

基于浅层地温及原位热物性参数地温场预测

张庆¹, 李云峰¹, 龚绪龙², 侯莉莉¹, 周小平¹, 陆远志¹, 牛晓楠¹

ZHANG Qing¹, LI Yunfeng¹, GONG Xulong², HOU Lili¹, ZHOU Xiaoping¹, LU Yuanzhi¹,
NIU Xiaonan¹

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210000;

2. 自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室(江苏省地质调查研究院), 江苏 南京 210000

1. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210000, Jiangsu, China;

2. Key Laboratory of Earth Fissures Geological Disaster, MNR (Geological Survey of Jiangsu Province), Nanjing 210000, Jiangsu, China

摘要:近年,地热资源作为一种新颖的清洁能源已经引起广泛的关注。中国浅层地热能资源丰富,但探测手段限制其大规模发展。热物性参数是地热能赋存载体的关键参数之一,决定了热能在岩土体中的传播速度和岩土体温度场的分布。因此,采用基于热物性参数研发的浅层测温 and 原位热物性参数测试仪开展现场试验,获取地温、热物性参数等数据。采用一维稳态热传导理论建立地温场预测模型,利用不同岩性实测、概化热物性参数进行恒温层地温场分布预测。结果表明,浅层地温场受江水流动影响较大。采用岩性概化与实测热物性参数对恒温层地温场预测几乎一致,因此,利用研发的仪器及模型进行恒温层地温场分布预测是十分有效的。另外,该方法方便快捷,可利用其对浅层地热能开发利用提供合理的建议,并在实际工程中推广应用。

关键词:浅层测温法;地温场预测模型;浅层地热能;热物性参数

中图分类号:P314.3;P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)10-1713-07

Zhang Q, Li Y F, Gong X L, Hou L L, Zhou X P, Lu Y Z, Niu X N. Ground temperature prediction based on shallow-surface ground temperature and in-situ thermophysical parameters. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(10): 1713-1719

Abstract: In recent years, geothermal resources as a new clean energy have begun to attract widespread attention. China is rich in shallow geothermal energy resources, but exploration methods limit its large-scale development. Thermophysical parameter is one of the key parameters of geothermal energy carrier, which determines the thermal energy transmission speed and the distribution of the temperature field of the rock and soil. Therefore, shallow temperature measurement and in-situ thermophysical parameter tester based on thermophysical parameters were used to acquire ground temperature and thermophysical parameters in the field tests. The one-dimensional steady-state heat conduction theory was used to establish the geothermal field prediction model, and the lithological measurement and generalized thermal physical parameters were used to predict the geothermal field distribution of the constant temperature layer. The results show that the shallow geothermal field is greatly affected by the river water flow. The adoption of lithology generalization and the measured thermal physical parameters resulted in almost the same prediction of the temperature field of the constant temperature layer, indicating that it is very effective to predict the distribution of the temperature field of the constant temperature layer by using the developed instruments and models. In addition, the method is convenient and fast, which can be used to provide reasonable suggestions for the development and utilization of shallow geothermal energy, and it can be widely used in practical projects.

Key words: shallow thermometry; geothermal field prediction model; shallow geothermal energy; thermophysical parameters

收稿日期:2020-07-08;修订日期:2021-06-21

资助项目:中国地质调查局项目《安庆多要素城市地质调查》(编号:DD20189250)和自然资源部地裂缝地质灾害重点实验室开放课题(编号:JSDDYH JD2018022)

作者简介:张庆(1986-),男,博士,高级工程师,从事城市地质调查、工程地质研究。E-mail:sy8633@126.com

随着中国日益重视环境保护及化石能源的逐渐短缺,浅层地热能等新兴清洁能源逐渐受到重视。浅层地热能是储存在地壳浅部岩土体和地下水中的地热资源,具有分布广泛、储量巨大、开发方便的特点^[1]。尽管储量丰富,但中国浅层地热能开发程度却不高,其主要原因在于目前探测技术不完善及探测区域选择不当,制约了浅层地热能的开发和应用。

浅层测温及原位热物性参数测量是一种快速获取地温和热物性参数数据的手段,在浅层地热能探测初期可以提供大量数据,指导重点探测区域的选择,同时也是各种地热泵、能量桩等建筑热工结构设计中需要考虑的主要参数之一。但浅层地温易受气候、地下水流动等外界环境的影响。另外,原位热物性参数测量一般采用原位热响应试验等方式,成本高、周期长,只能获取地层平均热物性参数。许多学者曾采用不同方法研究过地温预测。黄凯等^[2]通过分析秦岭越岭区的地热背景和地温变化规律分析得到初步地温预测公式,结合地形效应校正得到最终的地温预测公式。部分学者^[3-5]通过多年气象和地温实测资料建立地温预估模型。刘德平等^[6-7]采用地温波动理论采用非线性拟合算法进行地温曲线拟合,对多个地区的多年冻土地温进行预测。陈建兵等^[8]考虑高程、坡度、地表温度等因素,分析冻土与外部环境间复杂耦合换热,建立了地温预测模型。刘亚俊等^[9-10]采用有限元法对矿井深部的地温进行了预测。于连广等^[11-12]采用有限差分法分别对构造区和隧道建设的深部地温场进行了预测。韩力群等^[13]基于径向基函数神经网络,利用陆面参数和地表层不同深度的钻孔测温数据建立了地表各层温度的预测模型。张延军等^[14-15]在浅层测温法的基础上,提出采用一维稳态热传导模型进行地温预测,并在厦门东山地区进行应用,取得了良好效果。

地温预测模型种类丰富,其中一维稳态热传导模型原理简单清楚,在浅表层测温法基础上实现原位热物性参数测量,适合在浅层地热能资源储量探测初期采用。本文利用浅层测温及原位热物性参数测量在安庆迎江区开展现场实验,获取 1.5 m、2.5 m 深度(浅表层)地温和原位导热系数数据,并钻取 4 个钻孔 20 m 深度试样获得原位导热系数,基于浅表层测温及 20 m 深度范围原位热物性参数的地温

预测模型对研究区恒温层地温分布进行预测,将 2 种方法的预测值进行对比分析。通过分析研究区浅层及恒温层地温分布特征,论证基于浅表层地温及原位热物性参数的地温场预测在浅层地热能探测初期的有效性。

1 研究区概况

研究区位于安庆市迎江区(图 1),属北亚热带季风湿润气候区,气候温和、日照充足、雨量充沛。据安庆市气象资料统计,研究区多年平均气温 16.5℃,多年平均降水量 1419.0 mm,降雨主要集中在全年的 4~9 月份。区内地表水系发育,河渠纵横交错,湖泊、池塘星罗棋布。南侧为长江,是流经区内的主干河流。研究区地势平坦,上部地层由全新统中上段(Q⁴)冲积砂层、粉土层及淤泥质粉质粘土组成,中部岩性为千层饼状粉质粘土夹粉砂、砂土,下部岩性为砂、砾卵石,厚度 15~45 m。研究区地下水类型主要为松散岩类孔隙水、红层孔隙裂隙水。

2 仪器原理及浅层地温调查

地下温度场根据温度随深度的变化可以分为 3 层,其中地表至地下 20 m 深度左右称为变温层,变温层地温受气候、日照等因素的影响而变化。随着深度的增加,变温层地温受外界环境因素的影响递减,至 20 m 深度左右地温大致保持为当地的年平均地温,即为恒温层。浅层测温法可快速获取变温层地温。

多功能原位热物性测试仪的基本原理是基于傅里叶扩散定律的热探针法,可以测量的热物性参数包括温度、导热系数、体积比热容和热扩散系数。热探针法的数学模型是基于无限大且均匀的介质中的瞬态线热源导热理论,通过简化线热源的导热微分方程,得到探针表面升温速率与加热时间的关系,以此计算岩土体的热物性参数。

升温与时间对数函数关系式:

$$\begin{aligned}\theta(r, t) &= \frac{q}{4\pi\lambda} \left[-C - \ln \frac{R^2}{4at} \right] \\ &= \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{Br^2} \\ &= \frac{q}{4\pi\lambda} \ln t + \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4a}{Br^2} = K \ln t + b\end{aligned}\quad (1)$$

表 1 研究区浅层测量结果

Table 1 Shallow ground temperature survey results in the study area

孔 号	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
1.5 m 地温/℃	15.0	15.0	15.1	15.7	14.8	14.5	14.7	15.4	15.6	15.2
2.5 m 地温/℃	15.3	15.2	15.4	16.0	15.1	14.7	14.9	15.7	15.9	15.4
1.5 m 导热系数 W/(K·m)	0.732	0.927	0.689	0.652	0.729	0.687	0.813	0.837	0.779	0.955
2.5 m 导热系数 W/(K·m)	0.801	0.759	0.745	0.639	0.795	0.825	0.707	0.962	0.957	0.974
孔 号	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1.5 m 地温/℃	16.5	15.4	15.3	15.7	15.2	15.6	16.0	15.3	15.1	
2.5 m 地温/℃	16.8	15.7	15.5	16.0	15.5	15.9	16.2	15.6	15.4	
1.5 m 导热系数 W/(K·m)	0.984	0.968	1.080	0.995	1.202	1.036	1.004	1.064	1.184	
2.5 m 导热系数 W/(K·m)	1.018	1.306	1.125	1.030	1.529	0.995	1.087	1.027	1.064	

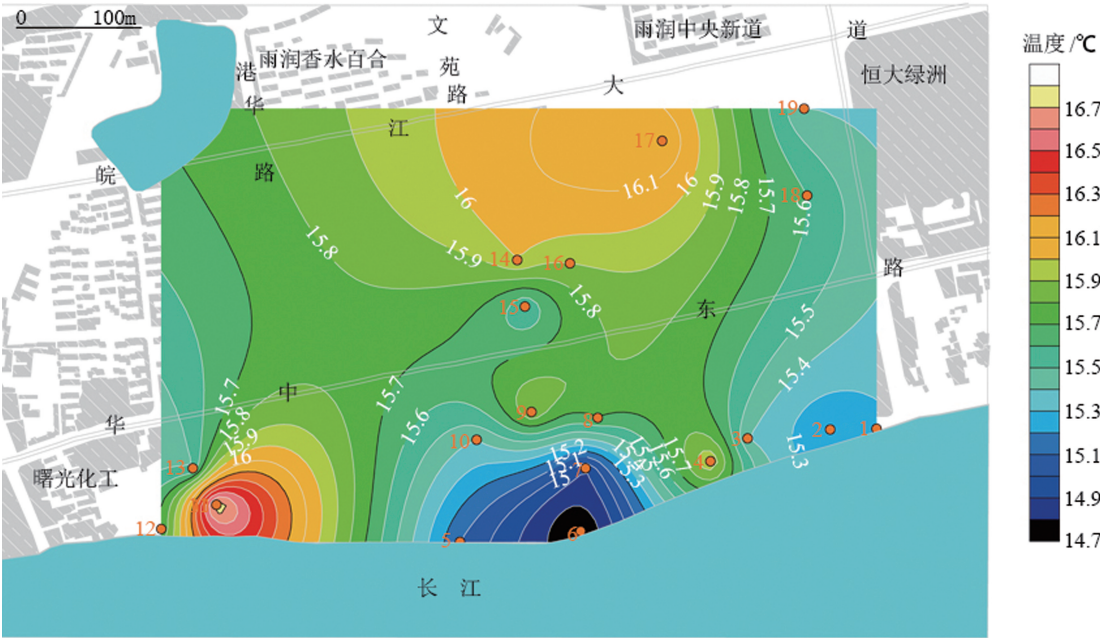


图 2 研究区 2.5 m 深度温度等值线图

Fig. 2 Temperature contour of the study area at 2.5 m depth

3 恒温层地温预测

3.1 地温预测模型

根据学者研究,24 h 太阳辐射变化在 1 m 深度左右造成的温度变化几乎可以忽略^[18]。由此可以得到,地下 1 m 深度以下短时间内可简化为稳态温度场。对地层热量传递做出以下假设:①忽略热辐射和热对流,只存在热传导一种导热形式;②热传导不存在热量损失,热流密度和导热系数保持不变;③热量传递沿着钻孔方向,为一维稳态热传导;

④地层导热系数为常数。根据假设,结合一维稳态热传导理论,预测深度的地温 T 可由公式(2)计算:

$$T=T'+q\frac{H}{\lambda}\tag{2}$$

式中: T' 为已知点地温,单位℃,通常取浅层测温法实测地温; q 为根据浅层测温数据计算得到的浅层热流密度,单位 W/m^2 ; H 为已知地温点深度到预测深度的距离,单位 m; λ 为已知地温点到预测深度之间的地层综合导热系数,单位 $W/(m\cdot K)$ 。

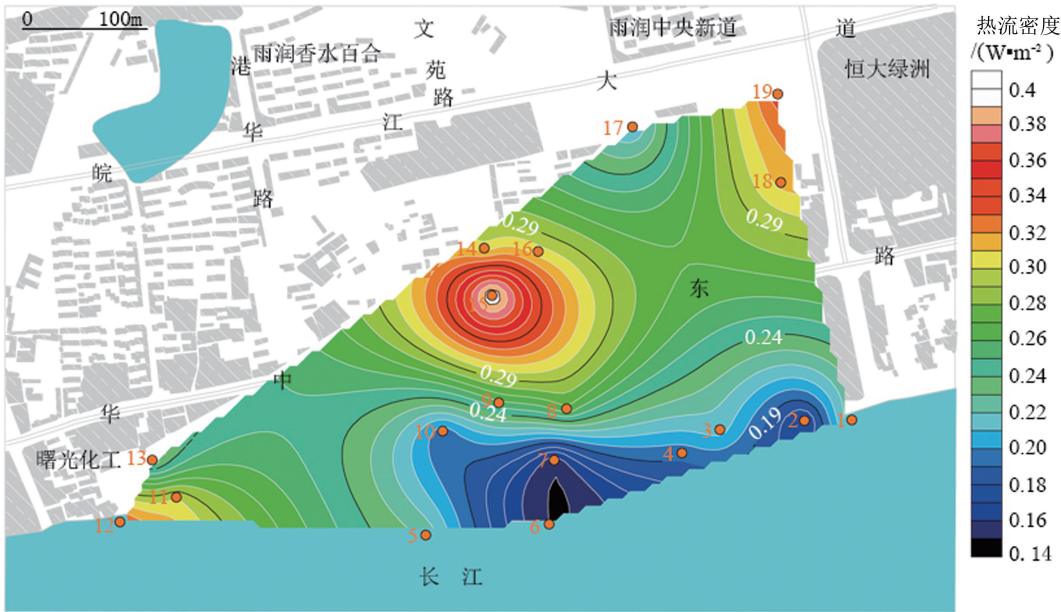


图 3 研究区浅层热流密度分布云图

Fig. 3 Distribution of heat flow density in the study area at shallow layer

3.2 恒温层地温场分布特征

应用基于浅层测温及原位热物性参数的地温预测模型对安庆迎江区 20 m 恒温层地温场进行预测。其中, T' 取 2.5 m 深度地温; q 根据图 3 获得的浅层热流密度取值; H 根据各点标高取值, 计算已知地温点深度到预测深度的距离, 取值根据实际地层。已有资料显示, 研究区处于长江冲积平原区, 地层结构较单一, 地表至地下 20 m 深度主要分布粉细砂、淤泥质粉质粘土、中粗砂等, 且水位均小于 2.5 m, 因此 2.5 m 深度导热系数可代表该值。

根据计算得到的地温绘制研究区恒温层温度等值线图(图 4)。从图 4 可以看出, 研究区恒温层地温(20 m)在 18.7~21.3℃ 之间, 温度范围变化不大, 04、14、16 号孔位温度稍高。相比 2.5 m 深度地

温, 恒温层预测地温受江水流动影响情况基本消除, 鉴于研究区无明显热异常现象, 因此恒温层预测地温大抵等于该地区年平均气温。恒温层是浅层地热能开发利用的主要层位, 因此在浅层地热能探测初期, 利用多功能原位热物性参数测试仪及地温预测模型获取不同深度地温分布, 可为浅层地热能开发利用选址提供依据。

3.3 恒温层地温预测对比

根据式(2)的地温预测模型可知, 浅层地温调查获取的是 1.5 m、2.5 m 的原位热物性参数, 均采用该数据概化预测计算。为了对比热物性参数概化与实测结果在地温预测结果上的误差, 在研究区对 4 个钻孔 20 m 深度取样, 取样间隔为 1 m, 在实验室测量样品的导热系数, 同一深度 4 组样品导热系数取平均值(表 2)。

表 2 研究区实测导热系数平均值

Table 2 Average value of measured thermal conductivity in the study area

深度/m	3	4	5	6	7	8	9	10	11
土质	粉土	粉土	粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土
导热系数 W/(K·m)	0.622	1.729	0.954	1.845	1.384	1.443	1.563	1.610	1.356
深度/m	12	13	14	15	16	17	18	19	20
土质	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土	淤泥质粉土
导热系数 W/(K·m)	1.244	1.227	0.424	0.797	1.139	1.883	1.811	1.111	0.755

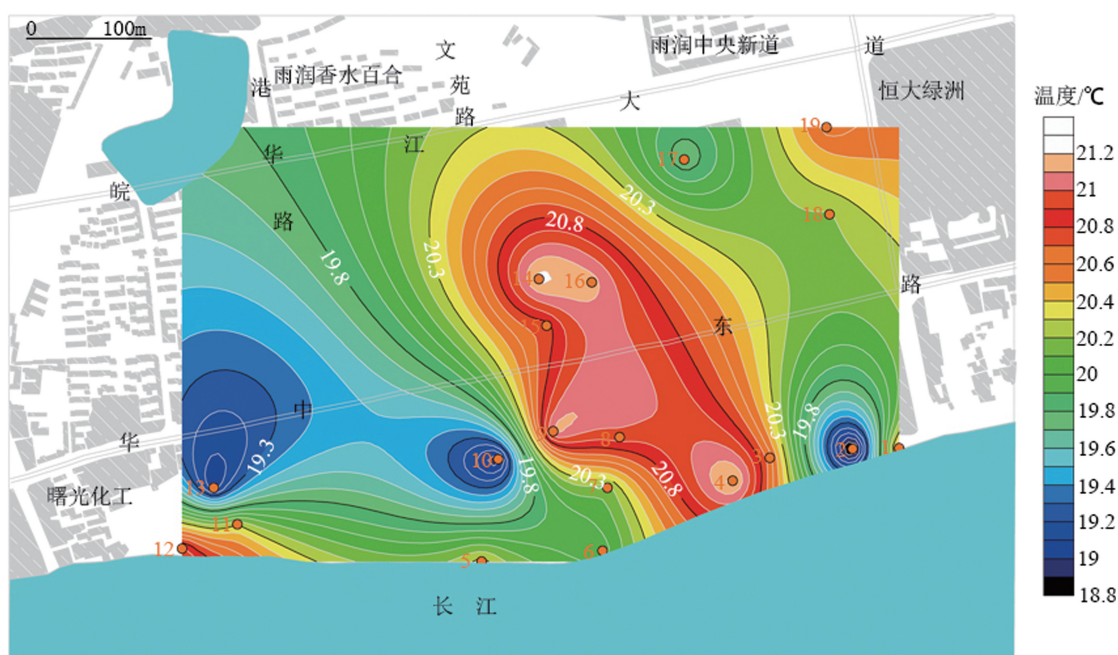


图4 研究区恒温层预测温度等值线图

Fig. 4 Predicted temperature contour of constant temperature layer in the study area

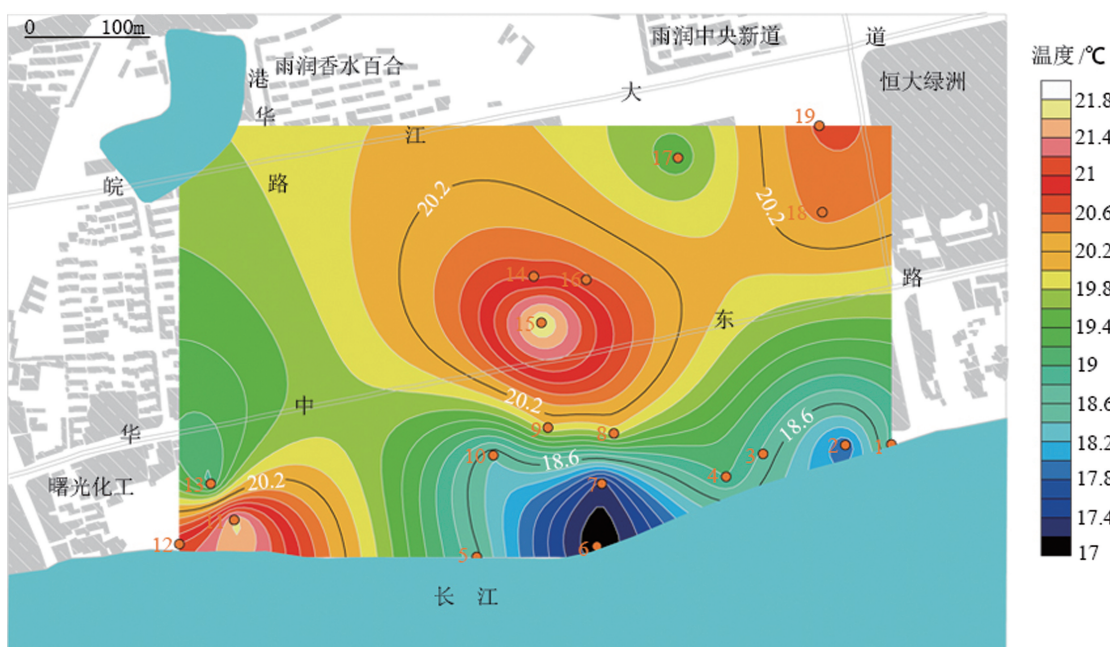


图5 实测热物性参数参与计算的恒温层预测温度等值线图

Fig. 5 Predicted temperature contour of constant temperature layer with the participation of measured thermophysical parameters

利用实测热物性参数参与模型计算,得到图5。对比图4和图5可以发现,由于参与计算的热物性参数获取方式不同,恒温层温度预测及地温场分布也略有区别,主要体现在靠近长江的孔位温度偏

低,说明江水流动会对岩土的热物性参数造成影响,而其他区域温度场分布较接近。从地温范围看,相比采用概化的热物性参数,采用实测热物性参数得到的恒温层预测地温最大值为21.8℃,最小

值为 17.1℃,经计算与概化参数误差分别为 2.2% 和 9.4%,二者区别并不显著,证明利用多功能原位热物性测试仪及地温预测模型进行恒温层地温场分布预测是有效的。可见采用浅表层导热系数进行深部温度场的预测计算可以大大减少初期工作量,降低工程成本,并保证一定的预测精度。

4 结 论

(1)研发浅层热物性测试仪器及模型进行恒温层地温预测,仪器基于傅里叶扩散定律的热探针法,可应用于地下温度场调查、监测及预测相关工作中,通过应用与数据对比说明该仪器是十分有效的,对指导、评价浅层地热能资源开发利用具有实际价值。

(2)基于浅表层概化导热系数和原位综合导热系数分别预测研究区恒温层地温,结果显示 2 种方法有较好的一致性,精度误差满足相关地热工程前期调查要求,因此提出通过采用浅表层导热系数进行恒温层温度场的预测模型,实现人力物力的高效节约。

(3)安庆市研究区浅层地温总体变化不大,无明显热异常现象,存在深部地热的可能性较小。另外,靠近长江地带出现地温偏低区,可能是由于上部地层主要为粉土、粉细砂,江水与该层地下水进行热交换引起的。

参考文献

- [1] 王贵玲, 蔺文静, 韩玉英, 等. 浅层地热能研究现状及亟待开展的工作[J]. 工程建设与设计, 2007, 11: 1-4.
- [2] 黄凯. 秦岭越岭深埋隧道地温预测方法[J]. 山西建筑, 2009, 35(18): 295-296.
- [3] 杨小强, 吴建良. 基于多年观测数据的地温预测模型[J]. 山西建筑, 2014, 40(6): 150-151.
- [4] 周斌, 李辑, 李晶, 等. 辽西地区地温预测方法探析[J]. 资源与环境科学, 2015, (21): 232-235.
- [5] 孙立军, 秦健. 沥青路面温度场的预估模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(4): 480-483.
- [6] 刘德平, 汪双杰, 金龙. 共和至玉树公路多年冻土地温拟合模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 100-105.
- [7] 刘德平, 汪双杰, 王彩勤. 国道 214 线鄂拉山至清水河段多年冻土地温预测模型研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(5): 53-60.
- [8] 陈建兵, 刘志云, 崔福庆, 等. 青藏高原工程走廊带多年冻土辨识及年平均地温预估模型[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 33-51.
- [9] 刘亚俊, 贾德祥, 童庆丰. 矿井三维地温场的反演分析[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1995, 14(z2): 8-11.
- [10] 李浪, 罗新荣, 张克兵. 丁集煤矿深部地温预测[J]. 黑龙江科技学院学报, 2010, 20(5): 340-342.
- [11] 张进平, 杜建国, 何铁柱. 基于 Tough2 软件的深部地温场模拟及影响因素分析——以苏北褶皱构造区为例[J]. 城市地质, 2014(9): 35-40.
- [12] 于连广, 吴喜平, 李昊翔. 三维地铁隧道土壤温度预测模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(2): 234-240.
- [13] 翰力群, 毕思文, 宋世欣. 地表层温度的级联递推预测模型研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2006, 36(增刊): 29-37.
- [14] Xie Y Y, Zhang Y J, Zhang T, et al. 2 m survey method and its improved device application in Dongshan geothermal field in Xiamen in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(18): 1290.
- [15] 张延军, 张通, 殷仁朝, 等. 基于 2 m 测温法的地热异常区探测及地温预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(1): 189-196.
- [16] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 611-626.
- [17] Elachi C, Zyl J V. Introduction to the physics and techniques of remote sensing[M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2006.