

关中盆地韩城大断裂东南部地区 地温垂向分布特征浅析

薛宇泽^{1,2}, 张玉贵³, 韩元红^{1,2}, 张廷会^{1,2}, 薛 超³,
肖踞辉⁴, 彭振洲⁴, 郭 斌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. 陕西省煤田地质集团有限公司, 陕西 西安 710021;

3. 陕西省一三一煤田地质有限公司, 陕西 韩城 715400

4. 陕西省一三九煤田地质水文地质有限公司, 陕西 渭南 714000)

摘 要: 为了进一步认识关中盆地韩城大断裂东南地区浅部地温场垂向分布特征, 利用单线多点通讯式测温光缆对研究区 50m 以浅的松散地层温度开展了为期 1a 的监测。结果表明: 该地区松散层温度在垂向上分带明显、规律性好, 可分为变温带、恒温带及增温带。变温带底面埋深为 15m, 其温度受气候影响明显, 且变温带的温度变化相对于大气的变化存在着滞后现象。恒温带深度范围为 15~35m, 平均温度 15.3℃, 比同地区年平均大气温度高 1.8℃。35m 以下地层为增温带, 推算该地区 35~100m 范围内地温梯度为 3.25℃/hm, 高于区域平均地温梯度, 推测可能有以下原因: 一是韩城大断裂作为导热通道将深部热量带到浅部地层; 二是浅部地层地下水径流强度相对较弱, 热量得以保存; 三是第四系与新近系松散层黄土厚度较大, 隔热保温性能较好。

关键词: 地热资源; 地温梯度; 垂向分布; 浅部地温场; 韩城大断裂; 关中盆地

地热资源是一种稳定和高效的可再生清洁能源, 充分开发利用地热资源是推动国家能源结构调整、实现“双碳”目标的有效途径。浅层地热能是地热资源的重要组成部分, 具有分布广、储量大的优点, 研究浅部地温场特征是开发利用浅层地热能的前提和基础, 同时对深部地热田的勘探、地热能资源的评价、地温梯度计算、油气资源勘探、矿井热害、农业种植、地下空间规划设计等方面具有重要意义。地温场的准确分析是地热能开发利用的先决条件。

王贵玲等对中国陆壳浅层地温场变温带、恒温带和增温带分布特征及影响因素进行分析总结, 认为中国陆壳浅层地温场变温带的厚度在全国范围内呈东南低, 西北、东北地区高的特征; 恒温带的温度变化特征与全国年平均气温变化趋势基本一致; 增温带 200m 深度以内的地温梯度分布、变化特征与地热场总体地温梯度变化较为一致。王均等根据大量钻孔测温资料研究了中国南部地温分布特征, 认为地温分布受地壳结构及区

域地质构造控制明显, 岩浆岩与碳酸盐岩分布区对地温有一定影响。蔺文静等计算了中国重点城市浅层地热能资源量为 2.78×10^{20} J, 折合标准煤为 94.86×10^8 t。卫万顺等在大量钻孔测温资料的基础上对北京平原区浅层地温场分布特征及影响因素进行研究, 认为区域地温场分布与构造线相吻合, 研究表明构造是控制地温分布的主要因素, 浅层地温场分布受松散层物质成分、颗粒度和密度影响显著, 水体参与使地温场状态趋于复杂。任战利等认为鄂尔多斯盆地中生代晚期地热异常区主要分布在吴旗—庆阳—富县一带, 异常地温场的形成可能与秦岭造山带燕山晚期构造活动有密切联系。杨树彪基于大量的实测数据对上海地区 200m 以浅的松散地层温度进行了研究, 对上海地区变温带、恒温带和增温带具体深度范围进行了划分, 分析了地层的导热性能及地层温度的影响因素。高世轩分析了地源热泵工程地下换热区地温场分布特征, 认为地埋管系统换热区地温场主要受气温、建筑冷热负荷、原始地温、岩土导热系

数等因素影响。王小清等以某工程为例通过设置地温监测系统进行地温监测,分析了地埋管地源热泵系统运行期地温场变化特征,结果表明换热区地温变化与地源热泵系统的运行情况呈规律性变化,系统运行对换热区外围区域地温场的影响范围有限。刘丹丹等根据西安市内布设的12口长观孔监测的一年内的月平均地温,绘制了不同时期地温随深度变化曲线,系统分析西安市浅层地温场垂向上的分布特征及其影响因素,认为西安市垂向上的分布特征有渐变升温型和升温降温交替型两种类型,影响其分布的主要因素是地质构造、地下水活动以及岩性。周阳等分析了关中盆地浅层地热能的开发利用情况、赋存特征和形成模式,认为关中盆地地热能的形成模式主要为热传导型和热对流型,并利用热储法计算出关中盆地浅层地热能热容量为 $1.38 \times 10^{16} \text{ kJ/}^\circ\text{C}$ 。关中盆地恒温带位于15~20m埋深处,导热系数与恒温层深度呈弱负相关,地表与大气间表面传热系数与恒温层深度呈弱正相关;大气温度年振幅与恒温层深度呈正相关,但受制于大气温度年振幅数值变幅有限,因此,它对恒温层数值影响范围有限;导热系数与恒温层深度呈明显的正相关。相关研究大多集中于西安咸阳地区,对于关中盆地东部地区地温场的研究很少。

1 区域概况

1.1 基本情况

韩城地区位于关中盆地东部,赋存埋藏较深的碳酸盐岩类岩溶裂隙热储。前人对该区地温场的初步研究认为韩城地区可能存在地热异常区(图1),但尚需进一步验证,总体而言该地区的地温场研究开展程度仍相对较低。选取韩城地区的

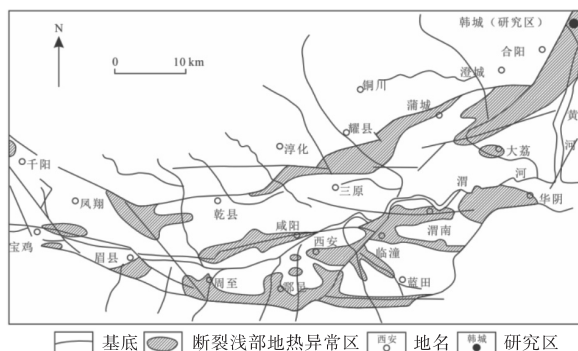


图1 关中地区浅部地热异常区分布

一口测试井,通过在井下布设温度传感器进行一年数据采集,分析浅部地层垂向分布特征,划分出变温带、恒温带及增温带,推测出地温梯度,为该区地热资源开发利用提供参考。

1.2 区域地质构造背景

研究区在构造上地处渭北隆起的东部,南接汾渭地堑系(图2),是鄂尔多斯地块东南缘与汾渭地堑的交界地带。断层为本区最为发育的构造形式,韩城大断裂为区内规模最大的断裂,北起禹门口,南至合阳、蒲城,主要表现为正断层,断层面沿走向及倾向呈舒缓波状,走向 $\text{NE}20^\circ \sim 50^\circ$,倾向南东,倾角大于 60° ,断距超过500m,至禹门口可达到1000m以上。韩城地区以该大断裂(图3)为界分为两个地貌单元:大断裂东南部为黄土台塬区,沉积了巨厚第四系松散沉积物,形成了渭河地堑的东北部地形平缓地区,是韩城市的主要农业区;大断裂西北部是以黄土梁峁景观为主的

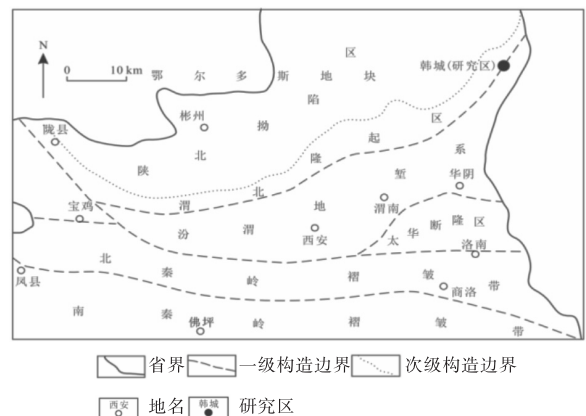


图2 关中地区区域构造划分

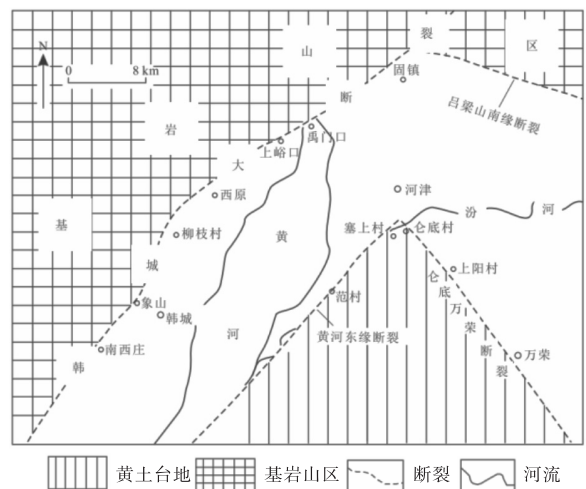


图3 韩城河津区区域构造断裂发育

低山丘陵区,区内沟谷纵横,地形复杂,是煤炭资源的主要开发区,出露的地层主要以奥陶系的石灰岩及石炭系—三叠系的砂泥岩为主。

2 测试方法

地温监测孔要选在地形平坦、地下水位浅、地表水干扰少的地段。选取韩城大断裂东南部黄土塬区一口荒废多年的农业灌溉井作为测试井(图4),井深70m,水位11m,地层主要由浅黄色、棕黄色黄土层,粉质黏土夹中细砂,砾卵石层组成,井内水态长期静止与地层温度已达平衡,能够反映出地层的原始温度。研究选用的TD-016C型总线式测温光缆由多个数字传感器通过总线串联组成,可实现连续的分布式多点温度测量,测温范围为 $-50\sim 100^{\circ}\text{C}$,精度为 0.1°C ,通过总线进行信号传输。该测温光缆具有接线简单、操作方便、精度高、抗拉性强等优点。采用测温光缆分别测量5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30, 32.5, 35, 40, 45, 50m深度处的地层温度,采集周期为2h。2020年5月开始将测温光缆从井口放入后不再移动,进行为期1a的温度测量,传感器自动记录温度数据并上传云端保存。

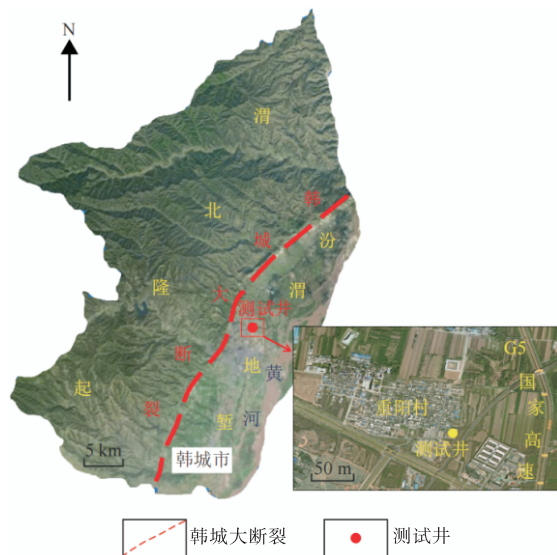


图4 韩城地区浅部测试井井位示意图

3 地温垂向分布特征

3.1 测温曲线一般特征

浅部地层的温度主要由太阳能与地球内部生热共同影响,受到浅部地层岩性、构造、水文地质

及大气温度等多方面共同影响,浅部地层在垂向上会随着气候变化划分出变温带、恒温带及增温带3个部分。

每天取12个数据的平均数作为当天温度数据,将30d的温度数据平均处理后作为当月温度数据,得到韩城大断裂东南地区不同深度地层温度变化表(表1),绘制50m以上地层温度变化曲线(图5)。从图5可以看出从2020年5月至2021年4月1个周期年期间不同时间地层温度的变化大致可分为4个阶段:①0~10m地层温度波动敏感,其中,5m处地温随时间变化剧烈,具有明显的季节性,10m处地层温度强烈收敛,受季节气候变化影响逐渐减小;②10~15m温度变化曲线进一步收敛,15m处地层温度基本汇聚;③15~35m处地层温度常年保持在 15.3°C 左右;④35~50m温度随深度的增加缓慢升高,且不随时间变化。

3.2 变温带

变温带受太阳辐射的影响,其温度有季节、年份等周期性变化,气候是影响温度的主要因素。2020年5月到2021年4月1个周期年期间(图6),5~10月大气温度高于11月至次年的4月,8月的大气温度最高,1月的大气温度最低;5m处地层,6~11月的温度高于12月至次年5月的温度,最高温度出现在9月,最低温度出现在2月,表明5m处地层温度与大气温度变化趋势基本一致,地层温度响应滞后大气温度1个月,5m以上地层受大气温度影响深远;10m处地层最高温度 16.1°C 出现在1月,最低温度 15.1°C 出现在5月,温差为 1.0°C ,并且最高温度与最低温度的出现时间几乎与气象条件相反,且由于土体导热性质,10m处地层温度响应滞后大气温度3~5个月;12.5m处地层全年最高温与最低温温差为 0.3°C ,温差进一步缩小;15m处地层温差为 0.1°C ,全年温度几乎恒定,大气温度变化对地下影响可以忽略。由此可推断:地面到地下15m为变温带,变温带的温度随气温的变化有规律地变化,地温的变化存在明显的滞后,在变温带深度范围内随深度的增加滞后时间变长。

3.3 恒温带

恒温带也称常温带,是指地表下某一深度处温度基本保持恒定不变的地带(或层),有日、月、

表 1 不同深度地层温度变化

深度 (m)	温度/℃											
	2020 年						2021 年					
	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月
大气功	21.5	24.0	24.0	24.5	20.5	12.0	12.0	7.5	1.0	6.0	10.0	13.5
5.0	13.6	16.0	17.5	19.5	19.7	18.7	15.7	14.0	11.7	10.9	11.0	11.7
10.0	15.1	15.5	15.5	15.5	15.7	15.9	16.0	16.0	16.1	15.9	15.7	15.3
12.5	15.5	15.5	15.3	15.3	15.3	15.3	15.5	15.4	15.5	15.6	15.5	15.3
15.0	15.4	15.4	15.4	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
17.5	15.4	15.4	15.4	15.4	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
20.0	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
22.5	15.2	15.2	15.3	15.3	15.2	15.3	15.3	15.2	15.2	15.3	15.3	15.3
25.0	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
27.5	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
30.0	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
32.5	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3	15.3
35.0	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4	15.4
40.0	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6	15.6
45.0	15.8	15.8	15.8	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7	15.7
50.0	15.9	15.9	15.9	15.9	15.8	15.9	15.9	15.9	15.8	15.8	15.9	15.9

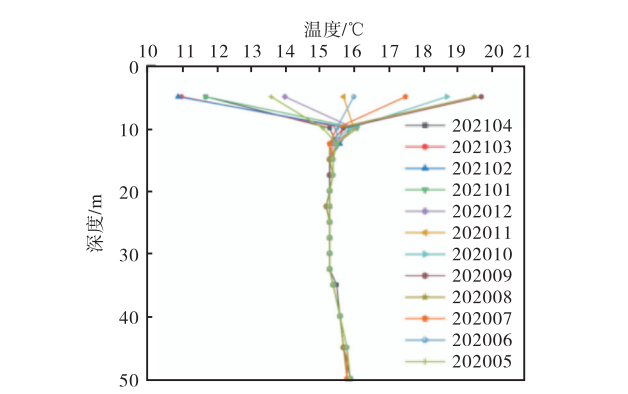


图 5 韩城地区 50m 以浅温度变化曲线

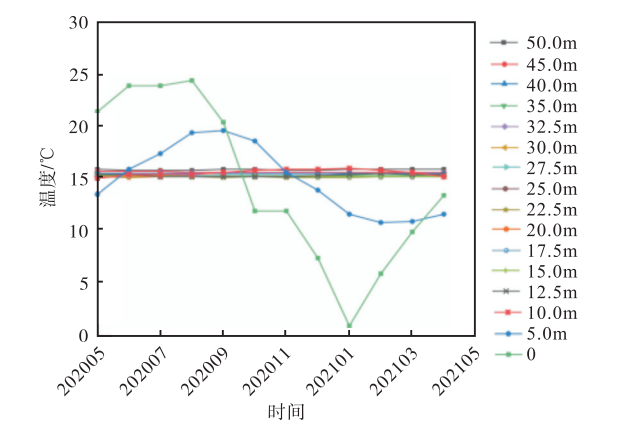


图 6 韩城地区不同深度地层温度与大气温度对比

季、年之分，通常所说的恒温带系指年恒温带。根据数据分析，韩城大断裂东南地区 15m 以下的地

层温度常年保持恒定，几乎不受大气温度的影响。深度超过 32.5m 的地层，温度略有上升，因此，确定韩城大断裂东南地区恒温带深度范围在 15.0 ~ 32.5m，厚度为 17.5m，温度为 15.3℃。韩城的年平均气温为 13.5℃，两者相差 1.8℃。恒温层的温度受多种因素共同制约，其中气候因素影响最大，控制整体变化趋势。恒温带与大气温度的关系可以表示为：

$$T_H = 0.91T_D + 3.6$$

式中：TH 为恒温带温度，℃；TD 为同位置的年平均气温，℃。

由式(1)计算得出韩城大断裂东南地区的恒温带温度为 15.885℃，而实测恒温带温度为 15.300℃，二者相差 0.585℃，说明实测数据可靠。恒温层温度比大气温度高 1.800℃，符合前人研究规律。

3.4 增温带

恒温带以下称增温带，主要受地球内部热能影响，温度随深度增加而升高。由研究区 35m 以深地层温度分布统计(图 7)可知，地层温度随着深度的增加开始缓慢升高，且其变化趋势与大气温度、季节时间无明显关联。35m 地层处的平均地温为 15.40℃，40m 地层处平均地温为 15.60℃，45m 地层平均地温为 15.72℃，50m 地层平均地温为 15.87℃。从 32.5 ~ 50.0m 之间 17.5m 的范围内温

度由 15.30°C 变为 15.87°C , 温度增加了 0.57°C , 按照地温梯度的定义计算韩城地区 $35 \sim 100\text{m}$ 地温梯度为 $3.25^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。据前人研究周边地区地温梯度小于 $3.00^{\circ}\text{C}/\text{hm}$, 故初步判断研究区为浅部地热异常区。

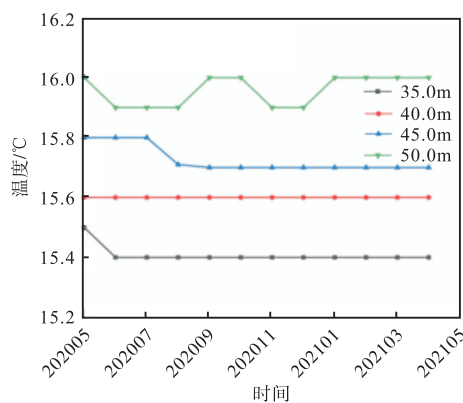


图7 韩城地区 35~50m 地层温度变化

4 浅部地温异常原因分析

(1) 韩城大断裂下盘地层受多次构造破坏, 断层节理发育, 裂隙率高, 形成网络系统, 作为导热通道在垂向上剧烈切割并沟通深部古生界奥陶系岩溶热储层, 将深部热量带到浅部地层。

(2) 测试井位于韩城大断裂东南黄土台塬地区, 沉积了数百米的第四系松散沉积物, 浅部松散层的孔隙水由于受到地形地貌的控制, 河流切割严重, 地下水径流方向统一性差, 多数由圆心流向两侧河谷, 黄土台塬区唯一的补给途径是大雨或暴雨产生地表迳流后沿“流海缝”裂隙入渗补给地下水。受补给量的限制, 径流强度相对较弱, 地表径流条件好, 大气降水以面流和片流的形式很快排泄到沟谷流走, 含水层的补充有限, 导致韩城大断裂东南黄土台塬区浅部地层地下水活动不丰富。

(3) 大断裂南部第四系与新近系松散层黄土厚度大, 作为深部岩溶热储的盖层, 有利于隔热保温。

综上所述, 韩城大断裂作为通道将地球深部热量传导上来, 由于黄土台塬浅部松散层含水不丰富及较弱的径流强度和浅部巨厚第四系与新近系松散层的保温作用, 共同造成研究区地温梯度高于周边地区。

5 结 论

基于实测数据对关中盆地韩城大断裂东南地区浅部地层温度在垂向上的分布特点进行分析, 得出以下主要结论:

(1) 韩城大断裂东南地区地温垂向分布分带明显、规律性好, 可分为变温带、恒温带及增温带。

(2) 变温带的范围从地面到地下 10m, 地温受大气影响显著, 其温度随气温的变化而有规律地变化, 对比大气温度有明显的滞后性, 5m 以浅地层滞后大气温度 1 个月, 地下 5~10m 地层滞后大气温度 3~5 个月。

(3) 地下 15m 附近及更深处, 季节性的气温变化的影响较小。韩城东南地区恒温带深度范围为 15.0~32.5m, 厚度 17.5m, 温度 15.3°C , 比大气温度高 1.8°C 。

(4) 韩城大断裂东南地区浅部地温体温度梯度高于区域平均地温温度, 推测可能有以下原因: ①韩城大断裂作为导热通道将深部热量带到浅部地层; ②浅部地层地下水径流强度相对较弱, 热量得以保存; ③第四系与新近系松散层黄土厚度较大, 隔热保温性能较好。

转自《油气藏评价与开发》, 2022, 12(6): 843-849.

上接第 33 页

洱源是大理州乃至云南省温泉资源最丰富的地方之一, 温泉出水口温度为 $70^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 以上, 享有“五里一泉, 十里一汤”、“中国温泉之城”等美誉, 是大理州实施地热(温泉)资源综合利用的主战场与主阵地。洱源县水热联供中心项目(EPC)

建成落地后, 有望成为涵盖“地热发电、高端设施农业、地热烘烤、地热供暖、温泉旅游康养”等方面的综合开发利用的高质量发展的样板、标杆、示范。

转自地热加 APP