



三维可视化技术在沈北盆地地热资源开发中的应用

李祎昕¹, 蒋丽丽¹, 王超², 王营³, 李伯男⁴, 张媛¹,
赵晓恕¹, 张言琰¹, 刘茂川¹, 张勇¹

1. 辽宁省物测勘察院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 辽宁省地矿集团生态修复有限责任公司, 辽宁 沈阳 110033; 3. 辽宁省自然资源厅, 辽宁 沈阳 110033; 4. 辽宁省自然资源事务服务中心, 辽宁 沈阳 110032

摘 要: 利用沈阳北部地热田以往钻孔、重力、可控源大地电磁测深测量结果, 建立沈北地热田热储概念模型和综合地球物理三维可视化模型, 使用布格重力异常模拟沈北盆地形态提取更多有用信息, 总结以往失败钻孔的原因, 圈定了新的找矿远景区, 提高了探测结果的可应用性, 提升地热找矿效果。

关键词: 地热; 综合地球物理; 三维可视化; 布格重力异常; 沈北盆地

APPLICATION OF 3D VISUALIZATION TECHNOLOGY IN GEOTHERMAL RESOURCES DEVELOPMENT IN SHENBEI BASIN

LI Yi-xin¹, JIANG Li-li¹, WANG Chao², WANG Ying³, LI Bo-nan⁴, ZHANG Yuan¹,
ZHAO Xiao-shu¹, ZHANG Yan-long¹, LIU Mao-chuan¹, ZHANG Yong¹

1. Liaoning Geophysical Measuring Exploration Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 2. Ecological Restoration Co., Ltd., Liaoning Geology and Mineral Resources Group, Shenyang 110033, China; 3. Liaoning Bureau of Natural Resources, Shenyang 110033, China; 4. Natural Resources Service Center of Liaoning Province, Shenyang 110032, China

Abstract: Based on the previous results of borehole, gravity and controlled-source magnetotelluric (MT) sounding of geothermal fields in northern Shenyang City, the paper establishes the heat reservoir conceptual model of Shenbei geothermal field and comprehensive geophysical 3D visualization model, and simulates the morphology of Shenbei Basin to extract more useful information through Bouguer gravity anomaly. By summarizing the reasons for failed drilling in the past, a new prospecting potential area is delineated, which improves the applicability of exploring results and geothermal prospecting effect.

Key words: geotherm; integrated geophysical method; 3D visualization; Bouguer gravity anomaly; Shenbei Basin

0 引言

综合地球物理方法是地热勘探的有效手段^[1-20]。沈北盆地地热为辽宁省典型的盆地传导型地热^[21], 具

有水质优、位置佳、储量大等特点, 是应用综合地球物理方法深部地热找矿的典型成功案例^[1]。多年来积累的地质、地球物理、钻孔资料齐全, 既有成功的案例, 也

收稿日期: 2020-11-26; 修回日期: 2020-12-30. 编辑: 张哲.

基金项目: 辽宁省自然资源科技创新项目“综合地球物理深部探测技术方法研究”(编号 2019-26).

作者简介: 李祎昕(1988—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理、遥感研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号羽丰大厦, E-mail// 875298227@qq.com

有失败的案例. 盆地传导型地热地热蕴藏深度较深, 导致了从前期的调查到勘探和开发都有很大的盲目性和风险性, 难度比较大. 一口 2000 m 左右的地热井, 钻探成本达 500~600 万元, 成井失败会造成巨大的经济浪费和工期延误. 本研究充分收集以往钻孔资料和地球物理资料, 建立沈北盆地三维可视化模型, 使用布格重力异常模拟盆地形态, 试图找到以往失败地热井水温、水量不佳的原因, 为本区地热有效开发利用提供一种新思路.

1 研究区地热地质特征

1.1 地质简况

沈北盆地由新城子盆地、道义盆地和蒲河盆地 3 个盆地组成, 位于辽宁中部鼻状幔隆区的抚顺-长兴幔凸之上, 属于古近纪大陆裂谷型盆地. 其基底为中元古代长城-蓟县期海相沉积岩, 地表全部为第四系覆盖. 受郯庐断裂系控制, 北东向断裂发育, 使其基岩相对破碎, 利于地下水的储存、富集.

1.2 热储概念模型

沈北地热田热储概念模型由盖层、热储层、热源和地下热水源组成.

1.2.1 盖层

沈北地区热储盖层主要由第四系、新近系、古近系沉积层构成. 第四系厚度 10~110 m, 岩性一般为亚黏土、亚砂土、砂、砂砾石及卵石, 未成岩, 结构疏松; 古近系底板埋深 900~1800 m, 局部可能超过 2000 m, 岩性以泥岩、粉质泥岩、砂质泥岩、砂岩及砂砾岩组成, 其中以泥岩最为发育. 据钻探资料统计, 泥岩加权厚度占新近系和古近系总厚度的 67%, 基本成岩或半成岩, 泥质、钙质或硅质胶结. 这些地层厚度大, 导热性差, 起到了很好的隔热保温作用, 是本区地热田的较好热储保温层.

1.2.2 热储层

本区热储层主要由中元古界组成, 热储层岩性为蓟县系铁岭组(Jxt)、洪水庄组(Jxh)和雾迷山组(Jxw)的白云岩或燧石条带白云质大理岩, 埋深在 900~1800 m, 局部超过 2000 m. 这类岩石以碳酸盐岩为主, 裂隙、溶隙普遍发育, 总厚度大于 1000 m. 岩石密度 2.5~2.8 g/cm³, 裂隙率 3%~7%, 热导率一般为 1.68~3.36 W/m·K, 构成了本区地热田的主要基岩裂隙、岩

溶类型热储层, 其水温基本上大于 45 ℃, 出水量可达 1000 m³/d 以上.

1.2.3 热源

研究区处于金州-营口-沈阳变异带上, 辽河断陷盆地的北端. 该变异带位于中部鼻状幔隆区的东侧, 呈北北东向展布. 受西伯利亚板块向华北板块俯冲影响, 岩石圈结构调整. 新生代由于地幔沿北北东向局部强烈上隆, 岩石圈显著伸展减薄^[7-9], 对应产生北北东向断裂体系. 由于地幔上拱, 拉张作用使本区地壳厚度变薄, 沈北盆地的地壳厚度小于 34 km. 地幔隆起导致熔融软流圈抬高, 地壳拉张形成的深部开原-营口断裂可能断至莫氏面, 即切割了上地幔凸起, 沟通了上地幔的岩浆热源, 地幔热流沿深部断裂上涌, 为地壳深部热流等热载体上升提供了良好的通道, 构成地热异常的热源.

1.2.4 热储范围

沈北盆地的地下热水主要赋存在中元古代蓟县系的断裂破碎带中. 新城子盆地和道义盆地规模较大, 而蒲河盆地的规模较小、较浅(图 1). 根据以往的钻探

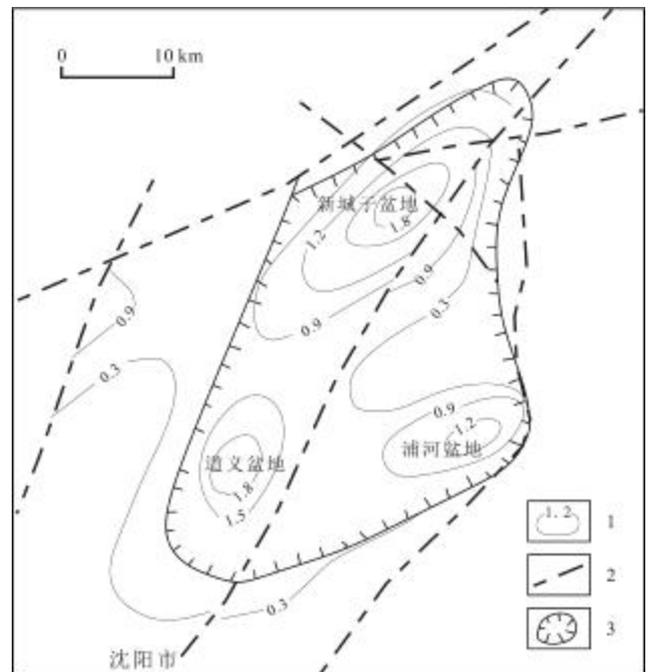


图 1 沈北盆地古近系基底等深线图

Fig. 1 Bathymetric map for Paleogene basement of Shenbei Basin
1—古近系底面等深线/km (isobath of Paleogene bottom); 2—重磁推断断裂 (gravity-magnetic inferred fault); 3—重磁推断盆地 (gravity-magnetic inferred basin)

成果,在1000 m以下的蓟县系中可以找到地下热水资源,因此按-1000 m标高圈定了热储的范围,沈北地热田总面积约190 km²。

1.2.5 热储概念模型

本区地热田热储概念模型是:地壳深部供热→深大断裂导热→低热导率岩层聚热隔热保温→侧向地下水径流深循环补给(图2)。区域性的深大断裂除自身会产生一定的摩擦热外,更主要的是沟通深部的热源,呈北北东向展布的开原-营口构造变异带产生的深大断裂可能断至上地幔,将熔融岩浆带至地壳,起导热能的作用;而区内的一些次级断裂则起导水作用。

2 综合地球物理数据整理

寻找盆地传导型地热的常见综合地球物理方法有地温测量、重力、磁法、可控源、音频大地电磁、电测深、

地震、放射性等。

本区应用重、磁面积性测量成果推测地质构造位置、性质和基本特征,确定主控地质构造,并依据重力异常圈定盆地总体轮廓,利用局部变化特征划分次级凹陷和凸起,确定次级凸起部位及其边缘断裂带为寻找地热资源的有利部位。利用可控源音频大地电磁法(CSAMT)剖面测量成果,根据断裂垂向地电断面视电阻率变化特征,推断断裂性质和深部的岩石破碎程度以及含水情况。根据二维地震测量,进一步确定断裂性质,推断出最佳含水部位,最终确定地热井井位。各种地球物理方法的作用和局限性见表1。

3 三维可视化技术的应用

本研究将布格重力异常进行矢量化处理,低异常区对应基底凹陷,高异常区对应基底隆起,因此布格重

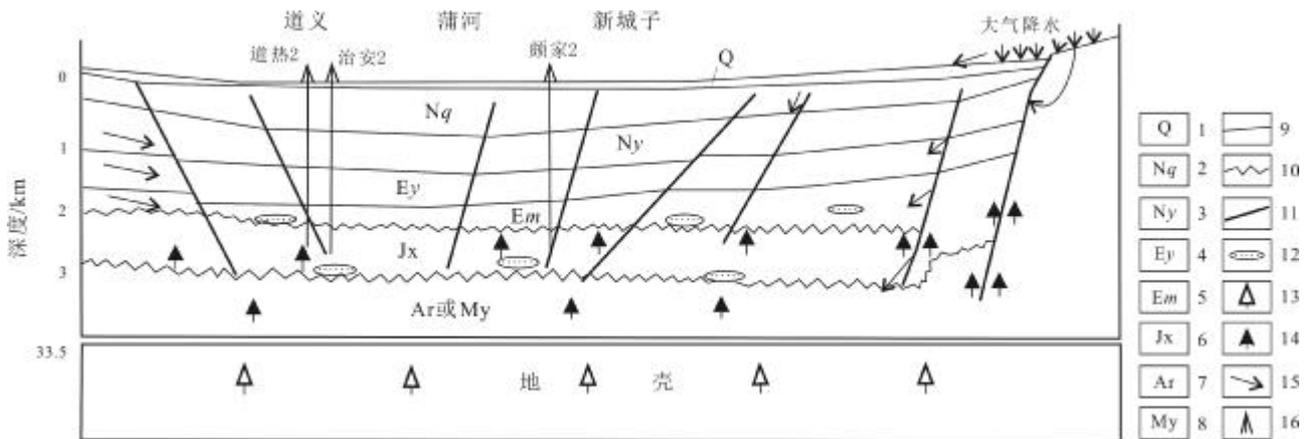


图2 沈北地热田热储概念模型

Fig. 2 Heat reservoir conceptual model of Shenbei geothermal field

1—第四系(Quaternary); 2—新近系邱家屯组(Neogene Qiujiatun fm.); 3—新近系洋河组(Neogene Yanghe fm.); 4—古近系杨屯组(Paleogene Yangtun fm.); 5—古近系木梳屯组(Paleogene Mushutun fm.); 6—蓟县系(Jixianian); 7—太古宇鞍山群(Archean Anshan gr.); 8—太古宇混合花岗岩(Archean migmatitic granite); 9—地层界线(stratigraphic boundary); 10—岩层角度不整合接触带(angular unconformable contact zone); 11—断裂(fault); 12—古封存水(paleo-connate water); 13—热源(heat source); 14—主热流运动方向(direction of active heat flow); 15—地下水侧向径流(lateral groundwater flow); 16—钻孔(borehole)

表1 地热勘探的地球物理方法及数据用途

Table 1 Geophysical methods and uses of geothermal prospecting

勘探方法	用途	局限性
重力	确定盆地的地质构造构架,圈定盆地总体轮廓,划分次级凹陷和凸起	无法明确判断断层的大小、性质和准确位置
磁法	划分地层、岩体,识别断裂,具有简单、快速、准确的优势	深大断裂的位置和深度确定不够准确
可控源音频大地电磁法	圈定地热异常范围和热储体的空间分布;确定地热田的基底起伏及隐伏断裂的空间展布;确定地热蚀变带;圈定地下水的赋存位置	无法准确确定构造位置,无法判明层位的准确深度
二维地震	确定古近系和新近系厚度及基底界面深度,盆地基底的起伏形态及太古宙结晶基底顶界面埋深,隐伏断裂的空间展布	无法准确识别地层的赋水性及断层的导水、富水性

力异常值由低到高对应地下深度由深到浅. 将已知钻孔资料进行矢量化处理, 叠加到重力三维模型中. 本文采用公式为:盆地底界面=布格异常×200-4400.

与其他地质资料相比, 重力可以更好地反映沈北盆地基底起伏情况. 根据区内 7 口地热井情况统计(见表 2.3), 地热勘探效果比较好的几口井(新南井、颇家 2、治安 2)都分布在盆地边缘断裂构造部位, 在三维模型图中同一重力值范围内(见图 3), 代表重力推断的某一深度的地层, 水温 and 水量不理想的几口井都不在该范围内. 新参 1 井是盆地内局部凸起, 水温较高而水量欠佳, 其余井的水温和水量都不理想, 是因为盆地中部盖层较厚而未打到含水层位. 三维可视化重力资料直观地模拟了盆地基底起伏情况, 重力勘探是寻找盆地传导型地热的有效手段.

4 地热资源开发方向与展望

根据资料汇总分析可以看出, 越向盆地内热储深度越大, 水温越高; 越向盆地边缘, 钻遇热储深度越浅, 温度越低. 但靠近盆地内, 容易发生盖层太厚、井太深而打不到目标层位的问题; 太靠近盆地边缘, 容易产生水温不够的问题. 因此, 最佳的钻孔位置应该分布在盆地边缘某一深度范围内. 结合以往成功和失败的地

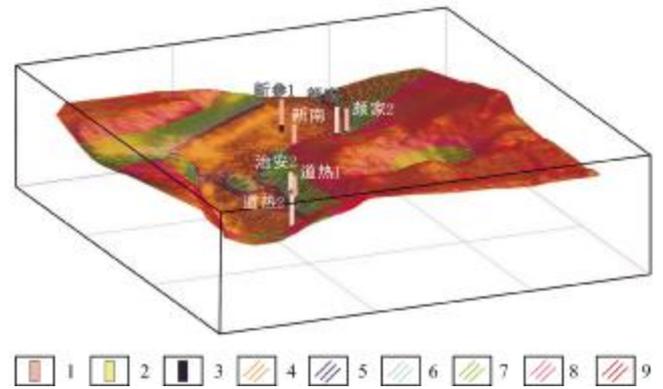


图 3 布格重力异常三维可视化模型

Fig. 3 3D visual model of Bouguer gravity anomaly

1—新近系(Neogene); 2—第四系(Quaternary); 3—蓟县系(Jixianian); 4— 10~12 mgal; 5— 12.5~13 mgal; 6— 13.5~14.5 mgal; 7— 15~17 mgal; 8— 17.5~21.5 mgal; 9— 22~23 mgal

热井分布情况和本区布格重力异常三维可视化模型, 于新城子和道义东部盆地边缘圈定了沈北地热田远景区(如图 3). 实际地热井的布设还应结合以下要素: 1)依照前人的经验, 断陷盆地的边缘和凹陷中的相对凸起区地下热水较好; 2)有一定厚度的地热盖层(即保温层); 3)有良好的热源通道(即断裂); 4)地下有一定的储水空间(即储水构造破碎带).

表 2 已建地热井一览表

Table 2 List of drilled geothermal wells

子盆地	编号	井深/m	水量/ (m ³ /d)	综合		盖层		热储层			
				井底温度/°C	增温率/(°C/100 m)	厚度/m	底板温度/°C	增温率/(°C/100 m)	厚度/m	温差/°C	增温率/(°C/100 m)
新城子盆地	新南井	2509	1200	88	2.95	1000	53	2.65	35	35	3.15
	颇家 2	2891	1277	87.5	3.95	1425	50	2.55		37.5	
道义盆地	道热 1	2117	1180	67.3	2.77	1370	48	2.84	732	19.3	2.64
	治安 2	2569	1400	89.6	3.1	1893	69.2		113.8	20.4	

表 3 失败地热井一览表

Table 3 List of failed geothermal wells

子盆地	编号	井深/m	井底温度/°C	水量/(m ³ /d)	失败原因
新城子盆地	颇家 1	2810	34.5		至-2810 m 终孔, 仍为蓟县系雾迷山组白云岩层位; 测井曲线虽解释出多处含水层, 但其泥质含量较高, 有效孔隙率低, 渗透率差, 因此水量低
道义盆地	新参 1 井	1700	68	360	水量不理想
	道热 2	2504			实钻超过设计井深仍然没有打穿古近系地层(已见到木梳屯组玄武岩层位), 与预计地层出现太大偏差, 现该孔暂停

5 结论

通过系统收集研究沈北地热田以往地球物理、地质、钻孔资料,分析以往打钻失败的原因,使用布格重力异常模拟了沈北盆地的三维空间形态. 经过与其他资料对比,模拟出的盆地形态可信程度更高. 建立了沈北盆地热储概念模型. 研究发现在沈北盆地中有些未成功的地热井,其原因是对盆地三维形态了解的不够,井位布设在盆地中心盖层较厚的位置,且不在有利的断裂构造位置,从而导致成井不成功. 根据本次研究进一步划分找矿远景区,为科学合理部署地热勘查工作提供了依据.

参考文献(References):

- [1] 蒋丽丽, 李伟昕. 综合物探方法勘查在沈阳新城子盆地地热勘查中的应用效果[J]. 地质与资源, 2016, 25(6): 575-579.
Jiang L L, Li Y X. Application of the integrated geophysical methods in the geothermal exploration in Xinchengzi basin, Liaoning province [J]. Geology and Resources, 2016, 25(6): 575-579.
- [2] 曲鹏志. 综合物探方法在安图县海沟地热勘查中的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
Qu P Z. Research on the application of integrated geophysical methods in the Antu Haigou geothermal exploration [D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [3] 金永念, 张登明, 刘志平. 综合地球物理勘查技术在地热勘查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 92-94, 106.
Jin Y N, Zhang D M, Liu Z P. The application of integral geophysical survey technology in geothermal exploration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(1): 92-94, 106.
- [4] 姜梓萌. 长白山地区地热资源综合地球物理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
Jiang Z M. The study of integrated geophysics for geothermal resources exploration in Changbai Mountain [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [5] 宋洪伟, 夏凡, 尚铭森. MT法在河北献县地区地热勘查中的应用[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 284-287.
Song H W, Xia F, Shang M S. Application of MT method in geothermal prospecting in Xianxian area, Hebei province [J]. Geology and Resources, 2018, 27(3): 284-287.
- [6] 付光明, 黄进调, 刘阳, 等. 高密度电阻率法与CSAMT法在江西会昌县坝背地热勘查中的综合探测[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 927-936.
Fu G M, Huang J D, Liu Y, et al. Multi-electrode resistivity method and CSAMT method in geothermal exploration of Babei area in Huichang County, Jiangxi Province [J]. Geology in China, 2019, 46(4): 927-936.
- [7] 汪道京, 张占文, 肖乾华. 辽河盆地是两期构造应力作用的产物: 来自构造物理模拟实验的新认识[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(2): 143-150.
Wang D J, Zhang Z W, Xiao Q H. Two phase of structural stress impacts on Liaohe basin: new evidences from tectonophysical modeling experiments [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(2): 143-150.
- [8] 张洪梅. 辽宁大民屯凹陷地热资源形成条件分析[J]. 地质与资源, 2013, 22(1): 25-29.
Zhang H M. Analysis on the forming conditions of geothermal resources in Damintun sag, Liaoning province [J]. Geology and Resources, 2013, 22(1): 25-29.
- [9] 倪金, 冯丽杰, 闫宝强, 等. 辽宁省中新生代盆地地下热水富集规律研究[J]. 地质与资源, 2006, 15(1): 57-61, 19.
Ni J, Feng L J, Yan B Q, et al. Study on the enriching regularity of geothermal water in the Meso-Cenozoic basins in Liaoning province [J]. Geology and Resources, 2006, 15(1): 57-61, 19.
- [10] 郑伟军, 彭鹏, 吴鹏, 等. 浙江新昌盆地北缘地热资源成矿模式与三维可视化预测[J]. 物探化探计算技术, 2017, 39(4): 484-489.
Zheng W J, Peng P, Wu P, et al. Geothermal resource mineralization model and 3d visualization prediction at the northern margin of Xinchang basin, Zhejiang province [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 39(4): 484-489.
- [11] 隋少强, 汪新伟, 周总璞, 等. 天津岩溶地热田热储特征研究[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 590-594, 569.
Sui S Q, Wang X W, Zhou Z Y, et al. Study on the thermal reservoir characteristics of karst geothermal fields in Tianjin city [J]. Geology and Resources, 2019, 28(6): 590-594, 569.
- [12] 郭昂青. 松辽盆地北部热储体系特征及开发利用[J]. 地质与资源, 2016, 25(4): 380-385.
Guo A Q. Characteristics and development of the thermal storage system in the north of Songliao basin [J]. Geology and Resources, 2016, 25(4): 380-385.
- [13] 谢青, 曾忠诚, 张若愚, 等. 渭河盆地新生界水气资源储层特征及存在问题分析[J]. 地质与资源, 2018, 27(6): 566-572.
Xie Q, Zeng Z C, Zhang R Y, et al. Analysis on the reservoir characteristics of Cenozoic water-gas resources in Weihe basin and problems in research [J]. Geology and Resources, 2018, 27(6): 566-572.
- [14] 王芳. 重磁勘探方法新技术[J]. 地质与资源, 2004, 13(3): 184-186.
Wang F. New technologies of gravimetric and magnetic survey [J]. Geology and Resources, 2004, 13(3): 184-186.

(下转第 75 页/Continued on Page 75)

- Qu H, Wang B Y, Wang J M, et al. Application of soil geochemical survey in the exploration of Yongxin gold deposit and its prospecting effect[J]. Gold Science and Technology, 2018, 26(2): 143-152.
- [18]兰双双, 吕杜, 曾攀, 等. 西藏浪卡子县穷子地区土壤地球化学特征及找矿预测[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(2): 286-293.
- Lan S S, Lyu D, Zeng P, et al. Geochemical characteristics of soil and prospecting prediction of the Qiongzi region, Tibet[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(2): 286-293.
- [19]刘方, 张晓帆, 陈川, 等. 综合物探方法在新疆某铜矿区中的应用探讨[J]. 新疆地质, 2013, 31(1): 113-116.
- Liu F, Zhang X, Chen C, et al. Application of integrated geophysical prospecting method to the evaluation of a Xinjiang copper deposit[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(1): 113-116.
- [20]李星, 王峰, 罗大锋, 等. 综合物探方法在云南江城隐伏铅锌矿勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(6): 1119-1123.
- Li X, Wang F, Luo D F, et al. The effects of applying integrated geophysical method to the prospecting for the Jiangcheng concealed lead and zinc deposit in Yunnan Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2015, 39(6): 1119-1123.
- [21]周立国. 物探方法在青海哈得尔甘南地区寻找砂卡岩型铁多金属矿中的应用效果[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(5): 2176-2181.
- Zhou L G. Effect of application of geophysical prospecting method for Skarn iron Polymetallic Deposit in the Hadeergannan area in Qinghai [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(5): 2176-2181.
- [22]何鹏, 张跃龙, 苏航, 等. 综合找矿方法在内蒙古昌图锡力锰银铅锌矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探, 2018, 54(3): 501-511.
- He P, Zhang Y L, Su H, et al. Application of the integrated ore-prospecting method in the Changtuxili Mn-Ag-Pb-Zn deposit, Inner Mongolia[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(3): 501-511.
- [23]张绍栋, 吕志斌, 雷延祥, 等. 高频大地电磁测深与激电中梯在金矿勘查中的应用研究[J]. 矿产勘查, 2020, 11(4): 746-750.
- Zhang S D, Lü Z B, Lei Y X, et al. Application of high frequency magnetotelluric sounding and IP intermediate gradient method in Gold Deposit exploration[J]. Mineral Exploration, 2020, 11(4): 746-750.
- [24]王文财. 激电中梯测量在辽宁矿洞沟铅锌矿床勘查中的应用[J]. 中国钼业, 2020, 44(4): 35-37.
- Wang W C. Application of polarization intermediate gradient survey in Kuangdonggou lead-zinc deposit in Liaoning Province [J]. China Molybdenum Industry, 2020, 44(4): 35-37.

(上接第 80 页/Continued from Page 80)

- [15]吴春发. 盆地地热场模拟在地热资源勘探中的应用[J]. 地质与资源, 2004, 13(1): 56-58.
- Wu C F. The technology of basin geothermal field modelling used in geothermal resources exploitation[J]. Geology and Resources, 2004, 13(1): 56-58.
- [16]王晓光, 王恩德, 都基众, 等. 东北地区水文地质环境地质调查未来工作方向探讨[J]. 地质与资源, 2004, 13(1): 17-21.
- Wang X G, Wang E D, Du J Z, et al. Discussion on the strategy of hydrological and environmental geologic survey in northeast China[J]. Geology and Resources, 2004, 13(1): 17-21.
- [17]张薇, 王贵玲, 刘峰, 等. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 255-268.
- Zhang W, Wang G L, Liu F, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255-268.
- [18]洪增林, 张银龙, 周阳. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 2019, 46(5): 1224-1235.
- Hong Z L, Zhang Y L, Zhou Y. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong Basin [J]. Geology in China, 2019, 46(5): 1224-1235.
- [19]张连增. 辽宁省综合地球物理解释断裂构造的方法和依据[J]. 地质与资源, 2015, 24(5): 483-488.
- Zhang L Z. Methods and basis of integrated geophysical interpretation of fault structures in Liaoning province[J]. Geology and Resources, 2015, 24(5): 483-488.
- [20]刘铁, 王成龙, 杨仲杰. 重力资料圈定地质构造边界方法的初步探讨[J]. 地质与资源, 2015, 24(6): 577-582.
- Liu T, Wang C L, Yang Z J. Preliminary discussion on the delineation method of geological structure boundary with gravity data [J]. Geology and Resources, 2015, 24(6): 577-582.
- [21]关键, 方石. 地热系统的概念与传热机制综述[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 207-213, 206.
- Guan J, Fang S. Concept and heat transfer mechanism of geothermal system: A review [J]. Geology and Resources, 2021, 30(2): 207-213, 206.