

常晓丽,兰爱玉,帖利民,等.大兴安岭西坡多年冻土地温变化模拟[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):21-27. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.004

CHANG X L, LAN A Y, TIE L M, et al. Modelled Thermal of Permafrost on the Western Slope of the Da Xing'anling Mountains [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(2): 21-27. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.004

大兴安岭西坡多年冻土地温变化模拟

常晓丽^{1,2}, 兰爱玉^{2*}, 帖利民¹, 张艳林¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 多年冻土作为大兴安岭西坡的重要组成部分,其变化发展深刻地影响着该地区的工程经济建设和生态环境建设。为进一步了解大兴安岭西坡多年冻土区的地温变化情况,基于地温波动理论,利用 Origin 软件对根河、伊图里河和满归 3 个地温监测站的多年冻土地温进行非线性拟合,建立相应的地温曲线拟合模型对当地多年冻土地温进行模拟研究。研究结果表明:一定时段内,各站点的地温模拟效果较好,尤其是冬、夏两季,地温模拟精度高于 0.99。

关键词: 大兴安岭西坡; 多年冻土; 地温曲线拟合模型; 模拟研究

中图分类号: P642.14

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2021)02-0021-07

Modelled Thermal of Permafrost on the Western Slope of the Da Xing'anling Mountains

CHANG Xiaoli^{1,2}, LAN Aiyu², TIE Limin¹, ZHANG Yanlin¹

(1. School of Resource & Environmental and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. State Key Laboratory of Frozen-Soils Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources (NIEER), Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Permafrost as an important part of the western slope of the Da Xing'anling Mountains, its development change profoundly affects the engineering economic construction and ecological environment construction. In order to further understand the variation of ground temperature in the permafrost region on the western slope of the Da Xing'anling Mountains, based on the theory of ground temperature fluctuation, the origin software was used to carry out nonlinear fitting of the ground temperature of permafrost in Genhe river, Yituli river and Mangui monitoring station, and the corresponding ground temperature curve fitting model was established, so as to simulate and study the ground temperature of local permafrost. The results show that the ground temperature simulation effect of each station is better in a certain period of time, especially in winter and summer, the ground temperature simulation accuracy is higher than 0.99.

Keywords: western Da Xing'anling Mountains; permafrost; ground temperature curve fitting model; simulation study

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41671059); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ5161); 冻土工程国家重点实验室开放基金资助项目(SKLFSE201505)

* 通信作者, E-mail: lanaiyu@nieer.ac.cn

大兴安岭西坡地处我国东北部,由于特殊的地理位置和气候条件,广泛分布着多年冻土,是我国高纬度多年冻土发育较好的地区之一^[1].作为寒区环境的重要组成部分,冻土是通过地-气间的能量和物质交换发育而成的,具有独特的演变规律,对环境变化的响应极其敏感.自20世纪30年代以来,由于战争及农林业的发展,大兴安岭西坡原始森林遭到了严重的破坏^[2-3],致使当地多年冻土上限下移、活动层厚度增加、冻土面积减少等,对生态环境和工程建设造成了严重的威胁^[4-5].而地温作为影响冻土性质的重要参数,其变化发展能够直接反映出冻土层的变化和演变趋势,因此,全面地掌握多年冻土地温的变化特征对大兴安岭西坡的生态、环境和工程建设具有重要的意义^[6].

目前,有关多年冻土地温的研究主要包括2方面:一是采用人工钻孔的实地监测研究,该方法虽然直接、精确,但由于多年冻土多分布于高寒、高海拔等环境恶劣区域,对实际工作的开展具有一定的局限性,因而难以获得完整、及时的地温监测数据^[7-9];二是基于模型的模拟研究,其相较于实地监测研究,不仅更加经济方便、易于实现,而且模拟结果能够很好地反映出研究区的地温变化规律,同时还能对冻土的变化趋势预测提供参考^[10-12].

当前冻土模型研究主要分为2类:一是物理因素详尽的过程模型,这类模型虽然能够详细地考虑各类因素对冻土变化过程的影响,但构建模型需要输入详细的参数,而这些参数由于环境及自身的复杂性,难以完全确定,因而,此类模型在大范围的冻土研究中存在一定的局限性^[7,13-16];二是经验模型,与物理过程模型相比,经验模型的建立更加简单快捷,不仅所需的参数较少,而且便于获取,适用于宏观、大尺度上的冻土研究^[17-20].对于大兴安岭西坡的多年冻土来说,由于空间尺度大且监测参数少,构建基于地温波动理论的冻土地温模型,并对地温进行拟合计算和模拟研究,对揭示当地多年冻土演变规律具有重要的推动作用.

1 基本原理与数据来源

1.1 基本原理

假设:(1)多年冻土区是一个近似于半无限大均匀介质的物体,其热量传递过程与半无限大物体在周期性边界条件作用下的非稳态导热过程十分相近;(2)地球表层短暂的非气候干扰因素(地形、产热和地下水流等)和系统扰动因素(如热性能变化等)可忽略不计;(3)大地热流所引起的温度梯度为定值.根据热传导理论,可得地表温度(边界条件)在周期性变化的条件下,任意深度 z 处任一时刻 t 的冻土地温可用方程表示为^[21-26]

$$T(z, t) = T_0 + q_0 R(z) + \sum_{i=1}^n A_0 e^{-k_i z} \cos[2\pi f_i(t - t_0) - k_i z]. \quad (1)$$

式中: T_0 为地表的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; q_0 为准稳定状态下的地表热流密度; $R(z)$ 为深度 z 处的地温梯度; i 为地表边界的不同周期; A_0 为简谐波的振幅, $^{\circ}\text{C}$; k 为冻土综合参数, m^{-1} , $k = (\pi f / \alpha)^{\frac{1}{2}}$ (α 为热扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$); f_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$)为地表不同周期温度简谐波动的频率; t_0 为地表温度简谐波的初始相位出现的时间.

若不考虑大地热流对冻土地温的影响,周期性边界条件下任意深度处,冻土地温随时间的变化可描述为^[21-25]

$$T(z, t) = T_0 + \sum_{i=1}^n A_0 e^{-k_i z} \cos[2\pi f_i(t - t_0) - k_i z]. \quad (2)$$

由式(1)和式(2)可知:任意深度冻土地温的变化规律与地表温度的变化规律相似,都可以用周期相同的余弦函数来近似描述,只是随着深度的增加,其简谐波的振幅在不断地减小,当减小到一定程度时,地温将不再波动.

1.2 数据来源

根河站位于大兴安岭西坡根河边上,地处大兴安岭冰缘地貌的强烈发育区,由于受蒙古国高压的控制和纬度地带性的影响,该站点冬季寒冷漫长,夏季温湿短暂,四季温差较大,一年中最低气温和最高气温分别出现在1月和7月,全年降水主要集中在夏季,占全年降水量的50%以上.伊图里河站和满归站均位于大兴安岭西坡地带,其气候条件与根河站基本相似.3个站点最大的区别在于:根河站由于靠近根河流域,

河水的流动性和水热性质等对当地冻土的发育具有一定的影响;伊图里河站位于图里河附近,其冻土的发育和保存也受到水流的影响,但相对于根河站而言受影响程度较少;而满归站由于远离流域,境内多年冻土发育情况相对较完全.

为探究大兴安岭西坡多年冻土区的地温变化情况,获取了根河站、伊图里河站和满归站 2010 年—2018 年间钻孔深度为 20 m 的地温监测数据,其中根河站和伊图里河站地温监测周期为一周,而满归站为逐月地温监测数据.此外,为了更加精确地对大兴安岭西坡多年冻土地温进行模拟研究,还获取了根河气象台站 2011 年—2018 年的逐日气温监测数据.

2 地温模型模拟与验证

2.1 确定模型周期

由于钻孔测温的时间较短(不到 1 h),所以在观测时间内孔内温度变化不大,且根据公式计算和监测数据的检验,1 d 内温度的变化对地温(尤其是较深层地温)的影响很小,可忽略不计,因此,某时段监测的地温数据即可代表当天的地温.

据研究表明,太阳辐射是地球表层地温分布的主要影响因素^[27-29],且太阳辐射的年周期变化对浅层地温的影响较显著,再加上浅层地温可在 1 年内达到平衡,所以本次地温拟合模型研究以 1 年为周期(即 $f = \frac{1}{365} \text{d}^{-1}$).

2.2 构建地温模型

由于钻孔深度为 20 m,大地热流对冻土地温的影响非常小,几乎可以忽略,所以只需考虑年周期的影响.在此情况下,各站点的地温波动方程为

$$T(z, t) = T_0 + A_0 e^{-kz} \cos[2\pi f(t - t_0) - kz]. \quad (3)$$

通过观察冻土地温变化规律可以发现:根河站、伊图里河站和满归站 3 个站点的地温曲线自某一深度 a 向下,地温基本保持不变,可近似看成一条直线,该直线与横坐标轴的交点即为稳定区的地温值,用 C_i 表示,而从地表至深度 a ,地温曲线可近似为一个简谐波.综上,建立的地温曲线拟合模型为

$$T_i(z, t) = \begin{cases} T_0^i + A_0^i e^{-k_i z} \cos[2\pi f(t - t_0^i) - k_i z], & z \in [0.5, a); \\ C_i, & z \in [a, 20]. \end{cases} \quad (4)$$

基于上述地温曲线拟合模型,假设大兴安岭西坡多年冻土浅层地温在气温的影响下,气温年均增温率 v 呈匀速增长,则每天浅层地温的增长率为 $\frac{v}{365}$;而深层地温由于受气温的影响较小,可忽略不计,地温保持不变,构建计算根河站、伊图里河站和满归站 3 个站点第 N 年第 t 天的地温模拟模型为

$$T_i(z, t) = \begin{cases} T_0^i + A_0^i e^{-k_i z} \cos[2\pi f(t - t_0^i) - k_i z] + (N - N_0^i) v + \frac{v}{365} t, & z \in [0.5, a); \\ C_i, & z \in [a, 20]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, 3$ 依次为根河站、伊图里河站和满归站 3 个地温监测站点; $T_i(z, t)$ 为第 i 地温监测站任一深度任一时刻的地温, $^{\circ}\text{C}$; z 为深度, m ; t 为地温监测时间, d ; T_0^i 为第 i 地温监测站的地表平均温度, $^{\circ}\text{C}$; A_0^i 为第 i 地温监测站的地表气温简谐波的振幅; k_i 为第 i 地温监测站的冻土综合参数; t_0^i 为第 i 地温监测站的地表温度波初始相位出现的时间, d ; C_i 为第 i 地温监测站稳定区的地温值, $^{\circ}\text{C}$; N_0^i 为第 i 地温监测站的地温模型拟合年份.

对于地温曲线拟合模型即式(4)中各参数 T_0^i, A_0^i, k_i 和 t_0^i 的确定问题,只要测得各站点任意时刻随深度变化的地温曲线,在 Origin 软件中利用式(3)对其进行拟合即可得到.

2.2.1 确定参数及增温率计算

1) 确定模型参数

为使大兴安岭西坡根河站、伊图里河站和满归站的地温模型精度更加精确,根据现有的数据,利用式

(3)分别对各站点不同时段的地温曲线进行非线性拟合,从中选取拟合效果最佳的时段(根河站2012年2月17日,伊图里河站2011年3月18日,满归站2013年8月22日)的拟合结果作为构建3个站点地温模型的参数如表1所示,图1~图3分别为3个站点的地温拟合效果图.

表1 3个站点地温拟合参数

站点	相关系数 R^2	平均温度 $T_0/^\circ\text{C}$	振幅 $A_0/^\circ\text{C}$	测量时间 t/d	初相时间 t_0/d	冻土综合 参数 k/m^{-1}	热扩散系数 $\alpha/(\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$
根河站	0.997 1	-0.308 3	-29.402 0	48	-13.144 1	1.003 7	0.008 5
伊图里河站	0.980 3	-0.588 6	-28.908 8	77	-48.622 2	1.408 8	0.004 3
满归站	0.990 5	-0.591 5	-25.365 2	234	344.143 8	1.260 2	0.005 4

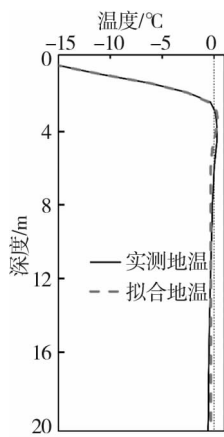


图1 根河站地温拟合效果图

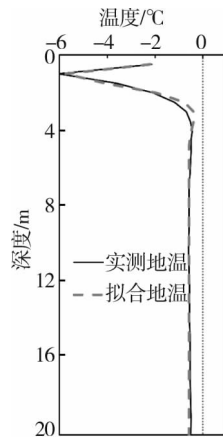


图2 伊图里河站地温拟合效果图

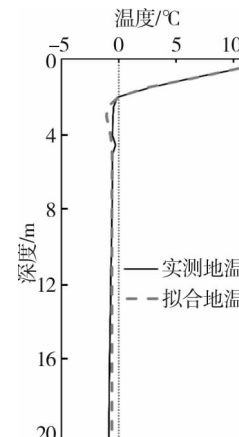


图3 满归站地温拟合效果图

由图1~图3可知:根河站8 m深度之下的地温稳定在 -0.31°C 左右,即 $a_1=8\text{ m}, C_1=-0.31$;伊图里河站6 m深度之下的冻土地温基本保持不变,稳定在 -0.59°C 左右,即 $a_2=6\text{ m}, C_2=-0.59$;满归站7 m深度之下冻土地温稳定在 0.59°C ,即 $a_3=7\text{ m}, C_3=-0.59$.

2)计算气温年均增温率

为了更好地对大兴安岭西坡多年冻土地温进行模拟研究,利用2011年—2018年根河地区的逐日气温数据,计算得到了各年的年平均气温分别为 $-3.177, -3.989, -3.142, -2.570, -1.838, -3.492, -2.837, -2.862^\circ\text{C}$,并通过计算得到了2011年—2018年根河地区气温的年平均增温率为 $0.045\text{ }1^\circ\text{C}/\text{a}$ (即 $v=0.045\text{ }1^\circ\text{C}/\text{a}$).

2.2.2 构建各站点模拟模型

根据上节分析,大兴安岭西坡3个站点地温的日平均增温率为 $0.045\text{ }1/365=1.235\text{ }6\times 10^{-4}\text{ }^\circ\text{C}/\text{a}$,随着气温的变化,根河站、伊图里河站和满归站第 N 年第 t 天的地温公式分别为

$$T_1(z, t) = \begin{cases} -0.308\text{ }3 - 29.402e^{-1.003\text{ }7z} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t + 13.144\text{ }1) - 1.003\text{ }7z\right] + 0.045\text{ }1(N - 2\text{ }012) + 1.235\text{ }6 \times 10^{-4}t, z \in [0.5, 8); \\ -0.31, z \in [8, 20]. \end{cases} \tag{6}$$

$$T_2(z, t) = \begin{cases} -0.588\text{ }6 - 28.908\text{ }8e^{-1.408\text{ }8z} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t + 48.622\text{ }2) - 1.408\text{ }8z\right] + 0.045\text{ }1(N - 2\text{ }011) + 1.235\text{ }6 \times 10^{-4}t, z \in [0.5, 6); \\ -0.59, z \in [6, 20]. \end{cases} \tag{7}$$

$$T_3(z,t) = \begin{cases} -0.5915 - 25.365 2e^{-1.2602z} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - 344.1438) - 1.2602z\right] + 0.0451(N - 2013) + 1.2356 \times 10^{-4}t, z \in [0.5, 7); \\ -0.59, z \in [7, 20]. \end{cases} \quad (8)$$

2.3 地温模拟验证

利用上述模型即式(6)~式(8),分别对各站点不同时段的冻土地温进行模拟,并将模拟结果与实测地温进行对比,结果表明:春季和秋季各站点的地温模拟结果存在一定的误差,但冬季和夏季的地温模拟结果较好.图4~图6分别是根河站2018年6月22日(即 $N=2018, t=173$)、伊图里河站2017年1月20日(即 $N=2017, t=20$)和满归站2016年7月31日(即 $N=2016, t=213$)的地温模拟结果.

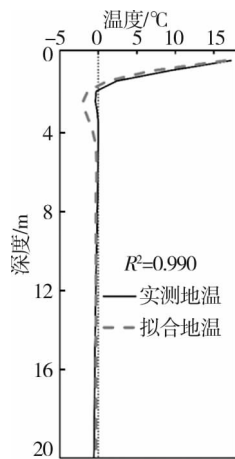


图4 根河站模拟结果

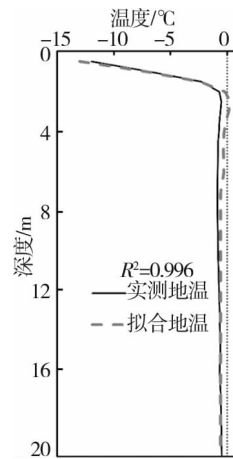


图5 伊图里河站模拟结果

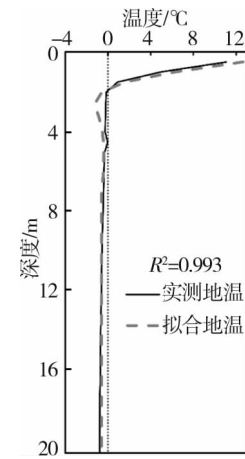


图6 满归站模拟结果

从图4~图6可以看出:3个站点的模拟地温曲线和实测地温曲线随深度变化的趋势基本相同,虽然浅层地温的模拟值稍高于实测值,但相差并不大,而深层地温基本相等.由此可知,一定时段内3个站点的地温模拟效果较好,尤其是冬季和夏季,各站点的地温模拟精度均高于0.990.

3 讨论

通过上述研究发现:所构建的地温模型能够很好地对根河站、伊图里河站和满归站3个站点夏季和冬季的冻土地温进行模拟,而春季和秋季的地温模拟效果较差.主要原因在于:冬季和夏季冻土活动层处于完全冻结或融化状态,土层性质相对均一,岩土的热导率一致;春季和秋季冻土层正处于融化和冻结阶段,土层处于冰水混合状态,岩土性质不均匀,热导率存在较大的差异.所构建的地温模型是在假设冻土层为半无限大均匀介质的条件下建立起来的,所以冬季和夏季的土层性质基本符合假设条件,地温模拟效果好,反之,春季和秋季的地温模拟效果较差.综上可知,该地温模型对于岩性存在较大差异的多层地层的适用性较差,因而在接下来的研究中可在该模型的基础上,构建适用于多层地层的地温拟合模型,从而更精确地对各层地温进行模拟.

利用式(3)分别对3个站点的地温进行拟合,得到相应的热扩散系数如表1所示,其中根河站的热扩散系数最大,满归站次之,伊图里河站最小.影响3个站点热扩散系数大小的因素包括土层含水量和土壤质地等,随着含水量的增加和土壤颗粒的增大,热扩散系数不断增大^[30-32].根河站由于靠近根河流域,河水的水热特性对其影响较大,使得当地土层含水量较高,且该地土壤质地以沙土为主,因而其导热系数大;伊图里河站虽然也位于图里河附近,但相对于根河站,其受图里河水热特性的影响较小,土壤含水量低,且该地土壤以黏土为主,所以伊图里河站的导热系数较小;对于满归站而言,由于该站点的地温拟合时段为8月,冻土层处于融化状态,土壤含水量高,因而其导热系数较高.

本文基于地温波动理论建立了相应的地温模型对大兴安岭西坡各站点的冻土地温进行模拟,虽然该模型还不能对大面积的冻土地温进行系统化、网络化模拟,但其可对较深层次的多年冻土地温进行精确的拟合,这对探究全球气候变暖背景下冻土层中热量传递过程的变化具有重要的意义.有关于冻土地温模拟方面的研究还有构建地形(海拔、坡向等)、纬度和气象因子(气温等)间的关系模型,数值模型和陆面过程模型.地形-纬度-气象关系模型还可以结合GIS技术模拟冻土地温的空间分布情况^[33-35],该方法虽然可以模拟大区域的冻土地温,但不能对小尺度的地温变化特征进行详细的模拟;数值模型和陆面过程模型可以较多地考虑地表过程,精确地拟合冻土地温,但其大多局限于浅层地温的模拟,不能反映深层冻土地温的变化情况^[36-38].综上,目前关于多年冻土地温的模拟研究还存在一定的不足,如何综合各模型的优势,改进和发展更系统、精确度更高的地温模型是今后多年冻土地温模拟研究的重要方向.

4 结论

1) 基于地温波动理论对大兴安岭西坡根河站、伊图里河站和满归站的冻土地温进行非线性拟合,所建立的地温曲线拟合模型能够很好地对当地夏季和冬季的冻土地温进行模拟,说明在一定时段内该模型的模拟精度较高,且通过拟合地温曲线能够大致求得各站点岩石的导热系数、地表年平均温度、振幅和初相等,这对进一步研究大兴安岭西坡的多年冻土具有重要的意义,因此,该方法可以在实际工作中得到推广应用.

2) 所构建的冻土地温模型是在假设冻土层为半无限大均匀介质的条件下建立起来的,只有当地层性质符合或基本符合假设条件时,模型才能适用.在接下来的研究中,可在本文的基础上对研究区进行一个较为详细的地质调查,以便对其进行分区、分层模拟,从而建立更加全面系统且精确的地温模型.

参考文献:

- [1] 周幼吾,郭东信,邱国庆,等.中国冻土[M].北京:科学出版社,2000.
- [2] 常晓丽.大兴安岭北部植被与积雪对冻土地温影响研究[D].北京:中国科学院大学,2011.
- [3] 宿伯杰.大兴安岭林区生态环境破坏与呼玛河及嫩江流域洪水[J].国土与自然资源研究,1999(1):51-53.
- [4] 何瑞霞,金会军,常晓丽,等.东北北部多年冻土的退化现状及原因分析[J].冰川冻土,2009,31(5):829-834.
- [5] 何瑞霞,金会军,吕兰芝,等.东北北部冻土退化与寒区生态环境变化[J].冰川冻土,2009,31(3):525-531.
- [6] 张鲁新.青藏铁路高原冻土区地温变化规律及其对路基稳定性影响[J].中国铁道科学,2000,21(1):39-49.
- [7] 黄文芳,李畅,马宇,等.高海拔多年冻土调查方法及分布模型研究进展[J].人民长江,2017,48(s2):123-128.
- [8] 李述训,吴通华.冻土温度状况研究方法和应用分析[J].冰川冻土,2004,26(4):377-383.
- [9] 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):33-41.
- [10] 吴青柏,李新,李文君.青藏公路沿线冻土区域分布计算机模拟与制图[J].冰川冻土,2000(4):323-326.
- [11] 曹元兵,盛煜,吴吉春,等.上边界条件对多年冻土地温场数值模拟结果的影响分析[J].冰川冻土,2014,36(4):802-810.
- [12] 王陆阳,吴青柏,蒋观利.风沙堆积对下伏多年冻土影响的数值模拟[J].冰川冻土,2018,40(4):738-747.
- [13] 张钰鑫,谢昌卫,赵林,等.青藏高原可可西里卓乃湖溃决出露湖底多年冻土形成过程的监测与模拟[J].冰川冻土,2017,39(5):949-956.
- [14] 吴小波,南卓铜,王维真,等.基于Noah陆面过程模型模拟青藏高原植被和土壤特征对多年冻土的影响[J].冰川冻土,2018,40(2):279-287.
- [15] You Q G, Xue X, Peng F, et al. Surface water and heat exchange comparison between alpine meadow and bare land in a permafrost region of the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232:48-65.
- [16] 郭林茂,常娟,徐洪亮,等.基于BP神经网络和FEFLOW模型模拟预测多年冻土活动层温度——以青藏高原风火山地区为例[J].冰川冻土,2020,42(2):399-411.

- [17] Xu X M, Zhang Z Q, Wu Q B. Simulation of permafrost changes on the Qinghai-Tibet Plateau, China, over the past three decades[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2017, 10(5): 522-538.
- [18] Zhao S P, Nan Z T, Huang Y B, et al. The Application and Evaluation of Simple Permafrost Distribution Models on the Qinghai-Tibet Plateau: Evaluation of permafrost distribution models on QTP[J]. *Permafrost and Periglacial Process*, 2017, 28(2):391-404.
- [19] 南卓铜,李述训,刘永智.基于年平均地温的青藏高原冻土分布制图及应用[J].*冰川冻土*,2002,24(2):142-148.
- [20] 程国栋,王绍令.试论中国高海拔多年冻土带的划分[J].*冰川冻土*,1982,4(2):1-17.
- [21] 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.
- [22] 何报寅,刘杰,徐贵来,等.浅层地温剖面曲线拟合法估算热扩散系数[J].*华中师范大学学报(自然科学版)*,2012,46(1):104-108.
- [23] 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.
- [24] AL-Temeemi A A, Harris D J. The generation of subsurface temperature profiles for Kuwait[J]. *Energy and Buildings*, 2001, 33(8):837-841.
- [25] Labs K. Underground building climate[J]. *Solar Age*, 1979, 4(10):44-50.
- [26] 董刚,李泽.典型多年冻土区公路地温观测研究[J].*公路交通科技(应用技术版)*,2018,14(5):158-161.
- [27] 陈晓冬,金旭,管彦武,等.长春地区地表温度日变、年变对地温测量的影响[J].*地球物理学进展*,2006,21(3):1008-1011.
- [28] 王衍斐.基于GIS的义乌市浅层地温能评价模型研究[D].南京:南京师范大学,2012.
- [29] 陈拯.太阳辐射对拱坝温度场的影响研究及其工程应用[D].北京:清华大学,2007.
- [30] 张乐乐,赵林,李韧,等.青藏高原唐古拉地区暖季土壤水分对地表反照率及其土壤参数的影响[J].*冰川冻土*,2016,38(2):351-358.
- [31] 何瑞霞,金会军,赵淑萍,等.冻土导热系数研究现状及进展[J].*冰川冻土*,2018,40(1):116-126.
- [32] 何玉洁,宜树华,郭新磊.青藏高原含砂砾石土壤导热率实验研究[J].*冰川冻土*,2017,39(2):343-350.
- [33] 焦世晖,王凌越,刘耕年.全球变暖背景下青藏高原多年冻土分布变化预测[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2016,52(2):249-256.
- [34] 张中琼,吴青柏,张泽,等.气候变暖情景下青藏高原多年冻土地温变化分析[C]//第九届全国工程地质大会论文集.2012:610-613.
- [35] Zhang W J, Cheng W M, Ren Z P, et al. Simulation of permafrost distributions in the Qilian Mountains using a multi-criteria approach[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 103:63-73.
- [36] Guo D, Wang H, Li D. A projection of permafrost degradation on the Tibetan Plateau during the 21st century[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2012, 117:D05106.
- [37] Lawrence D M, Slater A G. A projection of severe near-surface permafrost degradation during the 21st century[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): 230-250.
- [38] 马帅,盛煜,曹伟,等.黄河源区多年冻土空间分布变化特征数值模拟[J].*地理学报*,2017,72(9):1621-1633.