

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0050

LI Xiaofeng, LIANG Shuang, ZHAO Kai, et al. Snow cover classification based on climate variables and its distribution characteristics in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1):62–71. [李晓峰, 梁爽, 赵凯, 等. 基于气象要素的中国积雪类型划分及积雪特征分布[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1):62–71.]

基于气象要素的中国积雪类型划分及积雪特征分布

李晓峰^{1,2}, 梁爽¹, 赵凯^{1,2}, 王建³, 车涛³, 李震⁴

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 中国科学院 长春净月潭遥感实验站, 吉林 长春 130102;
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730003; 4. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100049)

摘要: 积雪分类对于深刻认识积雪性质及其时空分布具有重要意义。积雪是气候的产物, 气象参数是导致积雪性质差异的主要因素, 利用实测的气象参数能够对积雪性质进行大范围的有效分类。应用长时间序列高时空分辨率全国地面气象驱动格网数据集, 提取中国区域冬季大气温度、降水量和近地表风速信息, 基于冬季气象要素的二叉树积雪类型划分方法, 采用 Sturm 等提出的季节性积雪类型划分体系, 对中国区域的积雪类型进行了划分, 相比 Sturm 等的积雪分类结果空间分辨率显著提高, 利用“中国积雪特性及分布调查”项目 2017—2018 年全国实测雪坑数据, 描述了积雪类型对应的空间统计分布特征, 为制定符合中国区域特色的积雪类型分类系统奠定了基础。积雪分类结果表明: 中国区域的积雪类型划分为 5 种, 分别是大草原型、泰加林型、苔原型、高山型及瞬时型, 不同的中国积雪类型表现出与 Sturm 等的分类描述有所不同的积雪特性。

关键词: 积雪分类; Sturm-Holmgren-Liston(SHL)分类; 积雪特性; 中国

中图分类号: P468.0*25 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)01-0062-10

0 引言

积雪是冰冻圈的重要组成部分之一, 作为气候变化的指示器, 能够直接反映气候变化的影响^[1]。积雪的独特性质, 如高反照率、低热传导率以及高融解热等, 极大地影响着积雪与土壤、大气之间的质量和能量交换^[2]。积雪性质与积雪的状态以及积雪内部微结构有着密切关系, 积雪属性的时空演化与气候变化息息相关, 因此, 依据积雪的性质和特点, 将积雪进行有规律的区域划分和归类, 有助于深刻认识积雪的时空分布特征, 以及积雪对于气候变化的响应和反馈。

积雪是气候的产物, 其性质受当地长期气象要素的影响^[3]。通过易于观测的气象要素(如温度、降水量和风速等)进行积雪分类, 进而获得复杂的积雪性质, 得到区域积雪参数特性, 可为辐射传输

模型、水文模型等提供必要的输入参数, 对于改进和发展模型具有重要意义。

我国积雪分布十分广泛, 多年平均积雪范围达到 900 余万平方公里, 稳定积雪区面积达到 420 万平方公里, 主要包括三大积雪稳定区: 青藏高原地区、东北和内蒙古地区、北疆和天山地区^[4]。由于我国特殊的地理条件和气候环境, 积雪的时空分布情况比较复杂, 我国不稳定的积雪占据面积大, 并且不同区域的积雪表现出不同的区域特性。积雪分类能够对积雪空间分布特性进行类比描述, 是认识积雪特性和分布规律的有效途径。近些年, 国内已开展了积雪分类的研究, 张廷军等^[5]对欧亚大陆季节性积雪类型进行了划分, 将我国季节性积雪划分为稳定积雪区和非稳定积雪区。何丽焯等^[6]划分了中国西部积雪类型并分析了年际变化。目前我

收稿日期: 2018-10-27; 修订日期: 2019-05-23

基金项目: 科技部国家基础资源调查专项“中国积雪特性及分布调查”(2017FY100500); 国家自然科学基金“东北农田区积雪演化过程及其微波辐射特性研究”(41871248); 中科院 STS 计划项目(KFJ-STZ-ZDTP-048-04-03)资助

作者简介: 李晓峰(1978—), 男, 黑龙江讷河人, 研究员, 2008 年在中国科学院东北地理与农业生态研究所获博士学位, 从事积雪遥感定量研究. E-mail:lixiaofeng@neigae.ac.cn

通信作者: 梁爽, 硕士研究生, 从事积雪遥感研究. E-mail:liangshuang15@mails.jlu.edu.cn.

国积雪分类主要是根据积雪日数和积雪厚度对积雪类型进行划分, 缺少积雪特性的引入, 使其难以应用于积雪物理特性的类比和积雪分布特征统计规律研究。

国外的积雪分类研究中, Magono 等^[7]基于 Nakaya 等^[8]的工作对降落雪花进行了分类。陆地积雪可以使用 Sommerfeld 等^[9]提出的分类系统、UNESCO (1970) 或者国际陆地雪分类系统以及 ICSI (1954) 进行分类。这些分类系统有利于描述积雪从毫米到厘米级别的性质, 但对积雪密度、雪深、雪层数及雪层温度没有全面的概述。Mckay 等^[10]假设自然植被和区域气候之间有密切关系, 通过植被对积雪进行了分类, 分类方案虽然符合大的生态组合带, 但这些分类对土地利用和气候变化并不敏感, 对积雪的物理特性描述不完整。Sturm 等^[11]在对以往研究分析基础之上, 将积雪最为显著且便于观测和获取的基本属性作为重要参数, 重点考虑对积雪分布作用最为显著的气温、降水和风速的影响, 利用二叉树分类法考虑气温、降水和风速在高、低两种情形下积雪属性的差异, 最终得到 7 种有效的积雪类型, 建立了 Sturm-Holmgren-Liston (SHL) 积雪分类体系。该方法是目前被普遍认可和接受的分类方法, 在北美和前苏联, 根据实测数据进行了验证, 吻合度达到 90% 和 62%。目前, 关于 SHL 积雪分类方法在中国区域应用的相关研究很少, 只有区域尺度上的研究。例如, 杜一男等^[12]应用 SHL 的分类方法划分了黑龙江省的积雪类型, 并将其分类结果应用于 Foster 雪深反演算法中, 对积雪反演精度进行了评价。

早期由于缺乏足够的观测数据和气象因子信息, SHL 积雪分类方法在中国区域的合理性并未得到验证。此外, 由于受研究条件约束, 可用的风速数据分辨率很低, 无法得到准确的风速值。考虑到高、密植被 (如森林), 具有很大的粗糙度, 对地表风速影响很大, 所以 SHL 积雪分类方法选择利用植被的分类代表风速的高值或者低值, 由此可能产生一定的分类误差。本文通过气象参数再分析资料获取的分辨率相对较高的地表气象参数和风速值, 根据各地域的差异进行本地化参数选取, 进而获得更适合中国区域的积雪分类结果, 并通过全国积雪调查数据对分类结果进行了验证和统计分析。

本文采用 SHL 积雪分类方法, 基于 1979—2014 年的地面气象驱动数据, 对中国区域的积雪类

型进行了划分, 并结合 2017—2018 年中国积雪地面特性调查数据, 对该方法划分的积雪类型对应的积雪特性分布进行了统计分析, 对于深入认识中国的积雪特性及分布具有重要意义。

1 数据介绍

1.1 气象数据

本文采用的 1979—2014 年中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集^[13]是由中国科学院青藏高原研究所提供的多源数据融合格网数据集, 该数据集以国际上现有的 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料, 以及 TRMM 降水资料为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。可在国家地球系统科学数据共享平台上获取 (<http://westdc.westgis.ac.cn/data/>)。地理坐标是 WGS84, 空间分辨率是 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$, 时间分辨率是 3 小时。数据集中提供了地面高度 2 m 处的大气温度、降水量及近地面 10 m 风速。该数据集已在国内被多次使用进行气候和地理方面相关研究, 都得到很好的研究结果^[14-15]。

1.2 地面数据

在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”项目支持下, 2017—2018 年多家科研机构联合在东北地区、新疆地区和青藏高原地区开展了我国第一次全国性、大规模的积雪特性调查^[16], 历时近 5 个月, 获取了积雪多特征参数 (雪深、雪密度、雪水当量、积雪形态、表层硬度、液态水含量、雪粒径、雪层温度、雪/土界面温度、介电常数)。在整个冬季积雪期内, 积雪调查分三次, 分别在三个时期进行, 即积累期、稳定期和消融期, 三个时期的划分是参考稳定积雪划分标准^[4-6], 并根据各区域内多年的积雪开始日期, 结束日期以及持续时间和积雪厚度等确定的。

图 1 给出了在中国气候带分区图上的积雪调查路线图。积雪观测路线涵盖了不同的气候区, 包括中温带、寒温带、高原亚温带、高原亚寒带和高原温带。以积雪观测线路为主线, 点测量雪坑空间分布在线路附近, 不同时期的雪坑测量点是根据实际情况进行选择, 因此在空间位置上不完全一致, 但相差不大。试验开展前, 项目组建立了统一、规范的积雪参数测量规范, 统一了测量使用仪器, 以保证各线路测量参数系统误差在允许和一致范围内, 为后期数据应用确保数据质量。根据我国积雪情

况，将积雪状态分为三个阶段，考虑到积雪具有时空变化特性，各调查线路在相近时间同时开展试验，最终获取了三个时期(积累期、稳定期和消融期)的积雪测量特征参数数据。

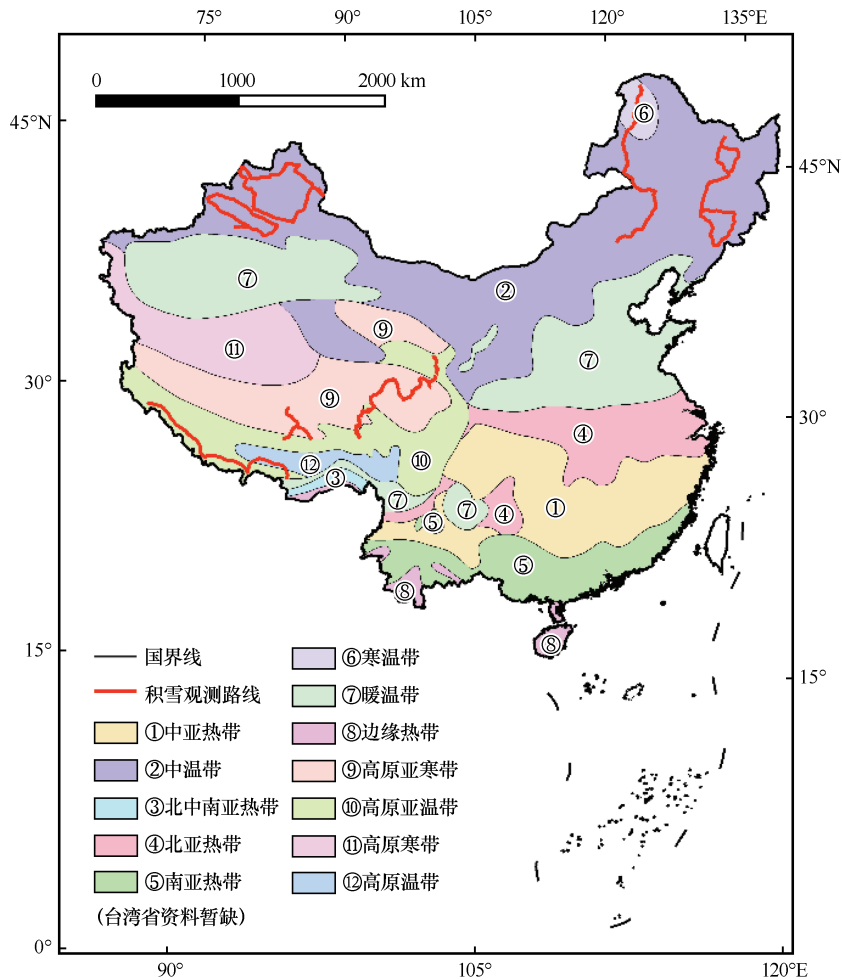


图1 积雪地面调查路线图

Fig. 1 China climatic zoning map, together with the snow cover ground investigation routes

2 研究方法

2.1 Sturm-Holmgren-Liston(SHL)分类方法

Sturm, Holmgren 以及 Liston^[11]在 1995 年发展了全球季节性积雪分类系统，该分类系统基于对积雪具有重要影响的三个气象要素，分别为：大气温度、冬季日降水量、冬季近地表风速。该分类系统沿用了 Sturm 等原有的积雪分类标准，使用冬季的气象要素代替积雪物理属性作为分类的指标，应用简单的二叉树系统描述积雪类型和重要的气象参数之间的关系(图2)。

在二叉树系统中，为了确定分类使用的气象参数中的冬季大气温度、降水量、风速的临界值，以及表示冬季温度和持续时间的作用，定义了冬季温度和持续时间的指数——月冷度，作为温度划

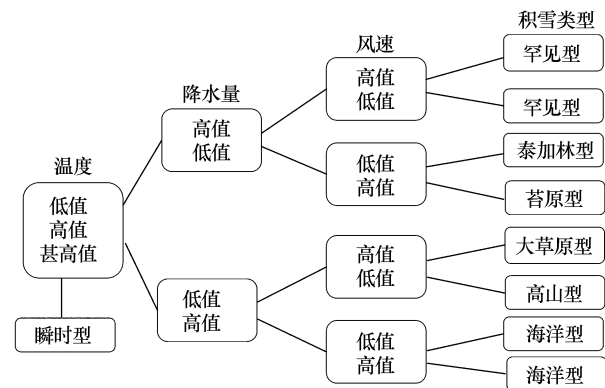


图2 积雪分类二叉树

Fig. 2 A dichotomous key for snow class identification

分的指标。计算公式如下：

$$CDM = \begin{cases} \sum_{i=1}^m (T_c - T_a), & T_a < T_c \\ 0, & T_a \geq T_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为一年中的月份(1~12); T_a 为月平均大气温度; T_c 为临界温度, 当月平均温度大于或等于临界温度的时候, 月冷度为 0; 当月平均温度小于临界温度的时候, 月冷度为累积的两者差值的累积值。月冷度数值越大, 表明冬季大气温度越低。认定临界值为本地积雪能够存在的温度, 并用临界值定义冬季月份。

根据图 2 所示的二叉树方法, SHL 分类方法将积雪分为 7 个类别(泰加林型、苔原型、大草原型、高山型、海洋型、瞬时型和罕见类型), 每个类别具有不同的雪层物理特性(雪密度、雪厚度、粒径大小、分层数)。尽管类型的命名采用了生物群落和生态区, 但分类应用的为气候指标, 并不是土地覆盖类型指标, 其分类方案对不同气候条件下的积雪特性做了详细描述(表 1)^[11,17]。

2.2 气象阈值选择

本文采用 36 年 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 格网的 3 小时地面气象要素驱动数据集计算月平均温度。根据月平均温度定义每个格网的冬季时间, 即月平均温度小于临界温度的月份, 由此计算各格网的冬季日平均降

表 1 积雪类型雪特性描述统计

Table 1 Description of snow cover characteristics in different snow class

积雪类型	积雪厚度范围/cm	雪密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	分层数
泰加林型	30 ~ 120	0.26	> 15
苔原型	10 ~ 70	0.38	0 ~ 6
大草原型	0 ~ 50	无数据	< 5
高山型	75 ~ 250	无数据	> 15
海洋型	75 ~ 500	0.35	> 15
瞬时型	0 ~ 50	无数据	0 ~ 3
罕见类型		无数据	可变的

水量和日平均风速。

首先按照文献[10]中的标准, 选定 10°C 作为计算月冷度的积雪可存在时的月平均大气温度临界值 T_c , 根据月冷度计算公式(1), 通过 1979—2014 年逐月大气温度生成出中国区域月冷度、冬季风速和冬季日平均降水量空间分布(图 3)。从图 3(a)中发现青藏高原地区和大兴安岭地区的月冷度很高, 主要原因是大兴安岭地区纬度较高, 青藏高原地区海拔较高, 这两个区域一年中月均温度低于 10°C 的月份较多, 故月冷度值高于其他地区。

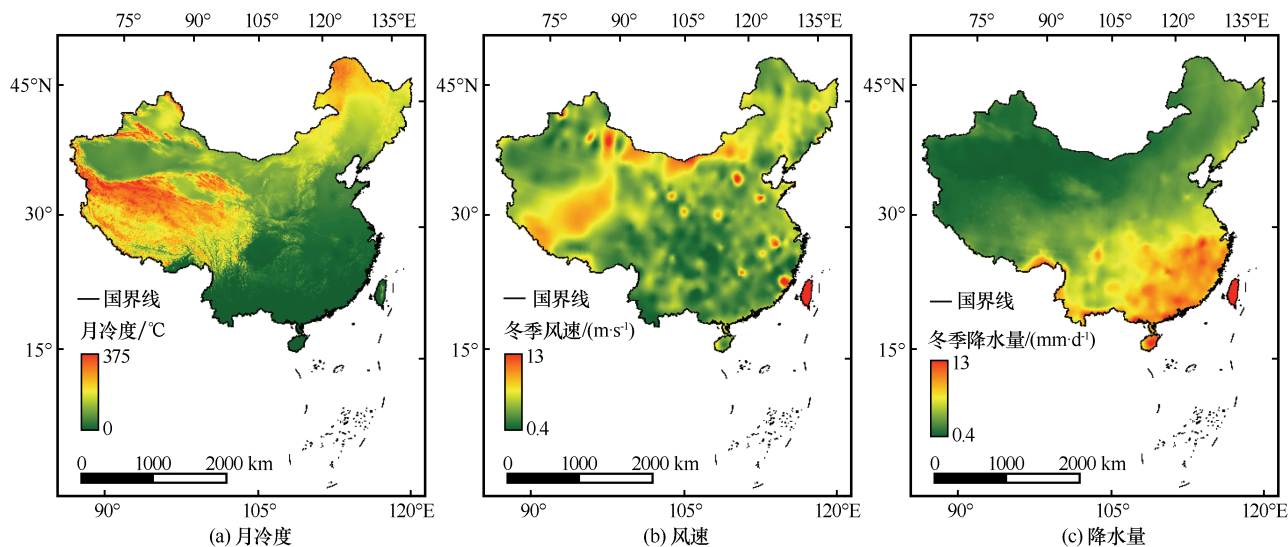


图 3 气象参数的空间分布

Fig. 3 Maps showing spatial distribution of cold degree of month (CDM) (a), wind speed (b) and precipitation (c)

冬季风速定义为月平均温度小于 T_c 时的月份日平均风速, 根据覆盖全国的 1979—2014 年的日平均风速计算出冬季风速, 由图 3(b)可看出, 我国冬季风速的空间分布不均匀, 在内蒙古、青藏高原、沿海一带的冬季风速较高。

冬季降水量定义为月平均温度小于 T_c 时的月份日平均降水量, 根据月平均温度计算出逐网格的

冬季降水量(图 3c)。较高冬季日平均降水量主要分布在南方低纬度地区, 主要因为该地区冬季大气温度较高, 冬季易发生降水事件。

Sturm 等依据积雪的判别分析和阿拉斯加的气象观测资料, 确定了每种积雪类型关系最密切的气象条件, 月冷度的临界值为 125°C , 甚高值在 $100 \sim 150^\circ\text{C}$ 以下, 冬季降水量阈值设定为 $1 \sim 3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,

风速阈值设定为 $0.5 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本文通过尝试不同的气象阈值,对多次实验结果的比较分析表明,SHL 分类选定的气象阈值同样适用于我国地区,参考杜一男等^[12]的阈值选择,本文月冷度阈值设置为 125°C ,通过经验判断瞬时型积雪大部分出现在我国不稳定积雪区和瞬时积雪区,调节甚高值,比较分类结果变化情况,最终将其设定为 80°C ,降水量阈值设置为 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$,风速阈值设置为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3 结果与分析

3.1 积雪分类结果

基于选定的气象阈值,利用SHL积雪分类方法得到中国区域积雪类型分类图,进一步对分类后结果进行过滤、平滑和移除小孤立区处理(图4)。相比于Sturm等应用60年月平均全球气象资料绘制的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 北半球积雪类型分类图,本文的结果在空间分辨率上得到了显著提高,在空间上对积雪类型有了更细致的划分。由图4可见,中国区域积雪类型主要分为5种,分别是大草原型、苔原型、泰加林型、高山型和瞬时型,不存在海洋型和罕见类型积雪。在Sturm分类系统的描述中,罕见类型积雪是变化迅速的积雪,在气温较低(冬季月冷度大于 125°C)和降水量较高(冬季日平均降水量大于 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$)的条件下形成的。从气象资料统计(图3a、3c)结果显示,冬季气温较低,降水量较高的现象在我国冬季并不常见,因此没有在这种气象条件下发育的罕见类型积雪。海洋型积雪发育于冬季温度较高、降水量较多的气象条件下,较多的降水量会产生厚雪层,因此积雪厚度范围相对于其它类型的积雪最大,较高的大气温度使积雪更暖,融雪特征非常普遍,积雪呈现出潮湿状态,从而导致该类型积雪具有较高的雪密度和较多的分层数。1978—2014年气象数据资料显示(图3a、3c),在我国没有同时满足月冷度低于 125°C ,并且冬季降水量高于 $2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 的地区,因此也不存在海洋型积雪。

瞬时型、苔原型、大草原型、高山型、泰加林型积雪占我国总面积的47.7%、22.7%、17.1%、6.5%、6%。瞬时型主要分布在我国秦岭—淮河一线以南,占我国大面积区域,该类型积雪只与冬季气温相关,当冬季月冷度小于 80°C 时,产生瞬时型积雪。部分分布在新疆塔里木盆地、黄土高原,该地区降水稀少、蒸发强烈、日照时间长,太阳辐射

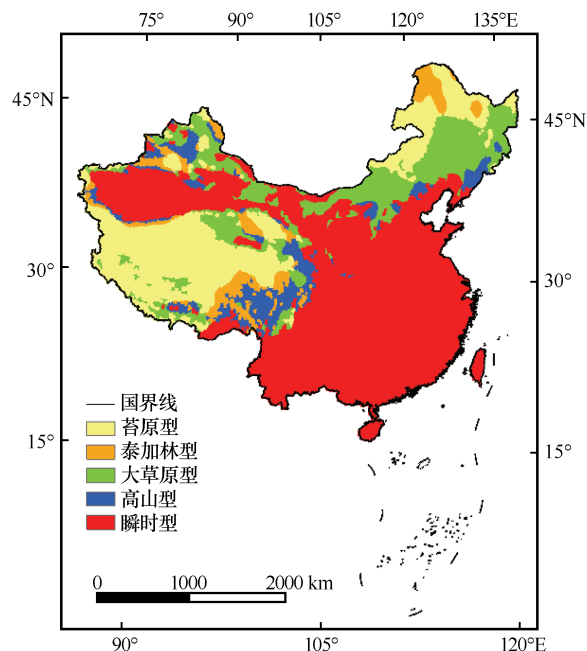


图4 中国区域积雪分类图

Fig. 4 Map showing various snow cover types in China

较强,导致冬季气温高,积雪表现出瞬时型积雪特性。苔原型积雪主要分布在我国青藏高原地区和东北地区,这些地区冬季气温较低,降水较少,风速较大。大草原型和高山型积雪均是在冬季气温较高,降水量较少气象条件下形成的,两种类型的区别在于近地表风速的大小。大草原型主要分布在我国北部地区冬季风速较大地区。高山型积雪分布在大草原型附近,主要分布在我国东北长白山区,青藏高原东南部,部分在新疆地区,受较强太阳辐射影响,该区域冬季气温较高,降水较少,风速较低。泰加林型积雪主要分布在我国最北部漠河一带,以及青藏高原南部、新疆北部部分地区,这些地区的冬季气温较低,降水较少,风速较低。

在我国三大稳定积雪区中,新疆地区积雪类型较多,涵盖了泰加林型、高山型、苔原型、大草原型和瞬时型的积雪,说明新疆地区气候条件较复杂^[18],导致形成多样的积雪类型。在青藏高原南部,交错分布着高山型和泰加林型积雪,它们之间的主要区别是冬季大气温度,泰加林积雪形成于更冷的大气条件下。相比新疆地区和青藏高原地区,我国东北地区同样涵盖了5种积雪类型,但积雪类型有明显的分界,层次分明,由南到北,依次为瞬时型、高山型、大草原型、苔原型和泰加林型。

我国积雪类型与我国气候带(图1)在空间分布上表现出较好的一致性。寒温带分布泰加林型积

雪, 暖温带和亚热带主要分布瞬时型积雪, 高原寒带和高原亚寒带主要分布苔原型积雪, 高原温带和高原亚温带分布高山型和泰加林型积雪。中温带分布积雪类型较多, 大草原型积雪占主要部分, 并有部分苔原型、高山型、瞬时型和泰加林型积雪。

3.2 积雪特征与分布

2017—2018 年全国积雪调查分 3 个时期进行了

积雪特性参数的实地测量, 分别为积雪的积累期(2017 年 11 月 25 日—12 月 25 日)、稳定期(2017 年 12 月 25 日—2018 年 1 月 30 日)和消融期(2018 年 2 月 1 日—3 月 30 日)。按照前期设计的积雪路线沿线测量, 积累期、稳定期和消融期测量样点分别为 118 个、152 个、148 个, 各时期实测雪坑空间分布如图 5 所示。

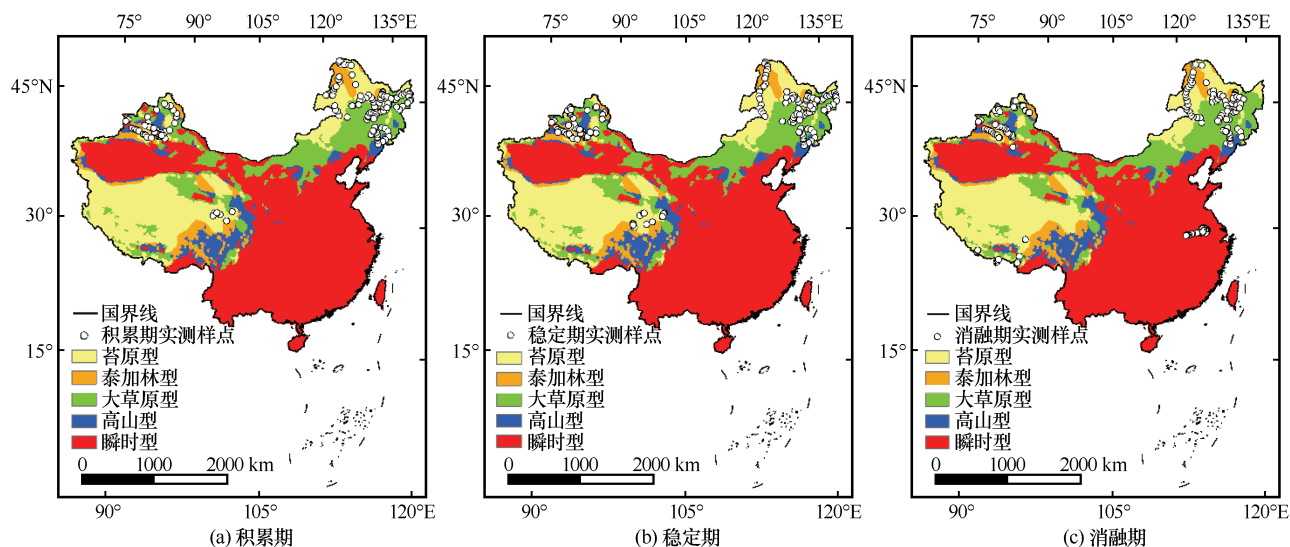


图 5 实测雪坑的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution maps of snow pits in accumulating period (a), stable period (b) and melting period (c)

实测雪坑样点主要分布在新疆地区和东北地区, 在青藏高原地区有少量实测点, 从图 5 中可以看出, “中国积雪特性及分布调查”所设计的积雪调查路线三个时期的实测点基本涵盖了 4 种积雪类型, 为大草原型、泰加林型、苔原型和高山型。值得一提的是, 2018 年 1 月 5 日—1 月 6 日, 1 月 29 日

—1 月 30 日在南京增加了瞬时型积雪特性的量测(图 5c)。按照三个不同时期和冬季期(积累期、稳定期和消融期), 对各类型的实测积雪特性(雪深、雪密度)进行统计分析(表 2、表 3), 统计参量分别为实测数据平均值(mean)、最大值(max)和最小值(min)。

表 2 各时期各类型积雪厚度特性统计

Table 2 Statistics of snow depth in different snow class

积雪类型	积累期/cm			稳定期/cm			消融期/cm			冬季期/cm		
	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min
大草原型	9.5	24.0	1.0	13.0	28.7	2.0	15.7	45.5	3.7	12.6	45.5	1.0
高山型	14.8	34.3	3.7	19.0	63	4.5	13.0	24.0	0.5	15.9	63	0.5
苔原型	16.5	45.3	5.5	18.9	63	5.2	19.7	56.3	3	18.9	63	3.0
泰加林型	13.6	18.7	4.7	16.2	29.7	6.8	22.1	35.0	7.8	17.7	35	4.5
瞬时型	—	—	—	—	—	—	—	—	—	14.2	24.0	6.7

以南京线路雪坑测量点数据作为表 2 中瞬时型积雪参数, 由于瞬时型积雪存留时间短, 不具有明显的时间演化特征, 因此未将南京线路的测量值按照三个时间分别统计。结果表明瞬时型积雪的雪厚在 6.7 ~ 24 cm 范围内, 雪层数、雪厚与 Sturm 等

描述的相一致, SHL 雪分类中对瞬时型积雪的雪密度缺少统计, 我们对其进行了补充, 瞬时型积雪密度比其它类型积雪密度大, 主要是因为较高的大气温度, 使积雪沉降后很短时间就开始融化, 积雪较湿, 雪密度较大。大草原型和苔原型积雪三个时期

表3 各时期各类型雪密度特性统计
Table 3 Statistics of snow density in different snow class

积雪类型	积累期/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			稳定期/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			消融期/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$			冬季期/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$		
	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max	min
大草原型	0.142	0.311	0.008	0.176	0.476	0.074	0.210	0.313	0.080	0.171	0.476	0.008
高山型	0.153	0.189	0.105	0.175	0.229	0.118	0.243	0.33	0.181	0.18	0.33	0.105
苔原型	0.184	0.41	0.073	0.189	0.287	0.122	0.206	0.297	0.141	0.193	0.41	0.728
泰加林型	0.148	0.2	0.064	0.156	0.237	0.01	0.181	0.284	0.147	0.161	0.284	0.064
瞬时型	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.126	0.305	0.149

的雪深均与表1描述一致，苔原型积雪三个时期的雪密度相比 Sturm 等描述的较低，Sturm 等对大草原型积雪密度缺少描述。高山型和泰加林型的雪深和雪密度均与表1描述不符。SHL 分类结果描述中高山型和泰加林型积雪厚度较大，这两种类型积雪具有较为相似的积雪特征，比如积雪厚度较大，雪层数较多，瞬时型、大草原型和苔原型积雪厚度较小。但苔原型积雪具有较高的雪密度，实际测量分层数在描述的范围。由此说明不同气候下发育的积雪虽然具有相同的定性描述，但积雪特征具有不同的表现，可能原因是积雪不仅仅受气候作用的影响。Sturm 等对积雪特性的描述

是基于当地的气候条件，个别雪类型的特征参数描述不全，需要我们针对中国区域的实际积雪情况，进行参数补充和修正描述。

图6给出了积累期、稳定期、消融期和冬季期，各类型积雪的雪深分布，由图6可以看出，苔原型积雪在各个时期的雪深最大，最大值为63 cm，与 Sturm 等对积雪类型的描述相符(最大值小于75 cm)。泰加林型积雪雪深分布较集中，最大值为35 cm，高山型雪深与泰加林型雪深在积累期和稳定期相近。大草原型积雪雪深平均值在三个期间最小，最大值在消融期为45.5 cm。同种积雪类型在不同时期的雪深变化较小。

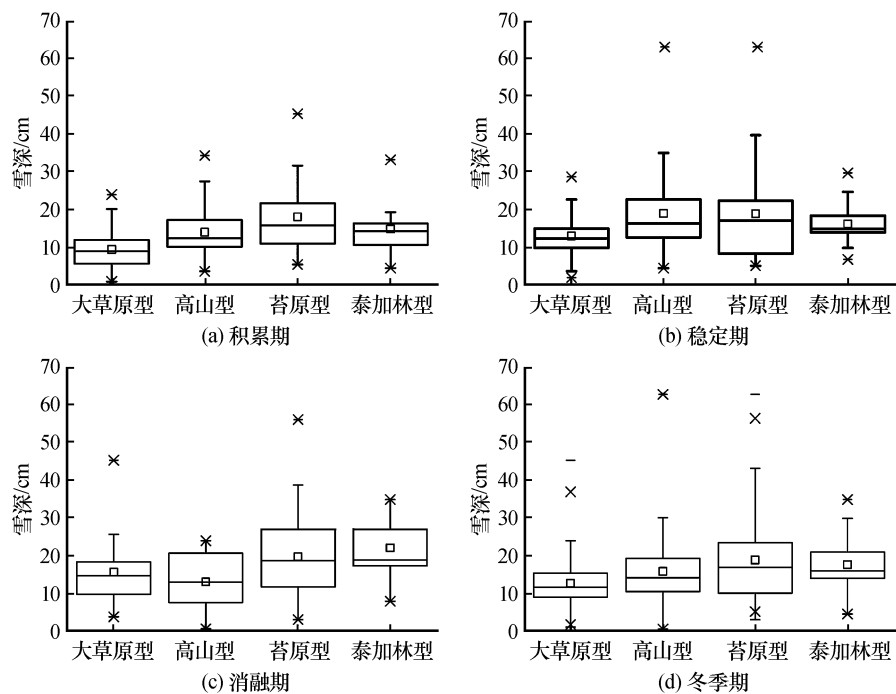


图6 各类型积雪的雪深分布
Fig. 6 The snow cover depths of the four snow cover types in accumulating period (a), stable period (b), melting period (c) and winter (d)

图7给出了各个时期各积雪类型的雪密度分布。大草原型、高山型、苔原型和泰加林型雪密度均值分布在0.142~0.261 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。积累期大草原

型、高山型、苔原型、泰加林型雪密度分别为0.141 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、0.152 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、0.183 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、0.148 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。高山型在积累期和稳定期雪密度分布较集

中。各类型积雪的雪密度在积累期雪密度最小，主要是因为积累期新雪较多，雪密度偏小。由于积雪在融化期内部液态水含量增大，导致此时的

雪密度增加，因此各类型积雪在融化期具有最大雪密度。同种积雪类型在不同时期的雪密度变化较小。

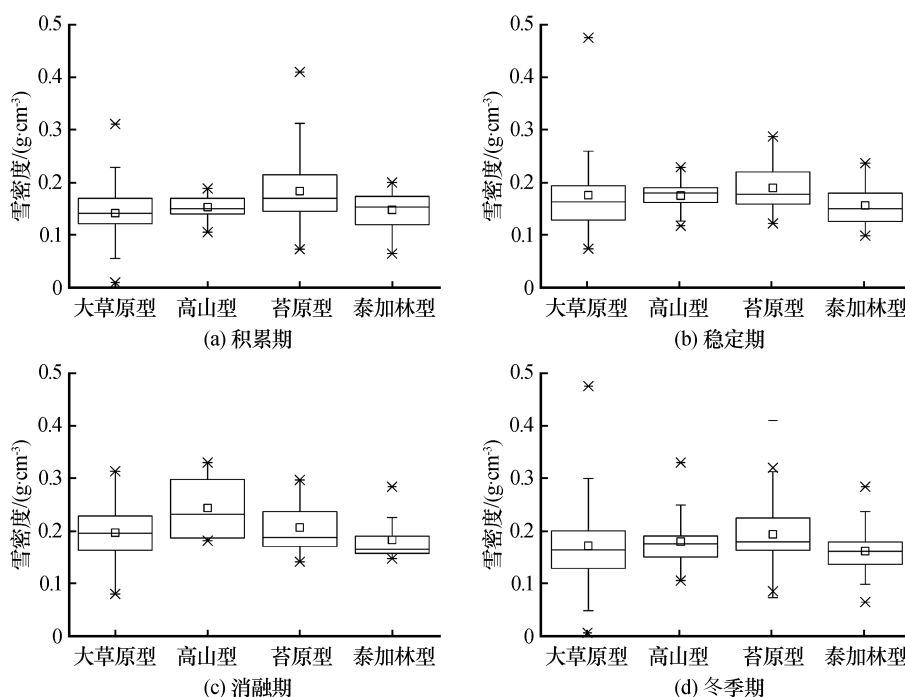


图7 各类型积雪的雪密度分布

Fig. 7 The snow cover densities of the four snow cover types in accumulating period (a), stable period (b), melting period (c) and winter (d)

积雪特征参数统计分析结果表明测量时间段内，我国各类型积雪的雪深差异并不明显，只有苔原型、大草原型雪深与 Sturm 等描述的雪深相符，由此说明，虽然基于气象要素的分类方法可用于中国区域的积雪类型划分，但各类型的积雪属性的定量描述并不符合我国积雪性质，需要进一步统计分析和制定适合我国积雪特性的描述。另外，各线路测量的雪深本身存在系统误差和精度问题，也会影响统计分析结果，单纯的一年实测数据代表性不强，后期将会增加更多试验数据，进行大量的统计分析，并且增加积雪其它特征参数的比较，寻找积雪类型可分度变量，使中国积雪类型划分体系具有更加完善的描述。

4 结论

积雪分类对深刻认识积雪特性、积雪时空分布特征以及积雪遥感反演均具有重要意义。本文基于冬季气象要素的二叉树积雪类型划分方法，采用 SHL 积雪分类方法提出的季节性积雪类型划分体系，应用 1978—2014 年的气象驱动数据集，

对中国区域的积雪类型进行了划分，主要结论如下：

(1) 我国积雪类型主要分为 5 种，分别是大草原型、泰加林型、苔原型、高山型及瞬时型，瞬时型占有较大面积，主要分布在我国不稳定和瞬时积雪区，我国三大稳定积雪区均涵盖了 5 种积雪类型；

(2) 基于气象要素方法对中国积雪类型划分，在空间上很好的表现出了我国积雪的定性描述特征，但定量描述的积雪特性并不适应于中国区域，部分地区积雪类型交错零散分布，不同积雪类型表现出相似或不同的积雪特性；

(3) “中国积雪特性分布调查”的调查路线很好地涵盖了不同区域的 5 种不同的积雪类型，路线设计具有全面性、科学性。

积雪是气候的产物，基于气象要素的积雪类型划分方法，可获取连续的空间积雪分类制图和雪特性分布图，由于中国的积雪水汽来源不同于 Sturm 等选取的北美地区，本文以 Sturm 等选取的气象阈值为参考，可能会导致其分类精度受气象要素数

据、气象阈值的限制,不同的气象阈值对分类结果影响较大区域主要分布在新疆北部、青藏高原南部等。因此,在后续工作中,需要进一步探究复杂区域积雪与气候的相互作用及其敏感性,开展中国区域积雪特性对气候的响应研究,选取更加精确合理的中国区域积雪分类的气象阈值。此外,将基于前期分类结果,对各类型积雪进行长时间序列的测量,获取更多积雪参数作为积雪分类辅助数据。

基于SHL积雪分类方法,在中国区域具有一定的参考价值,但需要结合地面积雪参数的特性,进一步结合气候带分布、地形等多种因素,并基于遥感反演的时间序列积雪数据集,合理的制作出中国的积雪分类体系,对我国积雪进行更加精准的划分,获取积雪特性空间分布,为水文建模等提供积雪必要参数。

致谢:感谢国家地球系统科学数据共享平台提供的由中国科学院青藏高原研究所制作的格网气象数据集。本研究所使用的地面调查数据由科技部国家科技基础资源调查专项“中国积雪特性分布调查”(编号:2017FY100500)项目组提供,项目主持单位为中国科学院西北生态环境资源研究院,参加单位包括中国科学院遥感与数字地球研究所、中国科学院东北地理与农业生态研究所、中国科学院新疆生态与地理研究所、国家卫星气象中心、北京师范大学、兰州大学、南京大学、西藏高原大气环境科学研究所、中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所、青海省气象科学研究所、西北大学。除了文中列出的作者以外还有众多的贡献者,感谢项目支持和各参与单位的科研人员辛勤付出获得宝贵数据并开放共享。

参考文献(References):

- [1] Sun Shufen. The physical, biochemistry and parameterized models for land process model[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. [孙菽芬. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型[M]. 北京: 气象出版社, 2005.]
- [2] Zhang Tingjun. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: an overview[J]. Reviews of Geophysics, 2005, 43(4): RG4002.
- [3] Zhang Lixu, Wei Wenshou. Variation trends of snowcover in the middle mountains of Western Tianshan Mts. and their relations to temperature and precipitation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(1): 67-71. [张丽旭, 魏文寿. 天山西部中山带积雪变化趋势与气温和降水的关系——以巩乃斯河谷为例[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 67-71.]
- [4] Li Peiji, Mi Desheng. Distribution of snow cover in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 9-18. [李培基, 米德生. 中国积雪的分布[J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18.]
- [5] Zhang Tingjun, Zhong Xinyue. Classification and regionalization of the seasonal snow cover across the Eurasian Continent[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 481-90. [张廷军, 钟歆玥. 欧亚大陆积雪分布及其类型划分[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 481-90.]
- [6] He Liye, Li Dongliang. Classification of snow cover days and comparing with satellite remote sensing data in West China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 237-45. [何丽烨, 李栋梁. 中国西部积雪日数类型划分及与卫星遥感结果的比较[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 237-45.]
- [7] Magono C, Chung W. Meteorological classification of natural snow crystals[J]. Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University Series 7, Geophysics, 1966, 2(4): 321-335.
- [8] Nakaya U, Marshall J S. Snow crystals[J]. American Journal of Physics, 1954, 22: 573-573.
- [9] Sommerfeld R A, LaChapelle E. The classification of snow metamorphism[J]. Journal of Glaciology, 1970, 9(55): 3-17.
- [10] McKay G, Gray D. The distribution of snowcover[M]. Pergamon Press Toronto, 1981.
- [11] Sturm M, Holmgren J, Liston G E. A seasonal snow cover classification system for local to global applications[J]. Journal of Climate, 1995, 8(5): 1261-1283.
- [12] Du Yinan, Li Xiaofeng, Zhao Kai, et al. Validation and analysis of the series of NASA snow parameter inversion algorithms in a single pixel in time series[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(2): 332-341. [杜一男, 李晓峰, 赵凯, 等. NASA系列雪参数反演算法在单像元内的时间序列验证与分析[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(2): 332-41.]
- [13] Chen Y, Yang K, He J, et al. Improving land surface temperature modeling for dry land of China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D20104): 1-14
- [14] Yang K, He J, Tang W, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: observation and modeling in the Tibetan Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 38-46.
- [15] Dai Y, Yao T, Li X, et al. The impact of lake effects on the temporal and spatial distribution of precipitation in the Nam Co basin, Tibetan Plateau[J]. Quaternary International, 2016, 475: 63-69.
- [16] Wang Jian, Che Tao, Li Zhen, et al. Investigation on snow characteristics and their distribution in China[J]. Advances in Earth Science, 2018, 33(1): 12-26. [王建, 车涛, 李震, 等. 中国积雪特性及分布调查[J]. 地球科学进展, 2018, 33(1): 12-26.]
- [17] Zhao Halin, Zhou Ruilian, Zhao Yue. Snow ecology: an interdisciplinary examination of snow-covered ecosystems[M]. Beijing: Ocean Press, 2003. [赵哈林, 周瑞莲, 赵悦. 雪生态学: 覆雪生态系统的交叉学科研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.]
- [18] Li Zheng, Jiang Fengqing. A study of abrupt climate change in Xinjiang Region during 1961—2004[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(3): 351-359. [李珍, 姜逢清. 1961—2004年新疆气候突变分析[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 351-359.]

Snow cover classification based on climate variables and its distribution characteristics in China

LI Xiaofeng^{1,2}, LIANG Shuang¹, ZHAO Kai^{1,2}, WANG Jian³, CHE Tao³, LI Zhen⁴

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 2. Changchun Jingyuetan Remote Sensing Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 4. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Snow cover classification is of importance for knowing snow properties and their temporal and spatial distribution. It is the climate that ultimately determines the physical characters of snow cover through temperature, precipitation and wind. Therefore, snow cover classification can be derived from the important climate variables. In this paper, a snow cover classification in China is put forwards based on binary system of the three climate variables proposed by Sturm et al. using long serie of China meteorological dataset, and the snow cover characteristics' distribution is statistically analyzed and validated by in-sit measured data from Science & Technology Basic Resources Investigation Program of China (investigation on snow characteristics and their distribution in China), which laid the foundation for formulating a snow cover classification system with China's regional characteristics. The results show that spatial resolution of the snow cover classification in this paper has increased significantly as compared with that in the study of Sturm et al. The snow cover types in China can be divided into five types: prairie, taiga, tundra, mountain and ephemeral types. Different types of snow cover in China show snow characteristics different from Sturm-Holmgren-Liston (SHL) classification.

Key words: snow cover classification; Sturm-Holmgren-Liston (SHL) classification method; snow cover characteristics; China

(责任编辑：周成林；编辑：周成林)