17(1):4-7.
- [28] 殷敬红,雷安贵,方炳钟,等. 辽河外围中生代盆地"下洼找油 气"理念[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1):6-10.
 Yin J H, Lei A G, Fang B Z, et al. Concept of "seeking for oil and gas deep down depressions" in Liaohe peripheral Mesozoic basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1):6 -10.
- [29] 张浩. 张强凹陷油藏类型及成藏控制因素分析[J]. 石油天然 气学报, 2007, 29(6):7-12.
 Zhang H. Reservoir types and reservoir formation control factors in Zhangqiang depression [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(6):7-12.

A study of magnetotelluric sounding of Xiushui Basin in the northern periphery of Liaohe

ZHANG Peng-Hui^{1,2}, ZHANG Xiao-Bo^{1,2}, YUAN Yong-Zhen^{1,2},

FANG Hui^{1,2}, LIU Jian-Xun^{1,2}, JIANG Chun-Xiang^{1,2}

(1. National Center for Geological Exploration Technology, Langfang 065000, China; 2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang 065000, China)

Abstract: Xiushui Basin is a small-sized Mesozoic fault depression located in the south of Zhangqiang fault depression where good indications of oil and gas have been drilled in its volcanic reservoirs in recent years. In order to find out the boundary, internal framework and stratigraphic distribution of the Xiushui Basin, the authors conducted magnetotelluric sounding and gravity and magnetic profile measurement along two survey lines and, as a result, obtained the magnetic anomaly curves and the shallow electrical structures of the Xiushui Basin and its peripheral east and west sides. Constrained by drilling, geological and petrophysical data, the electrical structure

characteristics of strata in different ages were determined, and the regional geological-geophysical model was synthetically established. The results show that the overall caprock of Xiushui Basin has low resistivity, which is apparently different from that of underlying basement. The basement of Xiushui Basin consists mainly of Upper Paleozoic strata, and the composition of the basement in the north is different from that in the south. In addition, the basement on east and west sides of the periphery of the basin consists of Precambrian metamorphic rock series. The basin has a structural pattern of two concaves and one uplift, relatively larger in the eastern sub-depression. The understanding obtained by the authors provides reliable geophysical basis for the oil and gas resources evaluation in the Xiushui Basin and Mesozoic basins in the periphery of the Songliao Basin.

Key words: magnetotelluric sounding; Xiushui Basin; basin structure; stratigraphic distribution; oil and gas resources evaluation

(本文编辑:沈效群)