

基于多年冻土顶部温度模型的 东北多年冻土时空分布变化

王薪迪¹, 李秀娟¹, 王文杰¹, 王政博¹, 丁琳¹, 宋杨², 柳艳杰^{1*}

(1. 黑龙江大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150080; 2. 深圳大学 土木与交通工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要: 以东北地区为研究对象, 分析多年冻土退化程度及空间分布。通过收集关键气象要素, 使用多元线性回归模型修正部分地面温度, 基于多年冻土顶部温度 (temperature at the top of permafrost, TTOP) 模型, 利用 ANUSPILN 软件进行插值, 分析东北多年冻土时空分布变化。结果表明, 1970 s、1980 s、1990 s、2000 s、2010 s 的多年冻土面积分别约为 3.99×10^5 、 3.41×10^5 、 2.31×10^5 、 1.80×10^5 、 1.59×10^5 km²。1970 s—2010 s, 东北地区的多年冻土面积显著减少约 2.40×10^5 km², 降幅高达 60.08%。多年冻土面积占东北地区总面积的比例从 27.66% 下降至 11.04%, 而季节性冻土面积比例则从 72.34% 增加至 88.96%。模型结果与实际钻孔数据差值仅为 0.05 °C, 且使用修正地面温度数据的模型结果高于现有研究结果。

关键词: 东北; 多年冻土分布; 冻土退化; 多年冻土顶部温度模型; 多元线性回归; 地表温度; 数字高程; 钻孔数据

中图分类号: S716.3; P314.5

文献标识码: A

DOI: 10.7525/j.issn.1006-8023.2025.05.012

The Spatial and Temporal Distribution of Permafrost in Northeast China Based on Temperature at the Top of Permafrost Model

WANG Xindi¹, LI Xiujuan¹, WANG Wenjie¹, WANG Zhengbo¹, DING Lin¹, SONG Yang², LIU Yanjie^{1*}

(1. School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Taking the Northeast China as the research object, this paper investigated the degradation degree and spatial distribution of permafrost over the years. Key meteorological elements were collected, and a multiple linear regression model was used to calibrate the ground surface temperature data. Based on the temperature at the top of permafrost (TTOP) model, and using ANUSPILN software for interpolation, the spatial and temporal distribution of permafrost in Northeast China was analyzed. The results showed that the areas of permafrost in the 1970 s, 1980 s, 1990 s, 2000 s, 2010 s were about 3.99×10^5 , 3.41×10^5 , 2.31×10^5 , 1.80×10^5 , 1.59×10^5 km², respectively. During the period of 1970 s to 2010 s, the permafrost area in Northeast China decreased significantly by about 2.40×10^5 km², with a decrease of 60.08%. The proportion of permafrost area in Northeast China decreased from 27.66% to 11.04%, while the proportion of seasonally permafrost area increased from 72.34% to 88.96%. The difference between the model results and the actual borehole data was only 0.05 °C, and the model results using the corrected ground temperature data were higher than the existing research results.

Keywords: Northeast; permafrost distribution; frozen soil degradation; temperature at the top of permafrost model; multiple linear regression; surface temperature; digital elevation model; borehole data

收稿日期: 2025-04-02

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2023D022); 冰冻圈科学与冻土工程重点实验室开放课题(CSFSE-KF-2429); 山区桥梁及隧道工程国家重点实验室项目(SKLB-T-ZD2302)。

第一作者简介: 王薪迪, 硕士研究生。研究方向为冻土工程。E-mail: 2242855@s.hlj.u.edu.cn

***通信作者:** 柳艳杰, 博士, 教授。研究方向为冻土工程、岩土工程、工程力学。E-mail: 1996058@hlj.u.edu.cn

引文格式: 王薪迪, 李秀娟, 王文杰, 等. 基于多年冻土顶部温度模型的东北多年冻土时空分布变化[J]. 森林工程, 2025, 41(5): 990-999.

WANG X D, LI X J, WANG W J, et al. The spatial and temporal distribution of permafrost in Northeast China based on temperature at the top of permafrost model[J]. Forest Engineering, 2025, 41(5): 990-999.

0 引言

中国多年冻土主要分布于青藏高原的高海拔多年冻土区、东北地区的高纬度多年冻土以及西北高山多年冻土区,因地理条件影响,其分布规律具有明显的纬度和垂直地带性。其水平分布规律服从纬度地带性,主要分布在大、小兴安岭山地及松嫩平原北部,高海拔多年冻土的形成与存在受地域海拔的控制,主要分布在青藏高原、阿尔泰山、天山、祁连山、横断山、喜马拉雅山以及东部局部山地。

随着全球气候变化的不断加剧、人类活动增多以及其他因素的影响,多年冻土的退化进程加快,从而导致工程建设、粮食安全和生活环境等问题愈发严重,不仅有区域性的影响,同时也对全球生态环境至关重要,这关乎生产建设和社会发展。鉴于此,了解东北地区多年冻土状况,是为未来制定工程建设方案、土地可持续利用和管理政策提供有价值的科学参考,推动东北地区的生态平衡和可持续发展。

模拟多年冻土的空间分布模型主要包括 Stefan 模型^[1]、冻结指数模型^[2]、海拔模型^[3]、多年冻土顶部温度模型(temperature at the top of permafrost, TTOP)^[4]。其中,TTOP 模型凭借出色的表现和优良的适用性被广泛关注,其能够连接地表气候与地下热特征,并建立补偿效应分析模型与气候等因素之间的关系^[5],随着光学遥感、热红外遥感和微波遥感等遥感技术的发展,通过统计学习^[6]、构建模型^[7-8]和逻辑判别^[9]等方法对多年冻土进行观测和绘图。因此,TTOP 模型的应用取得了许多研究成果^[10-13]。多年冻土的退化情况不尽相同,但是,多年冻土退化的典型特征是多年冻土范围缩小、土壤温度升高和活动层厚度增加^[14]。改变该区域内的地表排水模式和植被群落分布,影响土壤的物理特性和生态系统^[15]。

相关研究人员利用多种数据来源,如气象站数据、钻孔测量数据和遥感数据(Landsat 和中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)反演地表温度数据、干涉合成孔径雷达数据等),对中国东北地区的冻土退化程度进行了广泛研究^[16-18]。然而,对比同期东北地区多年冻土分布的最新结果,发现多年冻土面积差异较大,达到 $12.81 \times 10^4 \text{ km}^2$,这说明需要进一步研究东北地区多年冻土的分布情况。此外,在2006年前后,中国气象站使用自动测量替换了原来的人工测量,导致了前后平均地面温度(gradient surface temperature, GST)有较大差异性,因此在此过渡之后,GST数据缺乏统一性。

本研究的目的是基于1 km分辨率数据的TTOP模型绘制中国东北地区的多年冻土分布图。以机器学习

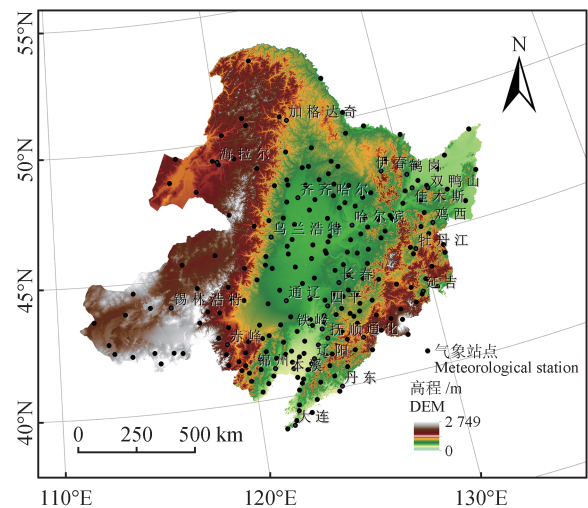
(回归算法)的方式消除地面温度气象站前后历史数据的不一致性,利用ANUSPILN软件进行插值,计算出东北地区的多年顶板温度,并根据实测钻孔数据的年平均地温(mean annual ground temperature, MAGT),进行模型结果与实测数据的相关性分析。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

1.1.1 气象数据

本研究在国家气象信息中心(<https://data.cma.cn/>)收集了1970—2020年263个地面气象站的逐日气象数据,由于气象站的特殊性及其数据质量对模型插值计算的准确性具有重要影响,在数据筛选过程中特别注重气象站点的稳定性和连续性。为确保数据的可靠性,本研究以10 a为一个时间序列,该时间序列作为时间分辨率,对气象站点进行了严格的筛选,最终选取了235个分布合理且数据连续的气象站点作为研究对象。其中气象要素包括气温、地面温度(GST)等。235个站点的分布情况如图1所示。



审图号:黑S(2025)114号

Drawing number: Hei S(2025) No. 114

图1 研究区域位置图

Fig. 1 Study area location map

此外,本研究还整合了1979—2020年长时间序列的中国积雪深度数据,该数据的时间分辨率为1 d,空间分辨率为25 km,数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)。

1.1.2 数字高程模型(digital elevation models, DEM)

本研究选取了地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>)的SRTMDEMUTM 90 m分辨率数字高程数据产品,使用澳大利亚国立大学开发的专门处理气象

数据软件(ANUSPLIN)进行空间插值时,DEM数据作为协变量引入。

1.1.3 融土导热系数与冻土导热系数之比(r_k)

融土导热系数与冻土导热系数之比(r_k)随着土地利用类型的变化而变化。本研究数据来源为“https://zenodo.org/record/4417810#.Y3x79mlByUk”,选取的是1995年的数据,同时对东北地区的土地利用类型数据进行了重分类,并通过对 r_k 进行赋值,土地利用和土地覆盖(the land-use/land-cover, LULC)类型的 r_k 赋值见表1,以此来反映土地利用类型变化对东北地区多年冻土变化特征的影响。

表1 不同LULC类型的 r_k 赋值

Tab. 1 r_k assignment of different LULC types

LULC类型 LULC types	r_k	LCCS分类系统编号 LCCS classification system number
未利用土地 Unused land	0.95	140, 150, 152, 153, 200, 201, 202
草地、耕地 Grass, farmland	0.75	10, 11, 12, 20, 130
灌木 Shrub	0.80	120, 121, 122
林地 Forest	0.95	50, 60, 61, 62, 70, 71, 72, 80, 81
湿地 Wetland	0.55	180
建设用地 Construction land	0.70	190

1.2 研究方法

1.2.1 局部薄盘光滑样条插值法

局部薄盘光滑样条插值法能够同时考虑多个协变量,能够同时获取多个表面的空间插值,并且,该方法还可以兼顾插值表面的精确度和平滑度,能够较好地反映出气象数据的空间分布。因此,本研究选取ANUSPLIN软件对数据进行处理。

本研究中ANUSPLIN的输入文件包括1970—2020年的地面温度数据.dat格式文件,引入协变量文件ASC II格式的DEM数据及编写的批处理命令文件sp-lina.cmd和lapgrd.cmd,该方法的公式为

$$Z_i = f(x_i) + b_{y_i}^T + e_i (i = 1, 2, 3, \dots, N)。 \quad (1)$$

式中: Z_i 为空间点 i 的因变量; x_i 为 d 维样条独立变量; f 为关于 x_i 的未知光滑函数; y_i 为 p 维独立协变量; b 为 y_i 的 p 维函数; e_i 为自变量随机误差。

其中,函数 $f(x_i)$ 与系数 b 由最小二乘法得到

$$\min: \sum_{i=1}^n \left[\frac{Z_i - f(x_i) - b_{y_i}^T}{w_i} \right]^2 + \rho J_m(f)。 \quad (2)$$

式中: $J_m(f)$ 为函数 f 的 m 阶偏导函数,被称为函数 $f(x_i)$ 的粗糙测度函数; ρ 为由广义交叉验证(generalized cross-validation, GCV)的最小化确定的正光滑参数,对平衡曲面粗糙度和数据保真有较好的作用效果。

1.2.2 TTOP模型

TTOP模型(式中记为 T_{TOP})是一个用于描述多年冻土与气候之间关系的平衡方程

$$T_{TOP} = \frac{r_k D_{DT} - D_{DF}}{P}。 \quad (3)$$

$$r_k = \frac{\lambda_t}{\lambda_f}。 \quad (4)$$

式中: D_{DT} 为融化指数; D_{DF} 为冻结指数; λ_t 为解冻土壤导热系数, W/(m·°C); λ_f 为冻土导热系数, W/(m·°C); P 是一年中的总天数,d); r_k 为基于LULC类型的赋值。

冻土的分布类型由以下公式确定

$$\begin{cases} T_{TOP} \leq 0^\circ\text{C}, \text{ 多年冻土} \\ T_{TOP} > 0^\circ\text{C}, \text{ 季节冻土} \end{cases}。 \quad (5)$$

1.2.3 多元线性回归模型

TTOP模型的地面冻融指数(D_{DF}/D_{DT})是由地面温度(ground surface temperature, GST)计算获得,目前获取地面温度主要有遥感卫星反演和陆地气象实测2种,考虑到东北地区植被覆盖高,冬季有较厚的积雪,遥感卫星反演结果实际为植被冠层或积雪表面温度,并不适用东北地区,故采用地面气象站观测的GST作为输入参数。整理数据时发现2006年以后观测的GST空间误差性更大,因此使用机器学习方法中的多元线性回归模型^[19-20],以2005年及以前的数据作为基础,训练和验证历史数据得到模型中的特征系数,然后输出2006—2020年的逐日GST。其中,训练集使用范围为1970—1998年,约占输入数据集的80%,验证集使用范围为1999—2005年,约占输入数据20%。

多元线性回归模型^[19-20]

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n。 \quad (6)$$

式中: y 为目标变量(这里是GST); b_0 是截距; b_1 — b_n 是特征的系数; x_1 — x_n 是特征值。回归算法是机器学习的基础模型之一,可以用来探索自变量与因变量之间的关系以及预测未知值,是一个简单且有效的方法,大量的数据能够使模型的拟合程度更高,提高了模型的鲁棒性(robustness),误差更小。本研究使用Python 3.10中的Sklearn模型库搭建并计算,以经度、纬度、海拔、气温、降水量、相对湿度、气压、日照和积雪雪深作为特征值输入,GST作为目标变量。

1.3 地面温度计算与调整

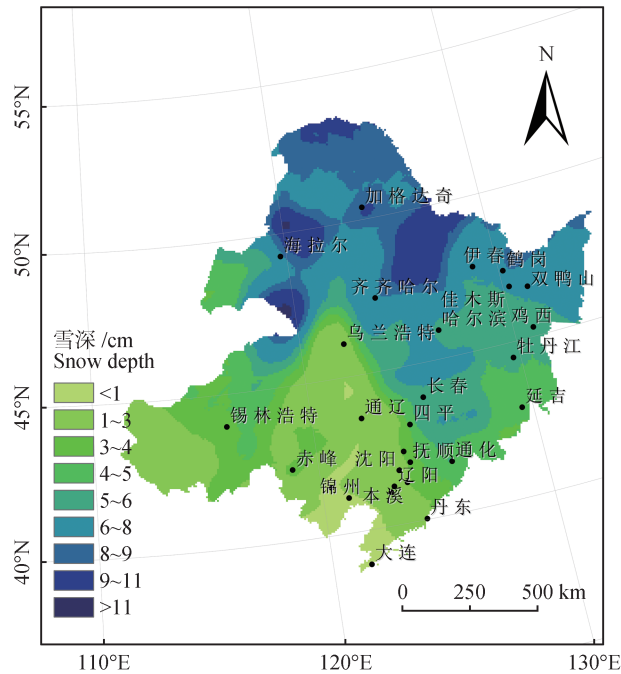
1.3.1 积雪雪深

东北地区具有独特的气候特征,夏季短暂,冬季漫

长,尤其是在东北北部,冬季通常被厚厚的积雪覆盖,这对地面温度的观测产生严重影响。在人工观测地面温度时,工作人员需要将温度计放置在未被破坏的雪面上进行测量,此时记录的温度实际上是雪面温度。而自动站观测地面温度通过传感器直接获取地面温度,无须将设备取出雪面,因此记录的是积雪底部的温度。由于自然积雪内部含有大量空气,具有良好的保

温效果,积雪底部的温度通常高于积雪表面。

由图 2 可以发现,东北地区受积雪影响的程度较大,平均积雪深度为 8.8 cm,大部分区域的积雪深度超过 5 cm。其中,大兴安岭和小兴安岭地区的积雪深度尤为显著,普遍超过 11 cm,最深可达 21 cm。相比之下,东北地区南部的辽宁和内蒙古一带,其积雪较薄且分布面积较小。



审图号:黑S(2025)114号

Drawing number: Hei S(2025) No. 114

图 2 1979—2020 年东北地区平均积雪雪深空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average snow depth in Northeast China from 1979 to 2020

1.3.2 地面温度与修正地面温度对比分析

采用机器学习方法,以经度、纬度、海拔、气温、降水量、相对湿度、气压、日照时数和积雪深度等逐日地面气象数据作为特征值输入,训练和验证样本基于 2005 年及以前的地面温度数据,利用这些数据对 2006—2020 年的地面温度进行计算和调整。温差是由积雪覆盖导致的,因此在调整结果时,对无积雪覆盖的数据做数据还原,只保留积雪覆盖时的数据修正。

通过对修正后的地面温度数据进行分析,将东北地区的地面温度、修正后的地面温度以及气温进行了对比,如图 3 所示,修正以后的地面温度整体下降约 2 °C,同时变化趋势与 2006 年之前的地面温度衔接良好,与气温变化趋势一致,具有较好的统一性。

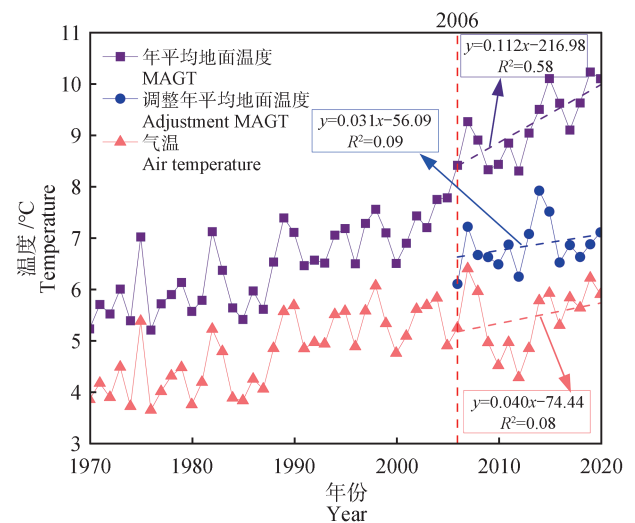


图 3 1970—2020 年平均地面温度、修正地面温度和气温变化情况

Fig. 3 Average ground temperature, corrected ground temperature and air temperature change from 1970 to 2020

2 结果与讨论

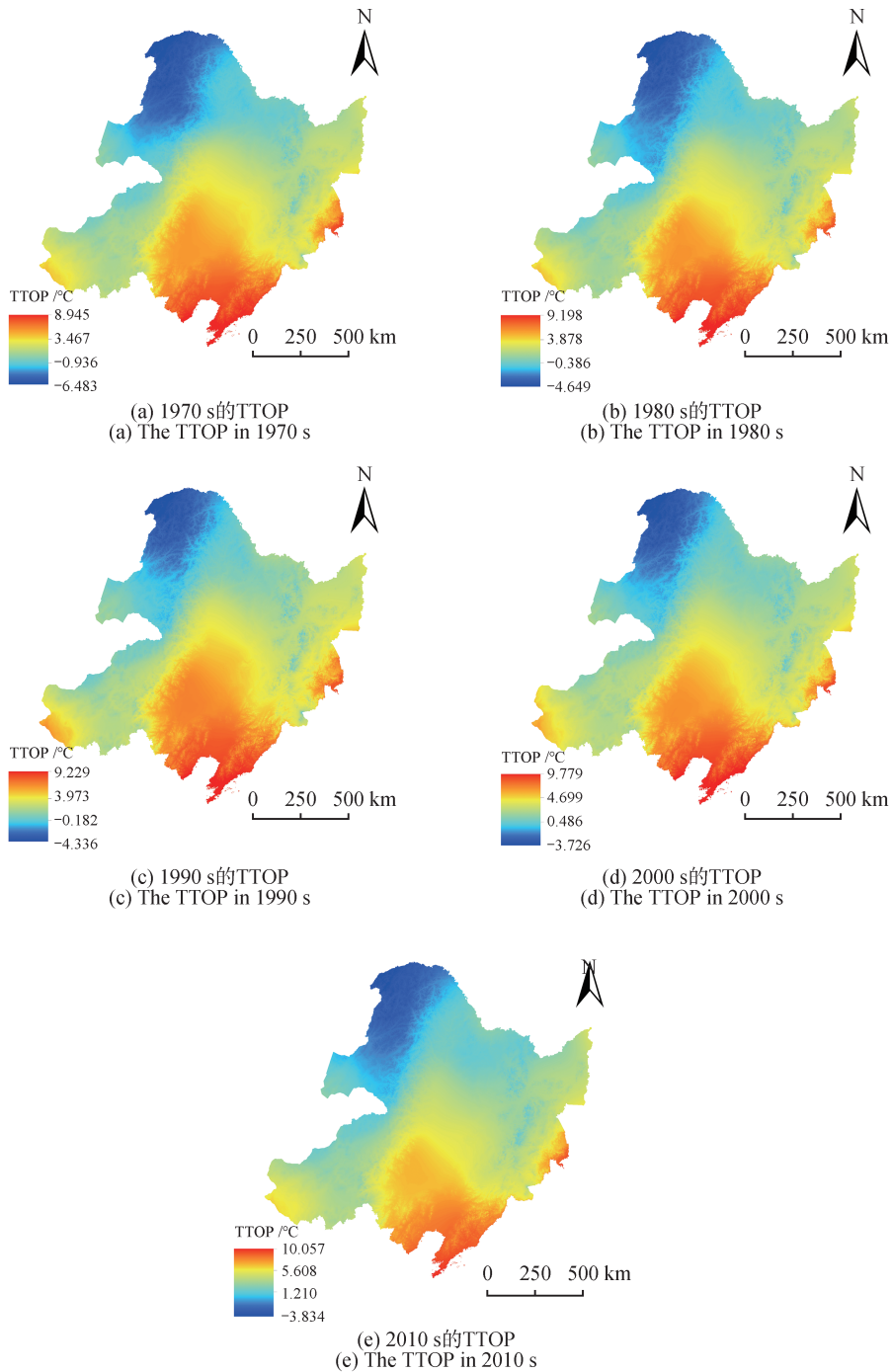
2.1 TTOP 模拟结果

结合历史气象数据,利用 TTOP 模型计算了东北

地区各站点的多年冻土顶板温度。通过 ANUSPLIN 软件对 1970 s—2010 s 东北地区的 TTOP 进行了空间插值模拟,如图 4 所示。

1970 s—2010 s,东北地区的 TTOP 发生了显著变化。最高温度从 8.945 °C 上升至 10.057 °C,升高了 1.112 °C,增幅达到 12.43%;最低温度从 -6.483 °C 上升至 -3.834 °C,升高了 2.649 °C,增幅高达 40.86%。随

着时间的推移,东北地区的整体温度呈现持续上升的趋势,尤其是低温区的升温幅度更为显著。此外,低温区的面积逐渐缩小,但其核心区域仍维持在大兴安岭和小兴安岭一带,表明这些高纬度高海拔地区对气候变化具有一定的缓冲作用,能够在一定程度上维持低温环境的相对稳定。



审图号:黑S(2025)114号

Drawing number: Hei S(2025) No. 114

图4 TTOP模型模拟东北地区1970 s—2010 s TTOP空间分布状态

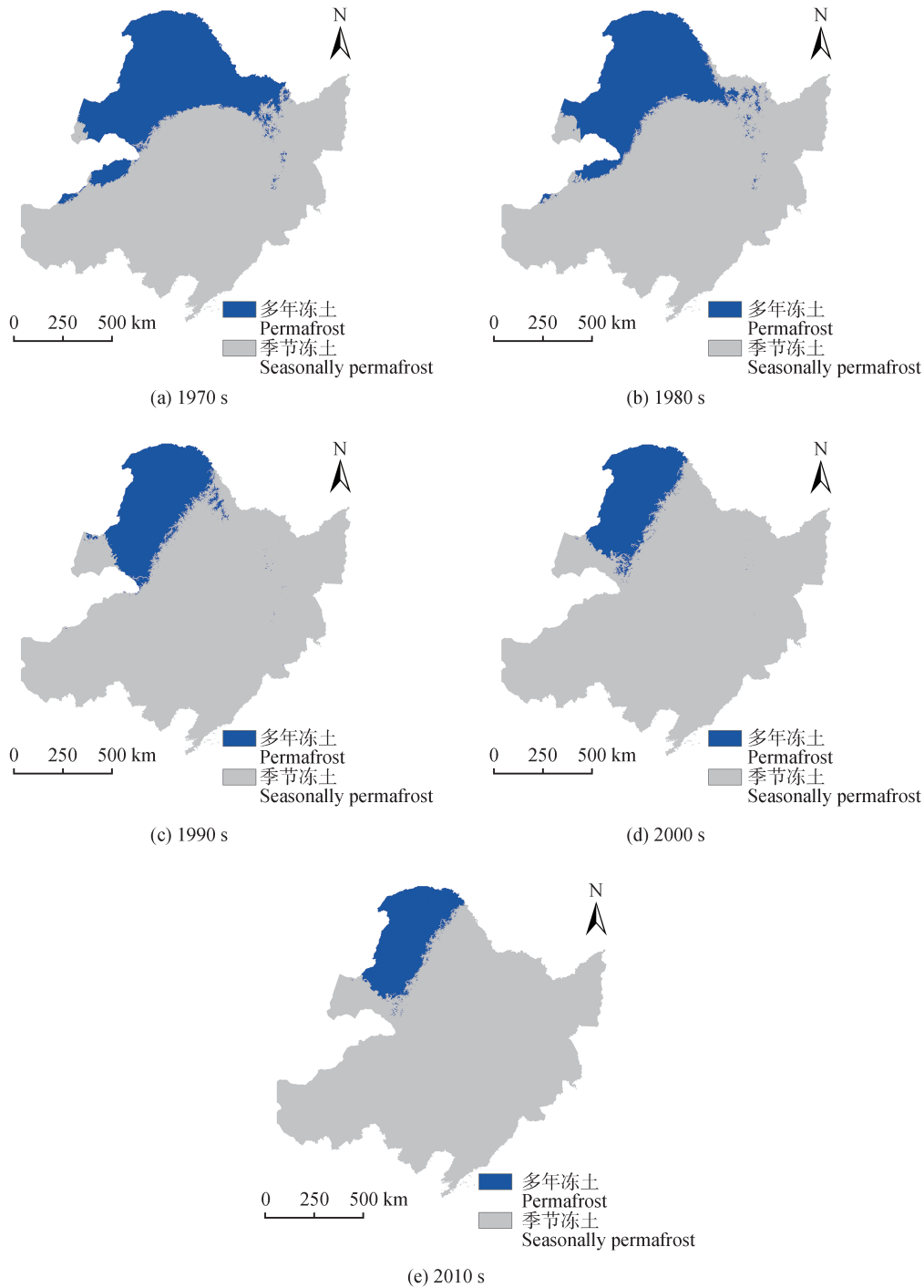
Fig. 4 The TTOP model simulates the spatial distribution of TTOP in Northeast China from 1970 s to 2010 s

2.2 冻土分区

根据 TTOP 模型的计算结果, 将 $T_{TOP} \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的区域划分为季节性冻土区, $T_{TOP} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的区域划分为多年冻土区。

由图 5 可知, 1970 s、1980 s、1990 s、2000 s、2010 s 的多年冻土面积分别约为 3.99×10^5 、 3.41×10^5 、 $2.31 \times$

10^5 、 1.80×10^5 、 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。1970 s—2010 s, 东北地区的多年冻土面积显著减少了约 $2.40 \times 10^5 \text{ km}^2$, 降幅高达 60.08%。与此同时, 多年冻土面积占东北地区总面积的比例从 27.66% 下降至 11.04%, 而季节性冻土面积比例则从 72.34% 增加至 88.96%。



审图号: 黑 S(2025)114 号

Drawing number: Hei S(2025) No. 114

图 5 1970 s—2010 s 东北地区冻土划分情况

Fig. 5 The division of permafrost in Northeast China from 1970 s to 2010 s

多年冻土主要集中分布在东北北部的大兴安岭一带,而小兴安岭等地的多年冻土大部分已经退化为季节性冻土。这种变化与全球气候变暖的背景密切相关,尤其是在高纬度地区,气温的显著上升加速了多年冻土的退化。大兴安岭地区由于海拔较高、纬度较高,保留了一定面积的多年冻土,但其范围也在逐渐缩小。

本研究对多年冻土面积进行了统计,统计结果如图6所示,表明多年冻土退化趋势已明显加剧。

2.3 模拟评价

本研究收集2000—2020年东北地区冻土区^[21-26]的50个钻孔数据的年平均地温(MAGT),其中2000s和2010s各包含25组数据。此外,还参考了2019年Obu等^[27]发表的相关研究成果,并将其与本研究计算的多年冻土顶板温度(TTOP)进行了对比分析,结果见表2。2个时期的50个钻孔数据的平均温度为 $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$,本研究中平均TTOP为 $-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者之间的差值仅为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。均方根误差(root mean square error, RMSE, 式中记为 R_{MSE})为 $1.32\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均绝对误差(mean absolute error, MAE, 式中记为 M_{AE})为 $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}$,如图7所示。误差值在可接受范围内,表明本研究的TTOP计算结果与实测钻孔数据具有较高的一致性,本

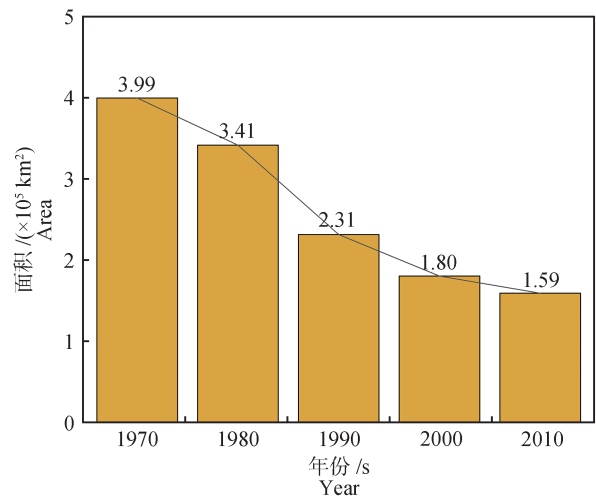


图6 不同时期东北地区多年冻土变化规律

Fig. 6 Variation law of permafrost in Northeast China in different periods

研究绘制的东北地区多年冻土分布图具有较高的可信度。这不仅验证了TTOP模型在东北地区的适用性,也为进一步研究冻土的空间分布及其对气候变化的响应提供了可靠的数据支持。此外,本研究的结果与Obu等^[27]的研究成果相吻合,进一步增强了研究结论的科学性和可靠性。

表2 本研究模拟的钻孔测得的年平均地温(MAGT)和多年冻土顶部温度(TTOP)

Tab. 2 The annual mean ground temperature (MAGT) and the temperature at the top of permafrost (TTOP) measured by the simulated boreholes in this study

钻孔 Bore hole	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	实测的MAGT/ $^{\circ}\text{C}$ Actual measurement MAGT	TTOP/ $^{\circ}\text{C}$	模拟误差 Simulation error	Obu等 ^[27] 的TTOP/ $^{\circ}\text{C}$ TTOP from Obu, et al ^[27]
CW1	123.98	53.33	-1.63	-2.12	0.48	0.74
CW3	124.58	52.99	-0.10	-1.64	1.77	1.86
CW4	124.51	52.74	1.90	-1.50	3.70	1.32
CW5	124.58	52.54	-1.80	-1.28	-0.05	1.24
CW6	124.66	52.43	-0.80	-1.10	0.79	1.75
CW7	124.66	52.06	-0.70	-0.75	0.49	1.58
CW8	124.53	51.81	-0.50	-0.80	0.60	0.21
CW9	124.39	51.70	-1.30	-0.69	-0.02	0.21
CW10	124.27	51.47	-2.75	-0.64	-1.49	0.74
CW12	124.21	51.21	-1.30	-0.26	-0.39	0.72
CW13	124.31	50.70	1.90	0.57	1.78	0.61
CW14	124.21	50.47	3.00	0.65	2.83	0.85
CW15	124.65	49.77	2.30	1.28	1.18	3.03
XL1	124.39	51.69	-1.13	-0.56	0.00	0.83
XL2	124.39	51.69	-1.71	-0.56	-0.58	0.83
XL3	124.39	51.69	-1.43	-0.56	-0.30	0.83

续表 2

钻孔 Bore hole	经度(E) Longitude	纬度(N) Latitude	实测的 MAGT/°C Actual measurement MAGT	TTOP/°C	模拟误差 Simulation error	Obu 等 ^[27] 的 TTOP/°C TTOP from Obu, et al ^[27]
GH1	121.51	50.94	-0.24	-2.44	2.19	-0.03
GH2	121.51	50.94	-0.80	-2.44	1.63	-0.03
GH3	121.50	50.93	-3.87	-2.27	-1.54	-0.20
GH4	121.50	50.93	-2.84	-2.27	-0.51	-0.20
GH5	121.53	50.80	-0.59	-1.81	1.36	-0.72
GH6	121.50	50.80	-1.92	-1.96	0.27	0.01
GH9	121.51	50.94	-3.30	-2.44	-0.87	-0.03
YT1	121.55	50.63	-2.18	-1.70	-0.40	-0.22
YT2	121.55	50.63	-1.92	-1.70	-0.14	-0.22
DW01	124.19	53.21	0.20	-1.86	0.77	1.38
DW02	124.20	53.19	-1.20	-1.80	-0.64	1.95
DW04	124.42	53.10	0.50	-1.63	0.93	1.61
DW05	124.57	53.00	-1.40	-1.53	-1.03	1.49
DW06	124.49	52.69	-0.50	-1.27	0.27	0.51
DW07	124.69	52.23	-0.60	-0.45	-1.11	1.40
DW08	124.66	52.03	-1.40	-0.33	-0.76	1.53
DW09	124.34	51.59	-1.70	-0.01	-1.12	0.40
DW10	124.33	50.90	0.90	0.94	0.10	0.16
DW11	124.34	50.74	1.00	1.16	-0.14	0.19
DW12	124.29	50.60	1.90	1.21	0.62	1.15
MH1	122.02	53.03	-2.90	-2.55	-0.55	0.28
MH2	122.02	53.02	-1.80	-2.54	0.56	0.83
NE2	125.14	51.13	-1.94	1.02	-2.66	0.97
NE3	125.14	51.13	0.92	1.02	0.20	0.97
NE4	125.14	51.12	2.16	0.92	1.45	1.84
NE5	125.15	51.15	-1.32	1.00	-2.01	1.91
YTLH1	121.55	50.63	-2.18	-1.41	-0.47	-0.22
YTLH2	121.55	50.63	-1.93	-1.41	-0.22	-0.22
MG	122.28	52.28	-2.31	-2.06	0.43	-0.70
ALS	121.90	51.89	-3.63	-1.87	-1.02	-0.15
P1	125.14	51.13	-0.52	1.02	-1.24	0.97
P2	125.14	51.13	-1.19	1.02	-1.91	0.97
P3	125.14	51.13	0.17	1.02	-0.55	0.97
P4	125.14	51.12	1.65	0.92	0.94	1.84
		平均值 Mean value	-0.82	-0.77	0.05	0.75

由图 7 可知,本研究得到的模型结果与钻孔数据的相关性(R)为 0.6($P < 0.001$),高于 Obu 等^[27]的研究结果($R=0.50$, 钻孔数 $N=50$)。因此认为通过回归模型

调整 2006—2020 年 GST 后,使用 TTOP 模型模拟东北地区多年冻土分布变得更加准确和可靠。

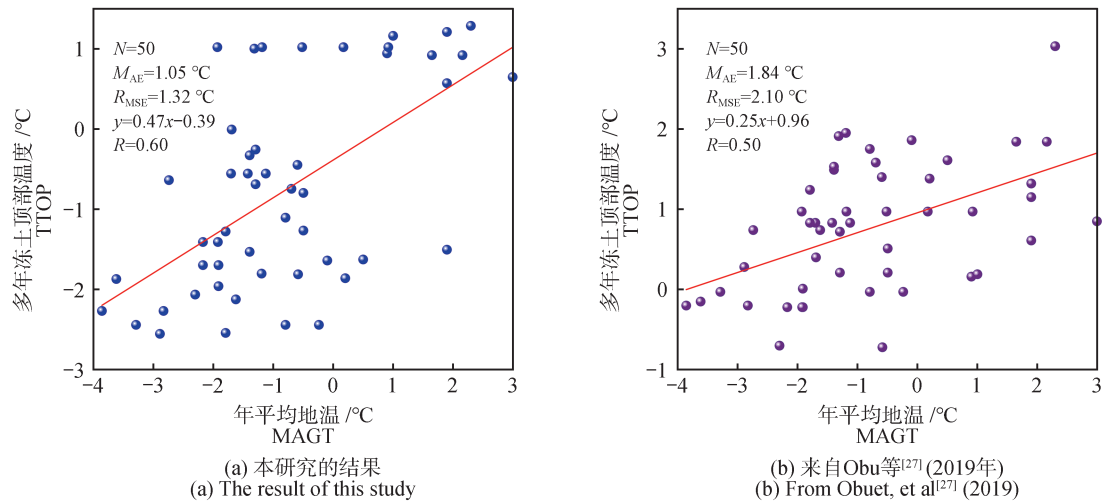


图7 模拟的多年冻土顶板温度模型(TTOP模型)的年平均地面温度与实测钻孔的年平均地温(MAGT)之间的相关性比较

Fig. 7 Comparison of the correlation between the annual average ground temperature of the simulated permafrost roof temperature model (TTOP model) and the annual average ground temperature (MAGT) of the measured borehole

3 结论

本研究使用TTOP模型研究东北地区冻土的时空变化。修正2006—2020年的地温数据,使用机器学习在Python 3.10中的Sklearn模型库搭建并计算,以经度、纬度、海拔、气温、降水量、相对湿度、气压、日照和积雪雪深作为特征值输入,GST作为目标变量。利用TTOP模型计算了东北地区各站点的多年冻土顶板温度。通过ANUSPLIN软件对1970s—2010s东北地区的多年冻土顶板温度进行了空间插值模拟,根据TTOP模型的结果,得出以下结论。

1)随着时间的推移,东北地区的整体温度呈现持续上升的趋势,尤其是低温区的升温幅度更为显著。此外,低温区的面积逐渐缩小,但其核心区域仍维持在大兴安岭和小兴安岭一带,表明这些高纬度地区对气候变化具有一定的缓冲作用,能够在一定程度上维持低温环境的相对稳定。

2)2个时期2000s和2010s的50个钻孔数据的平均温度为 $-0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$,本研究中平均TTOP为 $-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}$,两者之间的差值仅为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。均方根误差(RMSE)为 $1.32\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均绝对误差(MAE)为 $1.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。误差值在可接受范围内,表明本研究的TTOP计算结果与实测钻孔数据具有较高的一致性。

3)本研究的结果与Obu等^[27]的研究成果相吻合,进一步增强了研究结论的科学性和可靠性。模型结果与钻孔数据的相关性(R)为 0.6 ($P<0.001$),高于Obu等^[27]研究结果的($R=0.50$, $N=50$)。因此认为通过回归模型修正2006—2020年的GST后,使用TTOP

模型模拟东北地区多年冻土分布变得更加准确和可靠。

参 考 文 献

- [1] PHILIPP M, DIETZ A, BUCHELT S, et al. Trends in satellite earth observation for permafrost related analyses—A review[J]. Remote Sensing, 2021, 13(6): 1217.
- [2] NELSON F E, OUTCALT S I. A computational method for prediction and regionalization of permafrost[J]. Arctic and Alpine Research, 1987, 19(3): 279–288.
- [3] CHENG G. Problems on zonation of high-altitude permafrost[J]. Acta Geographica Sinica, 1984, 39(2): 185–193.
- [4] SMITH M W, RISEBOROUGH D W. Permafrost monitoring and detection of climate change—A reply[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 1998, 9(1): 91–92.
- [5] CHE L, ZHANG H, WAN L. Spatial distribution of permafrost degradation and its impact on vegetation phenology from 2000 to 2020[J]. Science of The Total Environment, 2023, 877: 162889.
- [6] RAN Y, LI X, CHENG G. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. The Cryosphere, 2018, 12(2): 595–608.
- [7] LEWKOWICZ A G, BONNAVENTURE P P. Equivalent elevation: A new method to incorporate variable surface lapse rates into mountain permafrost modelling[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2011, 22(2): 153–162.
- [8] GAO B, YANG D, QIN Y, et al. Change in frozen soils and its effect on regional hydrology, upper Heihe Basin, north-eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. The Cryosphere,

- 2018, 12(2): 657–673.
- [9] MORRISSEY L A, STRONG L L, CARD D H. Mapping permafrost in the boreal forest with thematic mapper satellite data[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 1986, 52(9): 1513–1520.
- [10] GARIBALDI M C, BONNAVENTURE P P, LAMOU-REUX S F. Utilizing the TTOP model to understand spatial permafrost temperature variability in a high Arctic landscape, Cape Bounty, Nunavut, Canada[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2021, 32(1): 19–34.
- [11] NI J, WU T, ZHU X, et al. Simulation of the present and future projection of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau with statistical and machine learning models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(2): e2020JD033402.
- [12] FERREIRA A, VIEIRA G, RAMOS M, et al. Ground temperature and permafrost distribution in Hurd Peninsula (Livingston Island, Maritime Antarctic): An assessment using freezing indexes and TTOP modelling[J]. Catena, 2017, 149: 560–571.
- [13] HUANG S, DING Q, CHEN K, et al. Changes in near-surface permafrost temperature and active layer thickness in Northeast China in 1961–2020 based on GIPL model[J]. Cold Regions Science and Technology, 2023, 206: 103709.
- [14] ROMANOVSKY V, ISAKSEN K, DROZDOV D, et al. Changing permafrost and its impacts [C]//Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2017: 65–102.
- [15] FU Z, WU Q, ZHANG W, et al. Water migration and segregated ice formation in frozen ground: Current advances and future perspectives[J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 10: 826961.
- [16] LI X, JIN H, SUN L, et al. TTOP-model-based maps of permafrost distribution in Northeast China for 1961–2020[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2022, 33(4): 425–435.
- [17] LI X, JIN H, SUN L, et al. TTOP-model-based maps of permafrost distribution in Northeast China for 1961–2020[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2022, 33(4): 425–435.
- [18] YANG D, ZHAN D, LI M, et al. Factors influencing the spatiotemporal changes of permafrost in Northeast China from 1982 to 2020[J]. Land, 2023, 12(2): 350.
- [19] DARAJEH N, IDRIS A, MASOUMI H R F, et al. Modeling BOD and COD removal from palm oil mill secondary effluent in floating wetland by *Chrysopogon zizanioides* (L.) using response surface methodology[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 181: 343–352.
- [20] NGUYEN X C, NGUYEN T P, LAM V S, et al. Estimating ammonium changes in pilot and full-scale constructed wetlands using kinetic model, linear regression, and machine learning[J]. Science of The Total Environment, 2024, 907: 168142.
- [21] LI X, JIN H, WANG H, et al. Effects of fire history on thermal regimes of permafrost in the northern Da Xing'anling Mountains, NE China[J]. Geoderma, 2022, 410: 115670.
- [22] HE R, JIN H, LUO D, et al. Changes in the permafrost environment under dual impacts of climate change and human activities in the Hala Basin, northern Da Xing'anling Mountains, Northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(8): 1219–1234.
- [23] HE R X, JIN H J, LUO D L, et al. Permafrost changes in the Nanwenghe Wetlands Reserve on the southern slope of the Da Xing'anling-Yile'huli Mountains, Northeast China[J]. Advances in Climate Change Research, 2021, 12(5): 696–709.
- [24] 常晓丽, 金会军, 何瑞霞, 等. 大兴安岭北部多年冻土监测进展[J]. 冰川冻土, 2013, 35(1): 93–100.
- CHANG X L, JIN H J, HE R X, et al. Review of permafrost monitoring in the northern Da Hingan Mountains, Northeast China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(1): 93–100.
- [25] 洪皓飞. 中俄输油工程对周围多年冻土的影响研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2018.
- HONG H F. Study on the influence of Sino-Russian oil transportation project on the surrounding permafrost[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2018.
- [26] 何瑞霞, 金会军, 郝加前, 等. 中俄输油管道(漠河—乌尔其段)沿线冻土环境影响评价[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S2): 128–134.
- HE R X, JIN H J, HAO J Q, et al. Impact assessment of permafrost environments along the China-Russia crude oil pipeline from Mo'he to Wu'erqi[J]. Journal of Civil, Architectural & Environment Engineering, 2011, 33(S2): 128–134.
- [27] OBU J, WESTERMANN S, BARTSCH A, et al. Northern hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 193: 299–316.