

面向地热温度动态监测的光纤实时传输技术应用研究

刘清晓

北京市地质矿产勘察院

摘要:在开发利用地热资源过程中,为达到采灌均衡,需要对地热温度开展动态监测。文章基于分布式光纤实时传输技术,对雄安新区地热井进行动态监测,揭示热储层温度及其动态演化特性。研究结果表明,光纤实时传输技术能够显著提高地热温度监测的效率和精度,为地热资源的勘探与开发提供了有力的技术支持。地热井地温梯度可以达到 $5.33^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{m})^{-1}$,具有良好的地热条件。由于非供暖期热恢复特性,储层温度会有一定上升,然后趋于稳定。从光纤监测的储层深度和时间演化方面,储层热量受其他地热群井开采的影响,其温度在供暖期会下降。该光纤实时传输技术可以实现动态测温的低成本和高效率,可以进一步推广到其他地热田监测。

关键词:地热能;光纤测温;非供暖期;雄安新区;温度演化

地热资源,作为地球内部储存的巨大热能,具有极高的经济价值,是可再生能源领域的重要组成部分(王贵玲等,2020)。近年来,随着全球能源危机和环境问题的加剧,地热资源的开发利用受到了越来越多的关注(Sharmin et al.,2023)。地热资源的勘探和开发过程面临着诸多挑战,其中一个关键问题是如何实现对地热温度的动态监测(王卓卓,2021),以便准确掌握其动态变化规律,为科学开发和合理利用提供有力支持(殷肖肖等,2024)。

传统的地温监测方法,如钻探、地球物理勘探等,虽然取得了一定的成效,但也存在着诸多局限性(程宇等,2024)。这些方法通常成本高昂、操作复杂,且难以实现对地温的实时、连续监测。因此,探索新的监测技术,提高监测的效率和准确性,成为地热资源研究领域亟待解决的问题(Ma Jingchen et al.,2024)。光纤传感技术作为一种新兴的监测技术,以其高精度、高灵敏度、抗干扰能力强等优点,在地热资源监测领域展现出广阔的应用前景。特别是光纤实时传输技术,能够实现数据的快速、准确传输,为地热资源的实时监测提供了强有力的技术支撑(张辉等,2023)。

自20世纪90年代以来,随着光纤传感技术和解译技术不断进步,其在国际地热开发中的应用越来越广泛。1996年,加拿大首次实现了安装光纤传感器进行温度分布测量,将光纤下入地热生产井,进行供暖前后一定时间段地温监测,分析地热开发利用后地温恢复情况。1997年,法国、德国、冰岛、美国、日本等也开始使用光纤测试系统,将光纤下入专门监测井,开始进行供暖前后一定时间段地温监测,在一定时段分析地热资源开发利用对地温场的影响(Brown,2010;IKEDA Naotsugu et al.,2003)。1999年,英国将光纤下入专门监测井并开展长期连续监测,分析地热资源开发利用对地温的影响。我国开展地热资源动态监测工作的城市主要有北京、天津、重庆、雄安新区以及山东、陕西、河南、广东、福建省部分地区,监测内容以水位、水量、水温、水化学为主(史启朋等,2023;方鹏飞等,2021;王伟,2022)。其中,北京、天津和雄安新区分别针对自身地热地质条件出台了监测规范规程,建立了较完善的地热监测系统,监测技术水平较高(马峰等,2023)。然而,地热监测手段以传统的井下温度计方式定期测量,对于温度的实时反馈和井下热恢复过程不能

很好地反映,因此开展面向地热资源动态监测的光纤实时传输技术应用研究具有重要的理论价值和实践意义。

本文采用分布式光纤实时传输技术,对雄安新区牛驼镇地热井进行地温动态监测。该项技术在国内属于首次应用于水热型地热采灌条件下地温长期实时监测。通过对地温的实时监测,可以更加准确地掌握地热资源变化情况,为地热资源的合理规划和开发利用提供科学依据。同时,该技术还可以为地热资源的保护和管理提供有力支持,促进地热资源的可持续利用。

1 研究区概况

1.1 地质概况

研究区位于雄安新区牛驼镇,根据地热井完井报告及区域地层资料,地热井自上而下钻遇地层为第四系、新近系明化镇组和蓟县系雾迷山组(余鸣潇等,2023;王永波等,2016)。1)第四系(Q)根据地热井完井报告,地热井第四系埋深在372.9~444 m,与区域地层沉积规律相符。该层为一套灰黄色、棕黄色亚黏土,亚砂土及灰白色中细砂河湖相沉积物,结构松散。2)新近系明化镇组(Nm)该层岩性为黄褐、棕褐、棕红带紫色泥岩、砂质泥岩与灰绿、浅灰、深灰色细砂岩、粉细砂岩、粉砂岩、中细砂岩、砂岩不等厚互层,为河湖相沉积物,底板埋深约900 m,沉积厚度约500 m。3)蓟县系雾迷山组(Jxw)该层岩性为碳酸盐岩地层,主要包括灰岩和白云岩。该类地层的主要容水空间是裂缝和溶蚀孔洞。顶板埋深约900 m,揭露厚度约为300 m,储厚比为30%。

1.2 地热特征

蓟县系雾迷山组为地热利用热储层,岩性为燧石结核条带白云岩,致密坚硬。该储层岩溶裂隙较发育,顶板埋深约900 m,揭露厚度为200~300 m。岩溶裂隙发育段占地层厚度的30%左右,出水温度80℃左右,出水量约80 m³·h⁻¹,水化学类型为Cl-Na型,pH为7~8,总矿化度3 000 mg·L⁻¹左右。

1.3 监测井特征

研究区地热井包含开采井、回灌井和监测井

(图1),地热井的类型均为水热型地热井。根据实际采灌情况,本次研究考虑两采两灌,其中X193号回灌井和X195号开采井为一对井,X192号回灌井和X190号开采井为一对井。监测井编号为R059,深度为1 285 m。在两对采灌井动态开采过程中,实时监测R059号井温度的动态变化。

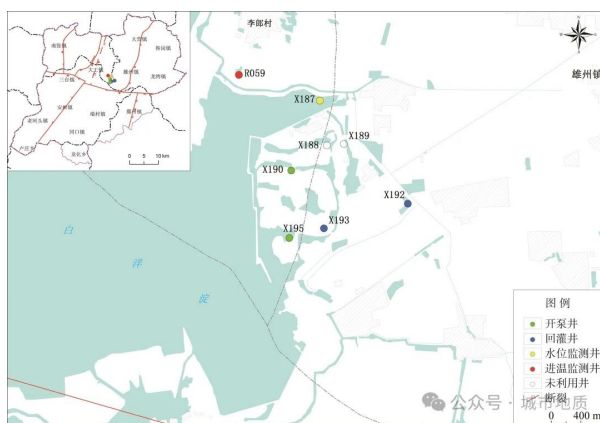


图1 研究区位置及地热群井分布图

2 光纤实时传输技术应用

2.1 光纤监测原理及方法

光纤传输技术是一种利用光的传输媒介进行信息传输的技术。光纤具有传输速度快、传输距离远、带宽大、抗干扰能力强等优点,因此在通信、数据传输、网络连接等领域有着广泛的应用。以该项技术为核心研发的分布式光纤测温装置是一款连续分布式光纤温度传感系统,它采用先进的OTDR技术和Raman散射光对温度敏感的特性,探测出沿着光纤不同位置的温度变化,实现真正分布式的测量,其技术原理主要由拉曼散射原理和光时域反射(OTDR)原理构成(赵晓鹰等,2019)。

2.2 光纤监测设备

全井温度监测设备包括深井分布式光纤测温系统和测温光缆。DBDTS-2000型深井分布式光纤测温系统是一种用于实时测量空间温度的传感系统,在系统中光纤既是传感介质也是传输媒体。利用光纤的拉曼光谱效应,光纤所处空间各点温度场调制了光纤中传输的光载波,经解调后实时地显示光纤所在空间的温度值;利用光时域反射

(OTDR)技术,由光纤中的光传播速度和背向光回波时间,可对所测各温度点定位,如图2所示。



图2 分布式光纤测温系统测温主机

GX-W-1B1-1A1a-GBB-8.0型测温光缆采用双层钢丝铠装(图3),保证足够的抗拉伸能力,内置多层不锈钢管和内护层有效保护纤芯,外护层光滑耐摩擦,减少上体、下方阻力,其温度测量量程为 $-30\sim 150^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

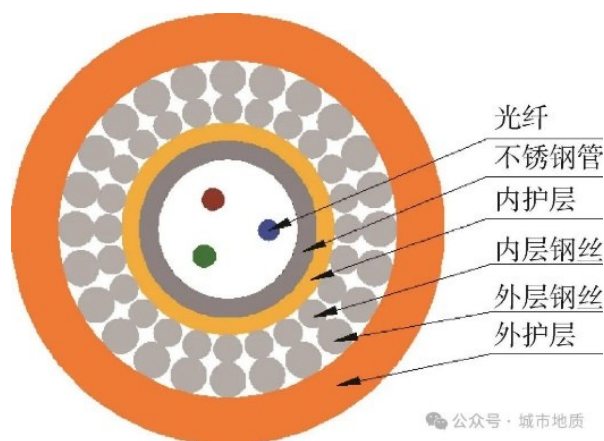


图3 测温光缆截面示意图

2.3 动态监测过程

R059号地热井底有沉积物堆积,二开台阶严重偏心,套管内有橡胶圈、扳手等落物,为保证光缆顺利安装,采用尾端配重、二开变径位置扶正、垂直入井、井口悬挂的安装方式安装全井测温光缆,安装示意图见图4。通过定制井口承载盖、光纤滑轮、光纤悬挂装置和加重杆等,保证光缆固定于井口。

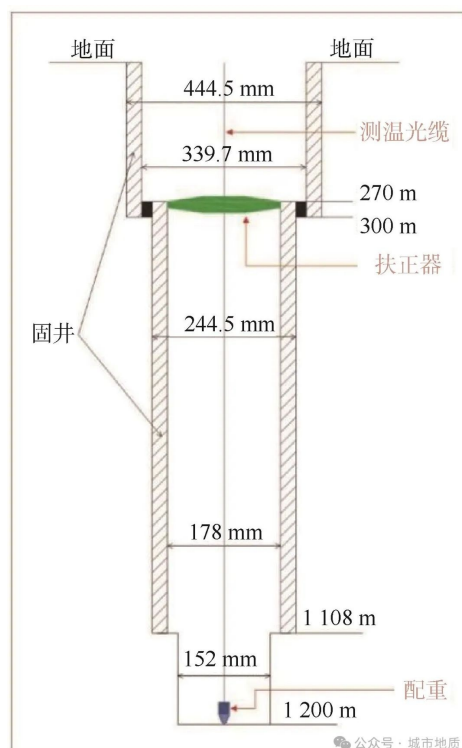


图4 全井温度监测设备安装示意图

光纤监测设备于2023年3月22日安装,随即进行校正调试,自2023年3月22日至6月14日,调试期85 d,后进入稳定监测期。光纤实时测温设备采样时间:2023年6月15日至2023年12月10日,共179 d,采样间隔4 h,垂向采样密度1 m·点 -1 ,监测深度1 200 m。为验证该方法监测的可靠性和高效性,在监测过程中采用地球物理测温方法同步监测。

3 结果与分析

3.1 地温场垂向分布特征

通过对R059号监测井中5月份的地球物理测温数据与光纤测温数据进行对比,发现地温在200 m以浅数据波动较大,不足以说明二者之间的对应关系。故利用光纤测温数据计算地温梯度时,第四系平原深度按200~390 m计算,得出地温梯度为 $5.33^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$,与同范围内地球物理测温结果相差 1.88°C ,表明光纤实时测温技术在准确度上是可靠的(图5)。

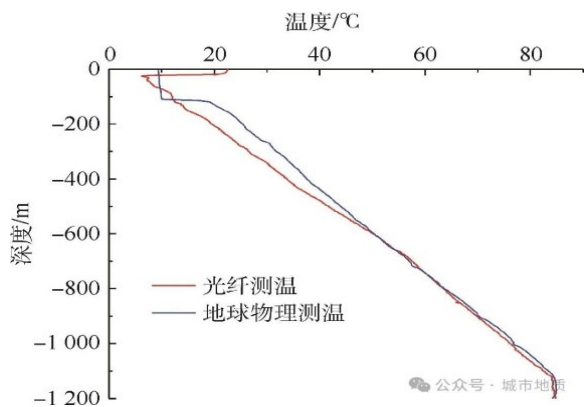


图5 R059井温度场垂向演化曲线

研究区供暖是季节性的,每年11月15日到次年3月15日,在非采暖季可以监测到地热井热恢复特性。图6表示R059监测井在非采暖季储层光纤测温数据演化曲线,可以看出热储层地温整体波动在77.5℃至83.5℃之间。从时间上看,非供暖季地温较高,主要是因为在此过程中受大地热流的影响,热恢复在热储层中一直进行,且随着热恢复时间的增加,储层温度也逐渐增加。从深度上看,1120 m前后出现明显温度拐点,1120 m以深储层增温率降低,说明在非采暖季地温演化过程中,不同深度大地热流值不同,受热恢复效果也有差异。

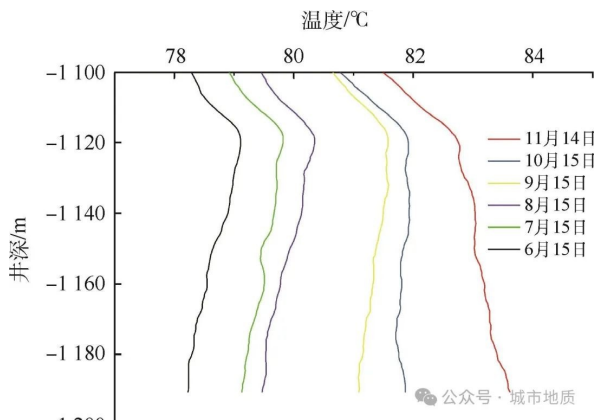


图6 非采暖季R059井光纤垂向测温演化曲线

图7表示R059监测井在供暖季光纤测温演化曲线,可以看出在采暖季,储层地温整体波动在66.0℃至74.0℃之间,较非供暖季波幅降低10℃左右,主要是受两对采灌井在供暖季开采回灌的影响,热量被地面建筑物利用。其地温随深度的变化趋势与非采暖季相近,供暖期地层增温率基本

一致。采暖季储层地温波动幅度比非采暖季小,主要是因为R059号监测井距离采灌井有一定距离,在供暖季会对监测井热储层温度产生影响,其受大地热流的影响程度不如非供暖季高。

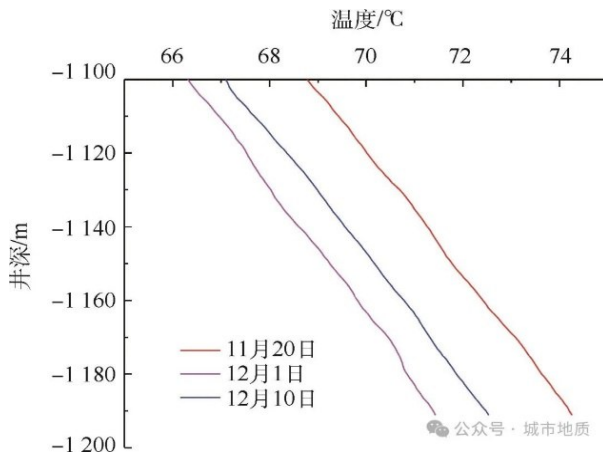


图7 供暖季R059号井光纤垂向测温演化曲线

3.2 温度场动态演化特征

在非采暖季中期(7月15日)、末期(10月10日),采暖季初期(12月5日),分别选取盖层浅部(350 m)、中部(750 m)以及储层浅部(1115 m)、中部(1150 m)、深部(1180 m)地温数据,分析地温动态特征。从图8表示R059井温度随深度演化曲线,可以看出非采暖季盖层增温率略大,接近储层部位增温率升高,进入储层后增温率降低。进入采暖季后,盖层、储层增温率与非供暖季末期变化规律基本一致,表明在地热资源开发利用过程中,由于该地地温条件良好,对远端的地温影响较小。

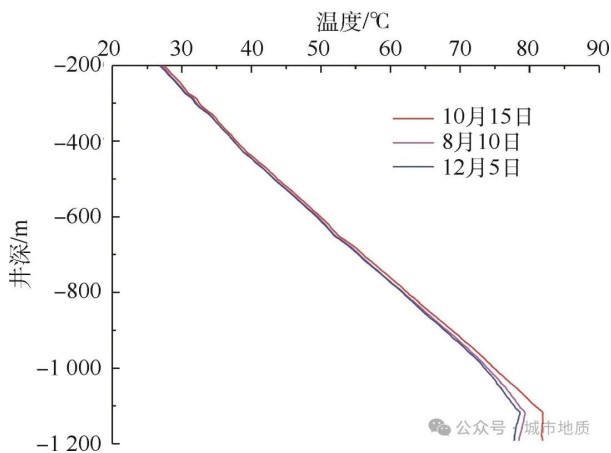


图8 不同时间地温随深度动态演化曲线

热盖层温度演化反应出研究区“热毯”作用,其温度的变化对于热储层保温效果有较大影响。对于R059号监测井,非供暖季中期盖层浅部(第四系)及盖层中部(明化镇组上段)地温波幅较小,地温变化较为稳定,波幅为 $2 \sim 3^{\circ}\text{C}$ 。供暖季开始后,受地热开采和大地热流的共同影响,盖层浅部地温波动明显,但相对稳定在 35°C 上下,盖层中部整体地温延续非供暖季变化趋势,延续波动,相对稳定在 58°C 上下,如图9所示。

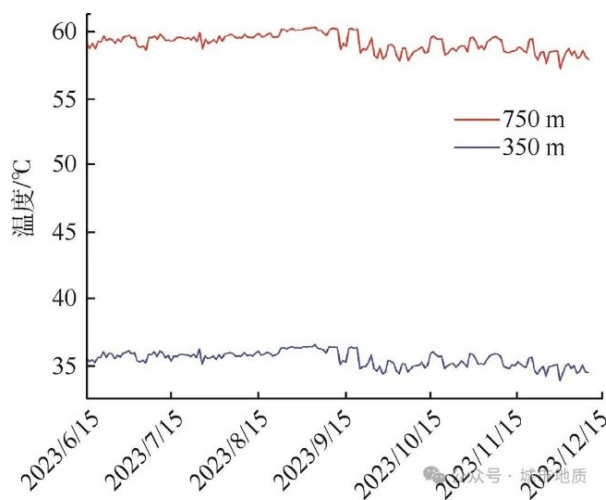


图9 热盖层不同深度地温动态演化曲线

对于热储层,供暖季开始后,地温呈下降趋势,如图10所示。主要是因为随着供暖期开始,储层热量被快速提取,其热流来不及补偿,温度会有一定降低。因此,综合地温动态监测结果,从空间角度分析,盖层、储层各层段地温变化趋势基本一致。从时间角度分析,采暖季同深度盖层地温变化相对稳定,储层地温呈下降趋势。

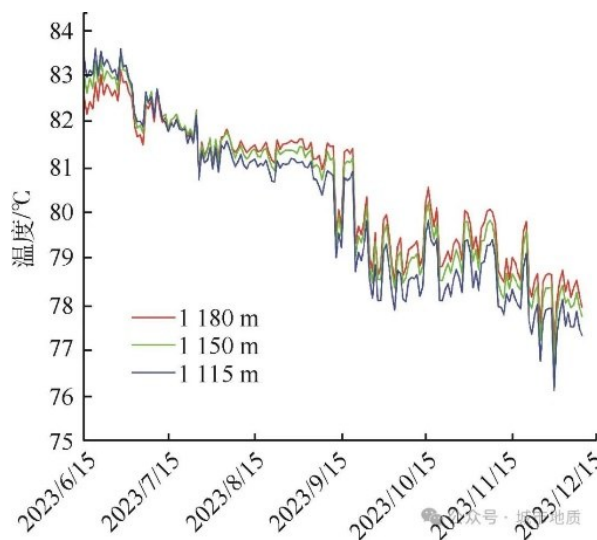


图10 热储层不同深度地温动态演化曲线

4 结论

通过对雄安新区地热群井采灌过程中进行开发利用,基于光纤实时传输温度监测技术,分析了地热监测井供暖季和非供暖季温度场动态演化规律,明确了光纤实时传输技术在地热资源开发利用中的应用价值,得出结论如下:1)通过对地温监测数据分析,数据稳定性和可靠性较强,利用光纤实时传输技术进行地温场动态监测是可行的。2)光纤实时传输技术可以在时间和空间上得到对应的井温数据,地温梯度为 $5.33^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 。3)非采暖季热盖层地温整体变化稳定,热储层地温趋于稳定,受热恢复影响增温率相对高,后期地温逐渐趋于稳定。4)从空间角度分析,盖层、储层各层段地温变化趋势基本一致;从时间角度分析,采暖季期间,同深度盖层地温变化较为稳定,储层地温呈下降趋势。

转自《城市地质》,19(3):275-280