

引用格式: Yue Shanna, Che Tao, Dai Liyun, *et al.* Temporal and Spatial Distribution and Variation Characteristics of Snow Depth in the Northern Hemisphere and Typical Areas[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6): 1263-1272. [岳珊娜, 车涛, 戴礼云, 等. 北半球及典型区雪深时空分布与变化特征[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1263-1272.]  
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1263

## 北半球及典型区雪深时空分布与变化特征

岳珊娜<sup>1,2</sup>, 车涛<sup>1</sup>, 戴礼云<sup>1</sup>, 肖林<sup>3</sup>, 邓婕<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院西北生态资源环境研究院, 甘肃省遥感重点实验室, 中国科学院黑河遥感试验  
研究站, 甘肃 兰州 730000;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049;  
3. 四川农业大学林学院, 长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室,  
长江上游林业生态工程四川省重点实验室, 四川 成都 611130)

**摘要:** 基于欧空局的 GlobSnow 雪水当量数据集和国家青藏高原科学数据中心的北半球长时间序列雪深数据集 NHSD 研究了北半球及 9 个典型区的雪深时空分布与变化特征。结果表明: 北半球 1988~2018 年平均雪深总体呈显著下降趋势 ( $p < 0.01$ ), 年际变化幅度为  $-0.55 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。在高纬度地区, 加拿大北部和阿拉斯加年平均雪深下降明显 ( $p < 0.01$ ), 下降速率分别为  $3.48 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  和  $3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 两地区月平均雪深在冬季显著下降。西西伯利亚平原和东欧平原年平均雪深呈下降趋势, 其中东欧平原雪深下降较为明显 ( $p < 0.01$ ), 变化速率为  $-2.3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , 两地区的月平均雪深在春季显著下降, 其中 5 月份最为明显。东西伯利亚山地的雪深年际变化呈增加趋势, 除堪察加半岛外, 其月平均雪深在冬季呈显著增加趋势。对于高山区, 阿尔卑斯山脉和落基山脉的年平均雪深呈缓慢增长趋势, 而青藏高原地区雪深呈缓慢下降趋势。阿尔卑斯山脉的月平均雪深在冬季呈显著增加趋势, 5 月份显著减小。落基山脉和青藏高原雪深变化呈现出空间异质性: 在整个研究时段, 落基山脉北部月平均雪深呈下降趋势, 中部和南部呈上升趋势; 青藏高原的北部边缘山脉雪深呈显著上升趋势, 中部大多数地区呈下降趋势。喜马拉雅山脉的北坡雪深增加, 南坡雪深减小, 但其变化率绝对值小于  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。东南部雪深较大的念青唐古拉山脉冬季雪深呈显著下降趋势。对 9 个典型区雪深的年内分析 (2001~2010 年平均值) 结果显示: 高山区雪深峰值远低于高纬度地区雪深峰值。除青藏高原外, 高山区的积雪融化起始日期明显早于高纬度地区。

**关键词:** 雪深; 北半球; 高山区; 高纬度地区; 遥感

**中图分类号:** TP75      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2020)06-1263-10

### 1 引言

积雪是构成冰冻圈的重要部分, 也是气候变化的指示器<sup>[1]</sup>。在全球气候变暖的背景下, 积雪变化导致的地表反照率及能量收支变化, 会反馈给气候

系统。作为重要的淡水资源补给, 积雪是维系全球水循环系统平衡不可或缺的纽带。融雪为世界上约 17% 的人口提供水源<sup>[2]</sup>, 因而其在很大程度上影响着人类的生活和生产活动。北半球蕴含着全球 98% 的积雪<sup>[3]</sup>, 为了解积雪的时空变化特征, 国内外

收稿日期: 2020-07-05; 修订日期: 2020-11-20

基金项目: 科技部国家科技基础资源调查专项“中国积雪特性及分布调查”(2017FY100500), 国家自然科学基金项目(41771389), 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划。

作者简介: 岳珊娜 (1996—), 女, 河南郑州人, 硕士研究生, 主要从事积雪遥感研究。E-mail: ysn@lzb.ac.cn

通讯作者: 车涛 (1976—), 男, 陕西周至人, 研究员, 主要从事冰冻圈遥感研究。E-mail: chetao@lzb.ac.cn

众多学者对北半球积雪开展了大量的研究。

北半球积雪变化的研究表明,近年来积雪覆盖日数和积雪覆盖面积呈缩减趋势,雪水当量也有所下降<sup>[4-7]</sup>。尤其是北半球春季积雪明显减少,其中高纬度和高山区积雪减少的最多,许多山脉的低海拔地区和融雪期的早期显示出积雪减少的迹象,例如在亚洲高山地区,但是某些地区(例如西喜马拉雅山脉)积雪几乎没有变化,甚至有所增加<sup>[8-11]</sup>。

在高纬度地区,尽管欧亚大陆的某些区域雪水当量变化趋势强烈,但欧亚大陆的总雪水当量并没有下降<sup>[12]</sup>。从季节尺度来看,欧亚大陆3月和4月积雪覆盖面积显著下降,雪水当量减少,其中3月份下降尤为明显。从4月开始,其他地区积雪减少,但是60°N地区积雪呈不变或增加的状态<sup>[8,13]</sup>。中西伯利亚高原及其以东地区和北美高纬度地区都有相比其他区域积雪早、融雪晚的特点<sup>[14]</sup>。利用1980~2012年GlobSnow V2.0的雪水当量数据在北美的研究表明,北美地区雪水当量2~4月均有所减少,其中2月和4月雪水当量显著减少<sup>[15]</sup>。

全球约有78%的山区在2000~2018年间积雪减少,积雪持续时间减少了43 d,积雪面积减少了13%,而部分山区冬季积雪持续时间增加了32 d,积雪面积增加了11%<sup>[16]</sup>。近年来对欧洲山区积雪研究发现,阿尔卑斯山脉春季雪水当量正在减少,且在海拔低于2 000 m的地区,雪深和雪水当量年际变化呈减小趋势,而且变化较为明显;高于2 000 m的地区,没有明显的变化趋势;Fennoscandian山脉的较高和较冷地区,最大雪深和最大雪水当量呈现上升趋势<sup>[17-20]</sup>。有报告称,美国西部33%的积雪监测点积雪显著减少,而有2.2%的监测点积雪显著增加<sup>[21]</sup>,美国中部局部地区积雪变化呈增加趋势<sup>[16]</sup>。落基山脉在5月和6月积雪面积呈线性下降

的趋势<sup>[22]</sup>。过去50 a青藏高原积雪面积总体呈减少趋势,中东部1961~1998年冬春两季雪深增加,1998~2014年冬春两季雪深下降<sup>[23]</sup>。尤其在2000年以后,积雪覆盖日数和雪深有明显的下降趋势<sup>[24]</sup>。但也有学者利用MODIS产品计算了2001~2015年积雪持续时间、积雪起始时间等相关参数,结果并未发现青藏高原积雪覆盖面积有明显的下降趋势<sup>[25]</sup>。

以往研究所用数据、时段、方法等不尽相同,研究结果在局部区域存在差异且目前尚未形成统一的认识。鉴于此,以欧洲航空局的雪水当量数据集GlobSnow<sup>[26]</sup>和国家青藏高原科学数据中心的北半球长时间序列雪深数据NHSD<sup>[27]</sup>为基础,综合分析了北半球以及9个典型区(包括6个高纬度区和3个高山区)的雪深时空分布特征和变化趋势,以期更好地了解北半球及典型区的积雪变化特征。

## 2 研究区概况

北半球蕴含着全球98%的季节性积雪,1月份积雪面积约 $45.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,该面积约占北半球整个陆地面积的49%<sup>[28]</sup>。北半球的雪深分布呈现出纬度地带性和垂直地带性,主要分布在30°N以北地区,雪深随纬度和海拔的增高而增加。北半球的主要积雪区域可分为两个类型,一个是阿拉斯加、加拿大北部、斯堪的纳维亚半岛和欧亚大陆等高纬度地区,另一个是美国西部山脉、阿尔卑斯山脉和青藏高原等高海拔地区。本研究旨在分析北半球雪深年际变化趋势以及典型区的年际、年内积雪变化。典型区包括6个高纬度地区和3个高山区(图1),分别是阿拉斯加、落基山脉、加拿大北部地区、阿尔卑斯山脉、东欧平原、西西伯利亚平原、中西伯利亚高原、东西伯利亚山地、青藏高原。

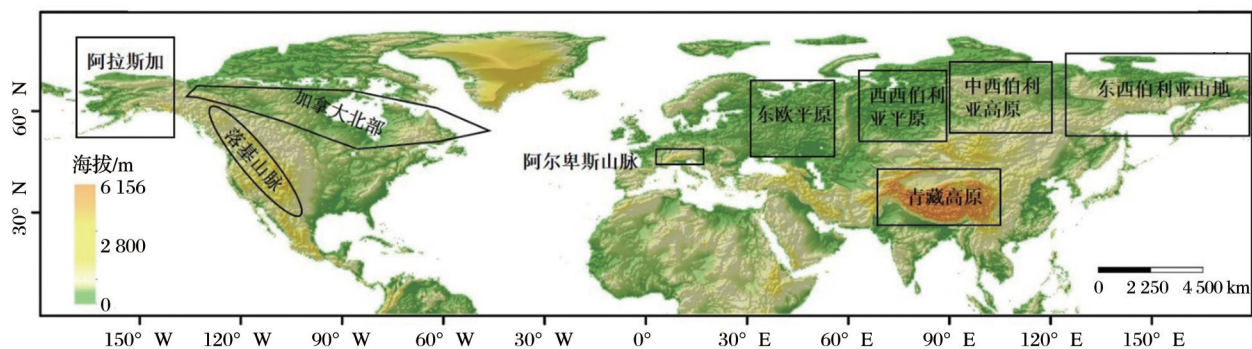


图1 北半球及典型区空间示意图

审图号:GS(2016)1593号

Fig.1 Location of typical areas over the Northern Hemisphere

### 3 数据集与研究方法

#### 3.1 数据集介绍

采用 GlobSnow 2.0 版本数据(V2.0)、3.0 版本数据(V3.0)和 NHSD 数据开展北半球雪深时空变化分析。GlobSnow 和 NHSD 都属于被动微波遥感产品,使用的原始亮度温度数据相同,来自美国国家雪冰数据中心的 3 个传感器 SMMR、SMM/I、SMMI/S,均使用 19 GHz 和 37 GHz 波段的亮温数据。在雪深反演算法上,GlobSnow 数据采用同化算法<sup>[26,29]</sup>,该算法结合积雪微波辐射传输模型 HUT 和地面站点观测雪深得到优化积雪粒径,并利用亮度温度梯度法进行雪深反演。NHSD 数据生产时,首先将这些不同传感器的亮度温度数据交叉定标<sup>[30]</sup>,然后在 Chang 算法<sup>[31]</sup>的基础上,引入森林覆盖率,且在不同地区采用不同的反演系数,进行雪深反演。

GlobSnow 的空间分辨率为 25 km,投影坐标系为 EASE-GRID,覆盖 35°~85°N 的地区, GlobSnow V2.0 的 L3 级数据包含山区,持续时间为 1979~2013 年。由于山区站点过少,同化后的数据准确率不高,所以 2013 年之后的山区数据被掩膜。GlobSnow V3.0 数据持续时间为 1979~2018 年,不包含山区数据。NHSD 数据的空间分辨率为 0.25°,投影坐标系为 WGS84,覆盖整个北半球地区,数据持续时间为 1979~2018 年。

利用 GlobSnow V3.0 和 NHSD 数据进行北半球和典型区雪深的年际变化分析,为保证数据的传感器一致,使用的时间段为 1988~2018 年,其中 NHSD 数据用于分析北半球山区和典型区 3 个高山区(落基山脉、阿尔卑斯山脉和青藏高原)的雪深, GlobSnow V3.0 数据用于分析北半球除山区外的其他地区 and 典型区中的 6 个高纬度地区的雪深。GlobSnow V2.0 和 NHSD 的 2001~2010 年数据用于本研究中 9 个典型区的雪深年内分析,其中 NHSD 数据用于青藏高原雪深的年内分析, GlobSnow V2.0 数据用于其他 8 个地区雪深的年内分析。

#### 3.2 数据处理方法

将 9 月至次年 8 月定义为一个完整的水文年,研究期(1988~2018 年)共 30 个水文年。由于 GlobSnow 数据的 6~9 月份数据缺失严重,本研究只对 10~5 月的雪深进行分析。GlobSnow 数据与 NHSD 数据的投影坐标系不同,且 GlobSnow 为雪水当量数据,因此首先对 GlobSnow 数据进行两

步处理:第一步,将 GlobSnow 数据的 EASE-GRID 投影转换为 WGS84;第二步,将 GlobSnow 的雪水当量值与积雪密度( $0.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )相除得到雪深数据。然后,将 GlobSnow 和 NHSD 的逐日雪深数据处理为逐月、逐年数据。

GlobSnow 逐日数据存在缺失现象,因此在逐月、逐年雪深数据分析时需做一些特殊处理:在像元尺度上,将逐日数据以连续的 5 d 为一个步长,每月数据分为 6 组;判断每组数据中有值的天数是否大于等于 3(若第六组数据小于 5 d,其判断阈值为 2),若是,则求该组均值,否则,认为该组均值为无效值(NaN);得到 6 组均值后,判断 6 组均值的有效值个数,若有效值个数 $\geq 4$ ,则对有效值的和求均值,并作为月均值,否则,视为 NaN;在计算水文年均值时,若月均值数据有效值的个数 $\geq 7$ ,则对有效值的和求均值,并作为年平均值;否则,视为 NaN。NHSD 数据的处理方法与 GlobSnow 数据的处理方法相同,处理流程见图 2。

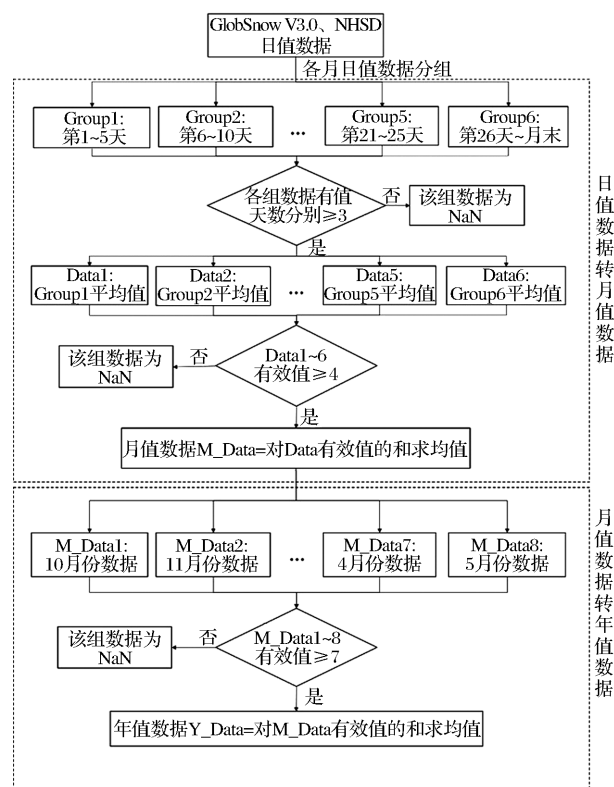


图2 GlobSnow 和 NHSD 数据处理流程图

Fig.2 Flow chart of data processing of GlobSnow and NHSD

#### 3.3 时空变化分析方法

对北半球雪深的逐年、逐月年际变化趋势分析时,采用线性趋势分析的方法<sup>[32]</sup>。用  $y_i$  代表第  $i$  年的



雪深,用 $x$ 表示年份序列号,构成一元线性回归模型:

$$y_i = a + bx_i \quad (1)$$

其中: $a$ 为一元线性回归模型中的截距,代表着某区域1988/1989水文年的期望雪深, $b$ 表示某一区域雪深随时间的变化趋势,若 $b > 0$ ,则雪深增加, $b < 0$ 雪深减小, $b = 0$ 时,表示雪深无变化。然后利用F检验(F-test)方法,对回归模型中的 $b$ 值在P值小于0.05(0.01)情况下进行显著性检验,P值代表拒绝原假设所需要的最小置信度。本研究的研究年份为30年,查F分布表知,若 $b$ 值小于0,F-test值不小于4.196(7.636)时,雪深显著减小;若 $b$ 值大于0,F-test值不小于4.196(7.636)时,雪深显著增加。

对典型区日尺度的年内变化分析时,为消除雪深的异常波动,采用移动平均滤波器对雪深值进行平滑处理,移动平均滤波器的窗宽设置为5,具体见式(2)~(6):

$$yy_1 = y_1 \quad (2)$$

$$yy_2 = (y_1 + y_2 + y_3) / 3 \quad (3)$$

$$yy_i = (y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2}) / 5 \quad (4)$$

$$yy_{\text{end}-1} = (y_{\text{end}-2} + y_{\text{end}-1} + y_{\text{end}}) / 3 \quad (5)$$

$$yy_{\text{end}} = y_{\text{end}} \quad (6)$$

其中: $y_1$ 、 $y_2$ 为原序列的第一、二个数据, $yy_1$ 、 $yy_2$ 为新数据序列的第一、二个数据; $y_i$ 为第 $i$ 个原序列值, $yy_i$ 为第 $i$ 个新序列值。新序列的第一、二个值分别由公式(2)、(3)计算,最后两个值分别由公式(5)、(6)计算,其他值由公式(4)计算。

## 4 结果与分析

### 4.1 北半球雪深时空变化分析

利用GlobSnow V3.0和NHSD的1988~2018年逐日雪深数据对北半球年平均雪深和月平均雪

深的年际变化趋势进行分析,并对变化趋势进行了显著性检验。

#### 4.1.1 年平均雪深的年际变化

北半球年平均雪深总体呈现下降趋势(图3),且通过了显著性检验( $p < 0.01$ ),年际变化幅度为 $-0.55 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,该结果与Xiao等<sup>[6]</sup>在相应时段分析的北半球雪深年际变化趋势相吻合。本研究中北半球的年平均雪深最小值出现在2009/2010年,研究期间的雪深为8.2 cm。2016/2017年和2017/2018年的平均雪深较之前有所增加,此结果与Pulliainen等<sup>[12]</sup>的研究结果相同。

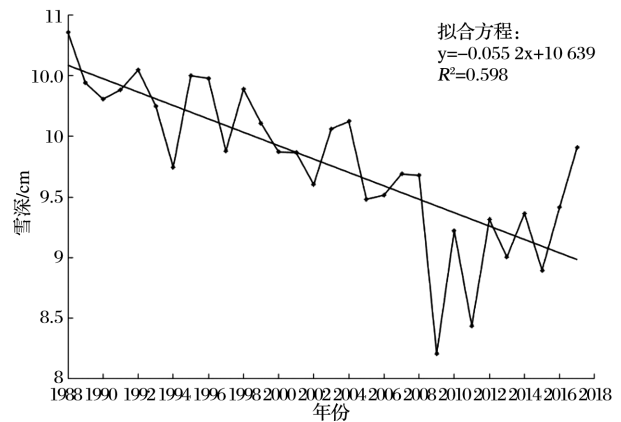


图3 北半球1988/1989~2017/2018年平均雪深的年际变化  
Fig.3 Interannual variation of average snow depth over the Northern Hemisphere from 1988/1989 to 2017/2018

北半球多年平均雪深变化率和显著性检验( $p < 0.05$ )显示,近30 a来北半球绝大多数地区雪深呈减少趋势(图4~5)。阿拉斯加、落基山脉北部、加拿大、斯堪的纳维亚山脉、东欧平原、西西伯利亚平原、中西伯利亚高原、中亚、蒙古国以及中国绝大多数地区雪深减小,其中阿拉斯加、加拿大北部地区、落基山脉北部、东欧平原以及欧亚大陆中部的部分地区雪深显著减小,其变化率介于 $-1.5 \sim$

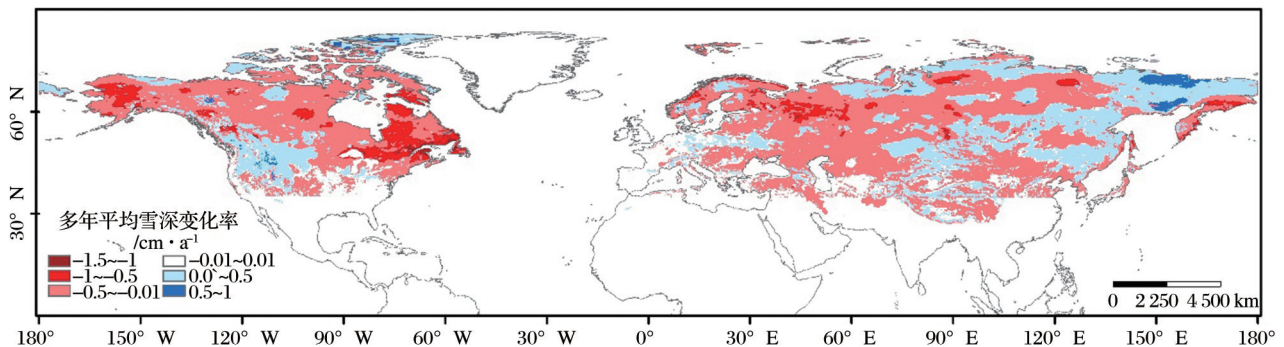


图4 北半球多年平均雪深变化率

Fig.4 Variation slope of annual average snow depth over the Northern Hemisphere

审图号:GS(2016)1593号

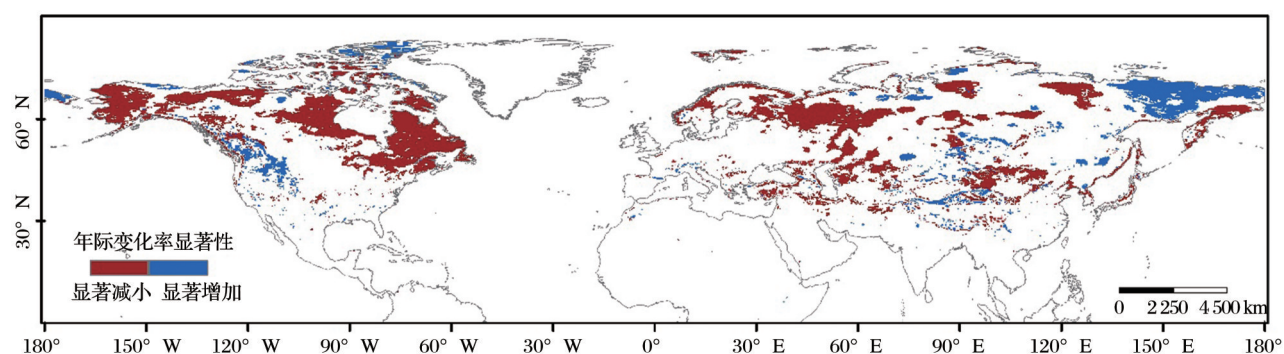


图 5 北半球多年平均雪深变化率显著性

审图号:GS(2016)1593号

Fig.5 Significant variation slope of annual average snow depth over the Northern Hemisphere

$-1 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。蒙古国北部、中国东北中部以及青藏高原部分山脉近 30 a 来雪深增加,其变化率介于  $0.01 \sim 0.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ ,加拿大西北地区西侧、落基山脉中南部零星区域和东西伯利亚山地的一些地区多年平均雪深增长率较大,介于  $0.5 \sim 1 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。

#### 4.1.2 月平均雪深的年际变化

北半球月平均雪深的年际变化趋势及其显著性检验( $p < 0.05$ )结果显示(图 6、图 7),北半球高纬度的绝大多数地区雪深在 10 月有所下降,但其多年雪深变化率不高,介于  $-0.5 \sim -0.01 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间。西

伯利亚平原和中西伯利亚高原的北部地区及东西伯利亚山地的部分地区雪深略微增加(图 6(a))。北美部分地区 11 月的年际变化率较 10 月发生了变化,多数地区的雪深年际变化率增大。欧亚大陆的红色区域(雪深减小区域)自东向西缩减,西西伯利亚、中西伯利亚和东西伯利亚山地的雪深增加区域扩大(图 6(b))。12 月份,阿拉斯加和加拿大地区雪深显著减小,北美沿海山脉雪深显著增加。欧亚大陆的斯堪的纳维亚半岛和东欧平原雪深显著减小,东西伯利亚山地雪深显著增加,中国的西北地区和

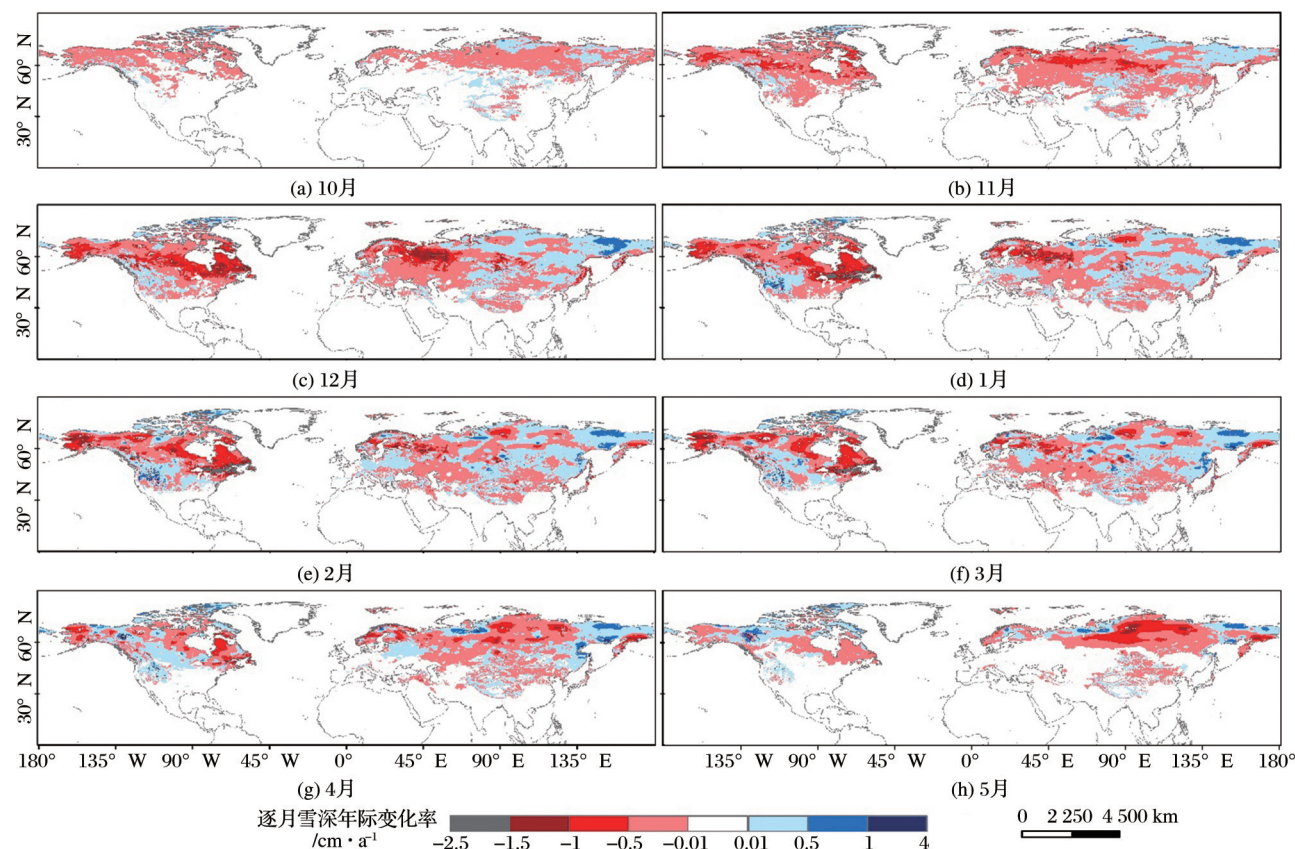


图 6 北半球月平均雪深年际变化率

审图号:GS(2016)1593号

Fig.6 Variation slope of monthly average snow depth over the Northern Hemisphere



蒙古国中南部雪深显著减小(图6(c)、图7(c))。1月份,北美的绝大多数地区雪深呈减小趋势:加拿大魁北克省南部的雪深变化率小于 $-1.5\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ;落基山脉北部雪深呈减小趋势,部分区域变化率也小于 $-1.5\text{ cm}\cdot\text{a}^{-1}$ ,其中南部雪深呈增加趋势。东欧平原雪深显著减小,东西伯利亚山地雪深显著增加(图6(d)、图7(d))。2月份的雪深年际变化规律跟1月份相似。3月份,阿拉斯加和加拿大北部地区雪深仍在减少,但对比12月、1月、2月,北美地区的雪深显著减小区域缩小(图6(f)、图7(f))。4月份,北美的中部地区雪深显现增加趋势,阿拉斯加西部和加拿大地区雪深仍呈减少趋势,但其雪深变化率绝对值小于12~3月的绝对值。欧亚大陆雪深大量减少,但只有少数区域通过了显著性检验(图6(g)、图7(g))。5月份,加拿大西北地区雪深呈增加趋势,且大多通过了显著性检验,魁北克省的西部雪深呈显著减少趋势。欧亚大陆的变化主要集中在西西伯利亚平原和中西伯利亚高原地区,两地区雪深大规模地呈显著减小趋势。阿尔卑斯山脉雪深呈显著减小趋势(图6(h)、图7(h))。

总体来看,北半球的月平均雪深年际变化结果

存在差异。高纬度地区:北美阿拉斯加和加拿大地区在11月~3月雪深呈显著减小趋势,表明北美高纬度地区雪深在1988~2018年冬季积雪期显著下降,此趋势与Jeong等<sup>[15]</sup>对北半球2~3月雪水当量的年际变化研究结果相一致。欧亚大陆高纬度地区( $50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{ N}$ )的减小区域从10月到1月逐渐缩减,西西伯利亚平原东北部和中西伯利亚高原在1~5月的雪深减小区域逐渐扩大,尤其在4~5月份,雪深大规模地显著减小。这表明西西伯利亚平原和东欧平原雪深在融雪期显著下降,尤其在5月份。东西伯利亚山地(除堪察加半岛)的雪深在10~5月呈现增加趋势,特别是在12~4月,雪深大规模地显著增加。对于高山区:落基山脉北部雪深10~4月呈下降趋势,中部和南部雪深呈上升趋势。阿尔卑斯山脉雪深10~3月显著增加,4月零星区域显著减小,5月份整个区域显著减小。此结果中3~4月份的雪深年际变化与近几年学者研究的阿尔卑斯地区春季雪水当量下降的结果相悖,而5月份的结果与前人研究结果一致<sup>[17-20]</sup>。青藏高原地区在整个积雪季(10~5月),其北部边缘山脉雪深呈显著上升趋势,中部大多数地区呈下降趋势;喜马拉雅

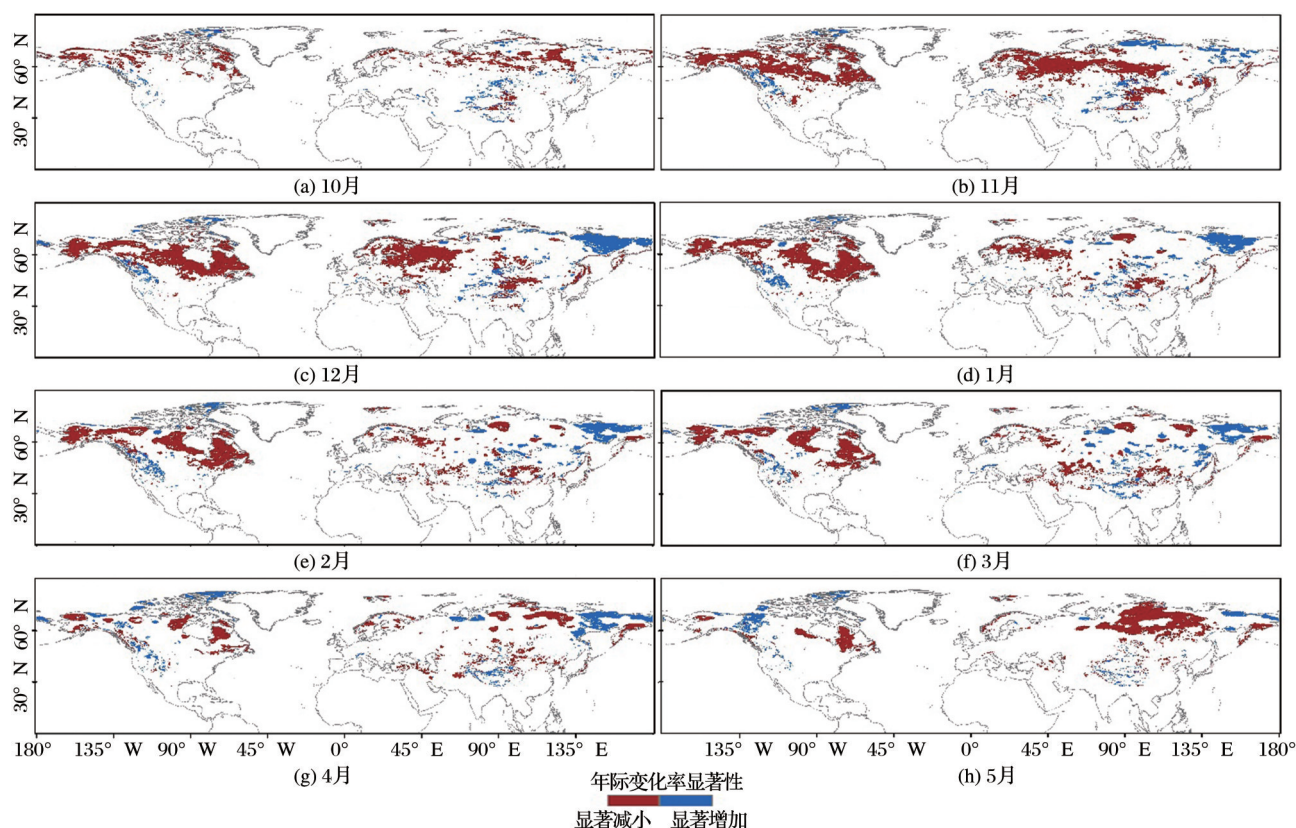


图7 北半球月平均雪深年际变化率显著性

审图号:GS(2016)1593号

Fig.7 Significant variation slope of monthly average snow depth over the Northern Hemisphere

山脉的北坡雪深增加,南坡雪深减小,但其变化率绝对值都不大,小于  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。12~1月,东南部雪深较大的念青唐古拉山呈明显的下降趋势。

## 4.2 典型区雪深变化对比分析

利用1988~2018年的GlobSnow V3.0及NHSD数据对北半球9个典型区的雪深年际变化进行定量分析,2001~2010年的GlobSnow V2.0和NHSD年平均值数据对9个典型区的雪深进行年内分析。

### 4.2.1 年际变化分析

典型区的年平均雪深变化对比分析显示,高山区中,阿尔卑斯山脉和落基山脉雪深呈增长趋势(图8(a)、8(b)),增长速率分别为  $0.13 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  和  $0.18 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,青藏高原雪深下降趋势微弱(图8(c)),下降速率为  $0.03 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,三者的雪深年际波动大。

高纬度地区中,阿拉斯加、东欧平原、加拿大北部地区、西西伯利亚平原和中西伯利亚高原5个地区的年平均雪深呈下降趋势。其中加拿大北部地区(图8(g))雪深的年际变化率为  $-3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,下降最为显著( $R^2=0.60, p<0.01$ )。其次是阿拉斯加地区和东欧平原(图8(d)、8(e)),年平均雪深下降速率分别为  $3.48 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  和  $2.3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,均通过了0.01的显著性水平检验。东西伯利亚山地

(图8(f))的平均雪深多年来呈缓慢增长趋势,增长速率为  $0.77 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

总的来说,北半球的高山区平均雪深的年际变化趋势不一,这与山区复杂的降雪过程和下垫面有关。本文得到的青藏高原雪深年际变化结果与车涛等<sup>[25]</sup>同时段得到的结果基本一致。高纬度地区,除东西伯利亚山地以外,其余5个地区的年平均雪深呈显著下降趋势( $p<0.01$ )。东西伯利亚山地的雪深呈缓慢上升趋势,并且2017和2018年的雪深较之前年份有所增加,此结果与Pulliainen等<sup>[12]</sup>对东西伯利亚山地最大雪水当量月份(3月份)的年际变化趋势研究结果相同。

### 4.2.2 年内变化分析

高山区的雪深峰值远低于高纬度地区雪深峰值(图9)。高纬度地区的西西伯利亚平原雪深在3月21日达58 cm,为9个典型区的最大雪深峰值。落基山脉雪深峰值是21.2 cm,为所选高山区里的最大峰值。对不同地区积雪消融过程的观察发现,除青藏高原外,其他8个地区都能发现明显的雪深最大值和积雪消融过程(图9)。青藏高原的雪深年内变化曲线显示结果可能与其存在大量的瞬时积雪(任何季节都有降雪和消融发生)有关。落基山脉和阿尔卑斯山脉的曲线到达峰值的时间要明显早

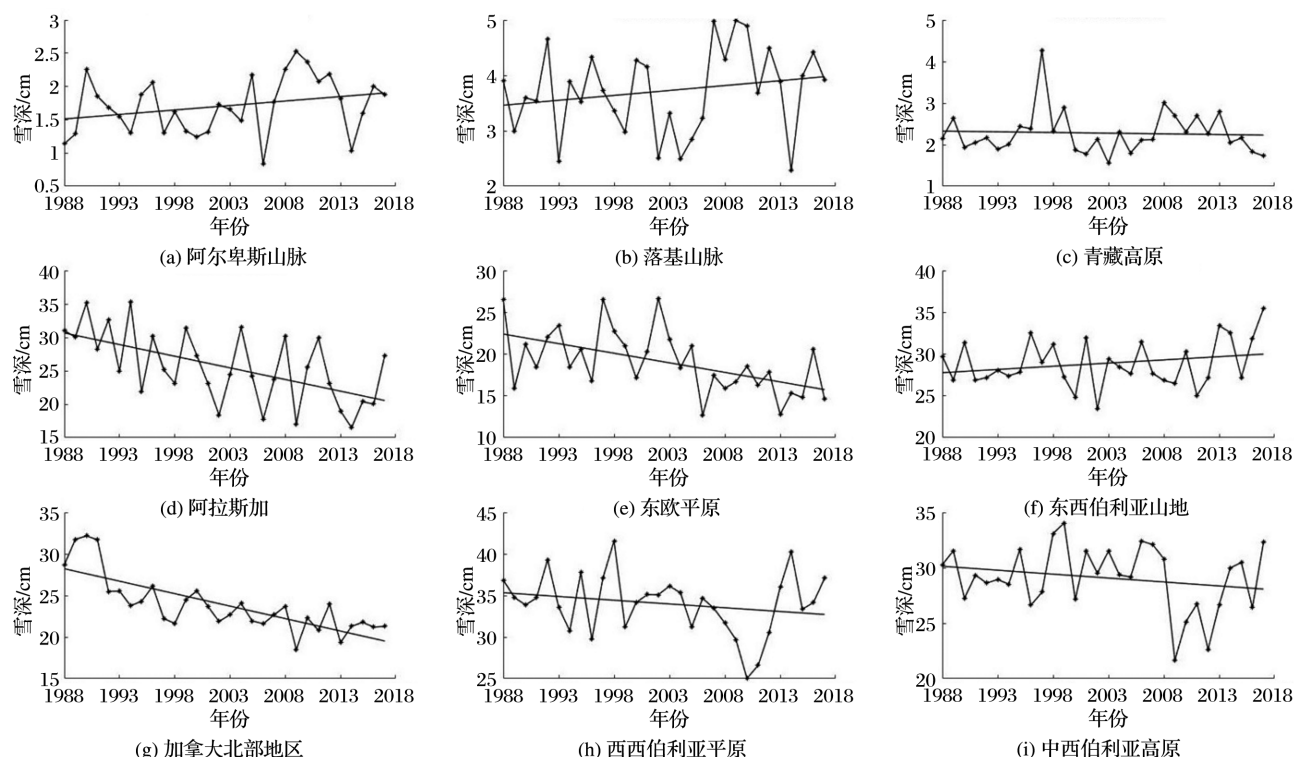


图8 典型区平均雪深年际变化

Fig.8 Interannual variation of average snow depth in typical areas

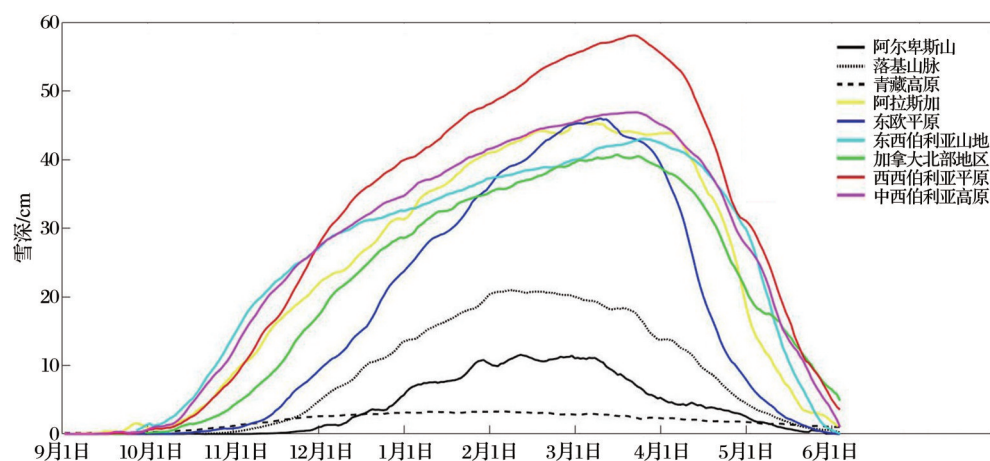


图9 典型区雪深的年内变化

Fig.9 Seasonal variation of snow depth in typical areas

于高纬度的6个地区,这说明落基山脉和阿尔卑斯山脉的积雪融化起始日期要明显早于高纬度地区。落基山脉和阿尔卑斯山脉的积雪在2月5日前后分别达到峰值并且开始融化。而高纬度的6个地区积雪在3月份依次开始融化,最早开始融化的地区是阿拉斯加,最晚开始融化的是东西伯利亚山地。造成高山区和高纬度地区积雪融化起始时间的差异可能与温度、辐射等因素的不同有关。

## 5 结 论

基于GlobSnow和NHSD两套数据集分析了北半球及典型区的1988~2018年雪深的年际变化趋势及显著性和2001~2010年雪深的年内变化情况,得到结果如下:

北半球年平均雪深总体呈现显著下降趋势( $p < 0.01$ ),其年际变化幅度为 $-0.55 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。高山区中,阿尔卑斯山脉和落基山脉雪深呈增长趋势,青藏高原雪深呈微弱下降趋势。高纬度地区中,阿拉斯加、东欧平原、加拿大北部地区、西西伯利亚平原和中西伯利亚高原年均雪深呈下降趋势,其中加拿大北部地区、阿拉斯加地区和东欧平原地区的平均雪深呈显著下降趋势( $p < 0.01$ ),其下降速率在 $-2.3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 以下。东西伯利亚山地的年平均雪深呈缓慢增长趋势,增长速率为 $0.77 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 。

月平均雪深年际变化存在差异。高纬度地区,北美阿拉斯加和加拿大地区冬季雪深显著减小。西西伯利亚平原和东欧平原春季雪深下降,5月份最为明显。东西伯利亚山地(除堪察加半岛)的冬季雪深大规模地显著增加。高山区,落基山脉北部

冬季雪深呈下降趋势,中部和南部冬季雪深呈上升趋势。阿尔卑斯山脉的雪深冬季显著增加,5月份显著减小。在整个积雪季(10~5月),青藏高原北部边缘山脉雪深呈显著上升趋势,中部大多数地区呈下降趋势;喜马拉雅山脉的北坡雪深增加,南坡雪深减小;东南部雪深较大的念青唐古拉山冬季雪深明显下降。

雪深的年内变化分布显示,高山区的积雪深度峰值普遍低于高纬度地区的积雪深度峰值。除青藏高原外,高纬度地区的积雪融化起始日期要晚于高山区的积雪融化日期。

## 参考文献 (References):

- [1] Brown R D, Goodison B E. Interannual Variability in Reconstructed Canadian Snow Cover, 1915 - 1992 [J]. Journal of Climate, 1996, 9(6): 1299-1318.
- [2] Barnett T P, Adam J C, Lettenmaier D P. Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-dominated Regions [J]. Nature, 2005, 438(7066): 303-309.
- [3] Armstrong R L, Brodzik M J. Recent Northern Hemisphere Snow Extent: A Comparison of Data Derived from Visible and Microwave Satellite Sensors [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(19): 3673-3676.
- [4] Zhang Ningli, Fan Xiangtao, Zhu Junjie. Analysis of Temporal and Spatial Distribution of Snow Cover in Northern Hemisphere based on MODIS Snow Products [J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(6): 28-34. [张宁丽, 范湘涛, 朱俊杰. 基于MODIS雪产品的北半球积雪时空分布变化特征分析 [J], 遥感信息, 2012, 27(6): 28-34.]
- [5] Li Z, Liu J, Tian B. Spatial and Temporal Series Analysis of Snow Cover Extent and Snow Water Equivalent for Satellite Passive Microwave Data in the Northern Hemisphere (1978-2010) [C] // Geoscience & Remote Sensing Symposium,



- IEEE, 2012. doi:10.1109/igarss.2012.6352521.
- [6] Xiao X, Zhang T, Zhong X, *et al.* Spatiotemporal Variation of Snow Depth in the Northern Hemisphere from 1992 to 2016 [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2728. doi: 10.3390/rs12172728.
- [7] Wang Y, Huang X, Liang H, *et al.* Tracking Snow Variations in the Northern Hemisphere Using Multi-source Remote Sensing Data (2000–2015) [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(30). doi:10.3390/rs10010136.
- [8] Bormann K J, Brown R D, Derksen C, *et al.* Estimating Snow-cover Trends from Space[J]. *Nature Climate Change*, 2018. doi:10.1038/s41558-018-0318-3.
- [9] Brown R D, Robinson D A. Northern Hemisphere Spring Snow Cover Variability and Change over 1922–2010 Including an Assessment of Uncertainty [J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(1): 219–229.
- [10] Derksen C, Brown R, Mudryk L, *et al.* Terrestrial Snow Cover[R]. In Arctic Report Card 2016. <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>.
- [11] Estilow T W, Young A H, Robinson D A. A Long-term Northern Hemisphere Snow Cover Extent Data Record for Climate Studies and Monitoring[J]. *Earth System Science Data*, 2015, 7:137–142.
- [12] Pulliainen J, Luojus K, Derksen C, *et al.* Patterns and Trends of Northern Hemisphere Snow Mass from 1980 to 2018[J]. *Nature*, 2020, 581(7808): 294–298. doi:10.1038/s41586-020-2258-0.
- [13] Xu B, Chen H, Gao C, *et al.* Regional Response of Winter Snow Cover over the Northern Eurasia to Late Autumn Arctic Sea Ice and Associated Mechanism[J]. *Atmospheric research*, 2019, 222 (JUL.): 100–113. doi: 10.1016/j.atmosres. 2019. 02.010.
- [14] Chen Yueliang, Huang Fei, Wang Hong, *et al.* Seasonal and Interannual Scales of Snow Water Equivalent in the Northern Hemisphere [J], *Periodical of Ocean University of China*, 2015, 45(7):11–17.[陈月亮, 黄菲, 王宏, 等. 北半球雪水当量季节和年际尺度时空主模态变化特征[J], *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2015, 45(7):11–17.]
- [15] Jeong D I, Sushama L, Naveed Khaliq M. Attribution of Spring Snow Water Equivalent (SWE) Changes over the Northern Hemisphere to Anthropogenic Effects [J]. *Climate Dynamics*, 2016, 48 (11–12): 3645–3658. doi: 10.1007/s00382-016-3291-4.
- [16] Notarnicola C. Hotspots of Snow Cover Changes in Global Mountain Regions over 2000–2018[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 243:111781.doi:10.1016/j.rse.2020.111781.
- [17] Bocchiola D, Diolaiuti G. Evidence of Climate Change Within the Adamello Glacier of Italy [J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2010, 100 (3–4): 351–369. doi: 10.1007/s00704-009-0186-x.
- [18] Marty C, Tilg A M, Jonas T. Recent Evidence of Large-Scale Receding Snow Water Equivalents in the European Alps [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2017, 18(4):1021–1031. doi:10.1175/jhm-d-16-0188.1.
- [19] Dyrddal A V, Saloranta T, Skaugen T, *et al.* Changes in Snow Depth in Norway during the Period 1961–2010[J]. *Hydrology Research*, 2013, 44 (1): 169–179. doi: 10.2166/nh.2012.064.
- [20] Beniston M, Farinotti D, Stoffel M, *et al.* The European Mountain Cryosphere: A Review of Its Current State, Trends, and Future Challenges [J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2):759–794. doi:10.5194/tc-12-759-2018.
- [21] Mote P W, Li S, Lettenmaier D P, *et al.* Dramatic Declines in Snowpack in the Western US [J]. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2018, 1(1).doi:10.1038/s41612-018-0012-1.
- [22] Seidel F C, Rittger K, Skiles S M, *et al.* Case Study of Spatial and Temporal Variability of Snow Cover, Grain size, Albedo and Radiative Forcing in the Sierra Nevada and Rocky Mountain Snowpack Derived from Imaging Spectroscopy [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(3): 1229–1244.
- [23] Shen Liucheng, Wu Tao, You Qinglong, *et al.* Spatial and Temporal Variation of Snow Cover Depth in the Middle and Eastern Part of the Qinghai-tibet Plateau and Its Genetic Analysis [J], *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1150–1161.[沈臻澄, 吴涛, 游庆龙, 等. 青藏高原中东部积雪深度时空变化特征及其成因分析[J], *冰川冻土*, 2019, 41(5):1150–1161.]
- [24] Che Tao, Hao Xiaohua, Dai Liyun, *et al.* The Change of Snow Cover in Qinghai-Tibet Plateau and Its Influence [J], *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11):1247–1253.[车涛, 郝晓华, 戴礼云, 等. 青藏高原积雪变化及其影响[J], *中国科学院院刊*, 2019, 34(11):1247–1253.]
- [25] Wang X X, Wu C Y, Wang H J, *et al.* No Evidence of Widespread Decline of Snow Cover on the Tibetan Plateau over 2000–2015 [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7 (1): 3065–3077. doi:10.1038/s41598-017-15208-9.
- [26] Takala M, Luojus K, Pulliainen J, *et al.* Estimating Northern Hemisphere Snow Water Equivalent for Climate Research Through Assimilation of Space-borne Radiometer Data and Ground-based Measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115 (12): 3517–3529. doi: 10.1016/j.rse. 2011.08.014.
- [27] Che Tao, Li Xin, Dai Liyun. Long-term Series of Daily Global Snow Depth (1979–2017) [DB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center, 2019.[车涛, 李新, 戴礼云. 全球长时间序列逐日雪深数据集(1979–2017) [DB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心, 2019.]
- [28] Lemke P, Ren J. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground [C]// *Fourth Assessment Report the Intergovernmental Panel on Climate Change (Chapter 4)*. Paris: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: 48.
- [29] Pulliainen J. Mapping of Snow Water Equivalent and Snow Depth in Boreal and Sub-arctic Zones by Assimilating Space-borne Microwave Radiometer Data and Ground-based Obser-

- vations[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 101(2): 257-269.
- [30] Dai L Y Che T, Ding Y J. Inter-Calibrating SMMR, SSM/I and SSMI/S Data to Improve the Consistency of Snow-Depth Products in China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(6): 7212-7230.
- [31] Chang A T C, Foster J L, Hall D K. Nimbus-7 SMMR Derived GlobSnow Snow Cover Parameters[J]. Annals of Glaciology, 1987, 9(1): 39-44.
- [32] Wei F Y. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.]

## Temporal and Spatial Distribution and Variation Characteristics of Snow Depth in the Northern Hemisphere and Typical Areas

Yue Shanna<sup>1,2</sup>, Che Tao<sup>1</sup>, Dai Liyun<sup>1</sup>, Xiao Lin<sup>3</sup>, Deng Jie<sup>1,2</sup>

(1. Northwest Institute of Eco-environment and Resources, Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Heihe Remote Sensing Experimental Research Station, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River, Sichuan Province Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering on the Upper Reaches of the Yangtze River, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** The temporal and spatial variation characteristics of snow depth over the Northern Hemisphere and nine typical areas were analyzed based on the GlobSnow snow water equivalent datasets of European Space Agency and the NHSD snow depth datasets of the National Qinghai-Tibet Plateau Scientific Data Center. The results showed that: the Average Annual Snow Depth (AASD) over the Northern Hemisphere generally decreased significantly ( $p < 0.01$ ) during 1988 to 2018, with a change slope of  $-0.55 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ . For high latitudes, the AASD in the northern Canada and Alaska decreased significantly ( $p < 0.01$ ), with a rate of  $3.48 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  and  $3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ , respectively; and the Average Monthly Snow Depth (AMSD) decreased significantly in winter. The AASD decreased in the West Siberian Plain and Eastern European Plain with a significant change rate of  $-2.3 \text{ cm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$  in the latter ( $p < 0.01$ ), and the AMSD decreased significantly in spring, especially in May. The AASD in the Eastern Siberia showed an increased trend, except in Kamchatka Peninsula, and the AMSD increased significantly in winter. For high mountainous areas, the AASD showed a slow increase rate in the Alps and Rockies, and slight decrease change in the Qinghai-Tibet Plateau (QTP). The AMSD in Alps increased significantly in winter and decreased significantly in May. The variation of snow depth in the Rockies and the QTP presented spatial heterogeneity. During the whole study period, the AMSD decreased in the north of the Rockies and most areas of central region of QTP, while increased in the central and south of Rockies and the mountains on the northern edge of the QTP. The snow depth increased on the north slope of The Himalayas, while decreased on the south slope, with the absolute change rates of less than  $0.5 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ . The AMSD of Nianqing Dangla Mountains which has deep snow showed a significant downward trend in winter. The seasonal variation analysis of snow depth (average snow depth from 2001 to 2010) in 9 typical areas showed that the peak values of snow depth in high mountainous areas are much smaller than those in high latitudes. The snow melting dates in high mountainous areas are obviously earlier than those in high latitudes except for the QTP.

**Key words:** Snow depth; Northern Hemisphere; High mountainous area; High latitude; Remote sensing