doi: 10.11720/wtyht.2022.1409

虎新军,陈晓晶,仵阳,等.综合地球物理技术在银川盆地东缘地热研究中的应用[J].物探与化探,2022,46(4):845-853. http://doi.org/10. 11720/wtyht. 2022.1409

Hu X J, Chen X J, Wu Y, et al. Application of comprehensive geophysical exploration in geothermal resources on the eastern margin of Yinchuan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4):845-853. http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1409

综合地球物理技术在银川盆地东缘地热研究中的应用

虎新军^{1,2},陈晓晶¹,仵阳¹,安百州¹,倪萍¹

(1. 宁夏回族自治区地球物理地球化学勘查院, 宁夏银川 750001; 2. 中国地质大学(武汉)资源 学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:银川盆地东缘天山海世界地热田的发现,揭示了该区域赋存优质地热资源,其成藏地质条件显著有别于盆地内"传导型"地热,为宁夏黄河流域清洁能源的研究提供了新的方向。本文以区域地质、地球物理特征为基础,针对1:5万重力、可控源大地电磁测深与微动测量资料进行处理与分析。研究结果显示:奥陶系基底隆升地带位于灵武凹陷东侧,沿黄河断裂呈"S"形展布,至天山海世界达隆升最高部位,并与NW向局部隆起区叠合;深部储热层奥陶系为中高阻层特征,中部第一盖层石炭系—二叠系表现为中低阻、弱低速层,浅部第二盖层古近系—新近系与低阻、低速层对应。以上述研究成果为基础,预测了3处地热资源开发利用远景区。

关键词:地热;综合地球物理;基底构造;储盖组合;银川盆地东缘

中图分类号: P631 文献标识码: A 文章编号: 1000-8918(2022)04-0845-09

0 引言

我国地热资源类型多样,分布广泛,不同的地质 条件造就了不同类型资源。根据赋存埋深和温度将 地热资源划分为浅层地热资源、水热型地热资源和 干热岩3个大类,再以地热资源富集赋存的关键地 质要素为依据,按照源(热源和水源)—通(通道及 传输)—储(储集体)—盖(盖层)等地质要素和热的 传输、储集、保存、散失等地质作用的特征,将水热型 地热资源进一步细分为岩浆型、隆起断裂型和沉降 盆地型3亚类^[1-3]。

近年来,银川盆地东缘地热勘探取得了新突破, 以天山海世界地热井田最具代表性,地热类型显著 区别于盆地内部"沉降盆地型"地热,具有"埋藏浅、 温度高、水量大、水质好"等优点,是典型的盆地边 缘"隆起断裂型"^[4],成为了本地区地热研究的热 点。地热研究中的地球物理方法有多种,以地温场 调查、重力勘探、磁法勘探、电法勘探、大地面波测深 和人工地震勘探^[5]为主流手段。早期的研究侧重 于单一方法的应用分析,黄力军及胡宁等^[6-7]认为 花岗片麻岩、火成岩一般都具有较强磁性,通过精度 高的磁法测量可确定火山岩、侵入岩及蚀变带的分 布位置,间接划定地热分布范围;Pamukcu O A 等^[8] 将自由空气重力异常与航磁异常的明显负相关关系 作为了指示区域地下地热远景区的一个重要指标, 李学云等[9]根据重力异常分布,发现河北汤泉地区 地热热源与深部构造的酸性热液活动有关:刘长生 等^[10]将 MT 法运用到辽河凹陷西部,将埋深较大的 低阻电性层确定为潜在热储层,并得到了实际钻孔 数据的验证,汪琪^[11]根据银川平原地区主要的电性 剖面,并结合地质剖面分析研究了该地区的热储类 型;付微等^[12]认为微动勘探方法对深部低速层分辨 率较高,对破碎带低速异常体探测效果良好,能有效 圈定含水破碎带区域,有助于提高地热勘查精度,刘 远^[13]通过对地微动探测和大地电磁测深两种方法

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-10-11

通讯作者: 陈晓晶(1990-),女,工程师,从事应用地球物理勘探、地热地质特征研究工作。Email:825785150@ qq. com

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(2018BFG02012);宁夏深部探测方法研究示范创新团队项目(KJT2019005);宁夏自然科学基金项目(2021AAC03451)

第一作者: 虎新军(1987-),男,工程师,从事地球物理勘探、区域构造体系研究工作。Email:junyan_home@126.com

的研究,探索性地提出利用地微动观测结果对大地 电磁数据进行约束反演的联合使用方法。随着技术 的快速发展,利用多种物探方法相互结合来杳明地 热地质条件成为通用的做法,张宇等[14]在银川平原 地热调查中利用浅层地温、视电阻率、卫星遥感图 像、土壤汞质量分数、地热钻井等方法综合圈定了地 热田范围:高亮等[15]在银川沙湖地区的地热研究中 利用可控源音频大地电磁法结合岩性测深,确定了 地热井位置,曹学刚等^[16]利用 MT 方法辅助以钻孔 资料,探讨了银川平原黄河东岸地热资源的分布特 征及赋存规律:左丽琼等[17]针对地质条件复杂区的 深部地热勘探,采用深孔测温测量、高精度重力剖 面、微动探测、CSAMT 法组成的综合物探方法,准确 查明深部地热的分布特征。可以看出,针对不同地 区地质条件与地热成藏模式的差异化与复杂化,物 探方法的选取也需要具有很强的针对性。所以,在 地热勘查与研究的实际工作中,以地质—地球物理 特征为基础,合理选取一种地球物理方法的优化组 合,不仅是一个重要的技术课题,而且对实际的地热 勘查开发具有很强的指导意义。

本次在前期地质条件分析的基础上,利用1:5 万重力测量、可控源大地电磁测深、微动测量,反演 了基底构造、确定了储盖组合、细化了盖层特征,综 合分析了银川盆地东缘临河地区"传导—对流"混 合型地热的成藏条件,并以此为指导,进行了地热资 源远景区预测,对陶乐—横山堡冲断带的中北段地 热资源勘查开发提供了先导性研究。

1 区域地质地球物理概况

1.1 区域地质概况

研究区位于银川盆地东部,大地构造位置属柴 达木—华北板块 I 级构造单元、华北陆块 I 级构造 单元、鄂尔多斯地块 II 级构造单元、鄂尔多斯西缘中 元古代—早古生代裂陷带 V 级构造单元、陶乐—横 山堡陆缘褶断带 V 级构造单元^[18]。黄河断裂是银 川断陷盆地与陶乐—横山堡陆缘褶断带的分界构 造,为一条超壳断层^[19-23]。区域巨厚新生界覆盖范 围广,前新生代地层出露有限,仅在灵武东山见有白 垩系地层出露(图1)。



1-第四系;2-新近系;3-古近系;4-白垩系;5-侏罗系;6-三叠系;7-二叠系;8-石炭系;9-泥盆系;10-奥陶系;11-寒武系;12-元古 宇;13-英云闪长岩;14-黑云母花岗岩;15-地质界线;16-推测地质界线;17-不整合界线;18-岩相界线;19-重要断层;20-隐伏断层; 21-裸露断层

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Paleogene; 4—Cretaceous; 5—Jurassic; 6—Triassic; 7—Permian; 8—Carboniferous; 9—Devonian; 10—Ordovician; 11— Caimbrian; 12—Proterzoic; 13—Tonalite; 14—Biotite granite; 15—geological boundary; 16—inferred geological boundary; 17—unconformity boundary; 18—lithofacies boundary; 19—important fault; 20—concealed fault; 21—exposed fault

图1 银川盆地地质构造

Fig. 1 Geological structure map of Yinchuan Basin

1.2 研究区重磁场特征

受西侧黄河断裂的控制,重力场呈近 SN 向展 布且具有一定宽度的带状高值异常区,反映了深部 奥陶系基底隆升幅度较大,与西侧的灵武凹陷低重 力异常区形成了明显的区别(图 2)。航磁场呈现出 与重力场截然不同的特征,灵武以北区域为平缓展



2 典型地热田地热异常

据研究区内地热钻孔揭示,天山海世界地热田 为银川盆地东缘典型的地热异常区,其中 DRT-03 钻孔井底(1 690 m)温度为 64.03 ℃,DRT-05 钻孔 井底(1 690 m)温度为 62.87 ℃,地层温度明显高于 布的低磁异常区,灵武以南区域分布两处形态不完整的高磁异常,幅值较低,推测其为银川地堑南部受 青藏高原东北缘 NE 向挤压应力的作用为形成逆掩 隆升条带的反映,在深部的磁性地质体整体抬升的 背景下,局部隆起、聚集所引起的航磁异常(图3)。



rig. 5 Aeromagnetic anomaly map

银川盆地内部 ZN 钻孔的地温梯度(图4)。钻孔揭 露的地层岩性资料显示,纵向上,以 DRT-03 钻孔为 例,地温梯度曲线明显分为3段,代表了3种岩性不 同的地层。浅部(200~600 m)新生界古近系—新近 系(E-N)以砂泥岩互层为主的地层,地温梯度由表 层的1.6℃/100 m 深逐渐增加至浅层的2.42℃/ 100 m;中部(600~1000 m)晚古生界石炭系—二叠





Fig. 4 Comparison of stratum temperrature in Yinchuan Basin and eastern margin area





系(C-P)含煤的地层,地温梯度随着深度增加陡然 升高至 5.04 ℃/100 m,而后快速回落至 3.53 ℃/ 100 m;深部(1 000~1 960 m)晚古生界奥陶系(O) 灰岩夹泥岩隔层的地层地温梯度逐渐趋于平稳,至 (1.95~2.05) ℃/100 m 区间(图 5)。

由此验证本区奥陶系(O)为深部热储层,石炭 系—二叠系(C-P)为中部第一盖层(隔热层),古近 系—新近系(E-N)为浅部第二盖层(保温层)。

3 综合地球物理方法的应用

3.1 重磁异常特征分析

由重磁对应分析的结果可知,天山海世界地热井 DRT-03 很好地落在了重力异常小波二阶细节的局部高重异常上,且位于黄河断裂附近,反映出该区域为奥陶系(0)热储层的隆升区(图 6a)。对于磁异常,已见地热井位于局部高磁异常附近,推测本区

深部磁性基底埋深相对较浅,为区域性深部热源的 有利区(图 6b)。

3.2 奥陶系构造反演

奥陶系是本区地热赋存的重要地层,反演其构 造形态,是研究地热赋存的基础。

研究区各地层间由浅至深存在 2 个密度界面, 分别为新近系—古近系与石炭系—二叠系之间密度 界面及石炭系—二叠系与奥陶系之间密度界面(第 2 密度界面($\Delta\sigma_{2,3}$))。具体地,新生界地层密度整 体偏低,均值为1.91 g/cm³,与下伏的石炭—二叠系 地层形成了密度差为0.68 g/cm³的第1 密度界面 ($\Delta\sigma_{1,2}$),深部奥陶系密度明显增大,均值为2.71 g/ cm³,与上覆的石炭系—二叠系地层形成了密度差为 0.12 g/cm³的第2 密度界面($\Delta\sigma_{2,3}$),上述两个密度 界面直接影响了本区重力异常分布,其中第2 密度 界面对奥陶系基底顶面起伏形态起着决定性作用, 为奥陶系基底顶面构造反演提供了密度物性前提。





Fig. 6 Correspondence analysis of DRT-03 borehole gravity(a) and magnetic anomalies(b)

基于1:5万重力资料,利用平面帕克法密度界 面反演银川断陷盆地南部奥陶系顶面构造。已知 DRT-03、LS01与Ren1这3口钻孔钻遇的奥陶系顶 面深度分别为791、800、788m,与实钻深度相对比, 反演深度偏差小于50m,二者吻合,侧面印证了奥 陶系储热层顶面反演结果的可靠性(表1)。

表1 奥陶	糸顶面深度对比
-------	---------

Table1 Depth comparison of Ordvician top surface

钻孔	DRT-03	LS01	Ren1
实钻深度/m	791	800	788
反演深度/m	812	833	818
偏差/m	21	33	30

由图 7 可知,研究区内奥陶系隆升区域呈明显的长条状分布,南部灵武东部基本呈单一条带 SN向展布,钻孔 LSO1 位于该条带中部西侧斜坡部位,隆升幅度比较高,最高区域埋深为 247 m;延伸至临河镇西南处分为两个 NNE 向隆升带,相较于南部隆起条带,幅度有所下降;到钻孔 DRT-03 西北处,两条隆起条带合二为一,并再次隆升明显,通贵乡东侧达到最高区域,埋深为 485 m。上述奥陶系的隆升条带平面展布严格受黄河主断裂及其次级附属断裂的控制,是寻找天山海世界"传导—对流"混合型地热的潜力区(图 7)。

3.3 储盖层组合划分

储层为地热赋存提供了优良的空间,盖层阻断 了储层中地热的逸散。

基于可控源大地电磁测量剖面 WL-01 剖面 (CSAMT)对储、盖层叠置关系与特征进行了分析。 纵向上分为4个明显的电阻率层,依次为高阻层 (大于100Ω·m)、中高阻层(25~100Ω·m)、中低 阻层(10~25Ω·m)与低阻层(1~10Ω·m)。高阻 层无钻孔钻遇,根据区域地质特征推测为贺兰山岩



Fig. 7 Inversion of Paleozoic basement depth map by Park method density inetrface

群的变质岩系。经与钻孔 DRT-03 对比:中高阻层 与储热层奥陶系相对应,为一套陆表海相沉积的含 泥质灰岩,岩层裂隙发育,裂隙率为 2.70%~20%, 渗透率为 0.01~115.4 μ m²,测井温度数据显示,该 段井温为 38~64 ℃;中低阻层与隔热盖层石炭—二 叠系对应,是泥岩、泥质粉砂岩、砂岩互层夹煤层沉 积;低阻层对应保温盖层古近系—新近系的红色亚 砂土、亚粘土沉积层,泥质成分含量高,此类岩石热 导率较低,均小于 2.3 W/(m・℃),煤系地层热导 率最低为 0.61 W/(m・℃)^[23](图 8)。





Fig. 8 Electrical characteristic diagram of WL-01 section

3.4 盖层特征细化

盖层的分布特征决定了其保温效率的高低,是 地热成藏的关键因素之一。

分析过 DRT-03 井区微动测量剖面,与钻孔分 层数据对比,存在3个明显的S 波速度层,深部(450~800 m)的弱低速层(1600~2400 m/s)为第一盖 层石炭—二叠系,P 波速度相对较高,层内横向波速 稍有变化,推测是同层系岩性差异所致;浅部(180~ 450 m)的低速层(1000~1600 m/s)为第二盖层下 段的古近系,层内速度变化不大,存在明显的局部低 速异常区带,推测是砂岩与泥岩互层的表征;表层 (180 m 以浅)为极低速区(<1 000 m/s),地层平坦, 表明在古近系上段为胶结程度比较低的松软沉积 层。综上,DRT-03 井区第一、第二盖层发育完整, 厚度稳定,横向变化较小,是良好的地热盖层(图 9)。

综上所述,综合运用1:5万重力、可控源大地 电磁测深、微动测量资料,分析银川盆地东缘天山海 地热田"传导—对流"混合型地热的成藏地质条件, 效果良好。



图 9 DRT-03 井区微动反演 S 波速度剖面地质解释



4 地热资源远景区预测

以综合分析的地热成藏地质条件为指导,在 1:5万重力数据处理分析的基础上,圈定本区地热 资源远景区(图 10)。圈定原则有 3 条:一是为奥陶 系顶面隆升区带,二是上覆一定厚度的石炭—二叠 系与新近—古近系地层,三是处于自然保护区红线 范围之外。



Fig. 10 Geothermal prospective prediction area in the southern part of the eastern margin of Yinchuan Basin

整体上,由重力小波2阶逼近场可知(图10a), 奧陶系储层的分布严格受黄河断裂及其次级附属断 裂控制,分为灵武市—黄草坡一线的南部及横山 堡—通贵乡一线的北部。南部地区基本全部位于白 芨滩自然保护区,并且大面积出露白垩系宜君组与 古近系清水营组,缺少优质的保温盖层(图10b),因 此不具备良好的储盖组合;北部地区覆盖有第四系 全新统地层,其下伏的保温盖层(新近系—古近 系)、隔热盖层(二叠系—石炭系)与储热层(奥陶 系)地层完整,邻近黄河断裂,具备导热、导水通道, 是寻找天山海世界"传导—对流"复合型地热的远 景区。

以重力异常反演的奥陶系基底隆起区为底图,叠 合白芨滩自然保护区与前第四系地层出露区,划定了 本区地热远景的预测(图 10c),具体分为3个远景区 (I区、II区与Ⅲ区)。I区呈 NNE 向展布的不规则片状, 面积为68.51 km²,地表被第四系完全覆盖,奥陶系储 热层顶界面埋深最浅处位于钻孔 DRT-03 西北处 4.6 km 附近,埋深约430 m;II区呈 NNE 展布的条带 状分布于临河镇南北,面积为34.6 km²,地表覆盖第 四系,奥陶系储热层埋深最浅处位于临河镇正 N 向 2.9 km 附近,埋深为1120 m; III区呈 SN 向展布的 片状分布于横山堡北部,面积为44.23 km²,地表覆 盖第四系,奥陶系储热层埋深最浅约为860 m,与 I 区、II 区相比较, III 区远离黄河断裂,是否有良好的 导热通道为该远景区提供深部热源需要进一步研究,建议布设 MT 电法剖面,分析低阻带、低速带,分析该区导热导水通道,明确热储模式,并布设地热钻孔验证物探方法的有效性。

5 结论

1)针对银川盆地东缘天山海世界"传导—对 流"混合型地热资源的研究,1:5万重力、可控源大 地电磁测深及微动测量剖面资料是有效的资料基 础,DRT-03井的成功钻遇验证了物探资料应用效 果。

2)研究区地层纵向存在 2 个差异明显的密度 界面,深部奥陶系与中深部的石炭—二叠系形成了 密度差为 0.12 g/cm³ 的第 2 密度界面(Δσ_{2,3}),为 奥陶系基底顶面构造反演提供了密度物性前提。利 用平面帕克法反演的奥陶系储热层顶面深度与 DRT-03、LS01 与 Ren1 这 3 口钻孔钻遇深度相吻 合。反演结果显示出奥陶系隆升区域呈明显的长条 状分布,平面展布严格受黄河主断裂及其次级附属 断裂的控制。

3)本区域电性与波速的差异性为储盖组合划 分提供了依据。结合 WL-01 剖面可控源大地电磁 测深和微动测量的结果与地热钻孔 DRT-03 相对 比,可知深部奥陶系储热层呈现中高阻层(25~ 100 Ω · m)的特征,中部石炭—二叠系作为隔热盖 层表现出中低阻层(10~25 Ω · m)、弱低速层 (1 600~2 400 m/s)的响应,浅部的低阻层(1~10 Ω ·m)、低速层(1 000~1 600 m/s)则是保温盖层古 近系—新近系的反映。

4)在银川盆地东缘地热储盖层组合的地球物 理模型总结的基础上,预测了3处"传导—对流"混 合型地热资源的远景区,为该区地热资源规模性开 发利用提供了科学依据。

参考文献(References):

 [1] 王钧,黄尚瑶,黄歌山,等. 华北中新生代沉积盆地的地温分布 及地热资源[J]. 地质学报,1983,57(3):94-106.
 Wang J, Huang S Y, Huang G S, et al. Geotemperature distribution and geothermal resources in the Meso-cenozoic basins of North Chi-

na[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(3):94-106. [2] 蔺文静,刘志明,王婉丽,等.中国地热资源及其潜力评估[J].

中国地质,2013,40(1):318-327. Lin W J,Liu Z M,Wang W L,et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology in China,2013,40(1): 318-327.

- [3] 王转转,欧成华,王红印,等.国内地热资源类型特征及其开发利用进展[J].水利水电技术,2019,50(6):187-195.
 Wang Z Z, Ou C H, Wang H Y, et al. The characteristics and development of geothermal resources in China[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2019,50(6):187-195.
- [4] 陈晓晶,虎新军,李宁生,等.银川盆地东缘地热成藏模式探讨
 [J].物探与化探,2021,45(3):583-589.
 Chen X J,Hu X J,Li N S, et al. A discussion on geothermal accumulation model on the eastern margin of Yinchuan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2021,45(3):583-589.
- [5] 刘天佑. 地球物理勘探概论[M]. 北京:地质出版社,2007.
 Liu T Y. Introduction to geophysical prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House,2007.
- [6] 黄力军.物探方法在地热调查中的应用效果.[J]物探与化探, 1988,12(2):129-133.

Huang L J. The application result of geophysical method in geothermal survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1988, 12(2):129-133.

- [7] 胡宁,张良红,高海发.综合物探方法在嘉兴地热勘查中的应用[J].物探与化探,2011,35(3):319-324.
 Hu N,Zhang L H,Gao H F. The application of integrated geophysical exploration to geothermal exploration in Jiaxing City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2011,35(3):319-324.
- [8] Pamukcu O A, Akcig Z, Demirbas S, et al. Investigation of crustal thickness in Eastern Anatolia 279 using gravity, magnetic and topographic data[J]. Pure Apply. Geophysics, 2007, 164(11):2345 -2358.
- [9] 李学云,刘百红,陈浩辉,等. 遵化市汤泉地热资源综合评价
 [J]. 工程地球物理学报,2014,11(6):894-900.
 Li X Y, Liu B H, Chen H H, et al. Comprehensive evaluation of

Tangquan geothermal resources in Zunhua City[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(6): 894–900.

- [10] 刘长生. 陈家凹陷 MT 法地热勘探实践[J]. 特种油气藏,2008, 15(S);328-329.
 Liu C S. Practice of MT Geothermal Exploration in Chenjia Depression[J]. Special Oil & Gas Reservoirs,2008,15(S);328-329.
- [11] 汪琪. 宁夏地热范围圈定与资源量评价[D]. 北京:中国地质 大学(北京),2015.

Wang Q. Delineation of Ningxia's geothermal area and evalution of resources[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2015.

- [12] 付微,徐佩芬,凌苏群,等. 微动勘探方法在地热勘查中的应用
 [J].上海国土资源,2012,33(3):71-75.
 Fu W,Xu P F,Ling S Q, et al. Application of the microtremor survey method to geothermal exploration[J]. Shanghai Land & Resources,2012,33(3):71-75.
- [13] 刘远. 地微动探测与大地电磁测深联合使用的研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2008.
 Liu Y. Study of microtremor and magnetotelluric associated survey
 [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing),2008.
- [14] 张宇,刘峥.综合方法圈定银川盆地地热田范围[J].宁夏工程 技术.2009,8(3):247-249.
 Zhang Y,Liu Z. Application of an integrated approach to determine the scope of Yinchuan Basin geothermal field[J]. Ningxia Engineering Technology,2009,8(3):247-249.
- [15] 高亮,陈海波,李向宝,等.综合电磁法在银川盆地地热资源勘查中的应用[J].山东理工大学学报:自然科学版,2013,27
 (3):62-66.

Gao L, Chen H B, Li X B, et al. Application of comprehensive electromagnetic method in geothermal exploration of Yinchuan Basin [J]. Journal of Shandong University of Technology:Natural Science Edition, 2013, 27(3):62-66.

- [16] 曹学刚,程国强,李龙亮. MT 法在银川平原黄河东岸地热资源 调查评价中的应用[J]. 西部探矿工程,2021(1):141-144. Cao X G, Cheng G Q, Li L L. Application of MT in the investigation and evaluation of geothermal resources on the east bank of the Yellow River in Yinchuan Plain[J]. West-China Exploration Engineering,2021(1):141-144.
- [17] 左丽琼,王彩会,荆慧,等.综合物探方法在南通小洋口地区地 热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报,2016,13(1):122-129.

Zuo L Q, Wang C H, Jin H, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to geothermal prospecting in Xiaoyangkou of Nantong City in Jiangsu [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1):122-129.

 [18] 徐占海,李捍国,宋新华,等.中国区域地质志・宁夏志[M]. 北京:地质出版社,2017.
 Xu Z H, Li H G, Song X H, et al. Regional geology of China,

Ningxia[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

 [19] 方盛明,赵成彬,柴炽章,等.银川断陷盆地地壳结构与构造的 地震学证据[J].地球物理学报,2009,52(7):1768-1775.
 Fang S M, Zhao C B, Chai C Z, et al. Seismological evidence of crustal structure and tectonics in Yinchuan Rift Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7):1768-1775.

- [20] 酆少英,高瑞,龙长兴,等.银川地堑地壳挤压应力场:深地震反射剖面[J].地球物理学报,2011,54(3):692-697.
 Feng S Y, Gao R, Long C X, et al. Crustal compression stress field in Yinchuan Graben:Deep seismic reflection profile[J]. Chinese Journal of Geophysics,2011, 54(3):692-697.
- [21] 侯旭波,崔红庄,郇玉龙.银川盆地不同构造层构造样式及形成演化分析[J].东北石油大学学报,2012,36(6):28-33.
 Hou X B, Cui H Z, Huan Y L. Analysis of structural style and tectonic evolution in Yinchuan basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University,2012,36(6):28-33.
- [22] 刘保金,酆少英,姬计法,等. 贺兰山和银川盆地的岩石圈结构和断裂特征——深地震反射剖面结果[J]. 中国科学:地球科学,2017,47(22):179-190.
 Liu B J, Feng S Y, Ji J F, et al. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan basin: Results of deep seismic reflection profiling[J]. Science China: Earth Sciences,2017,47(2):179-190.
- [23] 徐世光,郭远生. 地热学基础[M]. 北京:科学出版社,2009.
 Xu S G, Guo Y S. Fundamentals of Geothermal[M]. Beijing: Science Press,2009.

Application of comprehensive geophysical exploration in geothermal resources on the eastern margin of Yinchuan Basin

HU Xin-Jun^{1,2}, CHEN Xiao-Jing¹, WU Yang¹, AN Bai-Zhou¹, NI Ping¹

(1. Geophysical and Geochemical Exploration Institute of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China; 2. School of Earth Resources China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: A geothermal field has been discovered in the Tianshan Sea World on the eastern margin of the Yinchuan Basin, revealing that the region has high-quality geothermal resources. The geological conditions for the formation of the geothermal field are significantly different from those of the conduction-type geothermal resources within basins, providing a new direction for the study of clean energy in the Yellow River Basin in Ningxia. This study processes and analyzes the data of 1 : 50,000-scaled gravity surveys, controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT), and microtremor survey based on regional geological and geophysical characteristics. The results of the study are as follows. The uplifting zone of the Ordovician basement lies on the east side of the Lingwu Sag and spreads in an "S" shape along the Yellow River Fault. This zone reaches its highest part in the Tianshan Sea World, where it merges with the NW-trending local uplift. The Ordovician of the deep reservoirs in the geothermal field is characterized by medium-high resistance. The Carboniferous-Permian of the first cap rock at a moderate depth shows medium-low resistance and low seismic velocity. Using these results, three prospective areas for developing and utilization of geothermal resources have been predicted.

Key words: geothermal resources; comprehensive geophysical exploration; basement structure; reservoir-cap rock assemblage; eastern margin of Yinchuan Basin

(本文编辑:王萌)