

文章编号: 1001-1749(2023)01-0061-07

地震反射波法在潼关县地热资源勘查中的应用

商磊磊¹, 王龙龙¹, 纪龙¹, 张占元¹, 周武²

(1. 陕西地矿物化探队有限公司, 西安 710043;

2. 陕西工程勘察研究院有限公司, 西安 710068)

摘要: 陕西省潼关地区北部属于深部地热资源勘查开发的空白区, 区域内无深部地球物理和钻孔资料, 地下地质情况和构造情况不明。为了查明潼关县北部古城景区地热资源分布情况, 使用二维地震反射波法进行勘查, 查明了各个时代地层的埋深及厚度、热储层位特征和断裂构造空间分布情况。在物探勘查工作基础上, 于圈定的地热有利地段布设一眼地热孔, 最终成孔深度为2 300 m, 出水量为63.2 m³/h, 温度为74℃。勘探成果表明, 地震反射波法在潼关地区地热资源勘查中具有较好的应用效果。

关键词: 潼关地区; 深部地热资源; 浅层地震反射波法; 地热成因

中图分类号: P 631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.01.08

0 引言

潼关县位于渭河盆地东部, 最新研究资料显示, 该区构造单元属固市凹陷次级构造单元固市断凹东端(图1)^[1]。固市凹陷是渭河盆地最大的凹陷区之一, 中低温水热型地热资源丰富。目前除渭南市城区附近、华县、华阴市和潼关县城分布着为数不多的地热井外, 大部分地区地热资源均未得到有效勘查与开发利用^[2]。尤其是潼关县, 仅有县城的一眼地热深井, 整个北部地区为深部地热资源开发的空白区。同时这一地区的地热资源勘查工作滞后, 地热地质条件也未查明^[3-5]。

本次研究以渭河盆地渭南市潼关县北部古城景区地热资源勘查为对象, 通过二维地震反射波法, 以期查明工区地层分布以及断裂构造空间位置特征, 进一步结合固市凹陷地热资源开发较成熟地区的地热地质资料, 推断了工区地热系统的成因、热水资源

有利的赋存部位。作者通过系统总结和研究, 初步探讨了在相似地热系统成因地区内的有效地热资源勘查方法组合。

1 地质概况

根据距工区南部6 km的县城地热孔揭露地层情况, 推测工区地层的从新到老为: 第四系秦川群(Q₂₋₄qc)、三门组(Q₁s), 新近系上新统张家坡组(N₂z)、蓝田灞河组(N₂^{1+b}), 古近系渐新统白鹿塬组(E₃b)、始新统红河组(E₂h), 太古界太华群(沉积基底)^[5]。其中, 新近系蓝田灞河组和古近系白鹿塬组、红河组为热储层, 岩性为砂岩和泥岩不等厚互层, 砂层段孔隙度较大、渗透率高、赋水性好; 第四系秦川群、三门组为沉积盖层, 岩性以黄土、粘土和粉质粘土为主, 地层孔隙度小、渗透率低、赋水性差。沉积基底太古界太华群岩性为深变质的黑云母斜长角闪片麻岩、混合片麻岩夹大理岩、石英岩、变粒岩等。

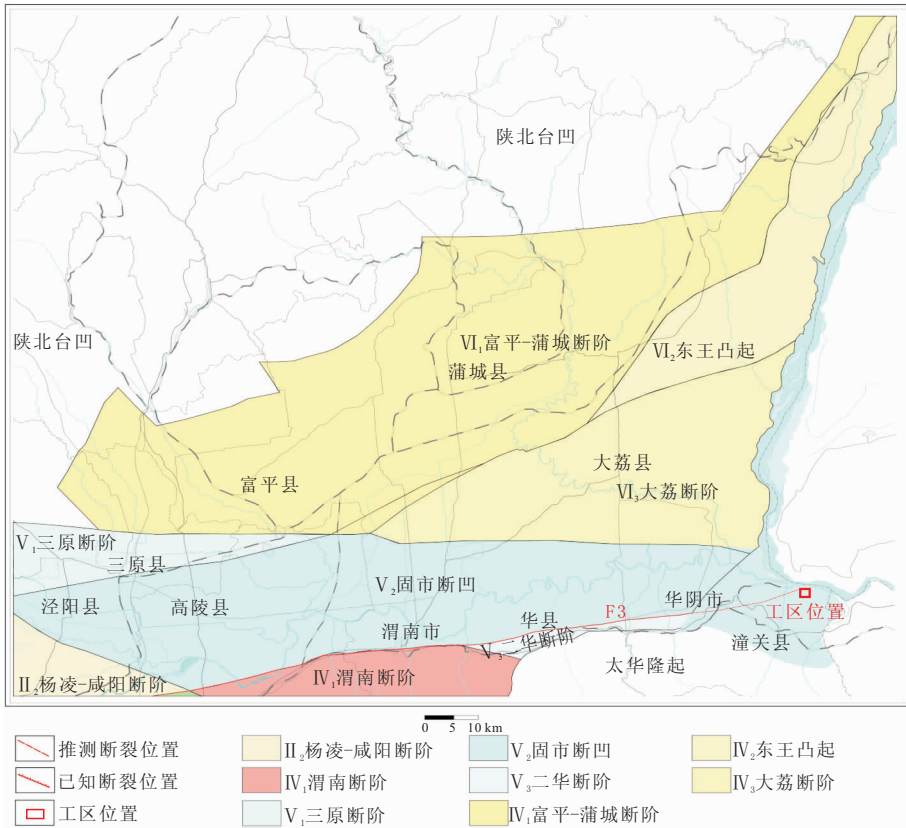


图 1 工区大地构造位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tectonic position in the work area

表 1 工区邻近地层物性特征表

Tab. 1 Physical characteristics of strata near the work area

地层	地震波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$
第四系秦川群 $Q_{2-4}qc$	600~2000	1.57~1.67(浅部)
		1.94~1.95(深部)
第四系三门组 Q_1s	2000~2200	1.95~2.17
新近系张家坡组 N_2z	2300~2600	2.10~2.30
新近系蓝田灞河组 N_2^{1+b}	2600~3000	2.17~2.37
古近系	>3200	2.32~2.53
太华群	2500~3500(破碎)	2.64~2.88
	3600~4000(完整)	

由图 1 可知,工区附近存在渭河断裂(图 1 中 F3 断裂),该断裂西起宝鸡以西,经眉县、武功、兴平、咸阳、渭南、华阴至潼关北进入河南境内后逐渐消失,延伸约 330 km,该断裂从工作区附近通过。其走向为近东西向,倾向北,倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$ 左右,为先压后张性断裂,断距较大,且随深度增加而增大,

上部错段第四系全新统地层。航磁、重力及地震剖面均显示,该断裂为基底岩相分界线^[6]。

2 地球物理特征

根据收集到的工区邻近区域地层物性资料,可



图 2 测线位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of survey line position

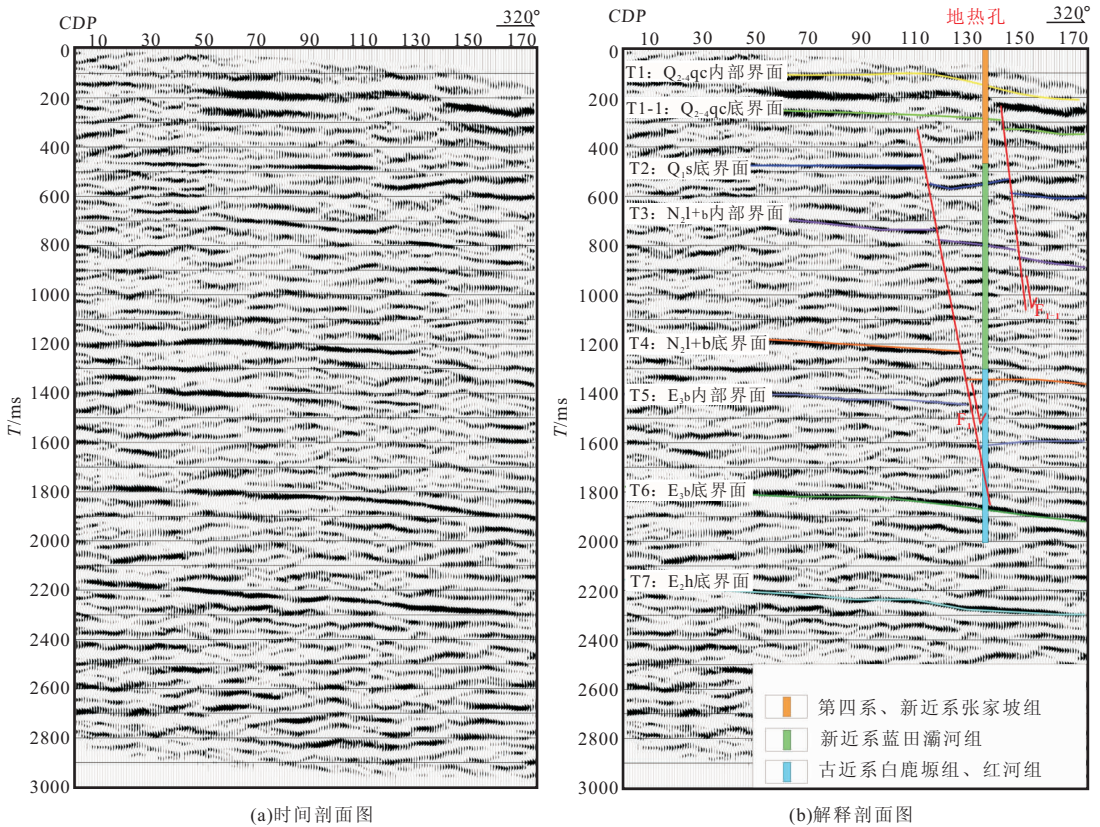


图 3 D1 测线地震水平叠加时间剖面图和解剖剖面图

Fig. 3 The seismic horizontal stacking time sections and interpretative profile

得工区邻近地层的物性特征(表 1)。

新生界内部地层在波速、密度等方面都存在一定差异,可构成 4 个大的物性层:1)第四系:密度小、地震波速低;2)新近系:密度中等、地震波速中等;3)古近系:密度大、地震波速大;4)太华群(沉积基底):

密度最大、地震波速大。

由表 1 可以看出,工区不同时代地层的地震波速和密度均存在较明显差异,进而波阻抗差异(地震波速度与密度的乘积)也比较显著,这就为地震反射波法的应用提供了良好的物性前提。

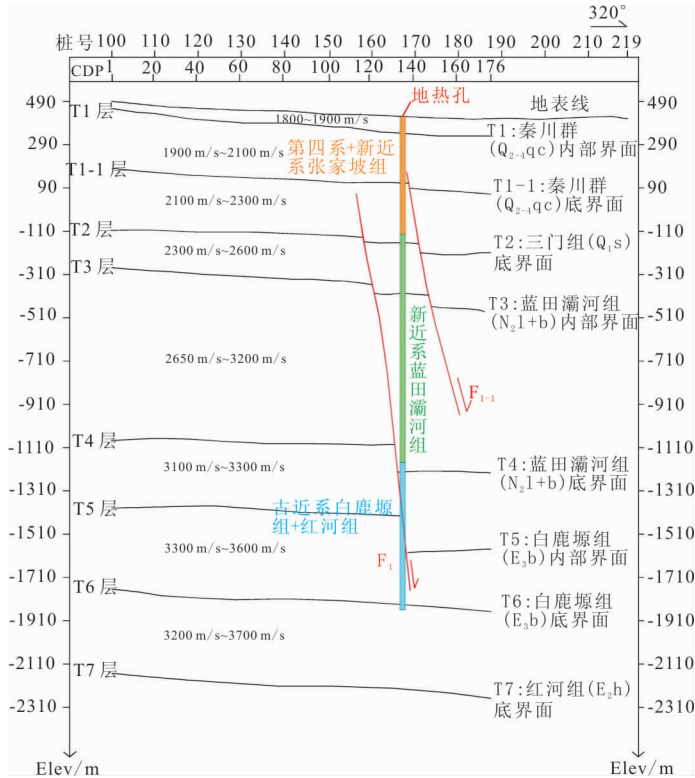


图 4 D1 测线地震地质解释剖面图

Fig. 4 Seismic geological interpretation profile of D1

3 物探方法成果分析

根据工区邻近地质情况和地热成因模式,可以推测潼关县古城景区具备以热传导为主的新生界孔隙裂隙型地热系统赖以存在的热源、热储层、盖层以及导热通道条件。综合以上信息,本次地热井论证的工作思路和工作重点是在给定的工区范围内寻找具有一定厚度的盖层、一定埋深的热储层,查明断层构造发育情况。

根据工区物性特征,采用人工源二维地震反射波法,旨在查明工区地层埋深及断裂构造空间分布特征,结合区域地质资料确定热储层分布特征。测线位置见图 2。

本次工作使用的仪器为 SE2404NT 分布式地震勘探系统(吉林大学工程技术研究所),具体采集参数为:采用单边~中间放炮反射波法,道距为 10 m,炮间距为 20 m,偏移距为 20 m,120 道接收,采样率为 1 ms,记录长度为 3 s,60 Hz、3 串 P 波检波器接收,激发孔深为 6 m,药量 5 kg~6 kg。本次工作完成地震剖面长度为 1.2 km。

对原始地震资料进行精细化处理,得到水平迭

加时间剖面(图 3(a))。从处理结果看,测线剖面波场信噪比相对较高,同相轴可追踪,波组特征清晰,反射层次丰富,局部不稳定,出现波组紊乱现象,总体结果较可靠,基本能反映地层的起伏变化及断裂构造展布特征。

3.1 层位解释

根据地震水平叠加剖面的波组特征,对各测线剖面范围内能量较强、连续性较好并可能具有一定地质意义的各反射波(组)进行了对比追踪和层位标定,定名为 T1、T1-1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 速度分层和反射界面(图 3(b))。综合分析所收集的潼关县城地热孔资料、地震处理速度分析资料以及时间剖面解释成果,得到地震地质解释剖面(图 4);各地层深度及速度特征见表 2。

从地层解释成果来看,工区新生界地层发育完整;考虑地层埋深,新近系蓝田灞河组、古近系白鹿塬组和红河组均有望成为良好热储层,以上准确的层位划分为后面地热井深度地确定提供了可靠依据。

3.2 断层解释

根据波组同相轴出现变形、连续性变差以及反射波能量的不稳定,并伴有反射波同相轴错断、强

表 2 D1 测线地震反射层标定成果表
Tab.2 Calibration results of seismic reflection layer

反射层	界面埋深/m	厚度/m	层速度/m·s ⁻¹	对应地质层位
T1	34~159	33~80	1800~1900	第四系秦川群内部界面
T1-1	309~346	227~277	1900~2100	第四系秦川群底界面
T2	598~632	250~298	2100~2300	第四系三门组底界面
T3	769~890	172~244	2300~2600	新近系蓝田灞河组内部界面
T4	1568~1636	746~816	2650~3200	新近系蓝田灞河组底界面
T5	1876~2006	300~374	3100~3300	古近系白鹿塬组内部界面
T6	2240~2280	240~425	3300~3600	古近系白鹿塬组底界面
T7	2640~2680	380~400	3200~3700	古近系红河组底界面

相位转换等特征,在地震水平叠加时间剖面上解释出两个断层,分别为 F_1 和 F_{1-1} (图 3(b))。断层 F_1 错断 T2~T5 界面,断面向下延伸到白鹿塬组底部,邻近太古界太华群沉积基底,断面北倾,为高角度正断层;断层 F_{1-1} 错断 T1-1~T3 界面,断面向下延伸到蓝田灞河组内部,断面北倾,也为高角度正断层。结合区域地质资料推测 F_1 为渭河断裂的东部延伸段, F_{1-1} 为 F_1 的次级断裂;尤其是 F_1 断裂的存在,为工区地热系统提供了良好的导热导水通道,这也使得沿 F_1 断裂附近钻成水量大、水温高地热孔的可能性大大提高。

4 地热系统成因分析

根据本次物探勘查成果结合区域地热地质资料可以分析工区的地热成因模式如下:

1)第四系秦川群和三门组厚度近 600 m,为工区稳定的隔热盖层。

2)新近系上新统蓝田灞河组、古近系渐新统白鹿塬组和始新统红河组为热储层,其中蓝田灞河组埋深较大(800 m~1 600 m)、厚度大(平均厚度近 800 m)、富水性好,是该地区最主要的热储层。

3)物探查明的 F_1 、 F_{1-1} 均为张性断裂,且 F_1 断裂切割地层为第四系三门组至古近系白鹿塬组底部,邻近太古界太华群沉积基底,是该区域良好的导热、导水通道。

4)根据潼关县城以往施工的地热井以及三普石油钻井(渭 7 孔)资料显示,该区域地温异常较明显,大地热流较高,平均地温梯度为 3.0℃/100 m~3.58℃/100 m^[5],所以深部地幔热源通过热传导为该地区地热系统提供稳定的热源。

5 钻探验证结果及讨论

综合以上物探勘查成果, F_1 断裂北侧(即断裂下降盘)附近为地热资源最有利区段。布置了一眼地热孔。为了最大限度降低成井风险,钻孔在深部穿透 F_1 断裂,以保证水量和温度。最终成孔深度为 2 300 m,取水段在 966 m~2 272 m 之间,取水层位主要为新近系、古近系砂岩孔隙裂隙型热储,同时在钻遇断裂附近存在构造裂隙型热储^[5],总出水为 63.2 m³/h,出水温度为 74℃。

5.1 钻孔揭露地层情况

新近系上新统蓝田灞河组(524.5 m~1 572.3 m,厚 1 047.3 m)、古近系(上部为白鹿塬组,下部为红河组,埋深 1 572.3 m~2 300 m,总厚度 727.7 m),未钻穿太古界太华群基底。另外该钻孔在深部成功钻遇 F_1 断裂。

5.2 地震解译成果分析

由图 3 与图 4 中钻孔揭露地层与地震解释地层对比可知,因工区新近系张家坡组地层厚度只有几十米,故其在地震反射剖面上未形成显著反射层。地震解释的第四系底界面(T2)与钻孔揭露地层的误差为+51 m,新近系蓝田灞河组底界面(T4)与钻孔揭露地层的误差为+69 m,可见地层解译精度很高。

T1~T6 均为新生界地层反射界面,在图 3 中均为能量强、连续的同相轴,代表着明显的波阻抗界面,一般均对应厚层砂岩或砾岩与厚层泥岩的分界面。钻孔未钻穿古近系地层,与地震剖面反映一致,因古近系红河组底部中砾岩与沉积基底太古界太华群深变质片麻岩存在明显波阻抗差异,故在古近系

红河组底部会形成一个强烈的反射界面,即 T7 反射界面,同时结合区域地质资料推断 T7 反射界面为红河组底界面,该界面亦是新生界与太古界太华群沉积基底的界面。

在 T7 界面以下,均为太古界太华群,水平叠加时间剖面上没有明显的波阻抗界面。分析最主要有以下两种可能原因:①太华群岩性为深变质角闪片麻岩、混合片麻岩夹大理岩、石英岩、变粒岩等,岩石致密坚硬,本身地层之间波阻抗差异小,不具备地震反射界面;②若存在波阻抗反射界面,但是因为地层埋深将近 3 000 m,受限于地震采集排列长度和震源激发能量,本次浅层二维地震在沉积基底以深分辨率低,无法有效探测基底以下地层。

钻孔在深部钻遇断裂,与地震解译的 F_1 断裂空间位置基本吻合。作者结合前人资料分析^[5],认为 F_1 断裂为渭河断裂的东部延伸段。根据区域地质资料^[1],渭河断裂为贯穿基底的深大断裂,其在深部汇交于秦岭山前大断裂,但是图 3 显示, F_1 断裂并未切穿古近系底界面,这与渭河断裂区域空间分布特征不符,故笔者分析认为, F_1 断裂到底是盆地东段逐渐消亡的渭河主断裂,还是其次级断裂,目前还是有一定疑问,由于工区附近缺乏详细的勘查资料,我们需待以后调查资料充足时,再次进行综合分析推断。

对比潼关县城地热孔,其井深 1 850 m,取水段 876 m~1 850 m,取水层位与本次施工地热孔相同,也未钻穿基底,出水量仅 27 m³/h,出水温度为 58℃。显而易见,因为 F_1 断裂的存在,使得古城景区地热孔出水量大、水温高,这充分证明了 F_1 断裂具有良好导热水性。

综上所述,本次二维地震勘查工作对工区地层和构造的解释基本准确。

6 结论与认识

本次论证成功的地热孔,是潼关县目前最深的一口地热温泉井,也是渭河断裂带和三门峡断裂带,秦晋豫金三角区域第一口地热温泉深井,它弥补了这一核心区域深井温泉的空白,社会各方均给予了高度评价,也为潼关发展古城旅游提供借鉴。

笔者在潼关县北部地区地热资源勘查的应用实例中,将目前地热资源勘查中常用的方法进行了对比分析,结合工区邻近地质资料、物性资料,确定了适用于该区域的优化物探方法,取得了良好的勘查

效果。具体得到以下结论:

1)浅层地震反射波法获得了 T1、T1-1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 合计 8 个反射界面,其中 T2、T4、T7 分别对应第四系底界面、新近系蓝田瀾河组底界面和古近系底界面(即沉积基底界面);工区附近沉积盖层 600 m 左右,新生界底界面埋深 2 600 m 左右。工区发育两条断裂 F_1 、 F_{1-1} ,均断面北倾,为高角度隐伏正断层。 F_1 上部延伸至第四系,向下延伸到白鹿塬组底部,邻近太古界太华群沉积基底,为导热水通道;断层 F_{1-1} 为 F_1 次级断裂,向下延伸到蓝田瀾河组内部。主力热储即分布于 F_1 断裂附近,表现出水量大、水温高特征,热储层包括新近系蓝田瀾河组、古近系白鹿塬组和红河组以及构造裂隙型热储。

2)浅层二维地震法,在潼关县北部地热勘查空白区取得了良好效果,其对地层划分和断裂构造的空间位置解释精度较高。目前该区域地热成因模式基本清晰,浅层地震反射波法是该地区地热资源勘查的首选方法。

3)工区新生界地层发育完整,除过没有新近系中新统高陵群之外,与固市凹陷大部分地区一致。

以上物探方法可以推广应用到固市凹陷其他地区,以期在地热资源勘查中发挥更好的效果。

随着国家环境保护要求越来越高,地热能绿色、环保的优势也越来越明显,而有效利用、合理开发地热资源的前提条件是高效、准确的地热资源勘查,如何充分发挥物探方法在地热资源勘查中的有效作用、最大程度地降低地热开发的风险,是我们今后需要持续研究的一个方向。

参考文献:

- [1] 李玉宏.渭河盆地氦气成藏条件及资源前景[M].北京:地质出版社,2018.
LI Y H. Hydrocarbon accumulation conditions and resource prospects of Weihe basin[M]. Beijing: Geological Publishing House,2018. (In Chinese)
- [2] 孙红丽.关中盆地地热资源赋存特征及成因模式研究[D].北京:中国地质大学,2015.
SUN H L. The Bearing features and genetic model for geothermal resources in Guanzhong basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015. (In Chinese)
- [3] 卡惠瑛,王双明,杨泽元,等.固市凹陷地下水水动力条件分析[J].煤田地质与勘探,2014,42(3):50-53.
BIAN H Y, WANG S M, YANG Z Y, et al. Hydro-

- dynamic conditions of geothermal water in Gushi depression of Guanzhong basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2014,42(3):50—53. (In Chinese)
- [4] 郭森. 同位素演化对固市凹陷同地下水成因分类及渭河断裂导水性的指示意义[D]. 西安:长安大学, 2016.
- GUO S. Indicating meaning of isotope evolution about the genetic classification of geothermal water in GuShi depression and Hydraulic conductivity of Weihe fault [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016. (In Chinese)
- [5] 周武. 陕西省潼关县地热水资源地质条件分析[J]. 陕西地质, 2015,33(1):90—93.
- ZHOU W. Geology of geothermal water source in TongGuan county of Shaanxi[J]. *Geology of Shaanxi*, 2015,33(1):90—93. (In Chinese)
- [6] 刘方, 穆根胥, 刘建强, 等. 陕西省关中盆地地热资源调查评价报告[R]. 西安:陕西省环境监测总站, 2008.
- LIU F, MU G X, LIU J Q, et al. Investigation and evaluation report on geothermal resources in Guanzhong basin, Shaanxi province[R]. Xi'an: Shaanxi Institute of Geoenvironment Monitoring, 2008. (In Chinese)

The application of the shallow seismic reflection method to the geothermal resources exploration in Tongguan county of Shaanxi

SHANG Leilei¹, WANG Longlong¹, JI Long¹, ZHANG Zhanyuan¹, ZHOU Wu²

(1. Shaanxi Geology and Mining Geophysical and Geochemistry Prospecting Team Co. LTD, Xi'an 710043, China;

2. Shaanxi Institute of Engineering Prospecting Co. LTD, Xi'an 710054, China)

Abstract: The northern part of Tongguan county is a blank area for deep geothermal resources exploration and development. This area has no deep hole data and geophysical exploration data, and the underground geology and structure are unknown. In order to ascertain the distribution of geothermal resources in Tongguan ancient city scenic spot, using high-resolution 2D seismic exploration, finally, we have integrated the buried depth and thickness of the strata, the characteristics of the thermal reservoir, and the spatial distribution of the fault structure in the demonstration area. Based on the geophysical prospecting work, a geothermal hole has been arranged in an excellent geothermal targets area, with a depth of 2300 m, water flow of 63.2m³/h, and a temperature of 74℃. All researches show that high-resolution 2D seismic exploration has a good application effect in the exploration of geothermal resources in Tongguan region.

Keywords: Tongguan region; deep geothermal resources; shallow seismic reflection method; geothermal genetic model