

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.0402

LIU Shibo, ZANG Shuying, ZHANG Lijuan, et al. Analyzing the spatial-temporal variations of snow depth in the Northeast China by means of remote sensing in consideration of frozen ground zonation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(2): 261–269. [刘世博, 臧淑英, 张丽娟, 等. 东北冻土区积雪深度时空变化遥感分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(2): 261–269.]

# 东北冻土区积雪深度时空变化遥感分析

刘世博, 臧淑英, 张丽娟, 那晓东, 孙丽, 李苗, 张晓闻  
(哈尔滨师范大学 寒区地理环境监测与空间信息服务黑龙江省重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150025)

**摘 要:** 积雪作为冰冻圈的重要组成部分, 对地面有保温作用, 在消融时又吸收热量降低地面温度, 影响冻土发育, 对气候的变化十分敏感。利用微波遥感数据 1979–2014 年逐日中国雪深长时间序列数据集, 采用 GIS 空间分析和地学统计方法, 分析了东北冻土区积雪深度的时空变化规律及其异常变化。结果表明, 东北冻土区多年平均雪深为 2.92 cm, 年平均雪深最高值出现在岛状多年冻土区, 最低值出现在季节冻土区。东北冻土区年平均积雪深度变化以减少为主, 占区域面积的 39.77%, 减少速率为  $0.07\text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。东北冻土区年平均积雪深度在 1986 年发生突变, 开始出现减少的趋势, 这与气温突变年份较为吻合。受地形和气温变化影响, 年平均积雪深度减少的敏感区域主要发生在岛状多年冻土区。气温是影响东北冻土区年平均积雪深度变化最主要的因素, 降水量、风速、湿度、日照时数对积雪深度均有影响。季节冻土区积雪深度对气候的敏感性要大于多年冻土区。

**关键词:** 积雪深度; 东北; 冻土; 微波遥感; Mann-Kendall 检验; 敏感性

**中图分类号:** P468.0<sup>+</sup>25      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2018)02-0261-09

## 0 引言

积雪在冰冻圈中的地理分布最为广泛<sup>[1]</sup>, 对气候变化格外敏感, 是气候系统的重要组成部分, 是全球变化的核心内容和热点之一。随着全球气候的变暖, 积雪和冻土也随之发生变化。2013 年 IPCC 第五次评估报告指出, 1980–2012 年间全球地表平均温度上升了  $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[2]</sup>, 我国东北冻土区增温更为明显, 尤其是多年冻土区, 根据近 50 年的气象观测数据, 该地区年平均气温普遍升高  $0.9\sim2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3–4]</sup>, 升温速率高于全国水平。按人类中等排放情况, 至 21 世纪中期, 东北地区气温将继续升高  $2.5\sim3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[5]</sup>。气温的升高影响着积雪深度的变化, 进一步会对冻土区产生影响。研究表明, 积雪以高反射率、低导热率的特性对地表能量和辐射平衡产生重要影响<sup>[6]</sup>, 在一定条件下积雪覆盖会对地表起增温作用, 在融化时又会吸收地表热量, 影响冻土冻结深度<sup>[7]</sup>。东北地区是我国三大主要积雪

区(东北地区、北疆和天山、青藏高原)之一<sup>[8]</sup>, 也是我国典型的季节性积雪区之一。积雪的变化将带来地表反射率的改变, 进而影响气候, 对冻土区的生态系统产生重大的影响。

积雪的平均深度既是表征积雪气候环境特征与水资源条件的指标, 也是全面研究积雪分布不可缺少的主要指标<sup>[9]</sup>。近年来, 国内外专家学者对积雪的时空分布变化进行了大量的研究。Latenser 等<sup>[10]</sup>利用实测数据对不同海拔积雪深度进行分析, 发现自 1987 年以来, 瑞士阿尔卑斯山积雪减少比较明显。Foster 等<sup>[11]</sup>利用 SMMR 和 SMM/I 被动微波数据对 1979–2006 年的南美季节性雪盖和积雪当量进行了分析, 得到该地区最大和最小积雪覆盖面积出现的年份。Che 等<sup>[12]</sup>采用被动微波遥感数据反演积雪深度, 得到了符合中国地区实际的积雪深度产品。李小兰等<sup>[13]</sup>对比分析了被动微波遥感数据和地面观测积雪深度数据, 结果表明两种资料获得的积雪深度在各地基本一致, 可以用于研

收稿日期: 2017-09-06; 修订日期: 2017-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41571199; 41771067)资助

作者简介: 刘世博(1993–), 男, 河北石家庄人, 2015 年在河北师范大学获学士学位, 现为哈尔滨师范大学在读硕士研究生, 从事冻土与积雪遥感研究。E-mail: 327764711@qq.com

通信作者: 臧淑英, E-mail: zsy6311@163.com.

究我国长时间序列积雪深度的变化。柯长青等<sup>[14]</sup>、马丽娟等<sup>[15]</sup>利用微波积雪深度产品和气象站点观测数据进行了分析,指出我国积雪深度主要在内蒙古东部、东北北部、新疆西北部和青藏高原东北部呈增加趋势,其中青藏高原积雪空间分布极不均匀,高原东部是高原积雪年际变化最显著的地区。唐志光等<sup>[16]</sup>、白淑英等<sup>[17]</sup>利用微波遥感数据对青藏高原地区积雪深度进行了重建,分析了积雪深度与地形的关系,取得了较好的结果。

遥感技术手段的进步,为大范围监测积雪实时动态提供了可能,逐渐成为积雪监测最有效的方法之一<sup>[18]</sup>。特别是在地面站点分布稀疏自然条件恶劣的地区,遥感观测使得气象站点观测缺失区域数据得到弥补。与气象站点数据相比,微波遥感反演的积雪深度可以更好地反映大范围积雪深度的空间分布,可以全天候、全天时工作,不受云层影响地接收积雪信息。以往的积雪研究多集中在青藏高原、新疆和河套地区,东北地区积雪深度研究多是以气象站点数据进行研究,不能较好地反映东北地区整体的积雪深度时空变化。而且,以往主要侧重一个省或某个区域进行研究,较少以整个冻土区为研究背景。本文利用微波遥感数据,对东北冻土区不同冻土类型区域积雪深度时间空间变化进行分析,探索东北冻土区积雪深度的时空变化规律,利用 Mann-Kendall 检验研究东北冻土区年平均积雪深度的突变,最后结合气象站点数据,分析影响东北冻土区积雪深度的主要因素。东北积雪的多少直接关系到我国冰冻圈的分布状况,对东北冻土区生态环境的变化研究具有重要意义<sup>[19]</sup>。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区概况

东北冻土区是我国境内主要的高纬度冻土区,是我国第二大冻土区,主要发育“兴安-贝加尔”型冻土。地理位置介于 38°40′~53°30′ N、115°05′~135°02′ E,包括黑龙江、吉林和辽宁三省以及内蒙古自治区东四盟等行政区。全区年均气温在 0℃以下,年平均降水量为 460 mm,属寒温带大陆性气候,冬季漫长而寒冷干燥,夏季短暂温暖<sup>[20]</sup>。东北冻土区以嫩江-伊春一线为界,以北为多年冻土区,以南为季节冻土区<sup>[21]</sup>。图 1 为根据 1988 年出版的《中国冰雪冻土图》绘制的东北冻土区冻土类型分布图。

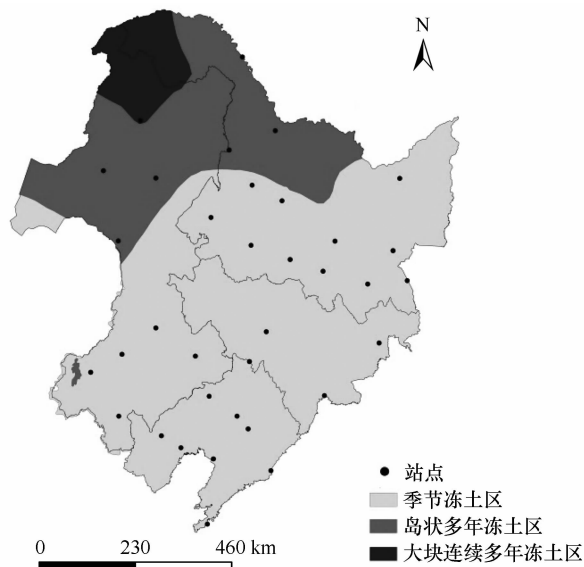


图 1 东北冻土类型及分布

Fig. 1 Distributions of frozen ground types in Northeast China

### 1.2 数据来源及处理

本文采用 1979–2014 年雪深长时间序列数据集,由中国西部环境与生态科学数据中心提供<sup>[12,22–24]</sup>。该数据集采用 EASE-GRID 和经纬度两种投影方式,空间分辨率为 25 km。用于反演该雪深数据集的原始数据来自美国国家雪冰数据中心(NSIDC)处理的 SMMR(1978–1987 年)、SSM/I(1987–2007 年)和 SSMI/S(2008–2014 年)逐日被动微波亮温数据。利用 Che 等<sup>[12]</sup>在 Chang 算法基础上针对中国地区进行修正的算法进行雪深反演。气象数据下载自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)。

本研究以年的时间尺度进行分析,利用 ArcGIS 将原始 ASCII 源文件转化成栅格数据,然后将雪深数据统一转换为 Albers 投影,通过栅格运算,对日雪深数据进行算术平均,获取年尺度平均雪深数据,并以东北冻土区划边界对年尺度雪深数据进行裁切,提取冻土区的雪深数据。

为进一步分析东北冻土区雪深变化的区域差异性和空间异质性,利用 ArcGIS 软件,逐栅格对雪深和年份进行线性回归分析,来表征积雪深度的空间变化趋势。线性趋势斜率(*slope*)用最小二乘法来计算,即

$$slope = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (1)$$

式中:  $n$  为研究时段年份;  $x_i$  为待分析变量年均积

雪深度。若  $slope > 0$ ，说明变化趋势是增加的；反之则是减少。

为定量分析积雪深度年际变率的平均变幅，计算年均积雪深度距平的均方根误差，其空间分布的高值区是积雪异常变化的敏感区<sup>[25-27]</sup>，均方根误差  $\sigma$  表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \tag{2}$$

式中： $n$  为研究时段年份； $d_i$  为年均积雪深度与其平均值的偏差。

## 2 东北冻土区积雪深度时空变化

### 2.1 时间变化

#### 2.1.1 年际变化

东北冻土类型大致分为三大类：大块连续多年冻土、岛状多年冻土、季节冻土。图 2 为 1979 – 2014 年东北冻土区及其不同类型分区年平均雪深变化趋势。研究期内，东北冻土区年平均积雪深度在 2013 年最大，为 5.09 cm，在 2008 年最小，为

1.51 cm。由于纬度、气候和地形的影响，大块连续冻土区是东北冻土区年平均积雪深度最大的子区域，1984 年最大，平均积雪深度达到了 8.35 cm，2003 年最小，为 3.61 cm。在岛状多年冻土区，年平均积雪深度最大值和最小值分别出现在 1984 年和 2002 年，积雪深度分别为 8.02 cm 和 2.78 cm。季节冻土区是东北冻土区积雪深度最小的子区域，年平均积雪深度最大值出现在 2013 年，只有 4.08 cm，最小值出现在 2008 年，为 0.52 cm。

图 2 利用线性倾向估计了 1979 – 2014 年东北冻土区及各子区域雪深变化特征，结果表明东北冻土区雪深呈轻微减少的趋势，减少速率为  $0.07 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。由图 2(a) 可知，东北冻土区雪深在 2002 年前一直呈现下降的趋势，且较为明显。在 2002 年后年平均积雪深度呈增加的趋势，且增加幅度较为剧烈。各子区域的积雪深度变化各有特点。大块连续多年冻土区和岛状多年冻土区年平均积雪深度均呈下降趋势，减少速率分别为  $0.17 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$  和  $0.46 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。而在季节冻土区，

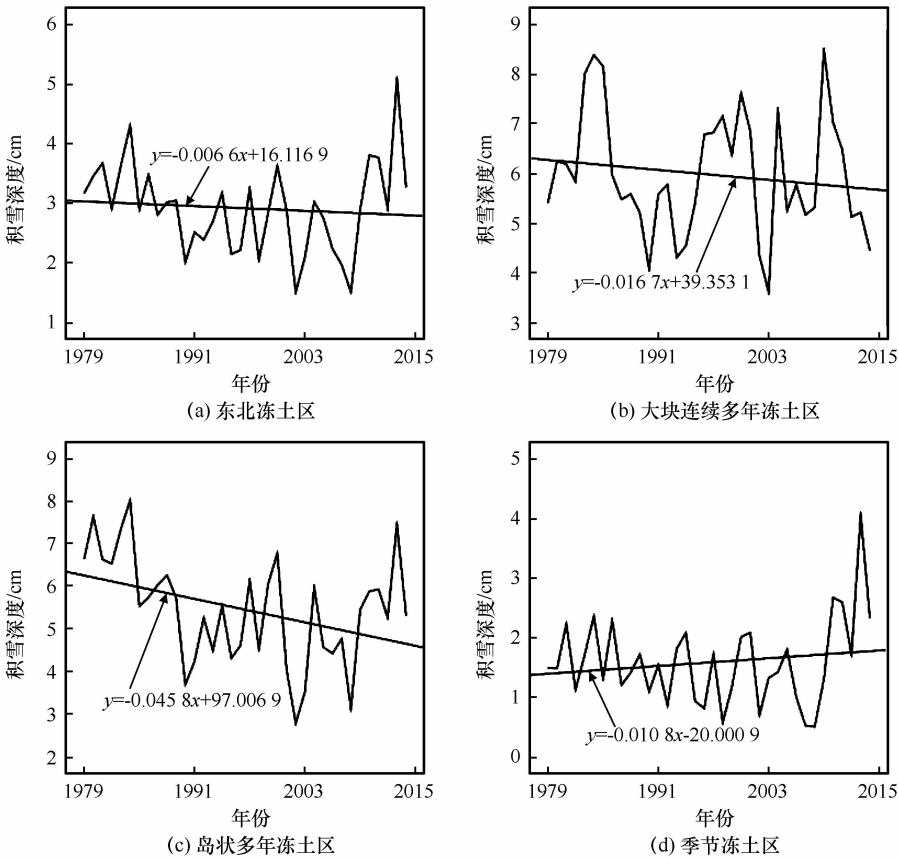


图 2 1979 – 2014 年积雪深度变化

Fig. 2 Variations of snow depth; Northeast China (a), large-block permafrost region (b), patchy permafrost region (c) and seasonally frozen ground region (d) during 1979 – 2014

年平均积雪深度变化与东北冻土区总的变化趋势相反,呈增加的趋势,增加速率为  $0.11\text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。季节冻土区和岛状多年冻土区在近 10 年积雪深度有增加的趋势,这也导致东北冻土区整体积雪深度在近 10 年有逐渐增加的现象。

2.1.2 突变年份

Mann-Kendall 检验通常用于趋势的显著性检验,因而被广泛用于气象要素时间序列的突变分析。利用 MATLAB 编写 Mann-Kendall 检验程序,分析东北冻土区年平均积雪深度突变年份。图 3 给出 1979 – 2014 年东北冻土区年平均积雪深度的 Mann-Kendall 检验。其中  $UF$  和  $UB$  为统计曲线,取  $\pm 1.96$  为临界曲线的 Mann-Kendall 检验值(即 0.05 的置信度检验区间)。从图中可知,  $UF$ 、 $UB$  在 1986 年有交点,且交点在临界区间范围之内,因此可以判断年平均积雪深度的突变年份为 1986 年,即东北冻土区年平均积雪深度从 1986 年开始出现减少的趋势;在 1991 年后  $UF$  线超出临界区间,说明 1991 年后进入显著减少阶段。根据丁一汇等<sup>[28]</sup>的研究,东北冻土区气温在 1988 年发生突变,出现增高的趋势,这与积雪深度突变年份基本吻合。在 2012 年后进入缓慢减少的状态,积雪深度减少趋势放缓。

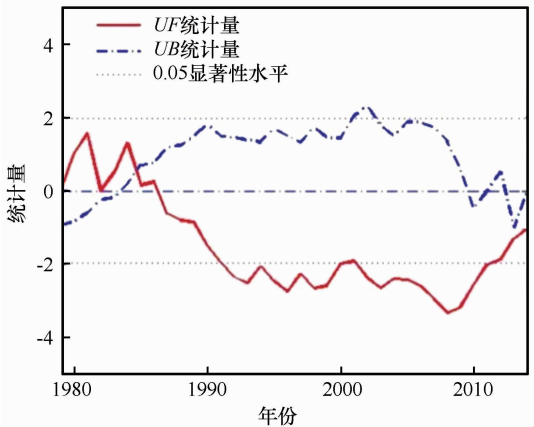


图 3 1979 – 2014 年东北冻土区积雪深度的 Mann-Kendall 检验

Fig. 3 Mann-Kendall test of snow depth in Northeast China during 1979 – 2014

2.2 空间变化

2.2.1 空间分布

东北冻土区积雪空间分布广泛,且存在显著空间差异。图 4 给出了 1979 – 2014 年东北冻土区多年平均积雪深度的空间分布。东北冻土区积雪分布受纬度和地形的影响,主要特征是随纬度升高积雪

深度增加,平原低、山地高。积雪深度的两个高值区在黑龙江北部和内蒙古东北部地区,低值区分布在东北地区平原腹地。由表 1 可知,东北冻土区多年平均雪深为 2.92 cm,年平均最大积雪深度达 11.69 cm。受纬度和气候的影响,东北冻土区多年平均积雪深度最大值出现在岛状多年冻土区,最小值出现在季节冻土区。大块连续多年冻土区年平均积雪深度分布较为均匀,最大值和最小值与平均值差值较小。岛状冻土区年平均雪深最大值与最小值差值较大,雪深空间分布不均匀,低值出现在岛状冻土区西部和中部地区,高值出现在大小兴安岭地区和岛状冻土区东部。季节冻土区面积较大,年平均积雪深度呈东高西低的特点,西部存在大片的雪深低值区。

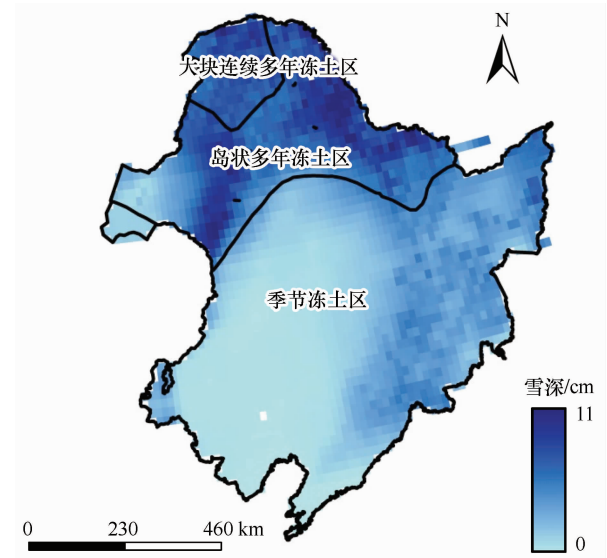


图 4 1979 – 2014 年东北冻土区年均雪深分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual mean snow depth in Northeast China during 1979 – 2014

表 1 东北冻土区年均积雪深度统计

Table 1 Annual mean snow depth, maximum snow depth and minimum snow depth in Northeast China

范围	平均积雪深度 /cm	最大积雪深度 /cm	最小积雪深度 /cm
东北冻土区	2.92	11.69	0
大块连续多年冻土区	5.98	9.21	3.64
岛状多年冻土区	5.45	11.69	0.21
季节冻土区	1.60	7.28	0

2.2.2 空间变化趋势

根据线性趋势斜率变化范围,将 1979 – 2014 年东北冻土区年均积雪深度和最大积雪深度变化趋势定义为明显增加、中度增加、轻度增加、基本不

变、轻度减少、中度减少、明显减少 7 个区间，并统计各区间面积及所占百分比，结果见表 2。

表 2 东北冻土区年均雪深变化趋势统计

Table 2 Change tendency of annual mean snow depth in Northeast China

线性趋势斜率变化范围/( $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	趋势变化等级	像元总数	占比/%
$\leq -0.1$	明显减少	29	1.24
$> -0.1 \sim -0.05$	中度减少	304	13.05
$> -0.05 \sim -0.01$	轻度减少	594	25.48
$> -0.01 \sim 0.01$	基本不变	680	29.17
$> 0.01 \sim 0.05$	轻度增加	571	24.50
$> 0.05 \sim 0.1$	中度增加	153	6.56
$> 0.1$	明显增加	0	0

从表 2 可以得知，东北冻土区年平均积雪深度变化以减少为主，面积比例达 39.77%，年平均雪深基本不变区域占冻土区面积的 29.17%，呈增加状态的区域占全区的 31.06%。总体而言，东北冻土区年平均雪深减少、不变、增加区域面积相差并不大。其中，明显减少区域所占面积最小，仅占全区面积的 1.24%。基本不变区域所占面积最大，为 29.17%。冻土区内没有年平均积雪深度明显增加的区域。从东北冻土区的线性趋势斜率变化范围来看，研究期内基本维持在  $-0.18 \sim 0.09 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$  之间。

图 5 给出了 1979 – 2014 年东北冻土区年均积

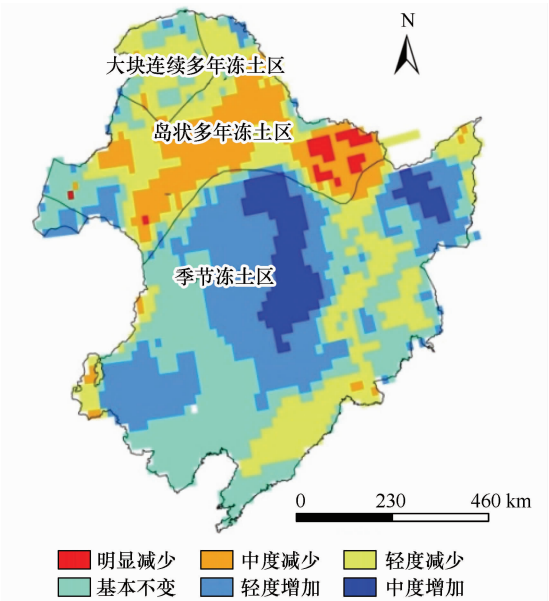


图 5 1979 – 2014 年东北冻土区年均雪深变化趋势的空间分布  
Fig. 5 Spatial distribution of change tendency of annual mean snow depth in Northeast China during 1979 – 2014

雪深度变化趋势的空间分布情况，逐像元回归分析结果显示，东北冻土区雪深变化存在明显的区域差异性。季节冻土区年平均积雪深度主要以轻度增加和中度增加为主，区域内中部和东北部增加最为明显。岛状冻土区以减少为主要趋势，该区域的东南部地区呈明显减少趋势，该区域也是东北冻土区减少最为明显的地区。这主要是因为该区域气温的增高超过其他地区，加之大小兴安岭地形导致冬季焚风效应显著，增温减湿，造成冬季降雪减少。其西部呈增加状态，主要分布在高原地区。大块连续冻土区面积较小，积雪年平均深度变化较为稳定，呈轻微的减少趋势。积雪深度的减少会导致冬季积雪对地面保温作用的削弱，对冻土的萎缩起到延缓作用。

2.2.3 异常变化

随着异常等级的提升，积雪深度变化的敏感度也随之提升。根据年均积雪深度和最大积雪深度距平的均方根误差  $\sigma$ ，将东北冻土区雪深异常分为 5 个等级。从表 3 可知，东北冻土区年平均雪深异常主要以轻度异常为主，占区域面积的 65.3%。无异常的区域所占比例最小，仅为 0.3%。冻土区内不存在重度异常的区域。总体而言，东北冻土区积雪深度异常程度较低，敏感性较低，变化较为稳定。冻土区内不同类型冻土区年平均积雪变化异常程度也不一样。图 6 为 1979 – 2014 年东北冻土区年均积雪深度距平均方根误差的空间分布情况。季节冻土区西部年平均积雪异常主要以轻微异常为主，该区域为平原地区，积雪深度变化较为稳定。东部主要以轻度异常为主，且有零星的中度异常区域。岛状多年冻土区主要以轻度异常为主，但在东部地区存在大量的中度异常区域。

岛状多年冻土年平均地温在  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右，属高温极不稳定多年冻土亚区，是冻土区内冻土变化最为活跃的区域，受气候影响较大。在气候变暖的大环境下，冻土南界不断北移，而岛状多年冻土区积雪

表 3 东北冻土区年均雪深异常变化统计

Table 3 RSME of anomaly of annual mean snow depth of the five abnormal levels in Northeast China

异常等级	距平均方根误差/cm	像元数	占比/%
无异常	0	8	0.3
轻微异常	$> 0 \sim 1$	654	28.1
轻度异常	$> 1 \sim 2$	1 520	65.3
中度异常	$> 2 \sim 3$	146	6.3
重度异常	$> 3$	0	0



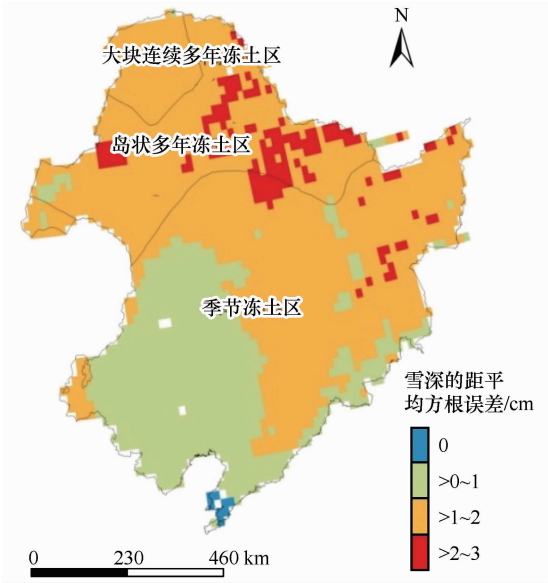


图6 1979–2014年东北冻土区年均雪深的距平均方根误差空间分布

Fig.6 Spatial distribution of the RSME of anomaly of mean snow depth in Northeast China during 1979–2014

深度变化异常也是由该区域气候异常变化导致的，该变化加剧了多年冻土的冻融变化，使该区域多年冻土的存在更不稳定，加剧了多年冻土的退化。由图6可知，年积雪深度变化异常区域主要集中于小兴安岭低山丘陵岛状多年冻土区和松嫩平原岛状多年冻土区以及大兴安岭东坡岛状多年冻土区。该区域冻土呈零星岛状分布，且属高温冻土，冻融作用强烈，冻土退化趋势显著<sup>[27]</sup>。该区域在大小兴安岭地区属于地势较低区域，冬季受地形影响，焚风效应强弱程度的不同导致冬季温度较为不稳定。位于该区域的孙吴县是增温中心 $[0.66\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}]$ ，该区域冬季增温显著<sup>[29]</sup>，气温的迅速增加导致了积雪变化的不稳定，且该区域年平均积雪深度呈明显减少和中度减少状态。

表4 积雪深度与气象要素的相关分析

Table 4 Correlation analyses of snow depth with meteorological elements

气象要素	多年冻土区		季节冻土区		东北冻土区	
	全年	冬季	全年	冬季	全年	冬季
降水量	0.154 *	0.266 **	0.153 **	0.360 **	-0.023	0.212 **
气温	-0.514	-0.353 **	-0.615 **	-0.673 **	-0.805 **	-0.789
风速	-0.359 **	-0.375 **	-0.140 **	-0.112 **	-0.260 **	-0.369 **
湿度	0.452 **	0.124	0.550 **	0.648 **	0.546 **	0.643 **
日照时数	-0.161 *	-0.029	-0.379 **	-0.503 **	-0.214 **	-0.369 **

注：\* 表示通过0.05水平显著性检验；\*\* 表示通过0.01水平显著性检验。

3 雪深对气候的响应

气候和大气环流的变化会引起积雪深度的变化，反过来积雪深度的变化也会对局部环境产生影响。季节性积雪变化的影响因子有气温、降水、风、大气环流、太阳辐射等，这些因子对积雪的变化起主要作用。积雪变化对局部水文环境和气候也会产生不容忽视的影响<sup>[30]</sup>。通过分析东北冻土区35个站点1979–2014年的积雪深度与站点降水量、平均气温、平均风速、平均相对湿度、日照时数等5个因素的相关性，探究其对积雪深度变化的影响。

首先利用站点位置的经纬度坐标提取出站点所在像元的年平均积雪深度，再将各站点1979–2014年的月平均气象数据合成年平均数据和冬季(12月、1月、2月)平均数据，最后将站点年积雪数据与各气象数据分别进行回归分析。在对不同冻土区域内积雪深度与站点气象要素进行分析时，由于大块连续冻土区站点较少，所以将大块连续多年冻土区与岛状多年冻土区合为一个区域，即多年冻土区。

由表4可知，通过Pearson相关性分析，在东北冻土区，气温、风速、日照时数与年平均积雪深度呈负相关，湿度与积雪深度呈正相关。冬季风速和日照时数与年平均积雪深度呈负相关，冬季降水量和湿度与年平均积雪深度呈正相关。以上气象要素均通过了0.01水平显著性检验。由此可知，气温是影响年平均积雪深度的主导因素。从全年来看，各气象要素与年平均积雪深度的相关性大小依次为：气温>湿度>风速>日照时数>降水量。在冬季，则为：气温>湿度>日照时数≈风速>降水量。这与胡列群等<sup>[31]</sup>对新疆的研究结果相似，降水量对积雪深度的影响并没有那么大。

进一步研究发现, 冬季降水量对积雪深度的相关性在季节冻土区高于多年冻土区, 这可能受到了气温和下垫面的影响。湿度作为影响降水量的气象要素, 也很好地印证了这一点。季节冻土区积雪深度与冬季湿度的相关性达到 0.648, 通过了 0.01 水平显著性检验, 远高于多年冻土区冬季湿度对该区域积雪深度的影响。日照时数与气温对积雪深度的影响在季节冻土区均大于多年冻土区。而风速对季节冻土区影响较小, 不论是冬季还是全年, 均远低于对多年冻土区的影响。多年冻土区位于东北冻土区北部, 在大气环流及内蒙古-西伯利亚高压的影响下, 风速对积雪的影响较大。总体而言, 季节冻土区年平均积雪深度变化与气象要素的变化相关度更高, 受气象要素影响更为显著。

## 4 结论

本文利用雪深被动微波遥感数据分析了东北冻土区 1979–2014 年积雪深度时空变化特征, 得出以下结论:

(1) 1979–2014 年, 东北冻土区雪深呈轻微减少的趋势, 减少速率为  $0.07 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。其中, 大块连续多年冻土区和岛状多年冻土区年平均积雪深度呈下降趋势, 减少速率分别是  $0.17 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$  和  $0.46 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。而在季节冻土区, 年平均积雪深度变化与东北冻土区总的变化趋势相反, 呈增加的趋势, 增加速率为  $0.11 \text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。

(2) 东北冻土区年平均积雪深度在 1986 年发生突变, 开始出现减少的趋势, 且在 1991 年后进入显著减少阶段。

(3) 东北冻土区多年平均雪深为 2.92 cm, 年平均雪深最高值达 11.69 cm。东北冻土区年平均积雪深度变化以减少为主, 占比为 39.77%。年平均雪深变化异常以轻度异常为主, 占区域面积的 65.3%。总体而言, 区域内积雪深度变化较为稳定。但在岛状多年冻土区出现了大量中度异常区域, 说明这一区域积雪深度较不稳定。该区域也是多年冻土退化最为严重的区域, 积雪深度变化在一定程度对气候变化起到指示作用, 该区域值得进一步关注。

(4) 降水量和湿度与年平均积雪深度呈正相关, 气温、风速和日照时数与年平均积雪深度呈负相关。气温是与东北冻土区年平均积雪深度相关性最高的气象因素, 而降水量与积雪深度的相关性并

不显著。湿度作为产生降雪的必要条件, 与积雪深度的相关性要高于降水量。季节冻土区积雪深度对气候的响应较多年冻土区更为敏感, 气候变化对季节冻土区积雪深度的影响更为显著。

(5) 受地形影响, 大小兴安岭地区是积雪深度变化最为敏感的地区。冬季焚风效应导致该地区增温减湿, 积雪深度也是减少最为明显的地区。积雪深度变化分界线大致与多年冻土和季节冻土分界线一致, 积雪的存在也影响着冻土的发育<sup>[32]</sup>。

## 参考文献 (References):

- [1] Li Peiji. Dynamic characteristic of snow cover in western China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1993(6): 505–515. [李培基. 中国西部积雪变化特征[J]. *地理学报*, 1993(6): 505–515.]
- [2] Stocker T F, Qin Dahe, Plattner G-K, et al. Climate change 2013: the physical science basis: Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Jin Huijun, Wang Shaoling, Lü Lanzhi. Features of permafrost degradation in “Hinggan” Mountains, Northeastern China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2009, 29(2): 223–228. [金会军, 王绍令, 吕兰芝. 兴安岭多年冻土退化特征[J]. *地理科学*, 2009, 29(2): 223–228.]
- [4] Zhou Mei, Yu Xinxiao, Feng Lin. Analysis of the driving force of the permafrost degeneration in Daxinganling [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2002, 16(4): 44–47. [周梅, 余新晓, 冯林. 大兴安岭林区多年冻土退化的驱动力分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2002, 16(4): 44–47.]
- [5] Zhao Zongci, Luo Yong. Projections of climate change over Northeastern China for the 21st century [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2007, 23(3): 1–4. [赵宗慈, 罗勇. 21 世纪中国东北地区气候变化预估[J]. *气象与环境学报*, 2007, 23(3): 1–4.]
- [6] Li Yuting, Liu Jinbao, Wang Zengwu, et al. Study of spatio-temporal dynamics and climate response of snow cover in Sichuan Province from 2003 to 2012 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(6): 1491–1500. [李玉婷, 柳锦宝, 王增武, 等. 2003–2012 年四川省积雪时空动态变化与气候响应研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(6): 1491–1500.]
- [7] Osterkamp T E. Characteristics of the recent warming of permafrost in Alaska [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): 488–501.
- [8] Liu Xun, Jin Xin, Ke Changqing. Accuracy evaluation of the IMS snow and ice products in stable snow covers regions in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(3): 500–507. [刘洵, 金鑫, 柯长青. 中国稳定积雪区 IMS 雪冰产品精度评价[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 500–507.]
- [9] Chen Chunyan, Li Yi, Li Qihang. Snow cover depth in Ürümqi region, Xinjiang: evolution and response to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 587–594. [陈春艳, 李毅, 李奇航. 新疆乌鲁木齐地区积雪深度演变规律及对气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 587–594.]
- [10] Laternser M, Schneebeli M. Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931–99) [J]. *International Journal of Climate*

- tology, 2003, 23: 733 – 750.
- [11] Foster J L, Hall D K, Kelly R E J, et al. Seasonal snow extent and snow mass in South America using SMMR and SSM/I passive microwave data (1979 – 2006) [J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(2): 291 – 305.
  - [12] Che Tao, Li Xin, Jin Rui, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China [J]. Annals of Glaciology, 2008, 49(1): 145 – 154.
  - [13] Li Xiaolan, Zhang Feimin, Wang Chenghai. Comparison and analysis of snow depth over China, observed and derived from remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(4): 755 – 764. [李小兰, 张飞民, 王澄海. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(4): 755 – 764.]
  - [14] Ke Changqing, Li Peiji. Research on the characteristics of distribution and variation of snow cover on the Tibetan Plateau by using EOF analysis [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 64 – 67. [柯长青, 李培基. 用 EOF 方法研究青藏高原积雪深度分布与变化[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 64 – 67.]
  - [15] Ma Lijuan, Qin Dahe. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957 – 2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(1): 1 – 11. [马丽娟, 秦大河. 1957 – 2009 年中国台站观测的关键积雪参数时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(1): 1 – 11.]
  - [16] Tang Zhiguang, Li Hongyi, Wang Jian, et al. Reconstruction of snow depth over the Tibetan Plateau based on multi-source data [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(7): 941 – 950. [唐志光, 李弘毅, 王建, 等. 基于多源数据的青藏高原雪深重建[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 941 – 950.]
  - [17] Bai Shuying, Wu Qi, Shi Jianqiao, et al. Relationship between the spatial and temporal distribution of snow depth and the terrain over the Tibetan Plateau [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 171 – 178. [白淑英, 吴奇, 史建桥, 等. 青藏高原积雪深度时空分布与地形的关系[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 171 – 178.]
  - [18] Chen Guangyu, Li Dongliang. Temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth in Northeast China and its vicinity [J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(5): 513 – 521. [陈光宇, 李栋梁. 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律[J]. 气象, 2011, 37(5): 513 – 521.]
  - [19] Zhao Wenyu, Liu Hailong, Wang Hui, et al. A study of spatial distribution of snow cover days in the Tianshan Mountains based on MODIS snow products [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(6): 1510 – 1517. [赵文宇, 刘海隆, 王辉, 等. 基于 MODIS 积雪产品的天山年积雪日数空间分布特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(6): 1510 – 1517.]
  - [20] Zheng Hongxing, Liu Jing. Long-term trends of aridity index and its sensitivity to climate factors in Northeast China: 1971 – 2008 [J]. Geographical Research, 2011, 30(10): 1765 – 1774. [郑红星, 刘静. 东北地区近 40 年干燥指数变化趋势及其气候敏感性[J]. 地理研究, 2011, 30(10): 1765 – 1774.]
  - [21] Wei Zhi, Jin Huijun, Zhang Jianming, et al. Prediction of permafrost changes in Northeastern China under a changing climate [J]. Science China: Earth Sciences, 2011, 54(6): 924 – 935. [魏智, 金会军, 张建明, 等. 气候变化条件下东北地区多年冻土变化预测[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(1): 74 – 84.]
  - [22] Dai L, Che T, Wang J, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 14 – 29.
  - [23] Dai Liyun, Che Tao. Cross-platform calibration of SMMR, SSM/I and AMSR-E passive microwave brightness temperature [C/OL]// Proceedings of Sixth International Symposium on Digital Earth: data processing and applications. [2018-04-05]. <http://westgis.ac.cn/wp-content/uploads/2011/01/Cross-platform-Calibration-of-SMMR-SSMI-and-AMSR-E-Passive-Microwave-Brightness-Temperature.pdf>.
  - [24] Che T, Li X, Gao F, et al. Study of snow water resources by passive microwave satellite data in China [C]// Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2004: 3674 – 3676.
  - [25] Che Tao, Li Xin. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993 – 2002 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 64 – 67. [车涛, 李新. 1993 – 2002 年中国积雪水资源时空分布与变化特征[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 64 – 67.]
  - [26] Dai Shengpei, Zhang Bo, Cheng Feng, et al. The spatio-temporal variations of snow cover in China from the snow depth time series dataset based on passive microwave remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(6): 1066 – 1073. [戴声佩, 张勃, 程峰, 等. 基于被动微波遥感反演雪深的时间序列分析我国积雪时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2010, 32(6): 1066 – 1073.]
  - [27] Guo Dongxin, Wang Shaoling, Lu Guowei, et al. Division of permafrost regions in Daxiao Hinggan Ling, Northeast China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3(3): 1 – 9. [郭东信, 王绍令, 鲁国威, 等. 东北大小兴安岭多年冻土分区[J]. 冰川冻土, 1981, 3(3): 1 – 9.]
  - [28] Ding Yihui, Zhang Li. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 794 – 805. [丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794 – 805.]
  - [29] He Wei, Bu Rencang, Xiong Zaiping, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519 – 531. [贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961 – 2005 年东北地区气温和降水变化趋势[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519 – 531.]
  - [30] Xi Ying, Li Dongliang, Wang Wen. Study of the temporal-spatial characteristics of snow covers days in Hetao and its vicinity [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 446 – 456. [惠英, 李栋梁, 王文. 河套及其邻近不稳定积雪区积雪日数时空变化规律研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 446 – 456.]
  - [31] Hu Liequn, Li Shuai, Liang Fengchao. Analysis of the variation characteristics of snow covers in Xinjiang region during recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(4): 793 – 800. [胡列群, 李帅, 梁凤超. 新疆区域近 50 年积雪变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 793 – 800.]
  - [32] Liu Shibo, Zang Shuying, Zhang Lijuan, et al. Estimation of land surface temperature from MODIS in Northeast China [J]. Geographical Research, 2017, 36(11): 2251 – 2260. [刘世博, 臧淑英, 张丽娟, 等. 东北冻土区 MODIS 地表温度估算[J]. 地理研究, 2017, 36(11): 2251 – 2260.]



Analyzing the spatial-temporal variations of snow depth in the Northeast China by means of remote sensing in consideration of frozen ground zonation

LIU Shibo, ZANG Shuying, ZHANG Lijuan, NA Xiaodong, SUN Li,  
LI Miao, ZHANG Xiaowen  
( Heilongjiang Province Key Laboratory of Geographical Environment Monitoring and Spatial Information Service  
in Cold Regions, Harbin Normal University, Harbin 150025, China )

**Abstract:** Snow cover is an important component of the cryosphere, which has an insulating effect on the ground. When snow melts, heat absorbing would reduce land surface temperature. Therefore, snow affects the growth of frozen ground, and is sensitive to climate change. Spatial and temporal variations of snow depth in frozen ground regions of Northeast China were analyzed by using spatial and statistics analysis function of GIS, based on the daily dataset of snow depth from 1979 to 2014. The results showed that the annual snow depth was 2.92 cm averaged from 1979 to 2014, with the maximum annual mean snow depth in the patchy permafrost regions and the minimum one in the seasonally frozen ground regions. Snow depth had decreased with the rate of  $0.07\text{ cm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ , and the decreased area accounting for 39.77% of the total. The annual mean snow depth mutated in 1986 and then followed a decreasing, which was in accordance with the air temperature mutation. Affected by the terrain and the air temperature changing, the reduction of annual mean snow depth and the sensitive range mainly appeared in the patchy permafrost regions. Air temperature is main controlling factor to the annual mean snow depth in Northeast China. Precipitation, wind speed, humidity and sunshine duration can also influence the depth of snow cover. The snow depth in seasonally frozen ground regions is more sensitive than that in permafrost regions.

**Key words:** snow depth; Northeast China; frozen ground; microwave remote sensing; Mann-Kendall test; sensitivity

( 本文编辑：武俊杰 )