



MT 法在鄂尔多斯盆地北部地热资源勘查中的应用

郭宝东¹, 孙中任², 石玉学¹, 郭嘉婧¹, 郭 跃¹, 赵晓恕¹, 孙 钢¹

1. 辽宁省物测勘查院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110032;

2. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘 要: 鄂尔多斯盆地北部地热资源埋藏深、温度高、储量大、开发潜力大, 合理地选择物探方法可以很好地确定靶区, 圈定热储构造, 更精准地为钻探提供依据。由于 MT 法探测深度的优势, 其反演电阻率特征能很清晰地反映出地热田导水导热构造的分布、产状等特征。本研究利用前期 ER01、ER02 地热井测井成果, 重新标定 ER03 地热井物探解释参数, 划分出 4 000 m 深度范围内的热储层在水平和纵向上的分布规律, 圈定地热异常范围和空间分布特点, 确定地下热水的富水部位及有利的勘探井位, 提出下一步工作的建议。

关键词: MT 法; 地热勘查; 热储层; 标定物探参数; 鄂尔多斯盆地

APPLICATION OF MAGNETOTELLURIC SOUNDING METHOD IN GEOTHERMAL RESOURCES EXPLORATION IN NORTHERN ORDOS BASIN

GUO Bao-dong¹, SUN Zhong-ren², SHI Yu-xue¹, GUO Jia-jing¹, GUO Yue¹, ZHAO Xiao-shu¹, SUN Gang¹

1. Liaoning Institute of Physical Survey and Exploration Co., Ltd., Shenyang 110032, China

2. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The geothermal resources in northern Ordos Basin are characterized by deep burial, high temperature, large reserves and great development potential. Reasonable geophysical prospecting methods can accurately determine the target area, delineate the thermal reservoir structure, and provide basis for drilling. Due to the advantages of magnetotelluric sounding (MT) method in detecting depth, the characteristics of resistivity inversion can clearly reflect the distribution and occurrence of water conductivity and thermal conductivity structures in geothermal fields. Based on the previous logging results of ER01 and ER02 geothermal wells, the study recalibrates the geophysical interpretation parameters of ER03 geothermal well, reveals the horizontal and longitudinal distribution rules of thermal reservoirs within 4 000 m depth, delineates the range of geothermal anomalies and spatial distribution, determines the water-rich location of geothermal water and favorable positions for drilling, and puts forward suggestions for next work.

Key words: magnetotelluric sounding (MT); geothermal exploration; thermal reservoir; calibration of geophysical parameter; Ordos Basin

0 引言

随着人类社会的不断发展, 地热能开发利用的应

用范围越来越广, 已受到世界各国的普遍重视。尤其

是 20 世纪 70 年代以后, 人口增长、世界性能源短缺、

收稿日期: 2021-11-06; 修回日期: 2022-02-07. 编辑: 李兰英.

基金项目: 内蒙古自治区地质勘查基金项目“内蒙古自治区鄂尔多斯市(鄂尔多斯盆地北部)地热资源勘查与评价”(内地基[2019]水勘 1-3).

作者简介: 郭宝东(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号, E-mail//116032002@qq.com

通信作者: 郭跃(1984—), 女, 高级工程师, 主要从事地质勘查工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区宁山中路 42 号, E-mail//287795748@qq.com

原料价格不断上涨以及矿物能源消耗对环境的危害,使人类更加重视开发利用地热能^[1-2]。地热是一种应用广泛、易于开发、无环境污染、可再生的新型能源。

1 勘查区地热地质

1.1 地质概况

研究区在大地构造位置上属华北地台中的鄂尔多斯地块。地层区划隶属华北地层区鄂尔多斯地层分区之中新元古代及古生代岩石地层区,西部属贺兰山-桌子山地层小区,东部属东胜地层小区。中—新生代岩石地层区划隶属于陕甘宁地层区,鄂尔多斯地层分区。

区内地层出露齐全,从太古宇到中生界均有分布。太古宇—古元古界以中深成变质建造为主;中新元古界主要为浅变质碎屑—碳酸盐建造,局部见火山岩;寒武系—奥陶系以碳酸盐岩为主;石炭系—侏罗系以含煤碎屑岩系为主;白垩系主要为陆相碎屑岩地层;新生界由松散堆积组成^[3-5]。区域经历了太古宙结晶基底演化、中新元古代海相盖层沉积、古生代海槽沉积、中—新生代陆相沉积过程。

1.2 地热地质条件

鄂尔多斯高原在构造上为轴向南北,轴心偏西,东缓西陡的不对称向斜盆地。地热地质条件受其影响较大,就地热储层而言,其分布随所处向斜盆地部位的不同有很大差异。根据以往鄂尔多斯盆地北部地质资料及已有地热勘查成果综合分析,鄂尔多斯盆地北部属沉积盆地型中低温地热田类型。热储类型以层状热储类型为主,即沉积盆地型热储,主要为传导热,靠地层沉积厚度、地温梯度进行增温。其次,该区还存在层状兼带状热储、带状热储两种类型,均属构造型热储,受断裂构造控制^[6-11]。这种类型的地热主要在鄂尔多斯盆地北部、西部构造带及各构造单元内分布。

2 勘查区地球物理条件分析

白垩纪—石炭纪地层岩性总体以砂岩、灰质砂岩、泥岩、泥灰岩为主,其中在白垩系及石炭系含有煤层^[12]。从石油钻孔测井电性参数分析,不同的岩石电性特征具有一定的差异,其中砂岩、灰质砂岩电阻率相对较高,一般在 $10\sim 95\ \Omega\text{m}$,泥岩电阻率较低,一般在 $10\sim 40\ \Omega\text{m}$,灰质泥岩及炭质泥页岩相对较高,一般在

$50\sim 80\ \Omega\text{m}$,而煤层电阻率在 $55\sim 240\ \Omega\text{m}$,呈现高阻特征。反映了不同的岩石具有一定的电性差异。奥陶系地层以灰岩、白云岩为主,前震旦系地层以石英砂岩、千枚岩为主,二者岩石电性相对于上古生界岩石均呈高阻特征。

总之,各地层间具有一定的电性差异,而且电阻率高低相间,具有一定规律性。但是,由于各系地层发育巨厚,同时,同一地质时期的岩性千差万别,不同层系的岩性之间又有相似性和可比性,因此严格意义上上述电性差异是宏观的^[13]。不排除微观的相近,甚至于相当。

3 ER01、ER02 地热井基本概况

本研究共实施3个地热孔。通过研究分析大地电磁测深在3个重点工作区的物探成果,确定ER01、ER02、ER03地热井井位。ER01、ER02地热井已实施钻孔验证,其中ER01井位于杭锦旗,终孔深度2 000 m,在侏罗系砂岩地层,测井曲线成果显示多个水层,并且在深部渗透率较高,水量较大,出水量1 700 t/d,井底温度达到 $55.9\ ^\circ\text{C}$ 。ER02井位于鄂托克旗,终孔深度1 600 m,因孔深限制,测井曲线成果显示1 000 m以浅有多个水层,水温较低,水温约 $30\ ^\circ\text{C}$,1 000 m以下无解释水层。这样的钻探效果与钻前预期还是吻合的。

4 标定物探解释参数

研究中通过ER01、ER02地热井测井成果来标定物探解释参数。使用设备V8多功能电法工作站,单点观测时长超过5 h。测点点距1 000 m,个别地段加密至500 m。数据质量均合格,一级品率超过85%。通过数据整理、畸变点剔除、数据校正、多种方法反演、TE和TM数据分析、推断解释,布设钻孔ER01、ER02、ER03。每个孔位有备选方案2个以上,并存预案分析。

已实施完的两孔资料分析如下。

(1)从ER01、ER02地热井测井曲线成果上看(如表1所示),解释水层位置与反演断面图TE模式吻合很好,所以ER03地热井设计井位参照TE模式反演断面图^[14-15]。

(2)将测井成果投影到断面图上(如图1所示),ER01地热井:502~956 m有多个水层,视电阻率值 $20\sim 31.6\ \Omega\text{m}$,以含水砂岩为主;1 189~1 235 m为低产

表 1 ER01 井测井解释成果表

Table 1 Logging interpretation results of ER01

层号	起始深度/m	终止深度/m	厚度/m	电阻率/ Ωm	声波时差/ $(\mu\text{s}/\text{m})$	孔隙度/%	渗透率/ $(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	泥质含量/%	井温/ $^{\circ}\text{C}$	解释结论
1	502.2	709.9	20.7	19.42	302.37	18.35	116.28	14.24	32.00	水层
2	719.4	738.1	18.7	8.31	333.27	17.16	63.79	25.44	34.30	水层
3	744.1	748.9	4.8	8.11	330.09	16.67	58.63	27.43	34.80	水层
4	757.0	768.8	11.0	8.59	304.77	17.41	65.09	24.45	35.20	水层
5	847.2	854.0	6.8	12.80	326.13	22.09	187.85	6.62	36.90	水层
6	860.5	880.4	19.9	10.78	324.25	19.22	106.70	17.52	37.30	水层
7	905.5	948.6	43.1	10.69	303.72	17.15	63.78	21.11	38.10	水层
8	951.6	955.9	4.3	11.40	289.27	20.36	134.30	11.33	38.60	水层
9	1 189.1	1 235.6	46.5	18.25	241.99	9.46	7.24	21.54	46.00	低不层
10	1 248.3	1 266.3	18.0	15.33	278.12	19.16	115.50	9.47	47.10	水层
11	1 307.6	1 364.6	57.0	14.72	277.95	16.45	63.79	20.79	48.60	水层
12	1 368.2	1 377.8	9.6	14.22	289.76	18.64	87.98	16.63	49.20	水层
13	1 382.4	1 394.8	12.4	14.39	277.62	18.06	78.81	15.66	49.50	水层
14	1 398.2	1 430.2	32.0	13.72	283.67	17.74	77.32	19.34	50.00	水层
15	1 432.8	1 440.3	7.5	14.84	269.42	16.62	66.96	13.27	50.30	水层
16	1 443.2	1 456.3	13.1	13.82	256.69	15.22	43.19	10.15	50.70	水层
17	1 469.6	1 479.0	9.4	13.01	273.67	16.51	60.47	18.15	51.20	水层
18	1 481.3	1 504.4	24.1	13.53	264.12	14.88	45.76	12.98	51.80	水层
19	1 509.2	1 541.9	32.7	13.88	283.70	20.24	140.80	6.98	52.20	水层
20	1 553.1	1 563.8	10.7	12.37	275.08	19.72	121.21	5.79	52.90	水层
21	1 581.8	1 606.8	25.0	14.43	279.92	20.47	138.84	5.98	54.10	水层
22	1 612.3	1 648.4	36.1	12.79	303.19	19.96	127.91	12.89	54.60	水层
23	1 661.2	1 682.5	21.3	12.56	289.55	19.84	124.99	11.73	55.50	水层
24	1 723.0	1 727.7	4.7	11.45	282.18	20.42	130.82	8.00	55.90	水层
25	1 808.1	1 812.0	3.9	11.58	254.13	11.91	12.90	22.78	58.30	低不层
26	1 837.1	1 843.2	6.1	11.89	244.63	10.42	8.63	20.86	59.40	低不层

层,视电阻率小于 20 Ωm ,以泥岩为主;1 248~1 727 m 有多层水层,视电阻率值 20~31.6 Ωm ,以含水砂岩为主.通过研究 ER01 地热井测井曲线解释成果可知,1 509~1 727 m 渗透率较高,说明在深部等值线稀疏宽大部位渗透率较高,富水性较好,是井位论证最优目的层^[16-17].1 800 m 以下视电阻率逐渐增高,测井曲线显示不含水,与笔者推断的 1 800 m 以下已经穿过断裂 F2 的结论相符.

(3)ER02 地热井(如图 2 所示):508~782 m 有多个水层,视电阻率值 20~31.6 Ωm ,以含水砂岩为主;782~972 m 电阻率较低,小于 20 Ωm ,以泥岩为主;972~1 053 m,以含水砂岩为主,但是水层较薄;1 000 m 以下电阻逐渐升高,地层密实,含水性较差.从 ER02

地热井可以看出,笔者推断的断裂构造 F6 距离井位较远,深层并未受到断裂 F6 影响,这也是在深部未见水层的原因.

(4)分析 ER01、ER02 钻孔成果,ER01 地热井成果较好,基本达到设计要求;ER02 在深部未见水层.两钻孔的设计资料都是主要参照 TE+TM 模式,这对 ER02 地热井造成了一定偏差.ER03 设计井位主要用 TE 模式,参照 TM 模式和 TE+TM 模式^[18-20].

5 ER03 井位设计

设计井位 ER03 位于第 9 剖面 3.3 km 处(如图 3 所示),建议孔深 2 800 m.地理位置距鄂托克前旗约 10 km 的空旷沙草地.

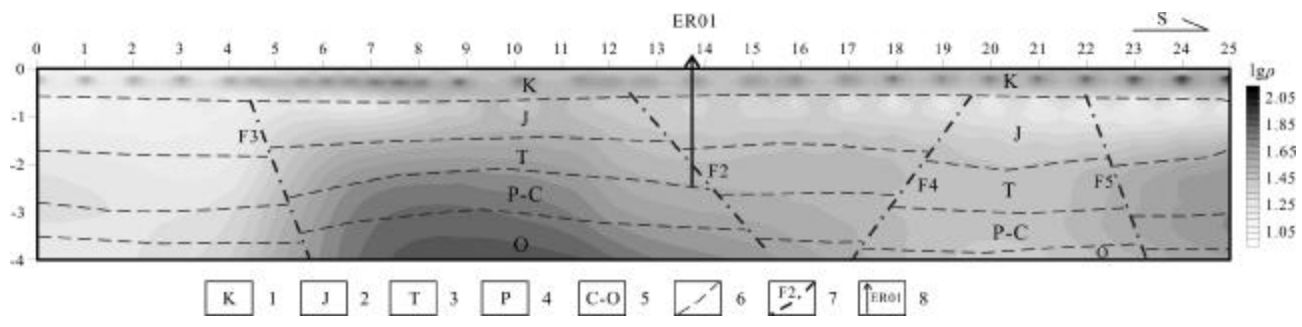


图 1 D2 测线 MT 视电阻率反演断面图

Fig. 1 Profile of MT apparent resistivity inversion along D2 survey line

1—白垩系(Cretaceous); 2—侏罗系(Jurassic); 3—三叠系(Triassic); 4—二叠系(Permian); 5—石炭和奥陶系(Carboniferous & Ordovician); 6—推测地层界线(inferred stratigraphic boundary); 7—推测断裂构造及编号(inferred fault and number); 8—设计钻孔及编号(designed borehole and number)

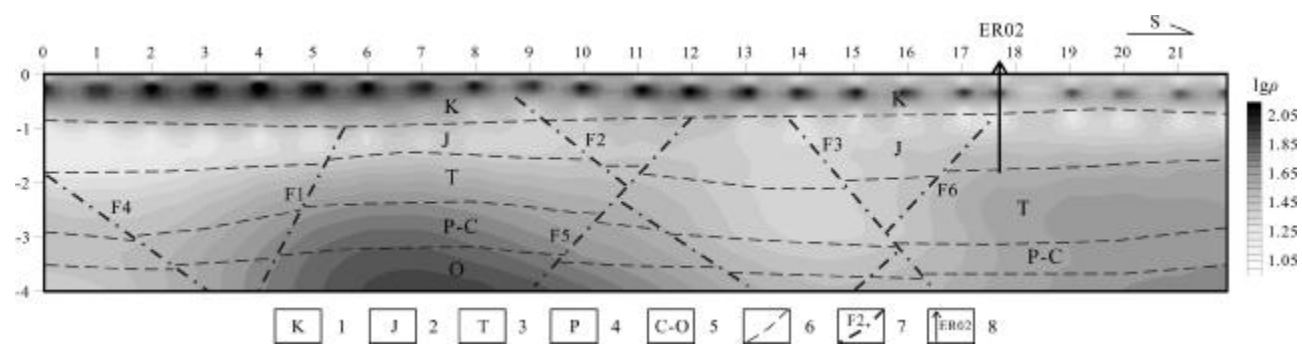


图 2 D5 测线 MT 视电阻率反演断面图

Fig. 2 Profile of MT apparent resistivity inversion along D5 survey line

1—白垩系(Cretaceous); 2—侏罗系(Jurassic); 3—三叠系(Triassic); 4—二叠系(Permian); 5—石炭和奥陶系(Carboniferous & Ordovician); 6—推测地层界线(inferred stratigraphic boundary); 7—推测断裂构造及编号(inferred fault and number); 8—设计钻孔及编号(designed borehole and number)

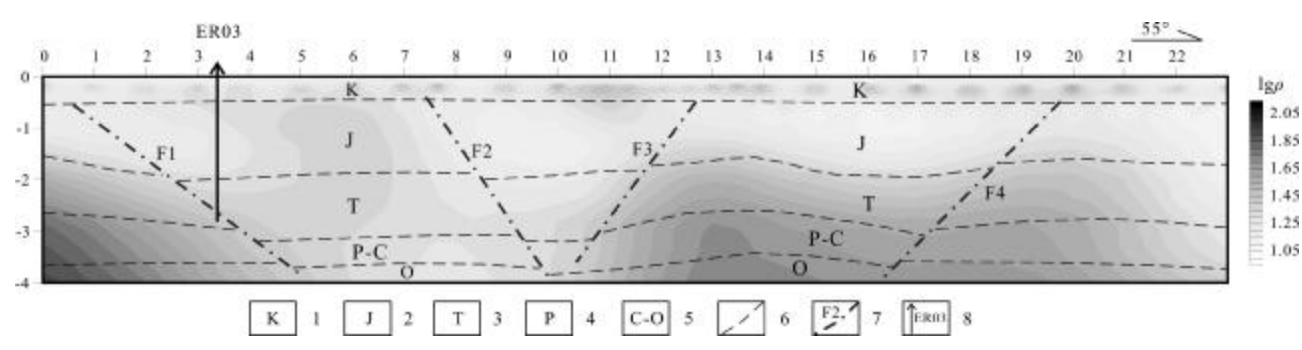


图 3 D9 测线 MT 视电阻率反演断面图

Fig. 3 Profile of MT apparent resistivity inversion along D9 survey line

1—白垩系(Cretaceous); 2—侏罗系(Jurassic); 3—三叠系(Triassic); 4—二叠系(Permian); 5—石炭和奥陶系(Carboniferous & Ordovician); 6—推测地层界线(inferred stratigraphic boundary); 7—推测断裂构造及编号(inferred fault and number); 8—设计钻孔及编号(designed borehole and number)

设计理由:

(1)井位距旗、镇较近,有利于地热的应用.

(2)目的层为白垩系、三叠系. 白垩系、三叠系地层为一套砂岩、砂砾岩与泥岩不等厚互层的沉积地层,其中的砂岩、砂砾岩结构疏松,裂隙、孔隙相对发育,有

利于地下热水的存储. 目标层位于相对隆起的边部,大地热流值较高,对地热水的温度较为有利.

(3)目标物为推测的 F1 深大断裂,推测钻井在 2 400~2 600 m 进入断裂影响带; 2 600 m 以下钻井穿透断裂带并且钻进三叠系底部,所以本次设计孔深

2 800 m.

(4)深度 470~950 m 与之对应电阻率值 20~31.6 Ωm , 2 100~2 800 m 与之对应电阻率值 20~31.6 Ωm , 并且断裂附近等值线稀疏宽大, 推测两个深度范围都存在含水层,是本次地热勘查重点靶区.

6 结语

(1)采用了多种数据反演手段,从 ER01、ER02 地热井测井曲线成果上看,解释水层位置与反演断面图 TE 模式对应用效果较好,所以大地电磁在鄂尔多斯盆地北部数据反演时用 TE 模式效果更好.

(2)通过 ER01、ER02 地热井成果分析,含水层所对应的电阻率值大约在 20~31.6 Ωm 之间,低电阻率和相对高电阻率含水性均可能较差.

(3)目的层为侏罗系、三叠系含水砂岩.但深部二叠系、石炭系电阻率等值线稀疏宽大,可能含水层更厚,渗透性更好.

(4)经过前期地热勘查,确定研究区热储类型为层状兼带状热储.

(5)结合已知的石油钻孔地层划分及各层电性特征,对大地电磁测深断面的地层进行划分有利^[21-22].

(6)V8 多功能电法仪工作效率高、仪器轻便、分辨率较高,其采集的大地电磁测深数据能够满足地热勘查的要求.

参考文献(References):

- [1]田廷山,李明朗,白治.中国地热资源及开发利用[M].北京:中国环境科学出版社,2006:12-57.
Tian T S, Li M L, Bai Y. Development and utilization of geothermal resources in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006: 12-57.(in Chinese)
- [2]徐世光,郭远生.地热学基础[M].北京:科学出版社,2009:22-185.
Xu S G, Guo Y S. Fundamentals of geothermal science[M]. Beijing: Science Press, 2009: 22-185. (in Chinese)
- [3]刘少峰,李思田,庄新国,等.鄂尔多斯西南缘前陆盆地沉降和沉积过程模拟[J].地质学报,1996,70(1):12-22.
Liu S F, Li S T, Zhuang X G, et al. Simulation of the subsidence and deposition of the foreland basin on the southwestern margin of Ordos [J]. Acta Geologica Sinica, 1996,70(1):12-22.
- [4]李清林,栗文山,张晓普,等.鄂尔多斯及其周缘地热分布的某些特征[J].西北地震学报,1996,18(2):51-59.
Li Q L, Li W S, Zhang X Q, et al. Characteristics of geothermal distribution in Ordos and its vicinity[J]. Northwestern Seismological Journal, 1996,18(2):51-59.
- [5]柳益群,李文厚,冯乔.鄂尔多斯盆地东部上三叠统含油砂岩的古地温及成岩阶段[J].地质学报,1997,71(1):65-74.
Liu Y Q, Li W H, Feng Q. Palaeotemperatures and diagenetic stage of the Upper Triassic oil sandstones in the eastern Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 1997,71(1):65-74.
- [6]汪集旸,黄少鹏,陈墨香.中国大陆地区大地热流图[C]//袁学诚.中国地球物理图集.北京:地质出版社,1996:67-113.
Wang J Y, Huang S P, Chen M X. Chinese mainland geothermal flow map[C]//Yuan X C. Geophysical maps of China. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 67-113. (in Chinese)
- [7]黄少鹏.我国大陆地区大地热流与地壳厚度的变化[J].地球物理学报,1992,35(4):441-450.
Huang S P. Variations of heat flow and crustal thickness in the continental area of China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1992,35(4): 441-450.
- [8]孙歧发,田辉,张扩.下辽河平原地区历史地面沉降情况研究[J].地质与资源,2014,23(5):450-452.
Sun Q F, Tian H, Zhang K. Study on the history of land subsidence in Lower Liaohe River Plain[J]. Geology and Resources, 2014,23 (5):450-452.
- [9]田辉,孙歧发,王福刚,等.D-InSAR在盘锦湿地地面沉降监测中的应用[J].地质与资源,2015,24(5):507-510.
Tian H, Sun Q F, Wang F G, et al. Application of D-InSAR in the land subsidence monitoring for Panjin wetland [J]. Geology and Resources, 2015,24(5):507-510.
- [10]庞康,吴柏林,孙涛,等.鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿碳酸盐岩碳氧同位素及其天然气-水混合流体作用特征[J].中国地质,2022,49(5):1571-1590.
Pang K, Wu B L, Sun T, et al. Characteristics of natural gas-water mixed fluid and carbon oxygen isotopes of carbonatite in the sandstone uranium deposits, Ordos Basin[J]. Geology in China, 2022,49(5): 1571-1590.
- [11]李娟,郑佳,雷晓东,等.北京平原区第四系热物性参数特征及对浅层地热能开采的影响因素分析[J].中国地质,2022,49(5):1543-1554.
Li J, Zheng J, Lei X D, et al. Analysis of quaternary thermal properties and influencing factors on shallow geothermal energy exploitation in Beijing plain[J]. Geology in China, 2022,49(5): 1543-1554.
- [12]周江羽,吴冲龙,韩志军.鄂尔多斯盆地的地热场特征与有机质成熟史[J].石油实验地质,1998,20(1):20-24.
Zhou J Y, Wu C L, Han Z J. Geothermal field and maturing history of organic matter in the Ordos Basin [J]. Experimental Petroleum Geology, 1998,20(1):20-24.
- [13]徐新学.大地电磁测深法在深部矿产资源调查中的应用[J].物探与化探,2011,35(1):17-19,23.

- Xu X X. The application of magnetotelluric sounding to the investigation of ore resources at depth[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2011, 35(1): 17-19, 23.
- [14] 徐世浙, 刘斌. 大地电磁一维连续介质反演的曲线对比法[J]. *地球物理学报*, 1995, 38(5): 676-682.
- Xu S Z, Liu B. The curve comparison method of MT inversion for one-dimensional continuous medium [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1995, 38(5): 676-682.
- [15] 王若, 王妙月, 底青云. 二维大地电磁数据的整体反演[J]. *地球物理学进展*, 2001, 16(4): 53-60.
- Wang R, Wang M Y, Di Q Y. 2D TM data integrated inversion[J]. *Progress in Geophysics*, 2001, 16(4): 53-60.
- [16] 魏胜, 王家映, 罗志琼. 大地电磁解释工作站[J]. *物探与化探*, 1994, 18(1): 50-54.
- Wei S, Wang J Y, Luo Z Q. The working station of magnetotelluric interpretation[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1994, 18(1): 50-54.
- [17] 夏金伟. 高频大地电磁在地下水勘查中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015: 25-119.
- Xia J W. The application and research of high-frequency magnetotelluric method in the groundwater exploration[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015: 25-119.
- [18] 陈小斌, 赵国泽, 汤吉, 等. 大地电磁自适应正则化反演算法[J]. *地球物理学报*, 2005, 24(4): 937-946.
- Chen X B, Zhao G Z, Tang J, et al. An adaptive regularized inversion algorithm for magnetotelluric data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 24(4): 937-946.
- [19] 刘国栋, 邓前辉. 电磁方法研究与勘探[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 9-118.
- Liu G D, Deng Q H. Electromagnetic method research and exploration [M]. Beijing: Seismological Press, 1993: 9-118. (in Chinese)
- [20] 张全胜, 王家映. 大地电磁测深资料的去噪方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2004, 39(S1): 17-23.
- Zhang Q S, Wang J Y. Denoising method of magnetotelluric sounding data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2004, 39(S1): 17-23. (in Chinese)
- [21] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及展望[J]. *地球物理学进展*, 2002, 17(2): 245-254.
- Wei W B. New advance and prospect of magnetotelluric sounding (MT) in China[J]. *Progress in Geophysics*, 2002, 17(2): 245-254.
- [22] 张赛珍, 王庆乙, 罗延钟. 中国电法勘探发展概况[J]. *地球物理学报*, 1994, 37(S1): 408-424.
- Zhang S Z, Wang Q Y, Luo Y Z. An overview on the development of the electrical prospecting method in China [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1994, 37(S1): 408-424.
-
- (上接第 48 页/Continued from Page 48)
- [34] 孙宁亮, 钟建华, 田东恩, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组事件沉积与致密油的关系[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(6): 30-40.
- Sun N L, Zhong J H, Tian D E, et al. Relationship between event deposits and tight oil of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2017, 41(6): 30-40.
- [35] 付金华, 李士祥, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 936-946.
- Fu J H, Li S X, Xu L M, et al. Paleo-sedimentary environmental restoration and its significance of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 936-946.
- [36] Plint A G. Mud dispersal across a cretaceous prodelta; Storm-generated, wave-enhanced sediment gravity flows inferred from mudstone microtexture and microfacies[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(3): 609-647.