

锡林浩特地区季节性冻土对气候变化的响应

赵晓英¹ 张利君¹ 李艳¹ 苏岩²

(1 锡林浩特国家气候观测台, 锡林浩特 026000; 2 沈阳工学院, 抚顺 113000)

摘要: 为了研究季节性冻土的变化特征及气候变化对冻土的影响, 基于锡林浩特国家基准气候站1961—2021年的逐日冻土深度和气象要素观测资料, 通过线性倾向估计、相关性检验、M-K突变检验、Morlet小波分析等方法, 对最大冻土深度的年际、年代际变化规律, 季节性冻土冻融日期进行分析, 研究影响最大冻土深度变化的气象因子, 建立冻土深度多元回归方程。结果表明: 最大冻土深度以 $-1.75\text{ cm}/(10\text{ a})$ 的速度变浅; 年代际变化呈“V”形分布, 20世纪70年代平均冻土深度最深, 90年代平均冻土深度最浅, 总体为深—浅—深的变化规律; 1983—1988年冻土深度有强突变发生; 最大冻土深度的主周期为28 a; 冻土冻结日期变化趋势不明显, 消融日期有提前的趋势; 最大冻土深度与年平均气温、平均最低气温、平均40 cm地温均呈极显著负相关, 说明气温和40 cm地温是影响季节性冻土深度变化的关键气象因子。通过建立多元回归方程, 可以预测锡林浩特地区的冻土深度, 为地方修建铁路、埋设取暖管道等与冻土相关的生产生活服务, 同时, 研究冻土深度的气候变化响应对合理利用气候资源有针对性地开展农牧业生产, 促进草原生态可持续发展有重要意义。

关键词: 气候变化, 季节性冻土, 响应, 锡林浩特草原区

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.009

The Response of Seasonally Frozen Soil in Xilinhot to Climate Change

Zhao Xiaoying¹, Zhang Lijun¹, Li Yan¹, Su Yan²

(1 Xilinhot National Climate Observing Station, Xilinhot 026000; 2 Shenyang Institute of Technology, Fushun 113000)

Abstract: In order to study the change characteristics of seasonally frozen soil and the impact of climate change on frozen soil, daily frozen soil depth and meteorological element data of Xilinhot National Benchmark Climate Station from 1961 to 2021 are used to analyze the interannual and interdecadal variations of maximum frozen soil depth as well as the freezing and thawing date of seasonally frozen soil. Through linear tendency estimation, correlation test, M-K mutation test, and Morlet wavelet analysis, we study the meteorological factors that affect the change of maximum frozen soil depth, and generate a multiple regression equation for frozen soil depth. The results show that the maximum frozen soil depth is shallowing at the speed of $-1.75\text{ cm}/(10\text{ a})$, with the V-shaped distribution of interdecadal variation. The average depth of frozen soil was the deepest in the 1970s, while it was the shallowest in the 1990s, thus showing a deep-shallow-deep variation for the overall distribution trend. Sudden strong changes were identified in frozen soil depth during 1983—1988, with the main cycle of the maximum frozen soil depth as 28 a; The overall change in the freezing date of frozen soil is not significant, while the melting date tends to advance. The maximum frozen soil depth is significantly negatively correlated with the annual average temperature, the average minimum temperature, and the average 40 cm soil temperature, indicating that the temperature and 40 cm soil temperature are the key meteorological factors affecting the change of seasonally frozen soil depth. The formulation of the multiple regression equation can be used to predict the frozen soil depth in Xilinhot so as to provide service for production and livelihood activities related to the frozen soil, such as the construction of local railways and the laying of heating pipelines. Meanwhile, the study of the response of the frozen soil depth to climate change is of great significance to the targeted agricultural and animal husbandry production with appropriate deployment of climate resources and to the promotion of the sustainable development of grassland ecology.

Keywords: climate change, seasonally frozen soil, response, prairie area in Xilinhot

收稿日期: 2022年10月25日; 修回日期: 2023年2月2日
第一作者: 赵晓英(1976—), Email: zxy-50913@163.com
通信作者: 张利君(1973—), Email: 415079163@qq.com
资助信息: 锡林郭勒盟气象局科技项目(xmqxjkyxm202101)

0 引言

“冰冻三尺, 非一日之寒”, 在地面气象观测规范中, 冻土定义为含有水分的土壤因温度下降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或以下而呈冻结的状态^[1-2]。内蒙古地区所建的气象站在

20世纪50年代开始对冻土进行观测,经过几十年的观测资料积累,为研究我国北方季节性冻土的变化打下坚实的基础。冻土对温度变化十分敏感,随着全球气温不断升高,多年冻土层面积在不断减少。冻土退化可能会引起森林草原面积退化,生态脆弱性加剧。气候变化对冻土的影响受到学者们的广泛关注并进行大量研究^[2-3]。冻土深度的变化会影响地表植被的热平衡,含有水分的土壤在冻结或消融时,会释放或消耗大量的潜热,引起生态环境的退化^[4]。

我国冻土带主要分布在30°N以北地区,锡林郭勒盟正处于此冻土带,属于季节性冻土区。锡林郭勒草原冬季寒冷,冻土的变化过程对于指示全球温度变化具有重要意义。李述训等^[5-6]研究指出冻融作用对环境带来的影响,在区域气候变化研究中具有非常重要的作用。高峰等^[7]分析了黑龙江省高寒地区冻土变化特征及影响因子,指出冻土变化对哈大高铁的路基稳定性具有重要影响。近年来,锡林郭勒盟地方政府在铁路的发展和建设上高度重视,为了草原上的交通更便利,旅游业更兴旺,全力以赴推动铁路事业迅速发展,准备修建太子城到锡林浩特铁路。修建铁路需要沿线的冻土和气候观测资料,季节性冻土地区的铁路路基冻害会阻碍列车的安全稳固运行,研究长序列冻土变化趋势以及气象要素对冻土层的影响对修建铁路是至关重要的。苏明等^[8]通过多个气象因子进行线性回归分析得出内蒙古典型草原区气温冻结指数、年平均风速、年极端最低气温对最大冻土深度产生显著影响。从已有的文献查看,关于锡林郭勒草原地区冻土对气候变化的响应研究较少,冻土深度预测预报服务方面尚属空白,因此,有必要对该地区的冻土特征进行分析,寻找影响因子并建立预报模型,为当地开展冻土气象服务提供参考。

本文以内蒙古锡林郭勒盟中部的典型草原区锡林浩特国家基准气候站为代表站,利用台站1961—2021年季节性冻土观测资料和气象要素资料,统计分析季节性冻土的变化特征,寻找影响冻土变化的气象因子并建立预报模型。研究本地区冻土深度的变化特征对合理利用气候资源有针对性地开展农牧业生产,促进草原生态可持续发展有重要意义。同时,冻土预报模型可为本地区未开展冻土观测的区域进行冻土深度预测,为地方的经济发展服务。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

内蒙古锡林浩特地区属中温带半干旱、干旱大陆性季风气候,地势南高北低,南部为低山丘陵,北部

为平缓的波状平原,平均海拔高度为988.5 m,地处中纬度西风带内。距海远,海拔高,具有寒冷、风大、雨少、日照长、温差大、湿度小等气候特点,年平均气温为3.4 °C,平均年降水量为280 mm,主要集中在6—8月,全年盛行偏西风,年平均风速为3.3 m/s,年大风日数为34 d,全年无霜期为115~179 d,年日照时数为2700.7 h。主要气象灾害有干旱、霜冻、冷雨、湿雪、大风、沙尘暴、寒潮、白灾等。锡林浩特地区极端最低气温为-38.4 °C,冻土持续时间约半年左右。

1.2 资料来源

研究采用锡林浩特国家基准气候站1961—2021年9月一次年5月(6—8月无冻土)的逐日冻土深度和冻结期内的负积温,以及年平均气温、年平均最低气温、年平均地面温度、年平均地面最低温度、年平均40 cm地温、年降水量、年日照时数、年平均相对湿度、年积雪深度、年平均风速等气象观测资料。冻土出现的初、终日期采用1962—2021年的数据。冻土深度采用冻土器进行观测,按照《地面气象观测规范》冻土观测和记录规定:当地面温度降到0 °C或以下,土壤开始冻结时,在每日08时观测一次冻土,直至次年土壤完全解冻为止^[1]。结合地面最低温度 ≤ 0.0 °C的初、终日期选取标准,冻土初日是指本年度下半年首次土壤冻结日期,冻土终日是本年度上半年最晚出现冻土的日期^[8-9]。全年冻土期中冻土深度的最大值为最大冻土深度。气象要素的观测方法亦遵循《地面气象观测规范》的相关要求进行观测和记录。

1.3 研究方法

数据的统计处理、分析及绘图主要应用Excel软件和SPSS统计软件完成。采用线性趋势分析法^[10]分析1961—2021年的最大冻土深度的变化趋势;采用相关分析法^[11]分析最大冻土深度与各气象因子的相关性,并进行显著性检验^[12];用线性回归分析法分析最大冻土深度与各气象因子之间的相关关系,用逐步回归法构建最大冻土深度预测模型^[13],模型构建均采用SPSS软件完成^[14]。采用M-K法^[15]对最大冻土深度的突变进行分析。此法可测定冻土深度突变的起始位置,具有检测范围宽、定量化程度高等特点。采用Morlet小波分析方法^[16-17]进行周期性检验,适合于多时间尺度变化特性分析。其中,冻土深度、积雪深度为日观测值,气温、最低气温、地面温度、地面最低温度、相对湿度、40 cm地温、平均风速为1961—2021年各气象要素的年平均值,降水量、日照时数为合计值,负积温为上年度9月一次年5月低于0 °C的逐日日平均气温的总和。

2 结果与分析

2.1 冻土深度时间序列变化特征及趋势

2.1.1 最大冻土深度的年变化及年代际变化

从1961—2021年锡林浩特地区最大冻土深度、平均气温年变化及冻土深度年代际变化趋势图中(图1)可以看出,随着气温的升高最大冻土深度呈减小趋势,气候倾向率为 $-1.75\text{ cm}/(10\text{ a})$,相关系数为 -0.1572 ($P < 0.05$),近61年来最大冻土深度减小趋势缓慢;年平均最大冻结深度为242 cm,冻土深度最大值出现在1970年,为291 cm,高于年平均值49 cm,最小值出现在2020年,为203 cm,低于年平均值39 cm。总体来看,由于1970年冬季气温较低,土

壤冻结较深,冻土深度值较大;2020年是暖冬,土壤冻结较浅,冻土深度值较小,说明气温是影响冻土深度变化的关键因素之一。

锡林浩特地区1961—2021年最大冻土深度年代际变化特点呈“V”形分布:平均冻土深度最深的年代出现在20世纪70年代,冻土深度为249 cm,次深的年代出现在20世纪60年代,冻土深度为248 cm;20世纪80年代平均冻土深度开始变浅,冻土深度为239 cm;20世纪90年代平均冻土深度最浅,冻土深度为230 cm;从21世纪初开始平均冻土深度又变深,2010—2019年平均冻土深度为244 cm,61年来总体变化趋势为深—浅—深。

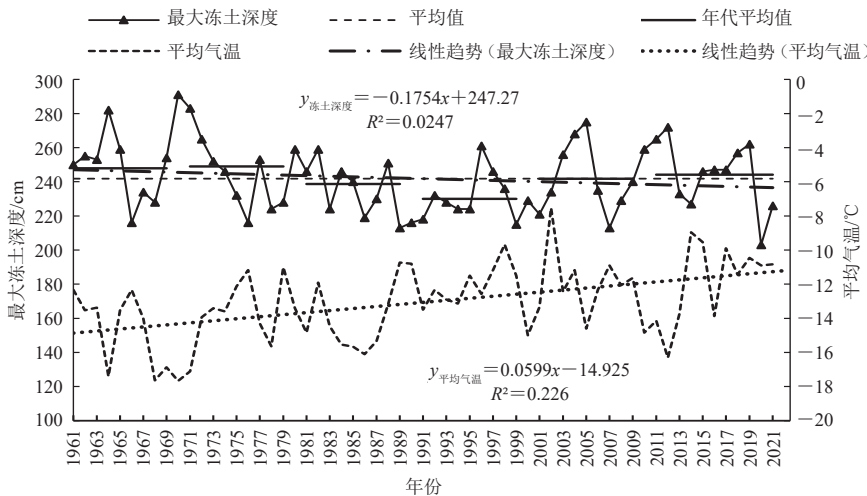


图1 1961—2021年锡林浩特地区最大冻土深度、平均气温年变化及冻土深度年代际变化

Fig. 1 Annual variation of maximum frozen soil depth, average temperature and interdecadal variation of frozen soil depth in Xilinhot from 1961 to 2021

2.1.2 最大冻土深度M-K突变检验及周期分析

对锡林浩特地区1961—2021年最大冻土深度进行M-K突变检验(图2),如果 $UF_{(k)}$ 与 $UB_{(k)}$ 两条曲线出现交点,且交点在临界值 ± 1.96 ($\alpha = 0.05$)之间,那么

此交点对应的值便是突变开始的时间。若 $|UF_{(k)}| > 1.96$ 说明该点有显著变化,若 $UF_{(k)} > 0$,则表明序列呈上升趋势,若 $UF_{(k)} < 0$ 则表明序列呈下降趋势^[15]。由图可知:最大冻土深度在1973年前有波动,1973年两线相交后最大冻土深度发生了突变,突变后最大冻土深度有明显变浅趋势,1983—1988年冻土深度发生了突变,突变后变化趋势不显著;1989年为显著变化年,从1989—2005年,随着气候变暖,冻土深度明显减小,有强突变发生,突变后呈下降趋势,在1995年又开始上升,之后又下降,在2001年后保持上升趋势。

从1961—2021年锡林浩特地区最大冻土深度小波方差分析图(图3)看,存在28 a周期、14 a周期和5 a周期。其中,对冻土贡献率最大的是28 a周期,为主周期,在28 a周期冻土经历了“暖—冷”的3个周期,其次14 a周期。锡林浩特站最大冻土深度周期变化能反应锡林郭勒草原地区最大冻土周期性特征。

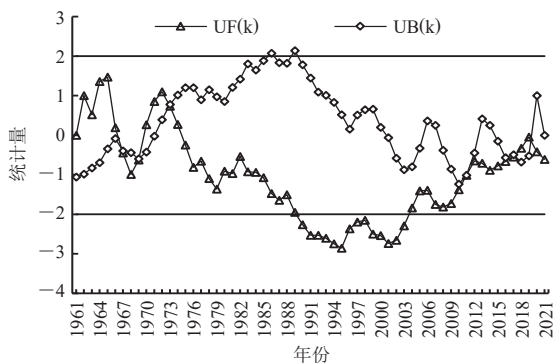


图2 1961—2021年锡林浩特地区最大冻土深度M-K统计量曲线
Fig. 2 M-K statistic curve of maximum frozen soil depth in Xilinhot from 1961 to 2021

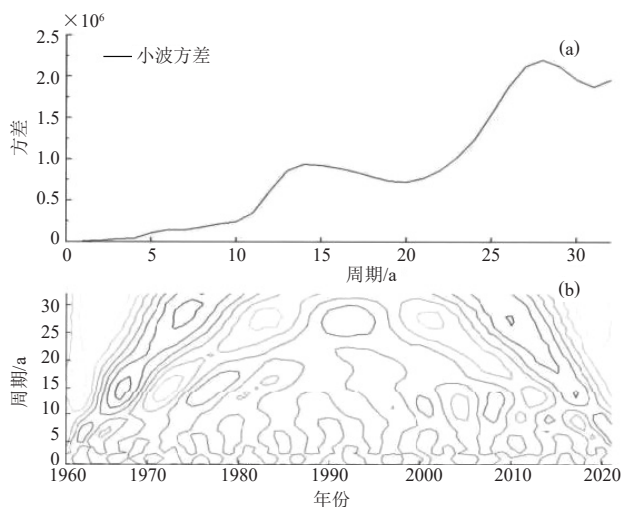


图3 1961—2021年锡林浩特地区最大冻土深度小波方差分析
Fig. 3 Wavelet analysis of maximum frozen soil depth in Xilinhot from 1961 to 2021

2.1.3 最大冻土深度出现日期、冻土初日及终日年际变化

从锡林浩特地区最大冻土深度出现日期年际变化图(图4)可以看出, 90%以上的年份出现在3月, 气候倾向率为 $0.1 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 相关系数为 $0.0173 (P>0.05)$, 说明最大冻土深度出现日期年际变化趋势不显著。

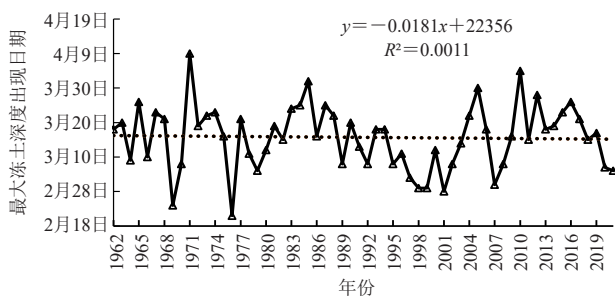


图4 1962—2021年锡林浩特地区最大冻土深度出现日期年际变化

Fig. 4 Interannual variation of the occurrence date of maximum frozen soil depth in Xilinhot from 1962 to 2021

冻土初日(图5)最早出现在9月26日(1992年和2008年), 最晚出现在10月29日(1972年); 近60年土壤冻结初日整体变化趋势不显著, 气候倾向率为 $-0.13 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 相关系数为 $0.032 (P>0.05)$ 。冻结初日80%的年份出现在10月中上旬。在秋末冬初土壤刚开始冻结期, 由于白天气温高, 夜晚气温低, 冻土层随着气温变化呈日消夜结状态, 当冻土层冻结深度达到 10 cm 时确定为稳定冻结日期^[18], 稳定冻结冻土初日平均在11月上中旬。

冻土终日(图5)最早出现在4月1日(2020年), 最晚出现在5月23日(1965年); 近60年冻土融化日期有

提前的趋势, 气候倾向率为 $-2.44 \text{ d}/(10 \text{ a})$, 相关系数为 $0.447 (P<0.05)$, 提前趋势显著。在冬末春初, 随着温度的升高, 土壤开始解冻, 冬季稳定冻结的土壤从下往上融化, 上层冻结的土壤从上往下融化, 下面冻土融化的速度较慢, 日融化速率在 $1\sim 3 \text{ cm}$, 上面冻结的土壤融化速率较快, 冻土终日有70%的年份出现在4月中下旬, 其余年份出现在5月上中旬。

2.2 最大冻土深度与气象因子的相关性

将可能影响季节性冻土深度的年平均气温、平均最低气温、平均地面温度、平均地面最低温度、平均 40 cm 地温、降水量、日照时数、平均相对湿度、最大积雪深度、平均风速和负积温共11个气象因子分别与最大冻土深度进行相关分析(表1), 结果表明: 最大冻土深度与年平均气温、平均最低气温、平均地面温度、平均 40 cm 地温呈极显著负相关($P<0.01$), 说明气温和地温是影响冬季冻土深度变化的关键气象因素; 最大冻土深度与负积温相关性显著($P<0.05$); 平均地面最低温度、日照时数、积雪深度与最大冻土深度呈负相关, 但相关性较低, 说明光照和雪深对冻土深度影响不明显; 相对湿度、降水量、平均风速与最大冻土深度呈正相关, 但相关性较低, 说明降水量、风速和空气湿度对冻土深度影响不大。为了找出与最大冻土深度最相关的气象因子, 同时选择各气象要素冻结期的平均值和年平均值, 分析表明冻结期的平均值相关性不如年平均值显著, 所以, 气象要素采用的是年平均值, 但年值预测冻土深度有滞后性, 对预测当年的冻土深度有一定影响。

2.3 最大冻土深度预测模型构建

将1961—2010年的最大冻土深度作为因变量, 年平均气温、年平均最低气温、年平均地面温度、年平均地面最低温度、年平均 40 cm 地温、年平均相对湿度、年平均风速、年降水量、年日照时数、年最大积雪深度和负积温作为自变量, 用SPSS统计软件进行线性逐步回归, 经过回归计算分析, 发现平均最低气温、平均气温、平均 40 cm 地温对最大冻土深度影响程度高, 建立的多元回归方程(公式1)拟合度高, 拟合相关系数为 $0.598 (P<0.01)$, 拟合效果较好。模型残差基本符合正态曲线, 服从正态分布。在 0.05 的显著性水平下, 方程显著, 认为所建立的回归方程有使用价值。

$$Y = 193.324 - 15.981X_1 + 14.247X_2 - 8.177X_3, \quad (1)$$
式中: Y 表示最大冻土深度(单位: cm); X_1 表示平均最低气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); X_2 表示平均气温(单位: $^{\circ}\text{C}$); X_3 表示 40 cm 地温(单位: $^{\circ}\text{C}$)。

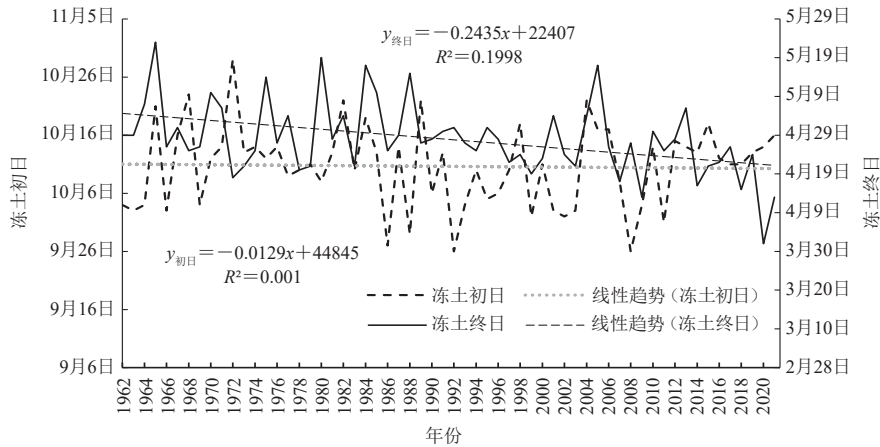


图5 1962—2021年锡林浩特地区冻土初、终日年变化

Fig. 5 Annual change of the beginning date and ending date of frozen soil in Xilinhot from 1962 to 2021

表1 锡林浩特地区最大冻土深度与气象因子的相关系数

Table 1 Correlation coefficient between maximum frozen soil depth and meteorological factors in Xilinhot

气象因子	年平均气温/°C	年平均最低气温/°C	年平均地面温度/°C	年平均地面最低温度/°C	年平均40 cm地温/°C	年降水量/mm	年日照时数/h	年平均相对湿度/%	年最大积雪深度/cm	年平均风速/(m/s)	年负积温/°C
相关系数	-0.393**	-0.515**	-0.363**	-0.262	-0.432**	0.008	-0.228	0.056	-0.179	0.207	-0.341*

注: **表示通过0.01的显著性水平检验(双侧); *表示通过0.05的显著性水平检验(双侧)。

2.4 预测模型准确性检验

为了检验方程的准确性,将2011—2021年的年平均最低气温、年平均气温、年平均40 cm地温代入回归方程进行准确性检验,经计算得出最大冻土深度的预测值。其中,2021年实测值与预测值相差1 cm,2013年相差2 cm,预测准确率均达到87%以上(图6),说明预测方程准确率较高且有效。

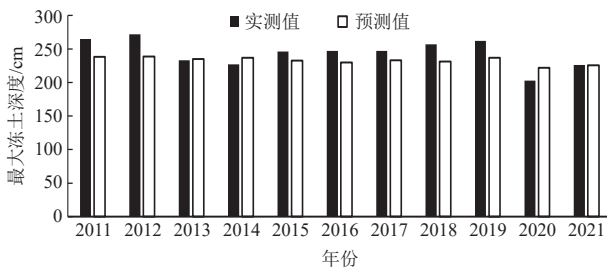


图6 2011—2021年锡林浩特地区最大冻土深度实测值与回归方程预测值对比

Fig. 6 Comparison between measured maximum frozen soil depth and predicted value using regression equation in Xilinhot from 2011 to 2021

3 讨论

随着全球气候变暖加剧,极端高温事件出现的概率将增加。王素仙等^[19]预估内蒙古地区气温也将持续升高;王宁^[20]指出气温是影响黑龙江省中西部季节性冻土厚度变化的主要因素之一;任景全等^[21]认为吉林省冻土冻结深度对气温变化较为敏感;蒲金涌等^[22]研究指出随着气候的持续变暖,甘肃陇东地区最大冻

土深度将进一步减少,预测到2050年将减少15 cm左右,对未来工程建设带来不利影响;李海花等^[23]分析表明新疆阿勒泰地区冻土深度随着平均气温的上升减小;彭小清^[24]研究得出北半球整体平均冻结、融化指数分别呈现递减和递增趋势。从以上研究来看,气温在冻土变化过程中起主导作用,这与本研究结果一致。罗江鑫等^[25]研究得出积雪覆盖对土壤有保温作用,对冻土有影响。由于研究区有的年份积雪较厚,有的年份积雪较少,整体上积雪深度对季节性冻土深度影响不明显。

影响冻土深度变化的不确定因素很多,不仅受当地气候变化的影响,同时最大冻土深度与海拔高度、纬度、地形、水体、植被、地温、土壤湿度及积雪覆盖度等因素均有关。张国胜等^[26]研究指出青海高原季节冻土退化除了人为活动和气候变化两大因素外,地表温度上升、土壤湿度减少也会导致高原冻土退化。相关研究表明,纬度^[7]、海拔高度^[27]、不同植被类型^[28]等因素均会影响冻土深度的变化。土壤性质不同也对冻土深度有着制约作用^[29]。研究发现在冻土退化区修建道路,对道路的使用存在潜在影响^[30]。冻土退化已对江河源寒区经济和生态环境产生了一系列重要影响^[31]。锡林郭勒草原海拔高,冬季寒冷漫长,季节性冻土冻结期长,冻土的变化对草原生态环境是否产生影响需进一步研究。

目前预测冻土深度有冻土水热耦合迁移数学模型^[32-34]、冻结数模型^[35-36],每种方法的预测模型都有

其优缺点,地域不同、应用领域不同,结果也各不相同。本研究所建立的冻土预测回归方程还需不断完善,在应用中需要运用大量的气象数据进行验证,使预测的冻土深度更精准。

4 结论

本研究基于1961—2021年锡林浩特地区的冻土深度和气象因子观测数据,分析了最大冻土深度的年变化及年代际变化趋势,对季节性冻土冻结初始日、融化终止日进行初步探讨,并对61年来的最大冻土深度进行了M-K突变检验和周期分析,再进行最大冻土深度与气象因子的相关分析,建立影响冻土深度的多元回归方程,得出以下结论。

1) 锡林浩特地区1961—2021年最大冻土深度年际变化呈变浅趋势,但趋势不明显;年代际变化呈“V”形分布,20世纪70年代平均冻土深度最深,90年代平均冻土深度最浅,从21世纪初开始平均冻土深度又变深。

2) 锡林浩特地区最大冻土深度在1973年后有明显增大趋势;1983—1988年冻土深度有突变;1989—2005年,随着气候变暖,冻土深度明显减小,有强突变发生。

3) 小波分析表明,锡林浩特地区最大冻土深度存在28 a、14 a和5 a周期,其中贡献率最大的是28 a周期,为主周期,在28 a周期冻土深度经历了“暖—冷”的3个周期,其次是14 a周期。

4) 锡林浩特地区最大冻土深度出现日期年际变化趋势不显著,90%以上的年份出现在3月。冻土消融日期整体有提前趋势,气候倾向率为 $-2.44 \text{ d}/(10 \text{ a})$ 。冻土全部融化70%以上的年份出现在4月中下旬。冻土冻结日期整体变化趋势不显著,气候倾向率为 $-0.13 \text{ d}/(10 \text{ a})$,冻结初日80%的年份出现在10月中上旬。

5) 最大冻土深度与年平均气温、平均最低气温、平均40 cm地温呈极显著负相关($P < 0.01$),与负积温显著负相关($P < 0.05$),说明温度是影响冻土深度变化的主要因素。通过逐步回归建立多元回归方程,经检验方程效果好,对研究区冻土深度预测具有一定的参考价值。

参考文献

[1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
 [2] 李倩. 中国东部季节性冻土的变化特征及其与季风活动的可能联系[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
 [3] 赵晓英, 高荣. 锡林郭勒盟近58 a冻土深度的时空分布特征[J]. 内蒙古气象, 2019(5): 25-28, 33.
 [4] 胡树贞, 刘志刚, 吴东丽, 等. 冻土自动观测仪性能比对分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2020, 37(4): 4-7.

[5] 李述训, 南卓铜, 赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 109-115.
 [6] 李述训, 南卓铜, 赵林. 冻融作用对地气系统能量交换的影响分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(5): 506-511.
 [7] 高峰, 刘军, 倪长健, 等. 高寒地区冻土活动层变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(4): 84-90.
 [8] 苏玥, 张存厚, 阿木尔萨那, 等. 1981—2018年内蒙古典型草原季节性冻土对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(3): 684-694.
 [9] 周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 10-12.
 [10] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
 [11] 荣廷昭, 李晚忱. 田间试验与统计分析[M]. 成都: 四川大学出版社, 2001.
 [12] 施能. 气象科研与预报中的多元分析方法(第2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
 [13] 何晓群. 现代统计分析与方法(第2版)[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2007.
 [14] 李洪成, 张茂军, 马广斌. SPSS数据分析实用教程(第2版)[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
 [15] 符凉斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
 [16] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望[J]. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413-1422.
 [17] 刘强军, 刘婉莉, 张喻君, 等. 太行山南麓冻土气候特征及与温度的相关性分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(2): 172-181.
 [18] 贾超, 向导, 郭凤娟, 等. 季节性冻土变化特征及对气候因子的响应[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(2): 56-60.
 [19] 王素仙, 张永领, 郭灵辉, 等. 1981—2010年内蒙古气温变化特征及未来趋势预估[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(4): 114-120.
 [20] 王宁. 黑龙江省季节冻土厚度的时空变化及其对气温、土地利用变化的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018.
 [21] 任景全, 刘玉汐, 王冬妮, 等. 吉林省季节冻土冻结深度变化及对气候的响应[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1098-1106.
 [22] 蒲金涌, 王位泰, 姚小英, 等. 甘肃陇东地区季节冻土变化对气候变暖的响应[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1562-1566.
 [23] 李海花, 刘大锋, 段淑芳, 等. 新疆阿勒泰地区1963—2012年最大冻土深度的时空分布及其对气温变化的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 251-258.
 [24] 彭小清. 北半球季节冻土时空变化特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2017.
 [25] 罗江鑫, 吕世华, 马翠丽, 等. 青藏高原多雪年与少雪年土壤水热特征模拟分析[J]. 高原气象, 2022, 41(1): 35-46.
 [26] 张国胜, 李林, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化驱动因素的定量辨识[J]. 地理科学, 2007, 27(3): 337-341.
 [27] 毛德华, 王宗明, 宋开山, 等. 东北多年冻土区植被NDVI变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 283-292.
 [28] 白云. 祁连山不同植被类型覆盖下冻土水热特征变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2020.
 [29] 李林, 朱西德, 汪青春, 等. 青海高原冻土退化的若干事实揭示[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 320-328.
 [30] 高春香, 苏立娟, 宋进华, 等. 内蒙古东北部冻土分布与地温关系[J]. 内蒙古气象, 2004(1): 19-22.
 [31] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 278-285.
 [32] 郝振纯, 王晓燕, 侯艳茹, 等. 黄河源区季节冻土最大冻结深度估算方法[J]. 水电能源科学, 2013, 31(5): 73-76, 208.
 [33] 郝振纯, 张晓鹏, 张磊磊, 等. 气候变暖下黄河源区冻土变化的数值模拟[J]. 黑龙江水专学报, 2009, 36(3): 100-104.
 [34] 张晓鹏. 气候变暖下黄河源区冻土过程的研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
 [35] 王澄海, 靳双龙, 吴忠元, 等. 估算冻结(融化)深度方法的比较及在中国地区的修正和应用[J]. 地球科学进展, 2009, 24(2): 132-140.
 [36] 南卓铜, 李述训, 程国栋, 等. 地面冻结数模型及其在青藏高原的应用[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 89-95.

(编辑: 郑秋红)