

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2019.03.11

引用格式: 周阳,张卉,江星辰,等. 陕西省恒温层深度主要影响因素及其估算[J]. 中国地质调查,2019,6(3): 81-86.

陕西省恒温层深度主要影响因素及其估算

周阳^{1,2}, 张卉^{1,2}, 江星辰³, 许泽润^{1,2}, 王克^{1,2}, 穆根胥^{1,2}

(1. 陕西省地质调查院, 西安 710054; 2. 陕西省水工环地质调查中心, 西安 710068; 3. 中圣环境科技发展有限公司, 西安 710000)

摘要: 恒温层深度的预测与地热能开发利用、地下空间建设等密切相关, 陕西省区域恒温层的研究工作进展较慢。通过探讨恒温层深度的影响因素认为: 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; 导温系数与恒温层深度呈明显的正相关。介绍并验证了一种土壤恒温层深度的计算方法, 通过该方法, 计算了全省不同地貌单元恒温层深度的理论值。全省恒温层深度介于 10.5 ~ 23.8 m 之间: 陕北地区恒温层深度为 10.5 ~ 23.8 m; 关中盆地恒温层深度为 11 ~ 17.4 m; 陕南地区恒温层深度为 11.7 ~ 18.6 m。该研究系统地划分了陕西省区域恒温层的深度范围, 为陕西省“绿色”追赶超越政策的实施做出贡献。

关键词: 恒温层; 导温系数; 数理统计; 深度; 陕西省

中图分类号: TK521.2; P314.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2019)03-0081-06

0 引言

恒温层是指太阳辐射热向地表下释减与地球内热向地表传导释热在一定深度温度达到平衡的界面, 此处地温年变化幅度接近于零, 其埋藏深度称为恒温层深度。同一纬度地区日照强度基本相同, 在恒温层以上太阳能影响大于地球内热传导影响, 地温受地表空气温度影响强烈; 在恒温层以下地温受地球内热控制, 随深度增加而逐渐增高, 其热量主要来自地球内部热能。

恒温层深度是地层温度场的重要指标。浅层地热能开发利用^[1-4]、农业地质及农业温室、地下空间建设等都需要对地层岩土体温度做出预测和评价。学者对于大陆恒温层温度和深度的发育规律已有一定的认识^[5-9], 也进行了局部海域恒温层的研究^[10-11], 城市工程地层地温分布规律的观测

研究^[12-14]取得了一定的成果, 但关于区域恒温层的研究较少。陕西省位于中纬度地区, 四季分明, 供暖制冷需求量大, 地热能开发利用前景广阔; 关中盆地古称天府之国, 农业发达; 随着城镇的发展, 地下空间的开发建设已然是大势所趋。恒温层深度对地热能、农业地质、地下空间开发利用都至关重要, 查明陕西省恒温层深度的分布特征已迫在眉睫。

本文依托前人的研究成果, 通过野外调查、实验分析、地温监测、数理统计等方法, 分析了恒温层深度的影响因素, 计算了陕西省不同地貌单元恒温层的深度范围, 结合实际的监测数据, 认为计算结果符合实际情况。

1 研究区概况

1.1 气象水文

陕西省位于我国大陆腹地, 属典型的大陆性季

收稿日期: 2018-09-04; 修订日期: 2019-02-20。

基金项目: 陕西省公益性地质调查专项“陕西省大中型城市浅层地热能调查评价(编号: 20130202)”、陕西省公益性地质工作项目“陕西省浅层地热能赋存规律及开发利用关键技术研究(编号: 20170201)”、中国地质调查局“陕西省关中盆地地热资源调查评价(编号: 1212010535416)”和“陕西省主要城市浅层地温能开发区 1:5 万水文地质调查(编号: 12120114086501-15)”项目联合资助。

第一作者周阳(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水工环地质工作与研究。Email: 77196410@qq.com。

风气候。冬季寒冷干燥,降水稀少;夏季温暖潮湿,降水量大。全省由南至北随纬度增加分为3个气候带:陕南亚热带,湿润、半湿润;关中暖温带,湿润、半湿润;陕北温带、暖温带,半干旱、半湿润。年平均气温为5.9~15.7℃,年平均降水量为676.4 mm,气温和降水分布均由南向北递减。

陕西省内以秦岭为界,南北分属长江、黄河两大流域。前者面积占全省面积的35.1%,后者为64.8%。长江流域主要河流有汉江、丹江等;黄河流域有无定河、延河、渭河等。全省水资源总体贫乏,地域分配不均。

1.2 水文地质

根据自然地理、地质条件所形成的南北差异、水文地质分带性特点,将全省划分为陕北黄土高原、关中盆地和陕南秦巴山地3个水文地质区。

陕北黄土高原区普遍为上覆黄土及沙层孔隙潜水与下伏碎屑岩孔隙、裂隙承压水的双层叠置,仅在北山一带有碳酸盐岩类裂隙溶洞水的分布。全区富水性弱,仅在构造条件优越的西部白垩系厚层较疏松砂岩区富水性较好。

关中盆地具有第四系松散岩类典型盆地的水文地质特征,砂砾卵石及粉质黏土层厚度大,构成稳定的含水空间,潜水与承压水丰富。

陕南秦巴山地区不同含水岩类的岩层相互交接,地下水的特征受地貌、岩性与构造的严格控制,富水性分布极为不均,秦岭南、北坡富水性较弱,山间盆地富水性较好。

1.3 地形地貌

陕西省总体地势南北高、中间低、西部高、东部低,自北向南可分为5个地貌单元:风沙高原区、黄土高原区、关中盆地、秦巴山地区(秦岭山地区和大巴山地区)及汉中—安康山间盆地(图1)。

1.4 地层岩性

1.4.1 风沙高原区

本区地貌单元可分为沙漠滩地、河谷阶地和沙盖黄土梁岗3类^[15]。上部地层为粉细砂、粉土,下部为粉土,部分河谷阶地下部地层为砂岩或砂质泥岩。

1.4.2 黄土高原区

黄土高原在新近纪末起伏和缓的准平原基础上,经历第四纪以来多次黄土堆积和侵蚀作用,地形破碎,沟壑发育。根据形态特征可分为5种地貌类型:沙盖黄土梁岗、黄土梁岗及黄土塬、黄

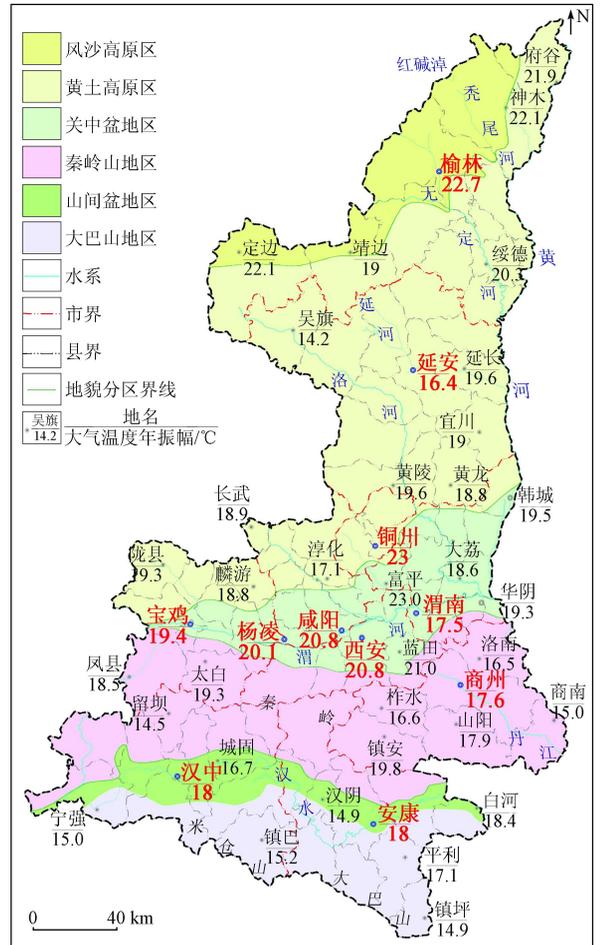


图1 陕西省地貌分区图

Fig. 1 Geomorphological zoning map of Shaanxi Province

土梁塬涧地、河谷阶地和土石中低山。地层以粉细砂、黄土和粉质黏土为主,土石中低山地层为砂岩。

1.4.3 关中盆地

关中盆地为西狭东阔的新生代断陷盆地,盆地由冲积平原、洪积平原和黄土台塬组成,呈阶梯状地貌景观。冲积平原上部地层为粉质黏土及粉土,下部为砂层,部分高级阶地地表覆盖黄土。南部秦岭山前洪积平原地层以粗粒物质为主,北部北山山前洪积平原以细粒物质为主。黄土台塬区地层为黄土,一级黄土台塬黄土厚100余m,二级黄土台塬黄土厚度一般小于100m。

1.4.4 山间盆地

本区包括汉中盆地、西乡盆地和安康盆地,发育一到四级阶地。一级阶地地层为黏土、粉砂及卵石;高级阶地地层为粉土、粉砂及砾砂。

1.4.5 秦巴山地区

秦巴山地区以中山地貌为主体,山间断陷盆地

较多,汉江谷地贯穿于秦岭和巴山之间。中、高山区地层以花岗岩及片麻岩为主; 低山、丘陵区地层以千枚岩、花岗岩和石灰岩为主。

2 恒温层深度影响因素及计算方法

2.1 恒温层深度影响因素

土壤恒温层深度的主要影响因素包括导热系数、导温系数、地表与大气间表面传热系数和大气温度年振幅4项^[6]。

导热系数与恒温层深度呈弱负相关,随着导热系数的增加,恒温层深度缓慢下降。地表与大气间表面传热系数与恒温层深度呈弱正相关,随着地表与大气间表面传热系数的增加,恒温层深度缓慢上升。大气温度年振幅与恒温层深度呈正相关,随着大气温度年振幅的增加,恒温层深度上升较快。陕西省乃至中纬度地区,大气温度年振幅理论值多介于15~25℃之间,因此对恒温层实际深度影响较小。导温系数对恒温层深度影响较大,导温系数越大,温度的传递越迅速。

2.2 恒温层深度计算方法

2.2.1 土壤自然温度场

土壤自然温度场呈年周期性变化,其计算公式为^[6]

$$T(x, t) = T_{am} + (T_{max} - T_{am}) \times \varphi \times \exp(-x \sqrt{\frac{\pi}{at_0}}) \times$$

$$\cos\left(\frac{2\pi t}{t_0} - x \sqrt{\frac{\pi}{at_0}} - \Psi\right), \quad (1)$$

$$\varphi = \left(1 + 2 \frac{\lambda_1}{a_2} \sqrt{\frac{\pi}{at_0}} + 2 \left(\frac{\lambda_1}{a_2} \sqrt{\frac{\pi}{at_0}}\right)^2\right)^{-0.5}, \quad (2)$$

$$\Psi = \tan^{-1}\left(\frac{1}{1 + \frac{a_2}{\lambda_1} \sqrt{\frac{at_0}{\pi}}}\right), \quad (3)$$

$$a_2 = 11 + 7\sqrt{v}, \quad (4)$$

式中: $T(x, t)$ 为 t 时刻 x 深度处的土壤温度,℃; T_{max} 为一年内最高日均气温,℃; T_{am} 为年均气温,℃; t 为距离最热大气温度时间,s; t_0 为年周期时间,s; a 为土壤导温系数, m^2/s ; λ_1 为土壤导热系数, $W/(m \cdot K)$; a_2 为地表和大气间表面传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; v 为年均风速, m/s 。

2.2.2 恒温层计算方法

由余弦公式特征可知,深度 x 处的土壤温度振幅(A)为

$$A = (T_{max} - T_{am}) \times \varphi \times \exp(-x \sqrt{\frac{\pi}{at_0}}), \quad (5)$$

当 $x \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{x \rightarrow \infty} A = 0$ 。随着 x 的增加,土壤温度的振幅逐渐衰减,收敛于零。对于任意给定的正数 ξ , 当达到一定的深度 H 时,土壤温度振幅 $A \leq \xi$, 此时的深度 H 可以视为恒温层深度。因此当深度 $x \geq H$ 时,年温度振幅在 ξ 之内,此时 H 即为恒温层深度,计算公式为:

$$H = \frac{\ln[\varphi \times (T_{max} - T_{am}) / \xi]}{\sqrt{\frac{\pi}{at_0}}}. \quad (6)$$

根据以上推导公式可以求取不同地区的恒温层理论深度。公式中的年均温、最高日均温、年均风速等数据由中国气象网或区县志查询所得,年周期时间指一个自然年时间。导热系数和导温系数选取地表下20m以浅岩层的综合导热系数和导温系数。通过采集全省岩土样品测试数据,以格罗布斯判据剔除异常值,得到不同地貌单元、不同岩性的导热系数和导温系数。由于恒温层是指地层温度的变化幅度等于零的地带,笔者认为当地温变化幅度 $\xi \leq 0.1$ ℃,即进入恒温层。

将咸阳市和延安市的气象、地质参数代入公式,通过对比理论结果(咸阳市14.5m,延安市10.5m)和实际地温监测曲线图,认为理论计算结果基本符合实际规律(图2、图3)。

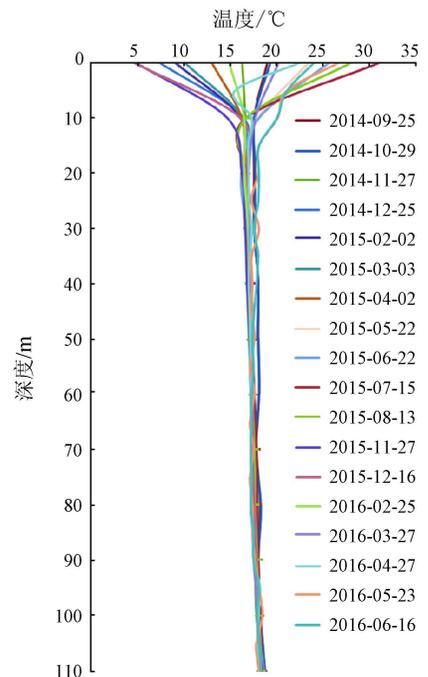


图2 咸阳地温变化图

Fig. 2 Stratatum temperature column in Xianyang

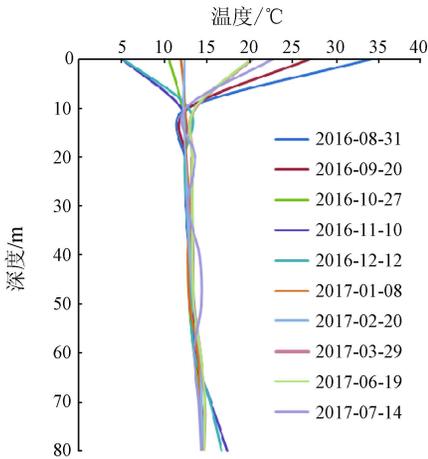


图3 延安地温变化图

Fig. 3 Stratum temperature column in Yan'an

3 陕西省恒温层分布

利用土壤恒温层深度计算方法,结合气象、地质资料,得出陕西省不同地貌单元恒温层的深度范围。

陕西省恒温层深度为 10.5 ~ 23.8 m。其中,陕北风沙高原区为 11.6 ~ 19.7 m,黄土高原区为 10.5 ~ 23.8 m; 关中冲洪积平原区为 11.1 ~ 17.4 m,黄土台塬区为 11.0 ~ 16.0 m; 陕南山间盆地区为 11.7 ~ 18.2 m,秦巴山地区为 14.7 ~ 18.6 m(表 1)。

通过对比恒稳层深度的理论值和实测值,发现 26 组实测数据中的 24 组落入理论数据的区间内,仅陕北风沙高原区内存在 2 处实测数据稍大于理论值,即沙漠滩地区的榆林市榆阳区盖排梁村(实测 17.0 m,理论 16.9 m)、河谷阶地区的榆林市榆阳区桥头村(实测 20.0 m,理论 19.7 m)。认为本文所用理论公式基本符合实际,可靠性较高。

如前所述,导温系数对恒温层深度影响较大。风沙高原区内的沙漠滩地区和沙盖黄土梁岗地层以导温系数较低的粉细砂、粉土为主,最大恒温层深度为 17.8 m,而河谷阶地区的砂岩地层由于导温系数较大,最大恒温层深度可达 19.7 m。在黄土高原区南部中低山区,受砂岩导温系数较大的影响,

表 1 陕西省恒稳层深度分布表

Tab. 1 Distribution of constant - temperature layer depth in Shaanxi Province

地区	地貌单元	次级地貌单元	恒温层深度 (理论值)/m	平均风速/ (m·s ⁻¹)	大气温度年 振幅/°C	恒温层实测数据
陕北地区	风沙高原	沙漠滩地区	12.5 ~ 16.9	2.2 ~ 3.2	19.0 ~ 22.7	榆林榆阳区盖排梁村 17.0 m
		河谷阶地	11.6 ~ 19.7			榆林榆阳区刘官寨乡 19.0 m, 桥头村 20.0 m
		沙盖黄土梁岗	11.9 ~ 17.8			榆林榆阳区新开沟村 16.0 m
	黄土高原	沙盖黄土梁岗	11.8 ~ 18.1	1.3 ~ 5.6	14.2 ~ 22.1	铜川市耀州区良种示范繁殖场 17.0 m
		黄土梁塬、黄土塬	10.5 ~ 17.4			延安市宝塔区李渠镇 10.5 m
		河谷阶地	10.5 ~ 17.8			
		土石中低山	10.6 ~ 23.8			
关中西地	冲积平原	低级阶地	11.1 ~ 17.0	1.3 ~ 2.0	17.5 ~ 20.8	杨凌永安村 13.0 m, 西安高陵区坡底村 11.5 m, 联庄村 14.0 m, 咸阳秦都区大泉村 14.5 m, 渭南临渭区杜王村 12.0 m, 张义村 13.5 m, 信义村 13.5 m, 段刘村 13.0 m, 宝鸡市金台区张家村 14.0 m, 南堡村 13.0 m
		高级阶地	11.8 ~ 17.0			咸阳渭城区底张镇 17.0 m, 渭南临渭区阆张村 16.0 m, 宝鸡市金台区王家河村 15.5 m
	洪积平原	秦岭山前洪积平原	12.4 ~ 17.2	1.3 ~ 2.0	17.5 ~ 20.8	
	北山山前洪积平原	11.5 ~ 17.4				
	黄土台塬	黄土台塬	11.0 ~ 16.0	2.0 ~ 2.3	17.1 ~ 23.0	宝鸡市金台区胜利村 16.0 m
陕南地区	山间盆地	一级阶地	11.7 ~ 16.2	1.3 ~ 2.1	14.9 ~ 18.0	商洛市商州区张村镇 15.5 m, 沙河子镇 16.0 m 安康市汉滨区建民镇 14.0 m
		二、三级阶地	12.4 ~ 18.2			安康市汉滨区新城办 15.0 m, 张滩镇 14.0 m 汉中市汉台区胡家村 18.0 m
	秦巴山地	高山	17.1 ~ 18.5	0.7 ~ 2.7	14.5 ~ 19.8	
		中高山	15.6 ~ 17.2			
	中山	15.2 ~ 18.6				
	低山丘陵	14.7 ~ 17.9				

深度可达 23.8 m。陕南地区恒温层深度为 11.7 ~ 18.6 m,其中秦巴山地区受导热系数较大的花岗岩、片麻岩和千枚岩影响,恒温层深度数值整体偏高,达到 14.7 ~ 18.6 m。

4 结论

(1)基于陕西省的气候气象、工程地质、水文地质、地形地貌特征资料,计算了全省不同地貌单元的恒温层深度理论值,认为全省恒温层深度为 10.5 ~ 23.8 m。

(2)在其他因素不变的前提下,探寻单一变量的改变对恒温层深度的影响,研究认为: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。

恒温层深度的准确分析直接关乎区域地热能、尤其是浅层地热能资源的评价,是开发利用浅层地热能的先决条件。对恒温层深度规律的研究,有利于推动地热能的开发利用。

致谢: 本文在野外工作及后期写作过程中得到了陕西省地质调查院闫文中教授级高级工程师、李锋教授级高级工程师的指导与帮助,同时参与野外工作的还有赵智强、桂忠强、宋巧莲、朱红玉等,在此表示衷心感谢!

参考文献:

- [1] 周阳,邓念东,王凤,等. 浅层地热能适宜性分区结构的分形原理[J]. 中国地质调查,2017,4(1):18-23.
- [2] 周阳,穆根胥,刘建强,等. 典型地貌单元浅层地热能资源量赋存规律研究[J]. 地质科技情报,2018,37(4):238-244,268.
- [3] 周阳,穆根胥,张卉,等. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质,2017,44(5):1017-1026.
- [4] 周阳,张卉,桂忠强,等. 岩土体综合导热系数影响因素研究[J]. 中国地质调查,2018,5(1):87-91.
- [5] 王婉丽,王贵玲,朱喜. 暖温带地区恒温层温度的预测方法[J]. 可再生能源,2016,34(8):1112-1116.
- [6] 刘晓燕,赵军,石成,等. 土壤恒温层温度及深度研究[J]. 太阳能学报,2017,28(5):494-498.
- [7] 张杰,王兴春,赵敬洗,等. 河北沽源、饶阳地区浅层地温场特征[J]. 物探与化探,2013,57(2):237-241.
- [8] Wu L L. A study on the thermal field of the soil in urban forest[J]. J Nanjing Forest Univ,2003,46(1):21-26.
- [9] Fan A W, Liu W, Wang C Q. Simulation on the daily change of soil temperature under various environment conditions[J]. Acta Energ Solaris Sin,2003,24(2):167-171.
- [10] 刘文通,徐德伦,侯伟,等. 渤海中部海域海底热扩散率及恒温层深度研究[J]. 青岛海洋大学学报,1994,24(4):485-490.
- [11] 刘文通,徐德伦,王正林,等. 渤海中部海底恒温层温度及泥温相位随深度变化特征[J]. 海洋与湖沼,1995,26(5):460-465.
- [12] 杨智国. 西安地铁沿线地层地温夏季分布规律观测研究[J]. 西安科技大学学报,2012,32(5):610-616.
- [13] 任建喜,刘嘉辉,高虎艳,等. 西安地铁沿线地层地温春季分布规律观测研究[J]. 铁道工程学报,2012,29(3):101-106.
- [14] 任建喜,高廷廷,冯晓光,等. 西安地铁沿线地层秋季地温分布规律原位观测分析[J]. 现代隧道技术,2013,20(4):146-151.
- [15] 周阳,邓念东,张卉,等. 榆神矿区首采煤层及上覆岩层工程地质特征[J]. 中国地质调查,2018,5(5):91-97.

Influencing factors of constant - temperature layer depth and its estimation in Shaanxi Province

ZHOU Yang^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2}, JIANG Xingchen³, XU Zerun^{1,2}, WANG Ke^{1,2}, MU Genxu^{1,2}

(1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Geological Survey Center of Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology, Xi'an 710068, China;

3. Zhongsheng Environmental Technology Development Co, Ltd, Xi'an 710000, China)

Abstract: The prediction of the constant - temperature layer depth is closely related to geothermal energy development and underground space construction. Progress of research on regional constant - temperature layer in Shaanxi Province is relatively slow. This paper discusses the influencing factors of the constant - temperature layer depth and the results show that there is an inverse correlation between the thermal conductivity and the constant - tem-

perature layer depth. And the surface heat transfer coefficient between the surface and the atmosphere is positively correlated with the constant - temperature layer depth. Besides, the annual amplitude of the atmospheric temperature is positively correlated with the constant - temperature layer depth. The thermal conductivity coefficient and the constant - temperature layer depth showed a significant positive correlation. This paper describes and validates a method for calculating the constant - temperature layer depth. And the authors calculated the theoretical value of constant - temperature layer depth for different geomorphic units by using this method. The constant - temperature layer depth is between 10.5 m and 23.8 m for the whole province and is between 10.5 m and 23.8 m in northern Shaanxi Province, with 11 ~ 17.4 m in Guanzhong Basin and 11.7 ~ 18.6 m in southern Shaanxi Province. The depth range of the regional constant - temperature layer in Shaanxi Province has been systematically divided in this research and this paper has contributed to the implementation of Shaanxi's "Green" Catch-up and Transcendent policies.

Key words: constant - temperature layer; thermal conductivity; mathematical statistics; depth; Shaanxi Province

(责任编辑:刘永权)