

doi: 10.11720/wtyht.2023.1209

韩元红, 申小龙, 李兵, 等. 基于综合物探的关中眉县构造裂隙型地热水靶区预测及钻孔验证[J]. 物探与化探, 2023, 47(1): 65–72. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1209>

Han Y H, Shen X L, Li B, et al. Target area prediction and drilling verification of the tectonic fissure-hosted geothermal water in Meixian County, Guanzhong Plain based on the integrated geophysical exploration[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(1): 65–72. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1209>

基于综合物探的关中眉县构造裂隙型地热水靶区预测及钻孔验证

韩元红¹, 申小龙^{1,2}, 李兵³, 徐德才⁴, 贾志刚², 吴大林⁴, 王伟², 吕俊³

(1. 自然资源部煤炭资源勘查与综合利用重点实验室, 陕西 西安 710021; 2. 陕西省煤田地质勘查研究院有限公司, 陕西 西安 710021; 3. 陕西中煤新能源公司, 陕西 西安 710054; 4. 陕西省煤田地质物测有限公司, 陕西 西安 710005)

摘要:“双碳”目标背景下, 地热能作为广泛分布的绿色清洁能源具有广阔的利用前景。构造裂隙型地热水因出水量大、易回灌等优势, 成为当前水热型地热能开发利用的重要类型。运用区域综合物探方法, 系统分析关中西部眉县城区区域构造、地层岩性、储水空间及富水性, 指导热水井靶区预测和井位布局。结果表明, 目标区发育 3 条隐伏断层, 其中富水性好、规模较大的 2 条断层可以作为靶区断层, 在此基础上将地热井布局于断层上盘靠近断层预测线的位置, 垂向上沿着断层倾向方向钻穿基岩面风化带, 结合断层和基岩面埋深等实际地质条件, 该区地热井平均钻进基岩面以下 500 m。钻井结果显示眉县地区二元结构热储发育, 即新近系碎屑岩孔隙水热储和基岩裂隙水热储, 完钻的 8 口地热井中 7 口井出水量超过 100 m³/h, 出水主要为基岩构造裂隙水, 另 1 口井出水量较小, 推测未取得基岩构造裂隙水, 出水主要为新近系碎屑岩孔隙水。

关键词:水热型地热能; 热储类型; 靶区预测; 钻探验证; 关中眉县

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)01-0065-08

0 引言

地热能是一种绿色低碳、能够持续利用的可再生能源, 具有储量大、分布广、清洁环保、稳定可靠等特点, 是一种现实可行且具有竞争力的清洁能源, 充分高效利用地热能, 是在能源领域中贯彻和实施国家绿色发展总体战略, 促进保持生态环境健康, 改善区域能源利用结构的重要举措和技术发展方向。水热型地热资源集热能和水资源为一体, 因具有开发利用方法简单, 经济效益良好等优势, 长期占据地热开发市场较大比例。国内学者在水热型地热资源热储条件^[1-3]、热源的水源特征及其富集机理^[4-5]、靶区预测^[6-7]、水热型地热资源的可持续开采^[8-10]、水

热型地热资源监测保护^[11]等方面的研究取得了丰富的成果, 有效指导了水热型地热资源的开发利用。

渭河盆地莫霍面埋藏浅, 地温梯度高, 断裂构造十分发育, 是适合进行地热资源开发利用的地区, 水热型地热资源可得到广泛的利用, 同时, 业界也对于渭河盆地地热资源展布^[12]、地温变化特征^[13-14]、地热水系统及成因^[15-17]、回灌及可持续性^[18-19]等方面进行了大量研究, 为渭河盆地地热资源高效开发利用夯实了理论基础。渭河盆地已有的水热型热储勘查、靶区预测和开发利用主要集中在西安、咸阳、临潼和渭南, 且主要针对新近系碎屑岩孔隙水系统进行勘查和开采。关中西部县市城区较多, 具有较大的清洁供暖市场需求, 但地热能勘查和开发仍处于起步阶段, 尤其是对构造裂隙型地热水研究及勘

收稿日期: 2022-05-04; 修回日期: 2022-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42102203); 陕西省自然科学基金项目(2021J LM-14)

第一作者: 韩元红(1988-), 女, 博士, 高级工程师, 2015年毕业于中国科学院大学, 目前从事地热及伴生资源相关地质研究工作。Email: hanyuanhong222@163.com

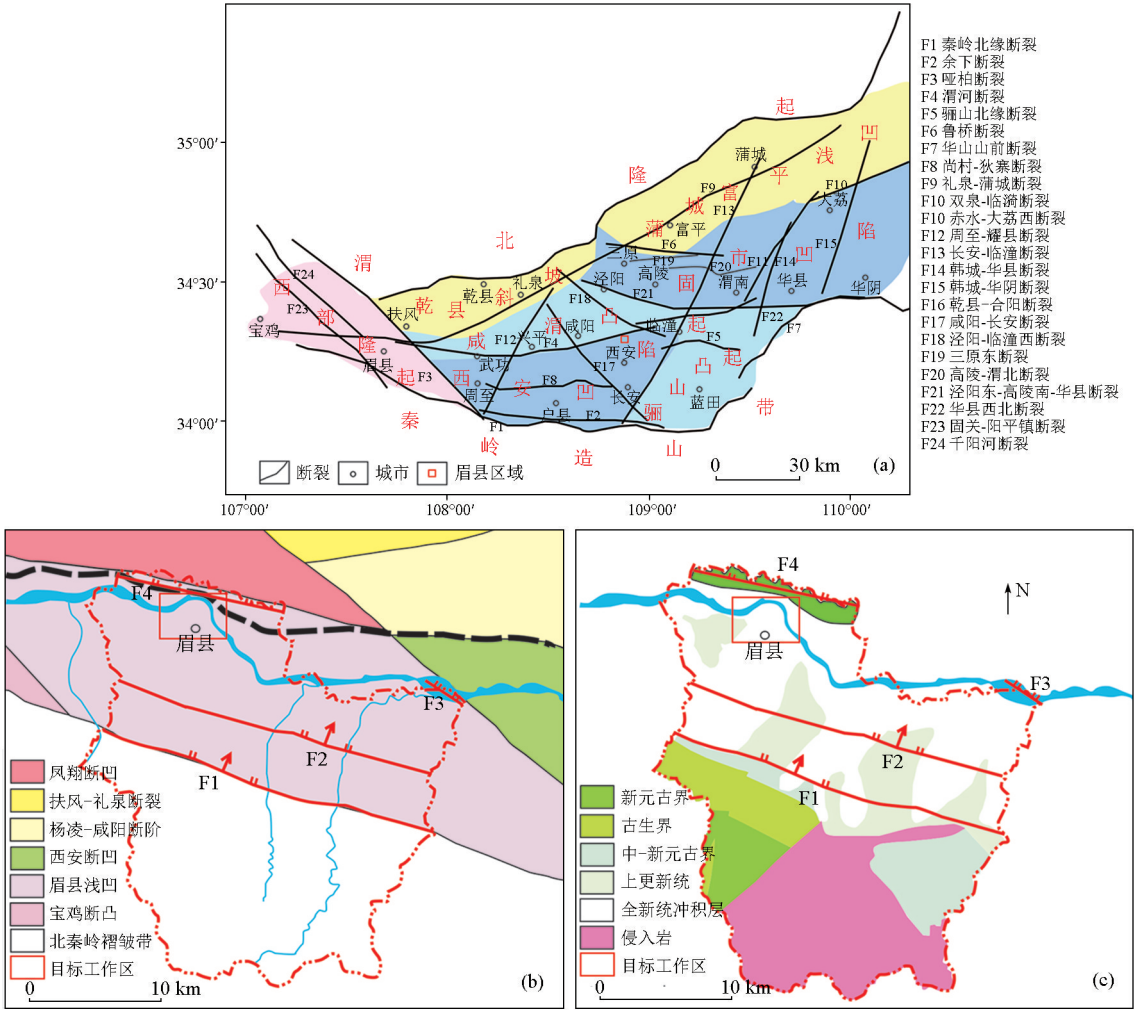
查更为少见。本文运用区域综合物探方法,系统分析了区域构造、地层岩性,储水空间及富水性,指导热水井靶区预测和井位布局,可以为水热型地热资源勘查提供参考。

1 地质背景

渭河盆地北邻鄂尔多斯台地、南接秦岭造山带东段,东靠山西台隆,西端与鄂尔多斯西南断裂相连,是近 EW 向展布的新生代活动性断陷盆地^[20]。渭河盆地构造背景复杂(图 1),盆地内发育有秦岭北缘断裂带,尚村—狄寨断裂带,三桥—临潼断裂带,渭河断裂带,关山—雷村断裂带,扶风—黑池断裂带,北山南缘断裂带,这些断裂带决定了整个盆地的轮廓^[21],使得构造单元呈凸起或凹陷的状态。渭

河盆地可划分为西部隆起区和中东部坳陷区 2 个一级构造单元,后者又进一步划分为 5 个二级构造单元,分别为咸礼凸起、西安凹陷、临蓝凸起、固市凹陷、蒲城凸起^[22-23]。

眉县地处渭河盆地以南,距秦岭山前约 15 km,整体构造主要处于渭河盆地宝鸡凸起的次级构造单元内,即“眉县浅凹”,北部、东部以哑柏断裂与西安凹陷、咸礼凸起相邻,南部以秦岭北侧断裂为界与北秦岭褶皱带为邻。眉县区域主要由秦岭山前断裂、余下断裂、哑柏断裂和渭河断裂及其次级平行断裂控制,4 条断裂在眉县区域内走向较一致,大致近平行的近 EW 向或 NW 向。至新生代,4 条断均表现出张性断裂的特征,均伴有次级平行断裂。秦岭北侧断裂和余下断裂倾向 N,倾角 60°~80°,渭河断裂倾向 S,倾角 65°~80°。



a—渭河盆地构造单元及主要断层;b—眉县区域构造单元;c—眉县区域地层

a—tectonic units and main faults in Weihe Basin;b—regional tectonic unit of Meixian County;c—regional stratigraphic of Meixian County

图 1 区域地质背景
Fig. 1 Regional geological background

2 研究方法

带状热储勘查的核心问题是热储构造的判识,地球物理勘查是判识深部构造最有效的方法^[24-25],常被用于构造裂隙型地热水资源的勘查^[26-28]。

因单一地球物理勘查方法具有多解性,近年来常用多种方法综合判识。本文依托眉县县城清洁供暖项目,供暖目标 300 万 m² 的住宅小区,采用水热型地热资源开发供暖。考虑到管网、能源站等需要设立在县城,选用眉县县城为资源勘查及靶区预测目标工作区。本次采用二维地震测线、音频大地电磁(AMT)测线和静电 α 卡测氡 3 种物探方法综合分析区域断层、地层岩性和富水性等热储特征(图 2)。

1) 地震勘探是采集地震波在地下的传播规律分析判识地层特征的方法,是判识地层性质和形态的最常用的地球物理勘探方法,通过对目标区进行二维地震勘查,施工测线 5 条,其中 NE 向 3 条,EN 向 1 条和近 SW 向 1 条,地震测线基本覆盖全区,区域地震测线全长 45.4 km,完成地震物理点 1 246 个。

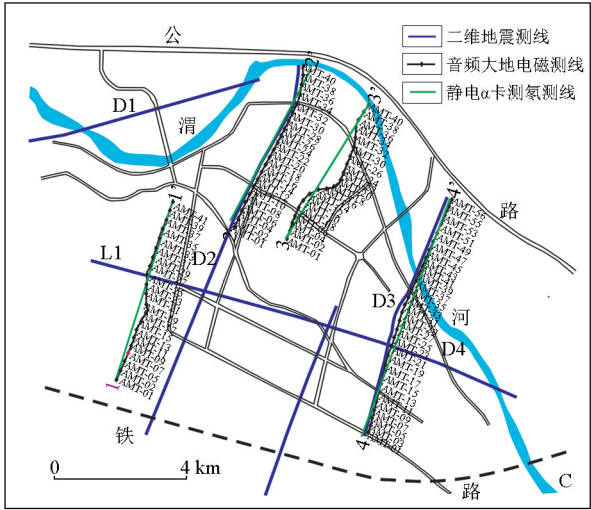


图 2 工作区物探工作位置

Fig. 2 Geophysical prospecting location of Meixian County

2) 音频大地电磁(AMT)是推断断裂构造有效的方法,常与别的物探方法结合判识地下隐伏断裂构造^[1]。因断裂构造带含水呈低阻特征,在音频大地电磁测深剖面上表现为横向上低阻异常来判识断裂发育。本次选用音频大地电磁(AMT),测线 4 条,CS 剖面累积长度 10 660 m,施工测点共 183 个。

3) 静电 α 卡测氡是通过测量 α 射线强度来圈

定断层破碎带位置。本次共完成静电 α 卡勘探测线 11 条(其中 4 条与音频大地电磁(AMT)测线一致),测线长累计 32.15 km,完成测氡物理点累计 674 个。

基于 3 种物探方法综合分析结果,明确勘查区精细构造特征,结合勘查井、测录井及岩心分析,分析了目标区详细的地层岩性特征及富水性特征,在此基础上进行靶区预测和井位布局,最终通过钻井验证了区域热储特征判识结果。

3 结果及讨论

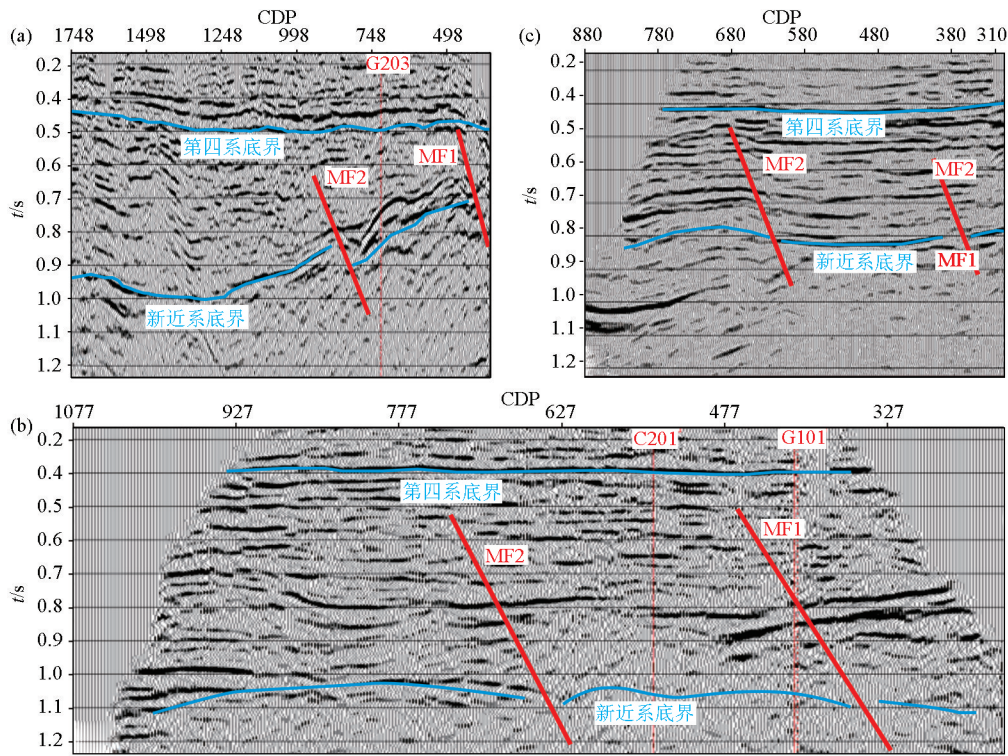
3.1 断层构造

根据本次 D2、D3、D4 这 3 条主要二维地震测线时间剖面上断点和平面组合分析,推测发育 MF1 和 MF2 两条断层,如图 3 所示断层发育特征,断层垂向穿透新近系底界,主要影响新近系地层和中元古界基岩地层。

通过施工 NNE 向 1-1', 2-2', 3-3' 和 4-4' 的 4 条音频大地电磁(AMT)测线,根据测线视电阻率断面特征分析,如图 4 所示,1-1' 剖面 AMT10 ~ AMT19, 2-2' 剖面 AMT6 ~ AMT11、AMT21 ~ AMT28, 3-3' 剖面 AMT2 ~ AMT6、AMT14 ~ AMT22 点段和 4-4' 剖面 AMT14 ~ AMT23、AMT29 ~ AMT44 点段呈现一定幅度的凹陷异常,推测为疑似断层或接触面引起的低阻响应。

本次测得各剖面上的静电 α 卡射线测氡显示幅度无十分突出的异常,但是以 600 cpm 为基线可见,1-1' 剖面 11 点位置峰值达到 960 cpm, 2-2' 剖面 7 点位置峰值达到 780 cpm, 29 点位置峰值达到 900 cpm, 3-3' 剖面 2 点位置峰值达到 660 cpm, 16 点位置峰值达到 780 cpm, 4-4' 剖面 17 点位置峰值达到 720 cpm, 29 点位置峰值达到 1 020 cpm, 推测这些异常点也与断层有关(图 5)。

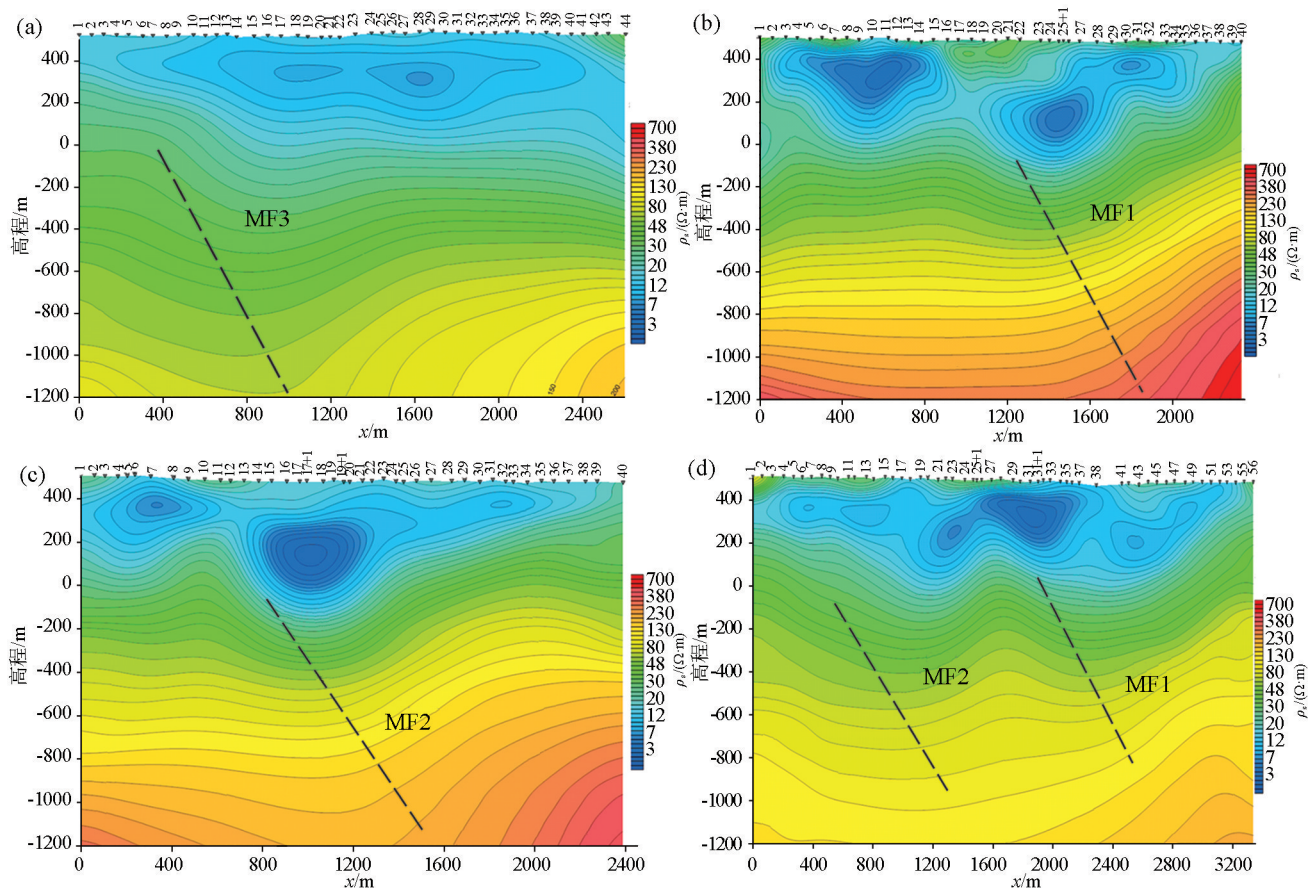
综合地震、音频大地电磁(AMT)及静电 α 卡测氡判识结果推断勘查区主要发育有 3 条隐伏断层(图 6), MF1 主断层或接触带,其南侧约 1 000 m 处发育次生断层或接触带 MF2,西南部 MF3 断层或接触带, MF1、MF2 及 MF3 均倾向 N, 倾角约 60°~80°, 均为隐伏正断层。走向 NW 或 NNW, 与区域大断裂渭河北断裂和余下断裂走向基本一致,可能为区域大断裂平行的次级断层。



a—D2 测线;b—D3 测线;c—D4 测线
a—D2 seismic line;b—D3 seismic line;c—D4 seismic line

图 3 断层在二维地震剖面上的反应

Fig. 3 Fault response of two-dimensional seismic time profile



a—1-1'测线;b—2-2'测线;c—3-3'测线;d—4-4'测线
a—1-1'AMT line;b—2-2'AMT line;c—3-3'AMT line;d—4-4'AMT line

图 4 断层在音频大地电磁 (AMT) 剖面上的反应

Fig. 4 Fault response on audio frequency magnetotelluric (AMT) profile

3.2 地层岩性

根据本次物探、钻探测录井及岩心分析,结合已有区域地质资料,揭示眉县县城地层可划分为3层,自下而上分别为中元古界宽坪群、新近系蓝田—灞河组及第四系黄土及碎屑松散层,并通过物探数据刻画了新近系底界和第四系底界标高形态。

第一层为中元古界宽坪群,厚度 393~732 m,岩性为大理岩,视电阻率大于 $50\ \Omega\cdot\text{m}$,在区域内该层总体连续性较好,水平方向偶见不连续,视电阻率随着深度增大。

2) 第二层为新近系蓝田—灞河组,厚度 245~783 m,视电阻率 $20\sim60\ \Omega\cdot\text{m}$,该层纵向连续性较好,水平方向连续性一般,主要为泥岩、粗砂岩、砾

岩,砂厚比为 21%,孔隙度为 56.0%~47.6%,渗透率为 $58.8\sim1\ 511.2\ \text{mD}$ 。新近系地层底界面起伏较大,呈走向 NWW 的向斜形态(图 7),轴部位于勘探区南部,两翼地层呈不对称展布,北翼地层倾角约 $2^{\circ}\sim12^{\circ}$,南翼地层倾角约 $2^{\circ}\sim8^{\circ}$,两翼地层局部有起伏。北部最高点位于勘探区北部边界,标高约 0 m,最低点位于勘探区南部,标高约-800 m。

3) 第三层为第四系黄土及碎屑松散层,厚度 428~449 m,视电阻率 $5\sim30\ \Omega\cdot\text{m}$,该层层位多变,分布不均匀,连续性较差。第四系底界面起伏较小,构造简单,勘探区北部、南部以及东部相对较高,最高处位于勘探区南部,标高约 120 m,勘探区西北部、中部和东南部较低,最低处位于勘探区西北部,

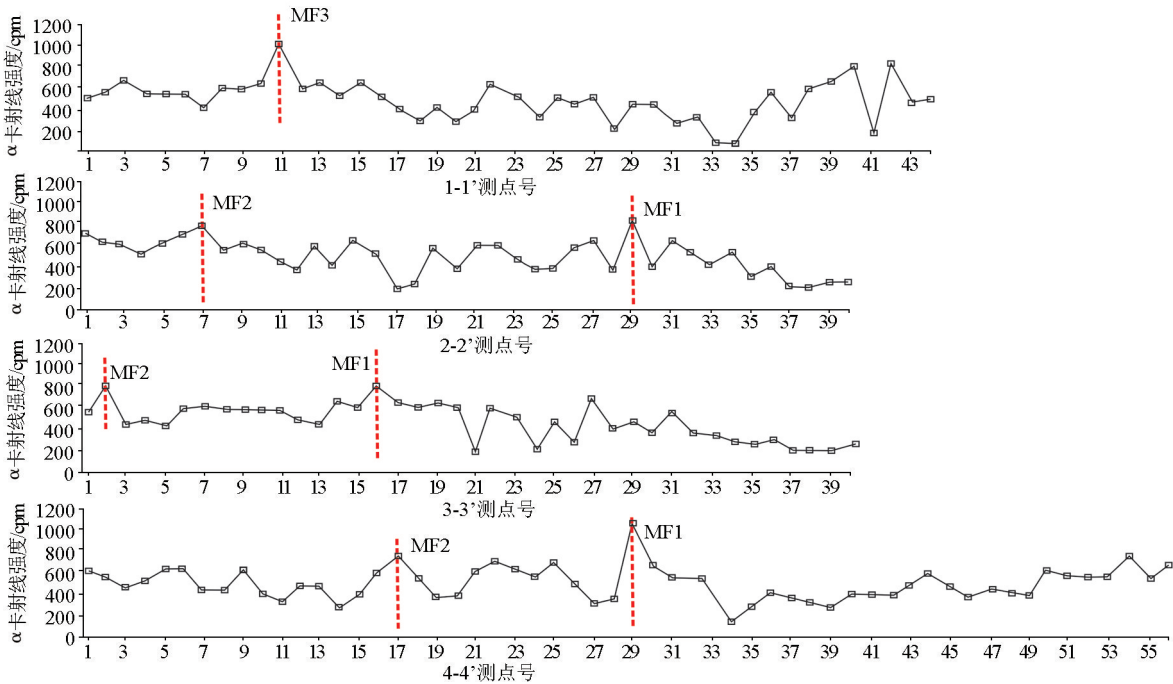


图 5 断层在静电 α 卡射线剖面上的反应
Fig. 5 Fault response on electrostatic α -card profile

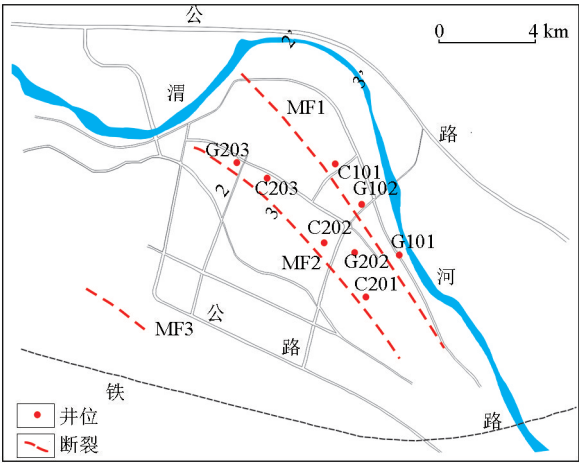


图 6 综合物探推断断层及钻探布孔
Fig. 6 Inferred fault line by comprehensive geophysical prospecting and drilling hole

标高约 40 m,勘探区南部和东北部地层倾角相对较大,约 $2^{\circ}\sim4^{\circ}$ 。

3.3 富水性特征

区域第四系主要为黄土层和砂泥层,粘结性很强,偶见发育松散沉积潜水层,埋藏浅而温度低,通常将第四系地层整体视为热储盖层。新近系碎屑沉积岩层平均砂厚比为 21%,孔隙度为 56.0%~47.6%,渗透率为 $58.8\sim1\ 511.2\ \text{mD}$,具有良好的含水性;该层音频大地电磁法视电阻率相对较低,为砂岩孔隙水的主要富集层,水平方向视电阻率凹陷异常段推断为相对含水性较好区域,分别位于 2-2'剖面 AMT6~AMT11、AMT21~AMT29 点段,3-3'剖面 AMT2~AMT6、AMT14~AMT22 点段,4-4'剖面 AMT14~AMT23、AMT29~AMT44 点段,其中以各剖

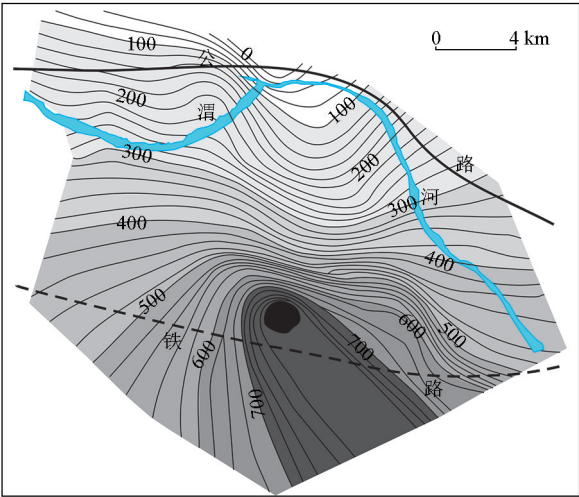


图 7 新近系底界标高等值线

Fig. 7 Elevation contour map of the Neogene bottom

面北侧段含水性相对较好,南侧段次之。层内发育有向斜构造,轴部中心区域应为良好的赋水空间。古生界风化基岩孔隙、裂隙承压含水层,基岩本身较致密,富水性较差,该层随深度的增加含水性逐渐降低,但因发育风化带孔和断层裂隙,是良好的基岩孔隙裂隙承压含水层。目标区发育 3 条隐伏断层,尤其 MF1 和 MF2 基本 EW 向贯穿整个勘查区北部区域,断层垂向上穿透新近系地层,发育至基岩地层中,可以作为良好的裂隙赋水空间和通道。

总之,区域赋水介质多样,有砂岩孔隙储水介质、砂岩构造裂隙储水介质、基岩风化带裂隙储水介质和基岩构造裂隙储水介质,这些孔隙和裂隙为地层提供了充足的储水空间;断层贯穿含水层,作为良好的导水通道,增强岩层间水力联系。这些特征集中显示目标工作区地层富水性较好,结合区域水源补给充足的地质实际情况,指示眉县城区具有开发水热型地热资源的良好地质背景。

4 钻探验证

3 种方法综合物探分析结果显示,勘查区发育 3 条断层,其中北部区域 MF1 和 MF2 断层较长,且 2 条断层间距离较小,以 2 条断层控制区域作为目标区,将井位布置于断层上盘区域,靠近推测断层线的位置,MF1 上盘布井 3 口,分别为 C101 井、G102 井、G101 井,MF2 上盘 5 口,分别是 G203 井、C203 井、C202 井、G202 井和 C201 井,其中 G202 因地表建筑问题,布井位置距离推测 MF2 断层线较其他井远,随后进行了水热型地热井钻探,垂向结合基岩面埋深,平均钻进基岩层 500 m,最后分别对 8 口井进行抽(放)水试验。

现场监测得出各井位出水量和水温等信息(表 1),统计结果显示地热井出水量 61.4~236.1 m³/h,平均出水量 174.1 m³/h,除了 G202 井,出水量均超过 100 m³/h,且多数超过 150 m³/h,出水量较好。地热水温度 41.5~53.0 ℃,平均 48.5 ℃,为低温地热水类型。完钻的 8 口地热井中 7 口井出水量超过 100 m³/h,出水主要为基岩构造裂隙水;G202 井出水量较小,推测未取得基岩构造裂隙水,出水主要为新近系碎屑岩孔隙水。

表 1 各井位出水量及温度

Table 1 Water rate of flow and water temperature of geothermal wells

序号	孔号	孔深/m	取水深度/m	水量/(m ³ ·h ⁻¹)	水温/℃
1	C101	1071	623 ~ 1071	181.0	48.5
2	C201	1555	803 ~ 1555	129.6	42.5
3	C202	1405	604 ~ 1405	207.2	46.5
4	C203	1217	711 ~ 1217	183.7	53.0
5	G102	1370	551 ~ 1370	186.4	41.5
6	G203	1301	470 ~ 1301	236.1	45.5
7	G101	1427	618 ~ 1400	207.2	42.0
8	G202	1590	610 ~ 1350	61.4	41.0
平均	/	1367	/	174.1	48.5

5 结论及建议

1)通过物探数据结合地质资料分析,眉县地区具有二元结构热储特征,即新近系砂岩层状热储和古生界变质岩构造裂隙型带状热储,新近系热储具有南厚北薄的特征,且发育有向斜构造。两层热储均有着良好富水性特征,有良好的赋水介质、充足的赋水空间和较好区域水力联系,使得这一区域具有开发水热型地热资源的良好地质背景。

2)综合物探区域构造分析得出区域发育 3 条走向为 NNW 或 NW 隐伏正断层,垂向影响新近系底至基岩一定深度地层,与区域余下断裂和渭河北断裂走向一致,推测为大断裂次级平行断层,这些断层作为良好的储水空间和导水通道,可以为水热型地热资源开发提供良好条件。

3)本次钻探以 2 条主断层作为靶区断层,沿着断层倾向方向,钻穿富水性良好的基岩面风化带,钻进变质岩一定深度,在断层上盘区域布钻探井,结果出水量较好,表明了多种物探方法综合分析在隐伏带状热储勘查中的有效性和准确性。

参考文献(References):

[1] 周琛杰. 高密度电法与 AMT 在断裂构造调查中的综合应用

- [J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(3): 300-307.
- Zhou C J. Application of high-density resistivity method and AMT to the investigation of fault structure[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2017, 14(3): 300-307.
- [2] 马峰, 王贵玲, 张薇, 等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1981-1990.
- Ma F, Wang G L, Zhang W, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1981-1990.
- [3] 邱辉, 朱育坤, 李朋. 广东河源市黄村地热田地质特征及地热流体化学特征[J]. 地质与勘探, 2021, 57(6): 1391-1400.
- Qiu H, Zhu Y K, Li P. Characteristics of geology and hydrochemistry of the Huangcun geothermal field in Heyuan City, Guangdong Province[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(6): 1391-1400.
- [4] 董月霞, 黄红祥, 任路, 等. 渤海湾盆地北部新近系馆陶组地热田特征及开发实践——以河北省唐山市曹妃甸地热供暖项目为例[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 666-676.
- Dong Y X, Huang H X, Ren L, et al. Geology and development of geothermal field in Neogene Guantao Formation in northern Bohai Bay Basin: A case of the CaoFeidian geothermal heating project in Tangshan, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 666-676.
- [5] 杨询昌, 康凤新, 王学鹏, 等. 砂岩孔隙热储地温场水化学场特征及地热水富集机理——鲁北馆陶组热储典型案例[J]. 地质学报, 2019, 93(3): 738-748.
- Yang X C, Kang F X, Wang X P, et al. Hydrochemical features of geothermal reservoir geotemperature field in sandstone porosity and enrichment mechanism of geothermal water: A case study of geothermal reservoir of Guantao Formation in the Lubei[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(3): 738-750.
- [6] 李弘, 俞建宝, 吕慧, 等. 雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(2): 242-248.
- Li H, Yu J B, Lyu H, et al. Gravity and aeromagnetic responses and heat-controlling structures of Xiong-xian geothermal area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(2): 242-248.
- [7] 张攀, 陈金国, 傅清心. 英罗地区地热资源成因分析及勘查靶区预测[J]. 资源环境与工程, 2018, 32(S): 44-47.
- Zhang P, Chen J G, Fu Q X. Genetic analysis of geothermal resources and prediction of exploration targets in Yingluo Area[J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(S): 44-47.
- [8] Zheng X, Si G, Xia B. The sustainable development of geothermal resources in China[J]. Transactions-Geothermal Resources Council, 2005, 29: 321-323.
- [9] Cheng W Q, Lin J W, Tang Y X, et al. Geothermal Reinjection in Tianjin, China[C]//Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 2010: 2305.
- [10] 任战利, 陈玉林, 李晓辉, 等. 西安市地热资源可持续利用的回灌试验研究[C]//中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 2011.
- Ren Z L, Chen Y L, Li X H, et al. Geothermal reinjection test study on sustainable utilization of Geothermal-energy resources in xi'an [C]//The 27th Annual Meeting of Chinese Geophysical Society, 2011.
- [11] Duan Z, Pang Z, Wang X. Sustainability evaluation of limestone geothermal reservoirs with extended production histories in Beijing and Tianjin, China[J]. Geothermics, 2011, 40(2): 125-135.
- [12] 王兴. 渭河盆地地热资源赋存与开发[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2005.
- Wang X. Occurrence and development of geothermal resources in Weihe Basin[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2005.
- [13] 穆根胥, 李峰, 闫文中, 等. 关中盆地地热资源赋存规律及开发利用关键技术[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 39-46.
- Mu G X, Li F, Yan W Z, et al. Occurrence law and key technology of development and utilization of geothermal resources in Guanzhong Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 39-46.
- [14] 张育平, 黄少鹏, 杨甫, 等. 关中盆地西安凹陷深层地热 U 型对接井地温特征[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(6): 54-59.
- Zhang Y P, Huang S P, Yang F, et al. Geothermal features of two deep U-shape downhole heat exchangers in the Xi'an Depression, Guanzhong Basin[J]. Coal Geology of China, 2019, 31(6): 54-59.
- [15] 范基姣. 关中盆地地下水热循环模式及可更新性研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.
- Fan J J. Study on groundwater circulation model and its renewability in Guanzhong Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [16] 马致远, 郑会菊, 郑磊. 关中盆地深层热储流体锶同位素演化及其指示意义[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(1): 154-160.
- Ma Z Y, Zheng H J, Zheng L. Evolution and instruction of the strontium isotope in the deep geothermal water in the Guanzhong basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(1): 154-160.
- [17] 马致远, 吴敏, 郑会菊, 等. 对关中盆地腹部深层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 富集主控因素的再认识[J]. 地质通报, 2018, 37(Z1): 487-495.
- Ma Z Y, Wu M, Zheng H J, et al. A re-recognition of the main controlling factors for $\delta^{18}\text{O}$ enrichment in deep geothermal water of Guanzhong Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(Z1): 487-495.
- [18] 贾旭兵. 关中盆地地下热水的可更新性与回灌问题研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
- Jia X B. Study on the renewability and recharge of geothermal water in Guanzhong Basin[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [19] 马致远, 侯晨, 席临平. 超深层孔隙型热储地热水回灌堵塞机理[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 133-139.
- Ma Z Y, Hou C, Xi L P. Reinjection clogging mechanism of used geothermal water in a super-deep-porous reservoir[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 133-139.
- [20] 夏勇. 渭河盆地新生代沉积特征及与构造的关系[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- Xia Y. Sedimentary characteristics of Cenozoic strata in Weihe Basin and its relationship with tectonics[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [21] 权新昌. 渭河盆地断裂构造研究[J]. 中国煤田地质, 2005, 17

(3):1-4.

Quan X C. Study on fault structure in Weihe Basin[J]. Coalfield Geology in China,2005,17 (3):1-4.

[22] 李智超. 渭河盆地新生代岩相古地理及环境演化[D]. 西安: 西北大学,2017.

Li Z C. Lithofacies palaeogeography and environmental evolution of Cenozoic Era in Weihe Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2017.

[23] 任占利,刘润川,任文波,等. 渭河盆地地温场分布规律及其控制因素[J]. 地质学报,2020,94(7):1938-1949.

Ren Z L,Liu R C,Ren W B,et al. Distribution of geothermal field and its controlling factors in the Weihe basin[J]. Aata Geologica Sinica,2020,94(7):1938-1949.

[24] 何展翔,王永涛,刘云祥,等. 综合物探技术新进展及应用[J]. 石油地球物理勘探,2005,40(1):108-112.

He Z X,Wang Y T,Liu Y X,et al. New progress and application of integrated geophysical prospecting technology [J]. Petroleum Geophysical Exploration,2005,40(1):108-112.

[25] 陈大磊,王润生,贺春艳,等. 综合地球物理探测在深部空间结构中的应用——以胶东金矿集区为例[J]. 物探与化探,2022,46(1):70-77.

Chen D L,Wang R S,He C Y,et al. Application of integrated geo-physical exploration in deep spatial structures:A case study of Jiadong gold ore concentration area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(1):70-77.

[26] 刘新号. 基于蓄水构造类型的山区综合找水技术[J]. 水文地质工程地质,2011,38(6):8-12.

Liu X H. Integrated techniques of locating groundwater in mountain areas based on groundwater-impounding types[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2011,38(6):8-12.

[27] 伍洲云,徐宁玲,范迪富. 带状(构造裂隙型)热储地热单井保护范围确定方法探讨[J]. 水文地质工程地质,2014,41(1):149-152.

Wu Z Y,Xu N L,Fang D F. Discussions on determining the protective scope of a geothermal well in zoned (tectonic fissure type) reservoir[J]. Hydrogeology & Engineering Geology,2014,41(1):149-152.

[28] 孙中任,杨殿臣,赵雪娟. 综合物探方法寻找深部地下水[J]. 物探与化探,2017,41(1):52-57.

Sun Z R,Yang D C,Zhao X J. The application of integrated geophysical methods to the prospecting for deep geothermal resource [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(1):52-57.

Target area prediction and drilling verification of the tectonic fissure-hosted geothermal water in Meixian County, Guanzhong Plain based on the integrated geophysical exploration

HAN Yuan-Hong¹, SHEN Xiao-Long^{1,2}, LI Bing³, XU De-Cai⁴, JIA Zhi-Gang², WU Da-Lin⁴, WANG Wei², Lyu Jun³
(1. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710021, China; 2. Shaanxi Coal Geology Investigation Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710021, China; 3. Shaanxi Zhongmei New Energy Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 4. Shaanxi Provincial Coal Geophysical Prospecting, Surveying and Mapping Co. Ltd. Xi'an 710005,China)

Abstract: To achieve the goals of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality, geothermal energy has great prospects for utilization as a type of widely distributed green and clean energy. The tectonic fissure-hosted geothermal water is regarded as an important type of hydrothermal energy for development and utilization because of its high water yield and easy reinjection. This study systematically analyzed the regional structures, formation lithology, water storage space, and water yield property of the urban area of Meixian County in the west of Guanzhong Plain through the regional integrated geophysical exploration, aiming to guide the target area prediction and well placement of geothermal wells. The results show that three concealed faults are present in the target area, of which two faults with favorable water yield property and large scale can be regarded as the faults of the target area. Based on this, geothermal wells were arranged near the fault prediction lines on the hanging wall of the faults, and the weathered zones of the bedrock surfaces were penetrated vertically along the dip angles of the faults. Given the actual geological conditions, such as the faults and the burial depth of the bedrock surface, the geothermal wells had an average drilling depth of 500 m from the bedrock surface. The drilling results show that there are dual-structure thermal reservoirs in the target area, including thermal reservoirs of pore water in the Neogene clastics and those of the bedrock fissure water. Among the eight geothermal wells, seven wells have a water yield of more than 100 m³/h, which mainly originates from the bedrock fissure water, and only one well has a relatively low water yield, which is mainly sourced from the pore water in the Neogene clastics.

Key words: hydrothermal energy;thermal reservoir type;target area prediction;drilling verification;Meixian County in Guanzhong Plain

(本文编辑:王萌)