doi: 10.12029/gc20210320

李济琛,陈明珠,汤强,刘春,梁立唯,Peter Bayer. 2021. 南京市浅层地温场研究——基于分布式光纤测温技术[J]. 中国地质, 48(3): 939−947.
Li Jichen, Chen Mingzhu, Tang Qiang, Liu Chun, Liang Liwei, Peter Bayer. 2021.Study on shallow geothermal field in Nanjing: Based on distributed optical fiber temperature measurement system [J]. Geology in China, 48(3): 939−947(in Chinese with English abstract).

南京市浅层地温场研究——基于分布式光纤测温技术

李济琛[1],陈明珠[2],汤强[1],刘春[1],梁立唯[1],Peter Bayer[3]

(1.南京大学 地球科学与工程学院,江苏 南京 210023;2.江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018;3. Institute of Geosciences and Geography, Martin-Luther University Halle−Wittenberg, Von Seckendorff−Plat 3, 06120 Halle (Saale), Germany)

提要:浅层地热能作为新型能源受到了国际国内的广泛关注,常规的电阻式温度传感器受电磁干扰,不适合长期在野外复杂环境中使用。本文应用抗干扰能力强的分布式光纤测温技术,对南京市19个百米深钻孔进行地温测量,获得了2018年冬季与2019年春季南京市浅层地下温度分布。综合南京市水文和地质条件,得出结论:浅层地温的变化相对于气温的变化存在着滞后现象;对于同一地点的浅层地温,地下水的流动会使得地温在不同季节出现差异;构造条件显著影响着南京市浅层地温分布。本项研究结果为南京市浅层地热能的利用分区与进一步开发提供参考。

关 键 词:浅层地热能;分布式光纤;地下水;洁净能源工程;南京

中图分类号:P314;TK521 **文献标志码**:A **文章编号**:1000−3657(2021)03−0939−09

Study on shallow geothermal field in Nanjing: Based on distributed optical fiber temperature measurement system

LI Jichen[1], CHEN Mingzhu[2], TANG Qiang[1], LIU Chun[1], LIANG Liwei[1], Peter Bayer[3]

(1. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing* 210093*, Jiangsu, China;*
2. *Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing* 210018*, Jiangsu, China*;*3. Institute of Geosciences and Geography, Martin−Luther University Halle−Wittenberg, Von Seckendorff−Plat 3, 06120 Halle (Saale), Germany*)

Abstract: Shallow geothermal energy has attracted extensive attention at home and abroad as a new type renewable energy. Resistance temperature sensors, as susceptible to electromagnetic interference, are not suitable for long−term use. The distribution−based fiber optic temperature measurement technology with strong anti−interference ability was used in 19 boreholes to a depth of 100 meters in Nanjing City. In the winter of 2018 and spring of 2019, the distribution of shallow uground temperature in Nanjing was obtained from the 19 boreholes. Based on the hydrological and geological conditions in Nanjing, it is concluded that the change of shallow ground temperature is lagged relative to the change of air temperature. For the shallow ground temperature in the same location, the flow of groundwater will lead to different ground temperature in different seasons. Structural conditions significantly

收稿日期:2019−09−25;**改回日期**:2020−01−05

基金项目:国家自然科学基金项目(41761134089,41977218)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20170393)联合资助。

作者简介:李济琛,男,1996年生,硕士生,主要从事浅层地热能研究; E − mail: ljc_nju@smail.nju.edu.cn。

通讯作者:刘春,男,1984年生,副教授,硕士生导师,长期从事计算工程地质科研工作;E − mail: chunliu@nju.edu.cn。

affect the distribution of shallow ground temperature. The results can provide a reference for the utilization and further development of shallow geothermal energy in Nanjing.

Key words: Shallow geothermal; distribution- based optical fiber sensing technology; ground water; clean energy engineering; Nanjing

About the first author: LI Jichen, male, born in 1996, master candidate, engaged in the study of shallow geothermal; Email: ljc_nju@smail.nju.edu.cn

About the corresponding author: LIU Chun, male, born in 1984, associate professor, majoring in computational engineering geology

Fund support: Funded by National Natural Science Foundation of China(No.41761134089,No.41977218) and Jiangsu Natural Science Foundation Youth Project(No. BK20170393).

1 引 言

浅层地热能是指地表以下0~200 m蕴存的低温能量，是一种绿色、可再生、储量大且分布广泛的能源（卫万顺等，2010）。中国浅层地热能潜力巨大，31个省会城市80%的土地面积适合开发浅层地热能，可替代标准煤4.67亿t（王婉丽等，2017）。了解地温场特征是地热能开发的关键，全国各地都有学者陆续开展地温场的调查工作（周阳等，2017）。不同地区地温特征并不完全一致，但完整的地质体内地温场分布多以热传导为基础（洪增林等，2019），即浅层地温场由介质和边界温度决定，而地温场研究的复杂则在于自然条件下的温度边界与介质情况是极其多样且难以确定的。从垂直方向看，地温场主要有上、下两个边界。上边界包括气温与人类活动等，对比南京市地表以下40 cm内的温度与气温后会发现，浅表地温的变化趋势与气温相同（王宝军等，2009）；对Basel地下水温度场的模拟则能看到，人类活动等会造成城区地下水温度高于郊区（Epting and Huggenberger，2013）。地温场的传热学下边界主要为区域的大地热流，基底起伏也会影响浅层地温场分布，并在基岩隆起区会形成高温（王贵玲等，2017）。对于传热介质，不同岩土体热物性质有所差异，即使同一岩层，不同的时代、岩石密度等也会导致热导率的不同，进一步控制地温场的分布（卫万顺等，2010）。此外，地下水的渗流也会对地温场产生影响：东京地区受地下水的垂向渗流影响，地下温度改变，表现为地下温度-深度曲线的偏移（Taniguchi et al.，1999）；对北京平原地区浅层地温调查则发现（王新娟等，2010），受地下水水平径流影响，地下热异常区地温在迎水一侧高于背水一侧，且同一地温异常区内，靠近地下水上游的地温等值线较密，靠近地下水下游的地温等值线较稀疏。

由前述可知，地温场是多种因素共同作用的结果，不同地区考虑的影响因素难以完全相同，相较于建立一个统一的模型评估不同地方，查清每个地区特点并单独分析评价更为合理。回顾全球部分城市浅层地热的研究现状后可以看到（Bayer et al.，2019）：未来，浅层地热综合利用的工作重点在于有效监测手段的建立与地热空间分布特点的查明。南京作为中国浅层地热能利用的先驱城市，已在多个城区开展了试点工作。但在对南京市浅层地温利用现状的研究中却发现（鄂建等，2015），南京市浅层地热能的利用存在“开发利用超前，调查评价与专项规划相对落后”的情况。同时，在南京市以往的浅层地温调查中，地温测量多采用电阻式温度传感器，对南京市范围的测温大多只进行一次。而为了查清地温基本特征以及初步探明影响地温的关键因素，本次研究将应用分布式光纤测温技术对南京市地温场进行多次测量。

本次研究在南京（除溧水与高淳外）地区的钻孔内布设了传感器，于2018年冬季以及2019年春季对南京市地下百米内的地温进行测量。在获得实测地温资料的基础上，分析了南京市地温特征，并对比南京市地质资料，探究了影响南京市地下温度的因素，为南京市浅层地热能的进一步的开发利用提供服务。

2 研究区概况与数据获取

2.1 研究区概况

南京市位于江苏省西南部、长江下游，南起31°

14′N，北抵32°37′N，西起118°22′E，东迄119°14′E，东西最大横距约70 km，南北最大纵距约150 km，市域平面呈南北长东西窄展开，面积6587.02 km²。属亚热带季风气候，年均气温15.4℃，春秋短、冬夏长，夏季温度高达40℃，冬季温度低至−10℃。

地质构造复杂，位于宁镇弧形构造和宁芜盆地交接处，区内褶皱、断裂发育。南京市三面环山，属丘陵地貌，受长江、秦淮河、滁河等影响，河漫滩发育。

2009年，南京市被列入国家级可再生能源示范城；2012年，南京市国土资源局开展南京市浅层地热能调查评价项目，在南京市除溧水区、高淳区外共布设50口百米深取样钻孔。本次研究主要利用了这些钻孔，但受城市建设等原因影响，到2018年项目开始时，共找到19口约100 m深的钻孔用于测温（图1）。

本次研究在每个钻孔内都布设了温度传感器，每次测温只需带测温仪器去采集温度数据。这样可以避免传感器放入过程对孔内温度的影响，确保传感器温度与地下温度一致。但由于研究区范围较大，考虑到经济与人力等因素，短期内完成全部钻孔的测量或者全年内对同一孔进行多次测量都比较困难。综合气候、经济等因素，最终确定监测总体按季节进行，目前已在全区进行了2次地温测量：一次从2018年12月10号到2019年1月20号，用以反映冬季地下温度；一次在2019年4月，用以反映春季地下温度。

图1 研究区钻孔分布

Fig.1 Distribution of boreholes in the study area

2.2 监测仪器介绍

传统地温测量多采用电阻式温度计，其精度较高，但很难做到分布式测温，这可能会漏测部分地温数据，而分布式测温光纤系统DTS（Distributed Optical Fiber Temperature Measurement System）可以避免这个问题。同时，此次测温环境复杂，外界干扰因素多，而基于拉曼散射的DTS具有高灵敏度、耐腐蚀、抗电磁干扰等特点，是野外长期监测传感器的首选（张青等，2018）。本次研究主要使用苏州南智传感科技有限公司生产的NZS−DTS−A03型便携式分布式光纤温度解调仪和温度自动校温箱，空间分辨率为0.41/0.42 m，测温精度为±0.5℃。光纤为直径5 mm的多模塑封铠装光纤，平均损耗为0.224 db/km。

然而在野外冬季寒冷、夏季高温的极端环境下，应用分布式光纤测温系统测量地温也可能会出现问题。在对仪器的测试中主要发现以下三点：(1)受传感系统结构限制，信号传输的每个环节都会引入噪声，最终采集到的数据也携带一定的噪声，影响精度，固然可以通过提高系统信号功率和减少噪声功率的方法提高信噪比，但这并不经济；(2)尾端测得温度通常会偏低；(3)实际使用过程中，受便携式仪器稳定性等限制，测得的温度可能与真实温度存在整体偏差。为此，在进行野外试验前，有必要通过室内测试获得一套可靠的野外测量方案。

2.3 室内试验与仪器校正

如图2，室内准备120 m长铠装光纤，将刻度0~15 m段与刻度85~100 m段光纤分别卷起放入恒温箱中，并在恒温箱中插入2根精度为0.1℃的水银温度计；光纤尾端拉出恒温箱悬空，首端连接温度补偿箱，再由温度补偿箱连接DTS测温仪采集数据。试验时，恒温箱共设置20℃、30℃、40℃三个温度；当恒温箱在设定温度稳定下来后，启动DTS测温，同时读取水银温度计示数；为削弱仪器不稳定的影

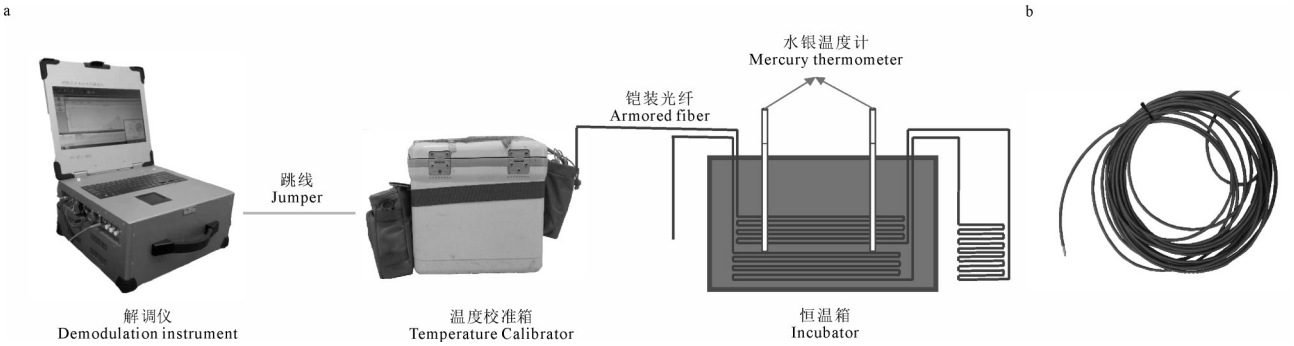

图2 室内测试装置示意图(a)及铠装光纤实物图(b)

Fig.2 A schematic diagram of the indoor test device(a) and a physical image of the armored fiber(b)

响,每个温度梯度下的测温过程维持20 min,取这20 min内DTS测温结果的算术平均值为实测温度。恒温箱从20℃升高至40℃后,逐级降回30℃、20℃,重复测量过程。

升温降温测试结果类似,此处取一次测试结果为例。如图3,噪声对实测温度约有0.5℃的影响,且仅和仪器自身有关,不随温度或光纤长度等变化,所以首先对测试结果进行去噪处理。这类噪声具有白噪声的特点,可以选择合适的算法去除噪声(张桂涛和张红光,2005)。传统的去噪算法有三种,叠加平均、小波变换和线性编码,观察测试结果,在尝试不同算法后,最终选定小波变换的算法进行去噪。

考虑光纤测温长度对测温精度的影响,对比不

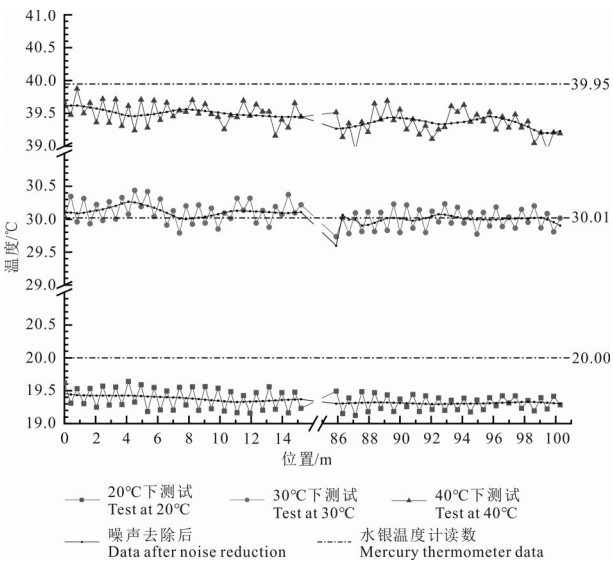

图3 室内测试及其降噪处理

Fig.3 Indoor test and data noise reduction

同温度下0~15 m(首段)与85~100 m(尾段)数据可知,20℃下0~15 m首段与尾段温差基本在0.1℃以内,30℃下首段约比尾段高0.2℃,40℃下首段约比尾段高0.1℃。说明随着光纤测量长度的增加,尾段测得温度会偏低。这是分布式光纤测温系统工作原理造成的:测温系统通过Stokes和Anti-Stokes光强度之比解调得到温度的,然而这两种光在光纤中衰减并不同,造成尾端温度偏低;尽管仪器可以根据理论计算校正这个值,但光纤依然可能存在弯折、熔接等损耗造成误差。不过,从试验结果看,仅就100 m左右的测量长度内,尾端比首段仅低0.1~0.2℃,20℃下工作最好。

对比不同温度下降噪后数据与温度计测得温度可知,20℃测得结果比温度计整体偏低0.7℃,30℃下测得结果与温度计差值在0.15℃以内,40℃下测得结果整体偏低0.6℃。说明DTS测温结果存在着系统误差,但温度的偏差是整体性的,可以通过其他高精度温度传感器(如高精度的PT100)来对光纤测温进行整体校正。

2.4 野外测量方案

野外钻孔通常深100 m左右,且南京市地下温度在18℃左右,综合室内试验结果,得到以下野外地温测量方案:(1)在钻孔内布设约100 m长铠装光纤,利用DTS测温仪获取至少20 min的稳定数据;同时,在孔内放入一个导线长约22 m的PT100,从地表开始逐米测量地下温度(图4);(2)对光纤测得数据进行降噪处理,对比22 m内光纤与PT100数据,获得光纤测温整体偏差值;(3)将光纤测得温度加上整体偏差值,获得实际地下温度。

以钻孔sg43为例(图5),对DTS测量数据进行

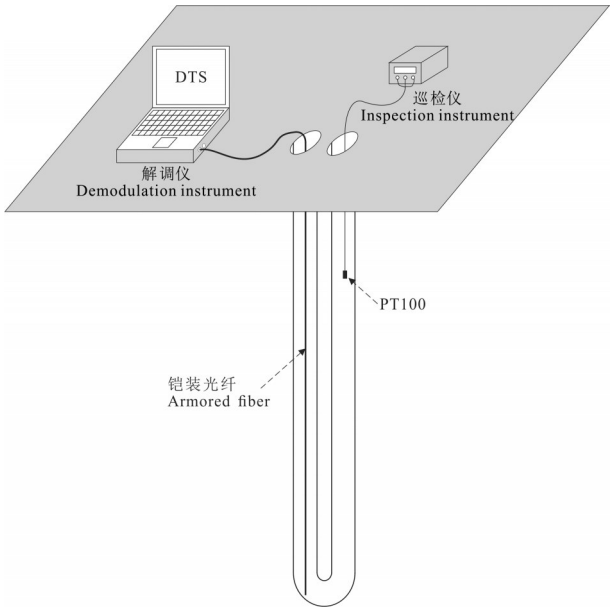

图4 野外钻孔布线图
Fig.4 Layout of boreholes in the field

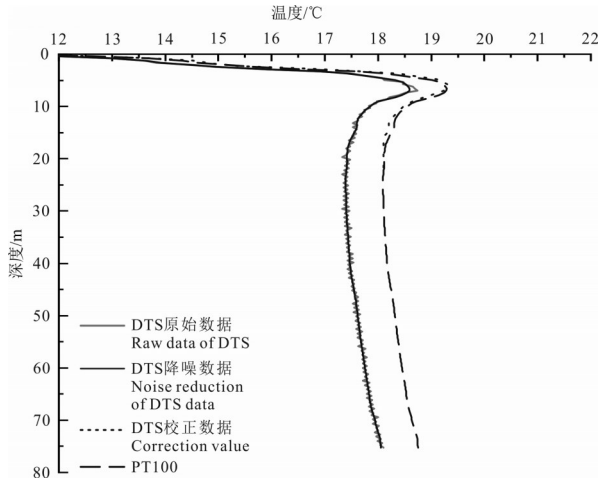

图5 钻孔sg43地温原始数据与处理后数据
Fig.5 Original underground temperature data and processed data of borehole sg43

降噪后,发现温度比PT100测得数据整体偏低0.7℃,那么将DTS测温仪得到数据都加上0.7℃,即可获得实际的地下温度。

3 野外测量结果与分析

3.1 地温曲线特征

只考虑大地热流,并假定地表温度不变与地下介质恒定,地下温度传递是一个稳态导热过程,地温曲线则是一条直线。若地表气温呈周期性变化,地温曲线在深部依然是一条直线,但浅部将发生弯曲(Pollack and Huang,2000)。如图6a,20 m以下地温呈现一条直线,但地表到地下10 m内地温发生偏离,这是研究区地温曲线的一种主要类型。而当同时考虑地表气温变化与地下水垂向渗流时,浅部地温发生偏离,深部地温也不再是一条直线(王海波等,2014)。

地下20~80 m地温随深度变化呈一条曲线(图6b),这是研究区另一种主要地温曲线类型。但总体上,研究区内这两种地温曲线类型依然存在相似的特征:地表到地下10 m左右,温度快速稳定至18℃附近(±2℃),并在区段内迎来地温曲线的拐点;地下10 m左右到地下30 m左右,地温随深度变化复杂,区段内温度通常会趋于一个特定的值,这也是南京市恒温层所处深度;地下30 m以后,地下温度整体上随着深度增加而增加。个别钻孔如sg28,受地下水或其他因素影响极深,在地下50 m后才呈显著增温趋势。

另一方面,从2018年冬季与2019年春季的两次测量结果中对比发现,地表到地下10 m,春季地温总体低于冬季地温,与气温条件相反,这是土体导热性质所引起的地下温度相对地表气温的滞后(王宝军等,2009)。

地下10 m附近,春季与冬季温度相等。从固体热传导角度分析,地表温度通常可视作一个简谐振动的温度波,温度波波动周期越短,温度波波幅在介质中衰减的越快。温度的日均变化对地下温度的影响在50~60 cm深度以下几乎可以忽略,而温度年均的变化则要到地下10 m以后才几无影响(金旭等,2004)。

然而对于研究区的地下10 m以下的地温,春季与冬季测得温度却并不都相等,大致可分为两类,一类相等(图7a),一类不相等(图7b)。考虑到同一个孔在深部既不受气温影响,也无岩土体、大地热流等的变化,那么导致深部地温变化的原因很可能是地下水径流作用的结果,而南京市地下水赋存条件满足这个要求。同时,测温结果表明,南京市恒温层在20 m附近。

3.2 地温梯度分布特征

地温梯度是反映地温度场的重要参数(张薇等,2019),一般是不同深度下线性段计算的地温梯

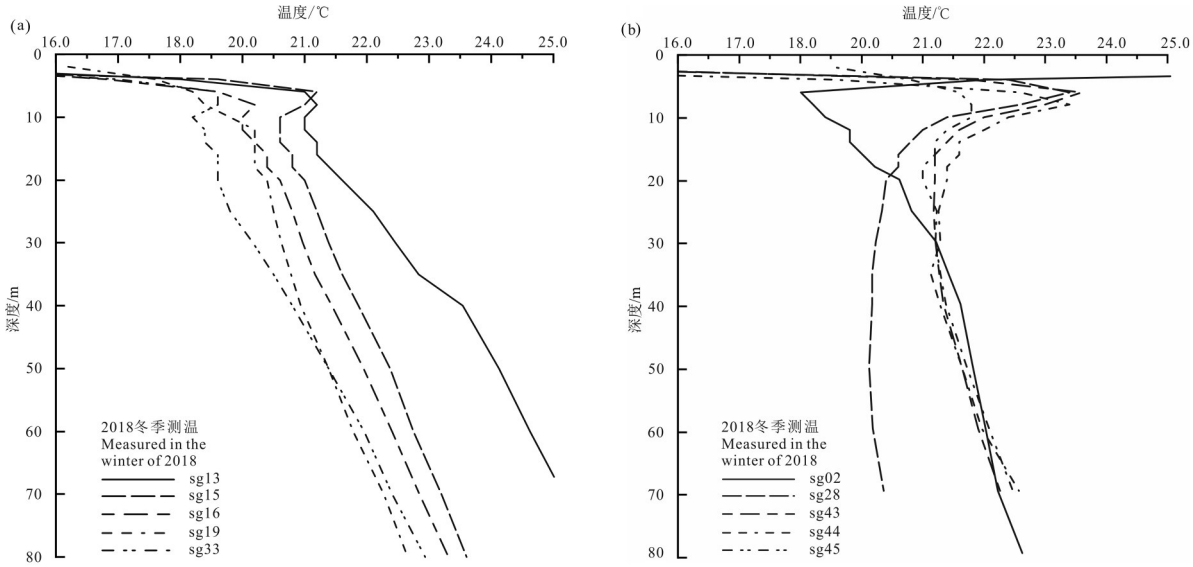

图6 南京市地温曲线特征

a—无地下水垂向渗流影响;b—有地下水垂向渗流影响

Fig.6 The depth-temperature profile in Nanjing

a−The underground temperature without groundwater influence; b−The underground temperature with groundwater influence

度的算术平均值,通常会取到一个较深的地温。但本文主要关注浅层地热能利用深度范围内的地温特征,由上述地温曲线特征分析知,该深度区段内的地温受季节变化或者地下水垂向渗流的影响。考虑到除sg26外,春季与冬季地表10 m以下地温变化趋势基本一致。在进一步去除季节气温变化的基础上,尽可能采用地温随深度呈近似线性变化的区间,最终选取2018年12月30~100 m内的地温数据计算地温梯度(图8)。

计算结果表明:研究区内30~100 m段地温梯度

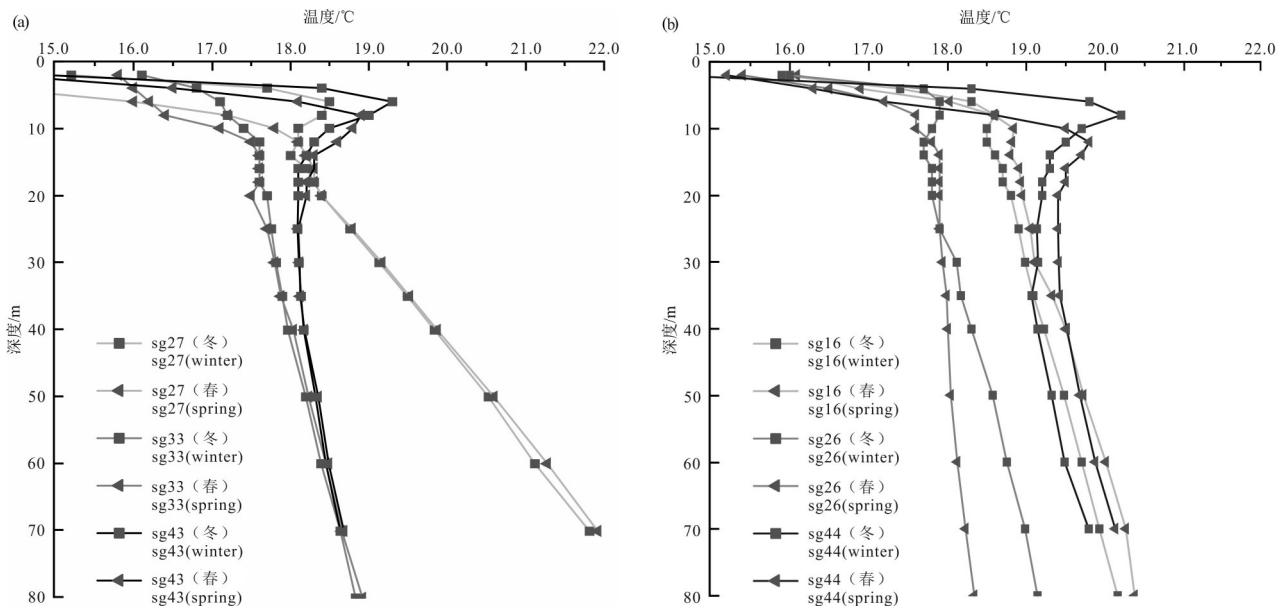

图7 春、冬季节变化下的南京市地温曲线

a—地下10 m以下地温相等;b—地下10 m以下地温不等

Fig.7 The depth−temperature profile of Nanjing under spring and winter seasons

a−The ground temperature below 10 m underground is equal; b−The ground temperature below 10 m underground varies

主要范围为1.80~3.00℃/100 m,并在局部出现异常,如sg28近似为0,sg27高达6.64℃/100 m。总体上略高于区域基岩地温梯度1.8~2.5℃/100 m,这可能与第四系松散沉积物的热导率低于基岩有关。此外,地温梯度存在一定的条带性,如sg11、sg14到sg09沿线,以及sg16、sg15到sg06沿线等,地温梯度的分带与南京地区北东、北西向的断裂展布相接近。

3.3 南京市地温场影响因素分析

气温、城市热岛效应、地面覆盖物、地下岩土体性质、区域地质构造以及水文地质条件等因素都会影响浅层地温场分布。本次研究钻孔多位于南京市城郊,因此忽略气温以及城市热岛的影响。地表覆盖物基本一致,即钻孔上方盖一个水泥盖板,周遭多为土壤,亦不考虑。因此研究区地温场影响因素主要为地质构造、岩土体性质与地下水。

地质构造:褶皱、断裂等往往会控制地热的运移或聚集。如图8,钻孔sg27地温梯度极高,达到6.64℃/100 m。这是因为钻孔sg27恰处在汤山—仑山复背斜,横剖面上窄下宽,有利于地热流热量的集中。同时,两翼的页岩致密,有效阻隔了外界地表水的入渗,起保温作用(栾光忠和邱汉学,1998)。

岩土体性质:不同岩土体通常具有不同的热物性质。sg39与sg44同位于长江附近,浅部岩土体同为黏土。然而sg44底部为风化的安山岩,sg39底部为粉砂,安山岩的热导率高于粉砂,使得地热更好地传导至浅表,造成sg44的地温高于sg39(图9)。

水文地质条件:两次测量结果中,恒温层以下存在温度整体偏移的现象,这可能与河流有关(Epting and Huggenberger,2013)。在与河流有直接水力联系的地下饱和带,当河水温度发生季节性变化时,地下温度会随之发生变化,这种变化地下不同深度的都大致相等。考虑到南京市水文地质条件复杂,河岸带第四纪沉积物较厚,如长江漫滩区有近60 m厚的砂层;部分地区受断层影响,有利于导水;栖霞区等地岩溶发育,有利于地下水运移。那么这种整体的偏差极有可能与南京市季节性地下水运动有关。

为查明季节性地温差异是否与地下水有关,对应南京市地下水层位,取地表20 m以下、2018年冬与2019年春地温差值的算术平均数,作为两次测温的整体偏差,依此对比南京市地下水资源分区情况

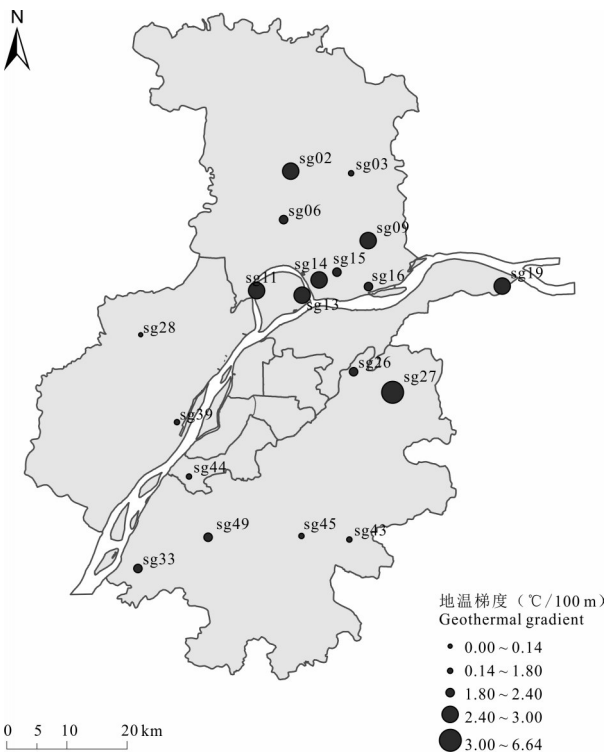

图8 南京市30~100 m地温梯度

Fig.8 The geothermal gradient of 30~100m underground in Nanjing

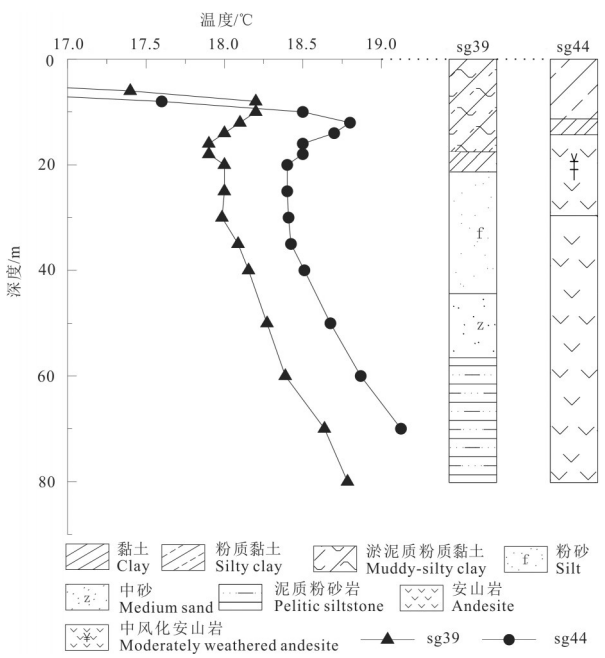

图9 sg39、sg44地温曲线与地层柱状图(2019年春测)

Fig.9 Geothermal curves and stratigraphic column of sg39 and sg44(measured in spring of 2019)

(温忠辉等,2009)(图10)。考虑DTS测温仪的精度问题,在两次测量中可能存在偏差,这里认为两次测量结果温差在±0.2℃内的钻孔地温是没有发生变化的。图10显示,在地下水资源模数较小,即地下水资源相对不太丰富的地区,sg02、sg27、sg28、sg33、sg43、sg45、sg49等处,春、冬深部地温几无变化;而地下水相对丰富的区域,以长江漫滩区钻孔sg09、sg14、sg15、sg16、sg39、sg44等为例,春季地温比冬季高;而sg26所处位置地下水丰富,且位于分水岭附近,地温受地表降水影响显著,丰沛的春季降水给地下温度带来更大的变化,导致春季地温反而低于冬季地温,同时带来春、冬季地温曲线春、冬形态的不一致。

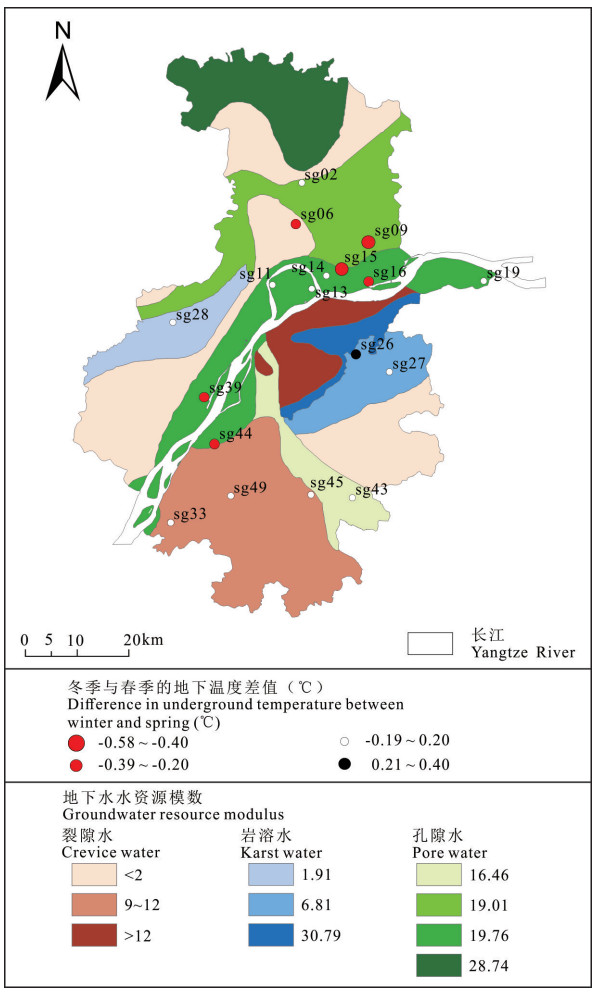

图10 2018年冬季与2019年春季地表30 m以下温度差值(据温忠辉等,2009修改)

Fig.10 Temperature difference between winter of 2018 and spring of 2019 underground 30 m to 100 m (modified from Wen Zhonghui et al., 2009)

4 结 论

(1)本文通过室内试验与野外测试,改进了野外DTS测温仪的使用方法:对DTS野外测温数据进行降噪处理,并辅以高精度pt100温度计进行温度校正,使DTS野外测温精度提高至0.2℃。

(2)南京市地下10 m以内的地温受气温影响显著,受岩土体性质影响,该深度范围内地温相对气温的变化存在滞后现象。地下10 m附近及更深处,季节性的气温变化在附近影响较小,而南京市恒温层也大约在地下10~30 m处。

(3)地质构造、岩土体热物性质影响着南京市浅层地温场,汤山背斜控热构造使得该处地温偏高。同时,南京市浅层地温场受地下水渗流影响显著,这区分了地温曲线类型,也使得百米内地温梯度产生差异。此外,在季节性地下水变化较大的地区,地下温度可能随季节变化而发生整体性的改变,在对南京市浅层地热能做评价时不能忽略这类因素。

受限于钻孔数量与测量次数,目前所获得数据对于研究区域的分析相对有限。未来,在对已有钻孔继续测量的同时,应当尽可能在城区等地方增加测点,并且获得更多的水文地质相关资料,校验已有的观点。

References

Bayer P, Attard G, Blum P, Menberg K. 2019. The geothermal potential of cities[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 106: 17−30.

E Jian, Chen Mingzhu, Yang Lumei, Wang Xiao, Gong Hongwei, Li Man. 2015. Exploitation and utilization of shallow geothermal energy in Nanjing[J]. Journal of Geology, 39(2): 339− 342(in Chinese with English abstract).

Epting J, Huggenberger P. 2013. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies——Definition of a potential natural state[J]. Journal of Hydrology, 501: 193−204.

Hong Zenglin, Zhang Yinlong, Zhou Yang. 2019. Research on the modes of occurrence and application of geothermal resources in the middle and deep layers of the piedmont area in southern Guanzhong basin[J]. Geology in China, 46(5): 1224− 1235(in Chinese with English abstract).

Jin Xu, Chen Xiaodong, Guan Yanwu. 2004. The correction of the influence of climatic change upon geotemperature measurement at shallow layer[J]. Acta Geoscientica Sinica, 25(5): 579− 582(in

Chinese with English abstract).

Luan Guangzhong, Qiu Hanxue. 1998. The type of low− medium temperature geothermal system of convection type——The genesis analysis of Tangshan geothermal system in Nanjing[J]. Journal of Ocean University of Qindao, 28(1): 160− 164(in Chinese with English abstract).

Pollack H N, Huang S. 2000. Climate reconstruction from subsurface temperatures[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28(1): 339−365.

Taniguchi M, Shimada J, Tanaka T, Kayane I, Sakura Y, Shimano Y, Dapaah Siakwan S, Kawashima S. 1999. Disturbances of temperature− depth profiles due to surface climate change and subsurface water flow: 1. An effect of linear increase in surface temperature caused by global warming and urbanization in the Tokyo metropolitan area, Japan[J]. Water Resources Research, 35 (5): 1507−1517.

Wang Baojun, Shi Bin, Jiang Hongtao, Zhao Lizheng. 2009. Characteristics of ground temperature variations in superficial soil layers for Nanjing in recent 30 years[J]. Geological Journal of China Universities, 15(2): 199− 205(in Chinese with English abstract).

Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Zhu Xi, Liu Yanguang, Li Jun. 2017. Research on formation mode and development potential of geothermal resources in Beijing−Tianjin−Hebei region[J]. Geology in China, 44(6): 1074− 1085(in Chinese with English abstract).

Wang Haibo, Huang Shaopeng, Ren Yongfei, He Liangliang, Xiao Bo. 2014. Preliminary analysis of the subsurface temperature and air temperature changes in Xi'an, China[J]. Chinese Journal of Geology, 49(3): 874−887(in Chinese with English abstract).

Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Liu Zhiming. 2017. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China[J]. Geology in China, 44(6): 1062−1073(in Chinese with English abstract).

Wang Xinjuan, Luan Yingbo, Lu Ming, Li Zhiping. 2010. Study of distribution law of shallow geothermal energy resources in Beijing plain area[J]. Site Investigation Science and Technology, (3): 48−53 (in Chinese with English abstract).

Wei Wanshun, Zheng Guisen, Luan Yingbo. 2010. Characteristics and influencing factors of the shallow geothermal field in Beijing plain area[J]. Geology in China, 37(6): 1733− 1739(in Chinese with English abstract).

Wen Zhonghui, Wang Binbin, Lu Chengpeng, Yan Lingxiang, Hua Hua. 2009. Development and utilization division of groundwater resources in Nanjing city[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 39(1): 107−113(in Chinese with English abstract).

Zhang Guitao, Zhang Hongguang. 2005. Signal processing of distributed optical sensor system based on Raman− scattering[J]. Journal of Qindao University(Engineering & Technology Edition), 20(3): 71−75(in Chinese with English abstract).

Zhang Qing, Hao Wenjie, Hao Shuli, Li Shengtao, Wang Xinjie, Jiang Fan. 2018. Research of deep− hole temperature measurement technology base on Raman scattering[J]. Progress in Geophysics, 33(4): 1438−1443(in Chinese with English abstract).

Zhang Wei,Wang Guiling,Liu Feng,Xing Linxiao,Li Man.2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 46(2): 255− 268(in Chinese with English abstract).

Zhou Yang, Mu Genxu, Zhang Hui, Wang Ke, Liu Jianqiang, Zhang Yage. 2017. Geothermal Field Division and its geological influencing factors in Guanzhong Basin[J]. Geology in China, 44 (5): 1017−1026(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

鄂建, 陈明珠, 杨露梅, 汪霄, 龚红卫, 李曼. 2015. 南京浅层地温能开发利用现状研究[J]. 地质学刊, 39(2): 339−342.

洪增林, 张银龙, 周阳. 2019. 关中盆地南部山前中深层地热资源赋存特征及应用[J]. 中国地质, 46(5): 1224−1235.

金旭, 陈晓冬, 管彦武. 2004. 气候变化对浅层地温测量影响的改正[J]. 地球学报, 25(5): 579−582.

栾光忠, 邱汉学. 1998. 中低温对流型地热系统的典型成因——南京汤山地热系统的分析[J]. 青岛海洋大学学报, 28(1): 160−164.

栾英波, 郑桂森, 卫万顺. 2013. 浅层地温能资源开发利用发展综述[J]. 地质与勘探, 49(2): 379−383.

王宝军, 施斌, 姜洪涛, 赵理政. 2009. 近30年南京市浅层地温场变化规律研究[J]. 高校地质学报, 15(2): 199−205.

王贵玲, 张薇, 蔺文静, 刘峰, 朱喜, 刘彦广, 李郡. 2017. 京津冀地区地热资源成藏模式与潜力研究[J]. 中国地质, 44(6): 1074−1085.

王海波, 黄少鹏, 任永飞, 何亮亮, 肖波. 2014. 西安城市地温与气温变化初步分析[J]. 地质科学, 49(3): 874−887.

王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 刘志明. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. 中国地质, 44(6): 1062−1073.

王新娟, 栾英波, 路明, 李志萍. 2010. 北京平原区浅层地温能分布规律研究[J]. 勘察科学技术, (3): 48−53.

卫万顺, 郑桂森, 栾英波. 2010. 北京平原区浅层地温场特征及其影响因素研究[J]. 中国地质, 37(6): 1733−1739.

温忠辉, 王彬彬, 鲁程鹏, 颜陵翔, 华骅. 2009. 南京市地下水资源开发利用分区[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(1): 107−113.

张桂涛, 张红光. 2005. 喇曼散射分布式光纤传感器系统的信号处理[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 20(3): 71−75.

张青, 郝文杰, 蒿书利, 李胜涛, 王新杰, 蒋凡. 2018. 基于拉曼散射的深孔测温技术研究[J]. 地球物理学进展, 33(4): 1438−1443.

张薇,王贵玲,刘峰,邢林啸,李曼.2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质,46(2): 255−268.

周阳, 穆根胥, 张卉, 王克, 刘建强, 张亚鸽. 2017. 关中盆地地温场划分及其地质影响因素[J]. 中国地质, 44(5): 1017−1026.