

1992~2010年中国积雪时空变化分析

钟镇涛¹, 黎夏^{2*}, 许晓聪^{1*}, 刘小平¹, 何执兼¹

1. 中山大学地理科学与规划学院, 广东省城市化与地理环境空间模拟重点实验室, 广州 510275;

2. 华东师范大学地理科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241

* 联系人, E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn; xuxiaocong@mail.sysu.edu.cn

2018-03-04 收稿, 2018-05-28 修回, 2018-05-28 接受, 2018-08-01 网络版发表

国家重点研发计划重点专项(2017YFA0604402)和国家自然科学基金(41531176)资助

摘要 积雪是地表覆盖的重要组成部分,也是气候变化的良好指示器,监测积雪变化对研究全球水循环、气候变化有着极为重要的意义. 本文利用“正-背景数据学习”算法,即Presence and Background Learning Model (PBL模型)对中国积雪进行估测,得到Special Sensor Microwave Imager 5 days (SSM/I 5 d)中国积雪分布图,并利用Mann-Kendall趋势检验法对1992~2010年中国积雪进行了时空变化分析,具体探讨了年积雪日数变化、积雪年季分布与变化特征、稳定积雪区变化. 结果表明, PBL模型在中国地区积雪估测精度表现良好,在与Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS), MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500 m Grid (MOD10A2)等积雪产品的比较中取得了较高的一致性,年平均总体精度达到0.88. 1992~2010年间中国三大主要积雪区积雪日数都有显著下降趋势,但青藏高原西北部则有显著上升趋势. 前者是由气温上升所引起,后者则是由降水增多所引起. 在积雪的季节分布上,新疆与东北-内蒙古地区积雪面积都是冬季最大,春、秋季相对较小;青藏高原积雪面积则是春、秋、冬季都很大,积雪的季节变化规律远不如其他两大积雪区明显. 研究期间,中国稳定积雪区面积无显著变化趋势,仅青藏高原年降雪日数波动较大.

关键词 中国, PBL 模型, 积雪, 时空变化

积雪是指由降雪形成的覆盖在地球表面上的雪层,它是地面气温低于冰点的寒冷地区或寒冷季节的特殊自然景观和天气现象^[1]. 季节性积雪是地表覆盖的重要组成部分之一,在北半球的冬季每年有40%的地表面积被积雪所覆盖,它对全球地表能量平衡、全球水循环以及气候变化^[2~5]都有重要影响. 中国位于北半球,且疆域辽阔,每年冬春季节国内大部分地区都有降雪发生,部分地区更是常年有积雪覆盖^[6]. 因此,能否获得准确的长时间序列和连续的积雪变化信息对研究我国生态环境、气候变化机制等至关重要.

国内在对于如何有效监测积雪及其时空变化方

面的相关研究已有不少. 总体而言,由于积雪的地理位置分布原因,人们对中国积雪的研究主要集中在青藏高原、新疆北部和东北-内蒙古这3个积雪大值区^[7]. 对新疆地区积雪的研究^[8]表明,在过去几十年间,新疆积雪深度有小幅增长,积雪日数呈略微降低趋势. 也有预测^[9,10]认为未来40年,新疆北部地区的积雪深度将会有所下降. 对于青藏高原地区,相关研究表明^[11,12]青藏高原积雪在空间上分布极不均匀,高海拔山区多雪,而四周腹地少雪,并且高原平均积雪日数在显著减少. 而对东北-内蒙古地区的积雪研究^[13,14]表明,大、小兴安岭是东北-内蒙古地区积雪分布较多的区域,其积雪大致按山脉走向分布,近10年

引用格式: 钟镇涛, 黎夏, 许晓聪, 等. 1992~2010年中国积雪时空变化分析. 科学通报, 2018, 63: 2641~2654

Zhong Z T, Li X, Xu X C, et al. Spatial-temporal variations analysis of snow cover in China from 1992~2010 (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2641~2654, doi: 10.1360/N972018-00199

来东北地区积雪覆盖率呈上升趋势. 在针对中国全范围的研究中, 一些学者^[6,7,15,16]认为在20世纪中期~21世纪初中国积雪量呈增长趋势, 也有学者^[17]认为在这段时间内中国春、秋季积雪量在缓慢减少, 而冬季积雪量则在增加. 还有研究^[5,18]认为在21世纪初前10年中国积雪未发生显著变化.

以往对中国积雪的研究, 无论是局部的还是大范围的, 大多是以地面观测站的站点数据为研究资料, 然而由于气象站点空间分布不均、建站密度较低, 在某些偏远地区, 尤其是我国中西部山区甚至根本无法建站, 这使得仅靠这些稀疏的站点数据根本无法准确反映大尺度区域的积雪状况^[7,19]. 随着遥感技术的发展, 其覆盖范围广, 观测周期短的优势逐渐被应用于积雪监测^[20], 于是更多的研究开始利用MODIS^[21~24], AMSR-E^[25,26], SSM/I^[27,28]等卫星传感器来反演积雪. Wang等人^[29]利用2001~2005年气象站点数据对MOD10A2积雪产品在新疆北疆地区的精度进行了验证, 发现在去除云盖前, MOD10A2在当地的积雪识别精度仅为71%, 而去云后精度可提升至83%. 杨晓峰等人^[26]利用2005~2008年地面观测数据对AMSR-E积雪产品在内蒙古地区的精度进行了评估, 得出AMSR-E产品虽能较好反应积雪的时间变化特征, 但其较粗的空间分辨率会导致低估地面积雪深度的结论. 任艳群^[30]等则通过结合2002~2010年间SSM/I亮温数据与气象站雪深数据建立了新疆天山山区雪深反演模型, 同样发现由于分辨率较低, SSM/I亮温数据在小尺度区域存在较大误差. 由此可见, 光学与微波传感器分别会因天气与分辨率的限制, 从而影响积雪反演的精度. 这也使得以往通过遥感手段来探究积雪变化的研究中大都面临着或是时间尺度太短、或是空间尺度太小等问题, 因此当前以高精度遥感数据来对中国全范围、长时间积雪变化信息进行探讨的研究还较为缺乏. 此外, 遥感数据与站点数据在反映积雪分布与变化规律时会在哪些方面存在差异、以及存在多大的差异, 这都是以往少有研究解答的问题.

Xu等人^[31]通过结合Special Sensor Microwave Imager(SSM/I)亮度温度数据与全球气象站积雪观测数据, 提出了利用“正-背景数据学习”算法—Presence and Background Learning Model(PBL模型)来对全球积雪进行估测的方法, 解决了以往仅通过站点观测数据或者微波探测等单一手段来进行积雪估测所造

成的精度低下或是不具有时空动态性的问题, 并得到了高精度的SSM/I全球积雪分布数据, 其积雪判识漏分误差低于0.13. 本研究利用PBL模型, 针对中国积雪进行估测和验证, 重点分析中国1992~2010年的积雪分布时空变化规律, 为揭示我国气候与环境变化提供一定的参考依据.

1 数据与方法

1.1 气象站观测数据

(i) 全球每日地面观测概要数据集(GSOD). GSOD数据集由美国国家气候数据中心(NCDC, <https://data.noaa.gov/dataset/global-surface-summary-of-the-day-gsod>)提供, 该数据集记录了自1929年以来包含雪深在内的14种天气要素, 在全球约有29000个站点分布, 如今有超过9000个站点仍在运作. 然而GSOD的雪深数据中仅记录了积雪深度大于零的观测值, 对观测结果为积雪不存在或者漏测的站点统一标记为999.9, 这为数据的使用带来一定的挑战.

(ii) 中国气象站观测数据集(CMSO). 中国气象站观测数据由中国气象局气象数据中心(<http://data.cma.cn>)提供, 该数据集包括分布于全国的747个气象观测站所记录的逐日积雪雪深、气温、降水等要素, 其中约有300个站点目前仍在进行积雪观测工作. 为了保证数据的连续性, 在剔除了一些观测时间较短或漏测较多的站点后, 共选取了539个站点用于本文分析.

1.2 SSM/I微波亮温数据

微波成像专用传感器SSM/I是搭载于美国国防卫星计划系列的被动微波成像仪, 该传感器是一个多频(19, 22, 37, 85 GHz)微波辐射系统, 除了22 GHz只有垂直极化观测值外, 其余3个频率均包含水平与垂直极化观测值^[30,31]. 本研究所用SSM/I亮温数据(<http://nsidc.org/data/NSIDC-0032>)是由美国国家雪冰数据中心(NSIDC)提供的北半球等面积地球格网数据, 其分辨率为25 km×25 km, 地图投影为WGS 1984等面积圆柱投影. 尽管SSM/I亮温数据自1987年起即可获取, 但由于在1987~1991年间有大量数据缺失, 因此本文只针对1992~2010年进行分析.

1.3 PBL算法提取积雪范围

传统的微波积雪反演模型尽管能在局部地区得

到较为准确的积雪反演结果,但大多未考虑积雪分布的时空异质性,反演精度极其依赖当地环境特征^[32],且用于验证模型的地面观测数据站点稀少,难以准确估测特殊地形的积雪状况.而构建基于全球地面站点与微波数据的积雪模型则能避免这些问题,但由于GSOD数据集不包含负样本,使得传统的二类分类器无法应用于模型训练,PBL模型的提出正是为了解决这种训练集中只有正样本的困境.PBL算法是一种在生态学中用于估测某物种种群数量的一类分类算法,其主要特征是当训练集缺失负样本时依然可以准确预测和验证目标种群存在的概率^[33],这种特性使我们可以 在缺失非积雪数据的环境下估测出实际积雪存在的概率,即可以反演出某些积雪观测值缺失的站点的积雪分布状况,弥补站点数据自身的不足.

图1展示了PBL模型的实现过程,利用PBL模型实现全球积雪估测的总体步骤如下^[31]: (1) 首先利用星载微波亮温数据与全球气象观测数据对PBL模型进行训练,通过人工神经网络自动学习与识别积雪特征,从而估计出遥感影像中每个像元积雪存在的可能性. (2) 选择合适的阈值将积雪概率分割成两类结果,即积雪存在、积雪不存在.由于全球气象站点并不是每日都能观测到足够的积雪存在记录,这导致仅用单日站点数据来进行PBL模型训练时会面临正样本数不足的问题,从而降低积雪估测精度.因此,考虑到积雪分布的时空异质性与模型的稳定性,在训练过程中我们根据当月数据为每个月单独建立一个模型来估测当月每天积雪存在概率,这样在保证足够训练样本的同时也减少了极端天气带来的不确定性.因此该模型应具有较高的时空动态性,使得

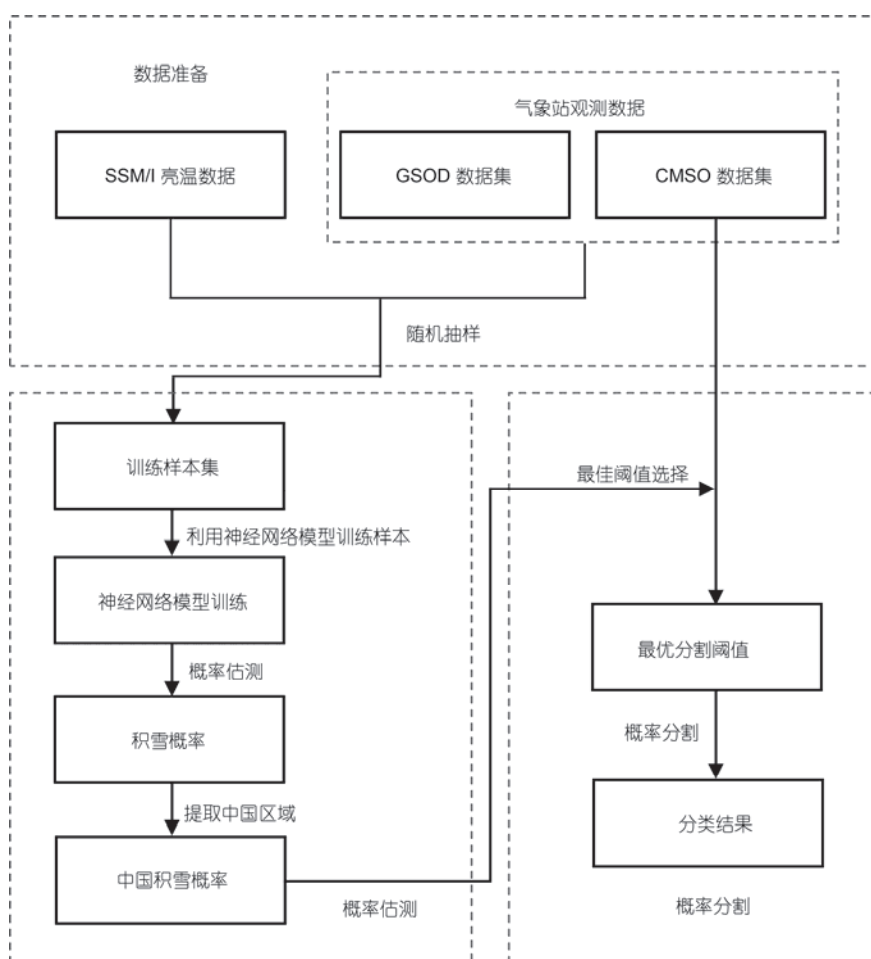


图1 PBL模型实现流程图

Figure 1 A brief flow chart of the implementation of the PBL model

估计误差不受局部环境条件影响. 以往的积雪估测过程中, 采取的是统一的阈值对全球积雪存在概率进行分割, 即对全球地面观测数据随机采样获取概率分割数据, 然而这样在保证全球积雪整体估测精度的同时却会降低局部地区的估测精度, 因此我们对积雪估测的第二步稍作改进, 在单独提取出中国积雪概率分布图以后, 仅使用中国气象站点积雪观测值(CMSO)来生成概率分割数据, 从而提高中国地区积雪估测精度. 分割积雪概率时使用的方法为 *F-Score* 检验, 该方法介绍如下:

在信息检索中经常会用到精确率与召回率这两个指标来检验分类准确性. 精确率(式(1))是指所有被检索到的样本中, 应该被检索到的样本所占的比例; 召回率(式(2))是指被检索到的样本占所有应该被检索到的样本的比例.

$$P = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

$$R = \frac{TP}{TP + FN}. \quad (2)$$

本文中, *TP* (true positives)为积雪被正确分类为积雪的样本数量, *FP* (false positives)为非积雪被分类为积雪的样本数量, *FN* (false negatives)为积雪被分类为非积雪的样本数量.

F-Score(式(3))是一个用来衡量统计结果准确性的值, 它是精确率与召回率的调和平均数. *PBL*模型实现过程中, 我们需要选择能使 *F-Score* 达到最高的阈值来对积雪概率进行分割, 以保证达到最佳积雪识别效果.

$$F = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}. \quad (3)$$

1.4 SSM/I 5 d积雪合成

由于SSM/I卫星每5 d才能完全覆盖中国一次, 因此我们对中国逐日积雪分布进行了5 d平均合成. 公式(4)中, S_s 代表积雪像元, S_f 代表非积雪像元, P_R 代表同一位置重叠像元数量, S_d 代表重叠区积雪像元的个数, S_R 则表示积雪5 d合成的结果.

$$S_R = \begin{cases} S_s, & \text{if } ((1 < P_R < 4), S_d > 1) \mid \text{if } ((3 < P_R < 6), S_d > 2), \\ S_s \mid S_f, & \text{if } (P_R) = 1, \\ S_f, & \text{if } ((1 < P_R < 4), S_d < 2) \mid \text{if } ((3 < P_R < 6), S_d < 3). \end{cases} \quad (4)$$

1.5 雪水当量转换

在已知积雪密度的情况下, 雪水当量可以与雪深相互转换^[26], 转换公式如下. 式中, *SWE*为雪水当量, ρ_w 为水的密度, ρ_s 为积雪密度, *SD*为积雪深度.

$$SD = \frac{SWE \times \rho_w}{10 \times \rho_s}. \quad (5)$$

1.6 Mann-Kendall趋势检验

Mann-Kendall检验是一种目前广泛用于分析气象数据变化趋势的非参数检验法, 其特点是不需要样本服从特定分布, 也不受少数异常值的干扰^[15], 检验过程如下:

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1, & \text{if } (X_j - X_i) > 0, \\ 0, & \text{if } (X_j - X_i) = 0, \\ -1, & \text{if } (X_j - X_i) < 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i), \quad Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}, \quad (8)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (9)$$

以积雪日数变化为例, 其中, *sgn*为符号函数, *X*为某年积雪覆盖天数, *n*为总的年份计数, *m*为数据的结(出现相同积雪日数的组数), t_i 为结的宽度(第*i*组积雪日数相同年的个数). 当 $n > 10$ 时, *S*趋于标准正态分布, 采取统计量*Z*进行双边趋势检验. 当 $Z > 0$ 时, 表示积雪日数呈上升趋势; $Z = 0$ 时, 表示无变化; $Z < 0$ 时, 表示积雪日数呈下降趋势. 在给定显著性水平 α 下, 当 $|Z| > Z_{(1-\alpha/2)}$ 时, 认为趋势显著; $|Z| < Z_{(1-\alpha/2)}$ 时, 则趋势不显著. 本文选取 α 为 0.05 的显著性水平进行检验, 即当 $|Z| > 1.64$ 时表示积雪日数变化趋势显著.

2 结果与分析

2.1 积雪估测精度

图2展示了利用PBL模型估测出的SSM/I 5 d中国积雪分布与其他3种积雪产品在2005年1月初积雪分布对比情况。其中Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS)数据集是由NSIDC所提供的北半球逐日积雪分布产品,该产品由多种传感器与地面观测数据共同反演而成,包含1 km×1 km、4 km×4 km、24 km×24 km三种分辨率,本文用于精度比较的数据分辨率为24 km×24 km; MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500 m Grid (MOD10A2)数据集是由NSIDC所提供的全球8 d积雪分布产品,分辨率为500 m×500 m; AMSR-E/Aqua 5-Day L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids(AE_5DSno)数据集同样是由NSIDC提供的全球5 d雪水当量分布产品,分辨率为25 km×25 km,以上积雪产品因其精度较高而被广泛用于与其他积雪反演算法进

行比较^[29,30,34]。由于AE_5DSno并非积雪覆盖产品,此处我们首先根据公式(5)将雪水当量转换为雪深,然后定义雪深大于10 mm的区域为积雪覆盖区。

为了便于精度比较,本文按不同积雪产品多日合成的方式,相应地对气象站点数据进行了5 d平均雪深合成(SSM/I、IMS)、5 d最大雪深合成(AE_5DSno),以及8 d最大雪深合成(MOD10A2),以保证站点数据与积雪分布数据的时间尺度统一。表1分别展示了2005与2008年1月初各积雪产品精度验证结果,可以看出在两期对比中,PBL模型的积雪识别精度(S_A)与陆地识别精度(L_A)都要高于除IMS外的其他积雪产品,且积雪判识准确率与IMS较为接近,总体精度(O_A)也稳定保持在0.90左右。AE_5DSno与MOD10A2的积雪精度则其他两者存在明显差距,这很可能是因为他们都采用了多日最大积雪合成方式,从而高估了某些地区的积雪。总之,PBL模型对积雪与非积雪都有较好的辨识能力,在中国地区的精度表现与IMS相当,并且优于AE_5DSno与MOD10A2。此外,

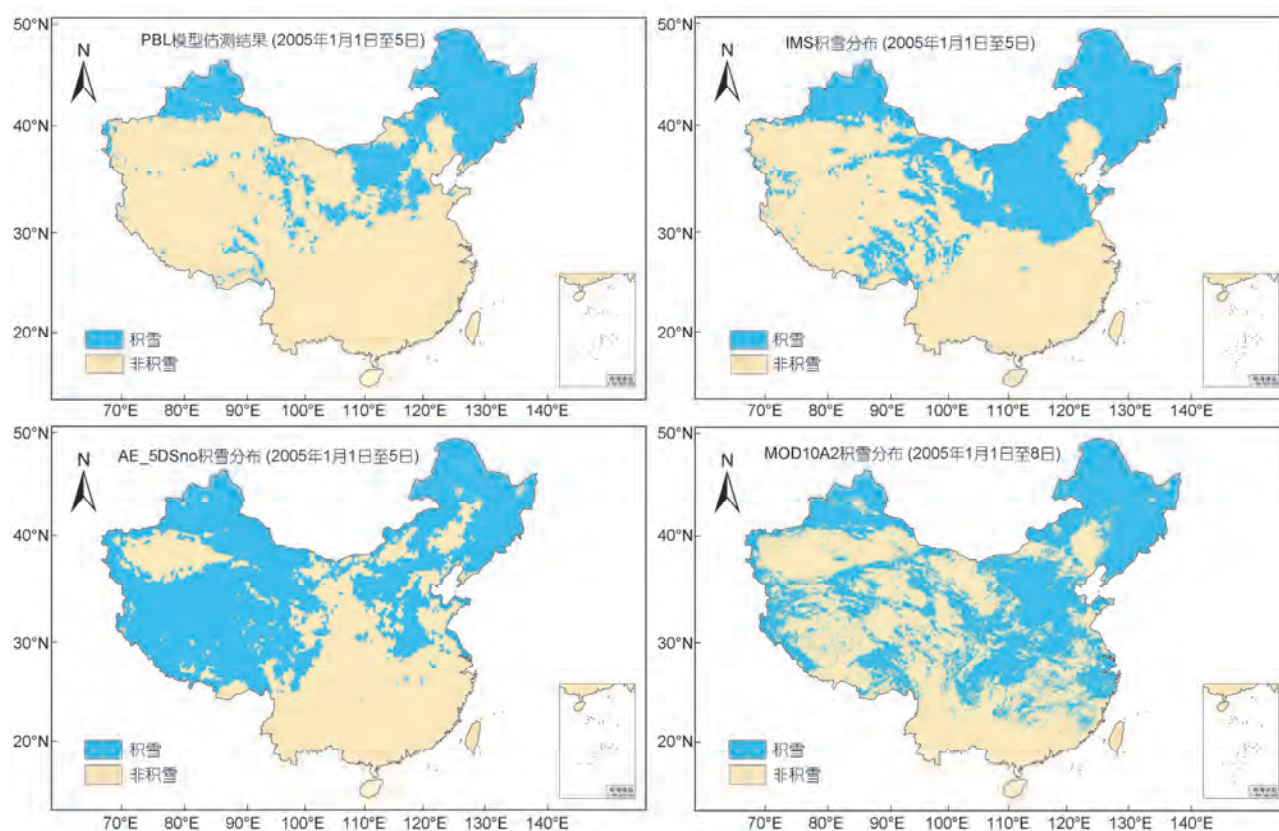


图2 2005年1月1日至5(8)日站点观测数据与积雪估测叠加图

Figure 2 Estimated result of snow cover overlapped with ground observation data from Jan.1st to 5(8)th 2005

表 1 不同积雪分布产品精度对比

Table 1 Accuracy comparison of different snow cover products

	2005年1月1日至5(8)日				2008年1月1日至5(8)日			
	PBL	IMS	AE_5Dsno	MOD10A2	PBL	IMS	AE_5Dsno	MOD10A2
S_A	0.80	0.84	0.63	0.67	0.80	0.81	0.74	0.67
L_A	0.94	0.75	0.77	0.69	0.96	0.97	0.76	0.87
O_A	0.90	0.77	0.70	0.68	0.93	0.94	0.75	0.82

为了验证模型的稳定性,对1992~2010年中国积雪估测年总体精度进行了评估.如图3所示,大多数年份总体精度都在0.87以上,即使是积雪估测精度最低的1993年,其总体精度也在0.85以上,19年的年平均总体精度达到了0.88,这表明SSM/I 5 d中国积雪分布图足以作为中国积雪变化分析的基础数据.

2.2 积雪时空变化分析

2.2.1 积雪日数变化分析

(i) 积雪分布特征. 图4(a)展示了1992~2010年中国平均积雪日数空间分布特征,从图中可以看出中国积雪主要分布在青藏高原、新疆、东北、内蒙古等高海拔或高纬度地区,而在西部的塔里木盆地中心和中国东南部几乎常年没有积雪产生.积雪日数大于120 d的地区主要分布在新疆的天山、阿尔泰山山脉;东北-内蒙古的大、小兴安岭;以及青藏高原的巴颜喀拉、唐古拉、祁连、喜马拉雅山脉,说明积

雪的维持与海拔高度相关,这一方面是因为气流在山地迎风坡会被迫向上抬升,从而使空气中水汽凝结形成降雪;另一方面,高海拔地区大多气温较低,有利于减缓积雪融化的速度.

(ii) 积雪变化趋势与原因分析. 利用Mann-Kendall趋势检验法对1992~2010年中国积雪日数变化进行了检验.从图4(b)可以看出,中国大部分积雪覆盖区的积雪日数都有显著下降趋势,如新疆北部、东北-内蒙古大部、青藏高原东南部,但是也有部分地区积雪日数呈上升趋势,如青藏高原西北部.

积雪的变化与气候变化密不可分,因为气温与降水不仅是影响降雪的重要因素,同时也与积雪的维持密切相关.对1992~2010年中国(不包含青藏高原西部)平均积雪日数与气温、降水进行相关分析,结果表明:积雪日数与气温呈显著负相关(图5(a)),与降水相关性不明显(图5(b)),说明比起降水,气温变化与积雪日数变化的相关性更强.正如表2所示,

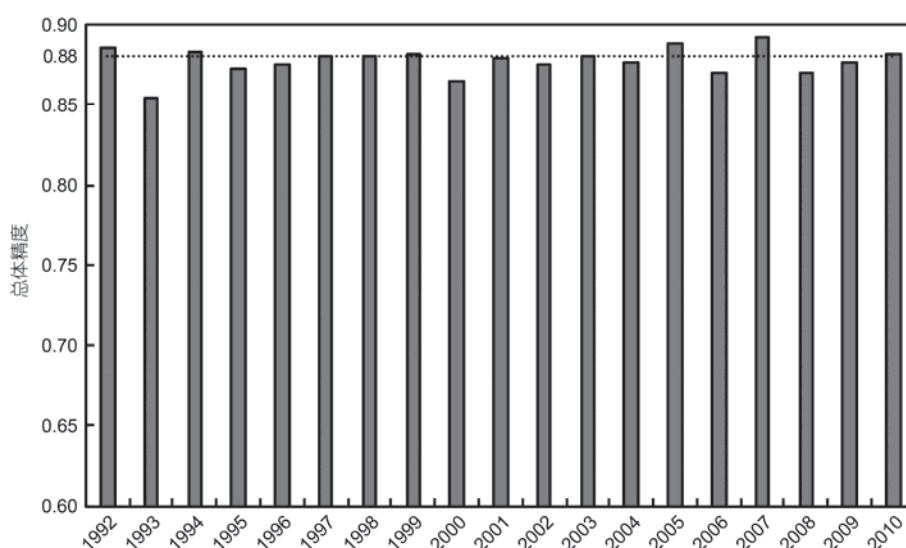


图 3 1992~2010 年中国积雪估测总体精度

Figure 3 Overall accuracy of snow cover estimation in China during 1992–2010

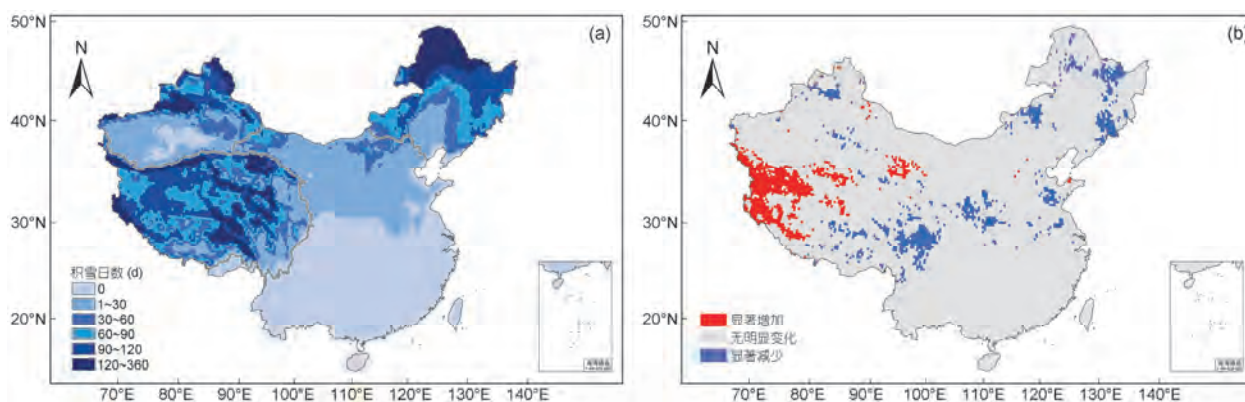


图4 1992~2010年中国平均积雪日数分布(a)与日数变化趋势(b). (a)中灰色框线范围从左至右、从上至下依次为新疆、东北-内蒙古(包括黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古东部地区)、青藏高原积雪区

Figure 4 Spatial distribution and variation trend of average snow cover days in China during 1992–2010. The range of gray lines in (a) represent three major snow cover regions, including Xinjiang (upper left), Northeast-Inner Mongolia (upper right) and Tibetan Plateau (lower left)

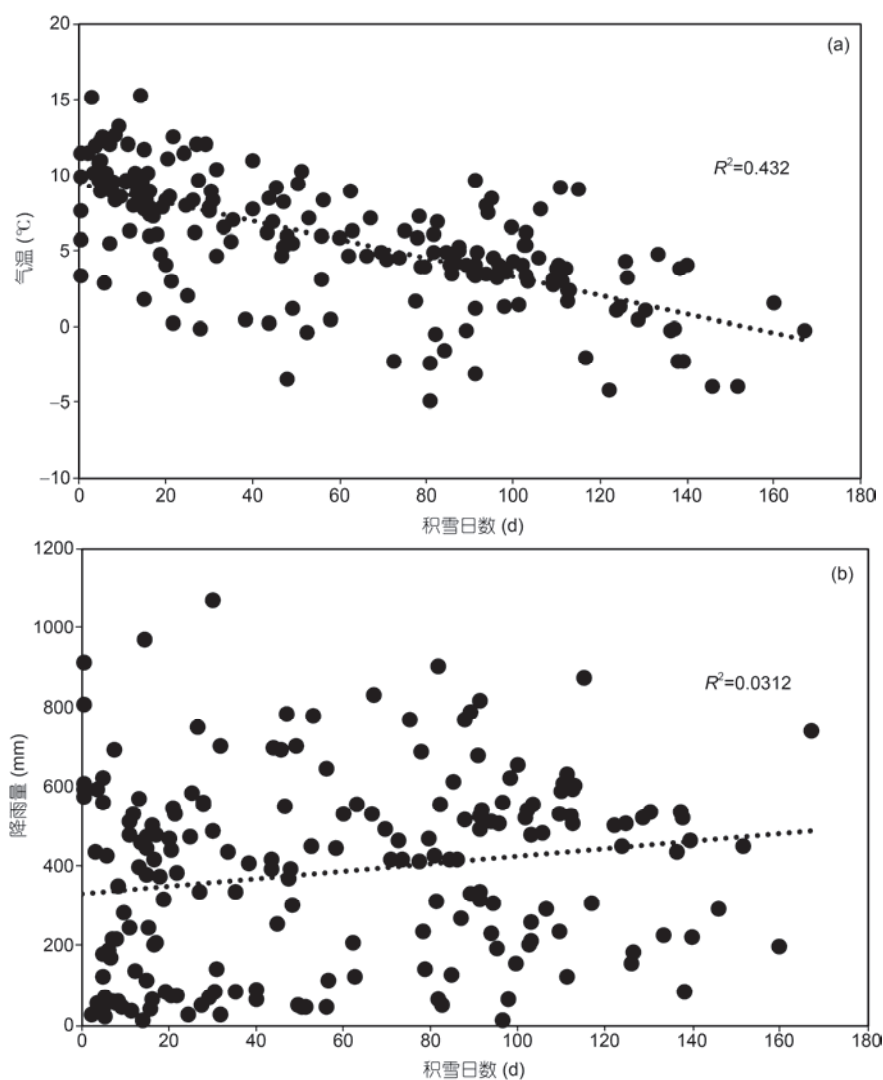


图5 年均积雪日数与气温相关性(a)和降水相关性(b)

Figure 5 Correlation between average snow cover days and temperature (a) and precipitation (b)

表 2 1992~2010年三大积雪区气温与降水变化Mann-Kendall检验Z值

Table 2 Mann-Kendall test value Z of temperature and precipitation in three major snow cover regions during 1992–2010

	降水	气温
新疆	-0.05	0.82
东北-内蒙古	0.07	0.21
青藏高原东部	0.30	0.94

研究期间新疆、东北-内蒙古以及青藏高原东部平均气温皆呈上升趋势,虽然趋势并不显著,但这些地区积雪日数的下降恰恰证明了积雪对气温变化的敏感性.青藏高原西北部由于气象站点过于稀少,导致其积雪日数变化无法通过有限的气温与降水数据反映,但是从其特殊的变化趋势来看,西北地区积雪日数与气温、降水的相关性强弱很可能不同于中国其他地区.田柳茜^[35]等认为:青藏高原西北地区受西风控制,气候寒冷干旱,而形成持续降雪的有力气候条件是寒冷湿润,因此西北地区降雪对降水的变化反应更敏感,即积雪日数与降水相关性更强.这就意味着,西北地区积雪日数增加很可能是由研究期间该地区降水增加导致的.

2.2.2 积雪年季分布与变化特征

为了解中国积雪年季分布与变化特征,本文分别统计了1992/1993~2009/2010年中国三大积雪区春、秋、冬季以及年积雪总面积(三季积雪面积累计之和).三大积雪区区域划分^[5]如图4(a)所示,季节上定义春季为每年3~5月,秋季为每年9~11月,冬季为前一年12月~次年2月.就不同区域来看,新疆(图6)一般是冬季积雪面积最大,春季次之,秋季最小.东北-内蒙古(图6(b))地区同样是冬季积雪面积最大,但秋季和春季积雪面积并没有固定大小差异,有些年份秋季更大,有些年份春季更大.而青藏高原(图7(c))则明显不同,该地区多数年份都是春季积雪面积最大,秋季和冬季积雪面积随年份交替领先.对比三大积雪区,可以明显发现,积雪面积季节变化最有规律的地区是新疆,基本遵循冬季>春季>秋季的模式,其次是东北-内蒙古,东北-内蒙古地区冬季积雪面积要远远高于春季和秋季,并且也是全国范围内冬季降雪最多的地区.最后则是青藏高原,青藏高原不同季节的积雪面积差异较小,并且没有固定季节变化规律,相对新疆与东北-内蒙古而言,该地区春季与秋季积雪面积都很大.王澄海等人^[6]对中国季节

性积雪的研究指出,新疆地区积雪通常于11月中旬形成;东北-内蒙古地区积雪最早10月中旬形成,4月下旬结束;青藏高原地区积雪开始最早,于9月形成,并且可一直延续到6月,这一定程度上解释了各地区积雪季节特征表现不同的原因.整体来看,在积雪季节分布特征上,新疆与东北-内蒙古地区较为相似,降雪都集中在每年冬季,这主要是因为他们同处中国高纬地区,皆受中温带气候控制.而青藏高原则处在高原高山气候区,终年低温,由季节更替造成的气温变化对降雪的影响远不如其他两大积雪区显著,因此降雪季节特征与前两者差异较大.

由于新疆地区积雪季节变化规律在三大积雪区中最为显著,因此本文重点探讨了该地区降雪分布突变年.从图6(a)可以看出,新疆地区在1996, 2003, 2004, 2006这4年间春季积雪面积远低于秋季,且冬季积雪面积相较于附近其他年份也偏低.由此推测,这很可能是由暖冬所导致,即气温异常偏高致使冬季降雪减少,且积雪在春季迅速消融.历史资料表明^[36,37],1996, 2003, 2004年中国都发生了全国性暖冬事件,但是在对应年份的其他积雪区,仅青藏高原(1996, 2003年)冬季积雪面积偏低,东北-内蒙古积雪区则并未发生明显变化.可能的原因有以下两点,其一是尽管暖冬年大部分地区气温会偏高,但不同区域的气温上升比例不同,未必能影响到降雪;其二是不同区域受局部气候的影响,降雪对气温变化的响应并不一致.不过在大范围的极端天气下,三大积雪区积雪变化会趋于统一,如2007/2008年冬季中国发生的罕见低温雨雪冰冻灾害,使得新疆、青藏高原地区积雪面积都达到了近20年间的峰值.

对三大积雪区积雪面积变化进行趋势检验的结果表明(表3),三大积雪区各季积雪面积变化趋势并不相同:新疆地区冬季积雪表现出增长趋势,春季表现出减少趋势,秋季保持不变;东北-内蒙古地区秋季和冬季积雪都呈减少趋势,只有春季呈增长趋势;青藏高原则三季都呈增长趋势.在年积雪总面积变化上,新疆和青藏高原都呈增长趋势,而东北-内蒙古地区呈减少趋势.然而所有地区的Z值都未通过显著性水平检验,这表示各地积雪面积变化趋势并不明显,也就是说,无论从季节尺度上还是年际尺度上来看,三大积雪区降雪的空间范围都没有显著收缩或扩张.尽管如此,青藏高原地区的积雪变化尤为值得关注,由图6(c)可以看出该地区积雪面积在2005年

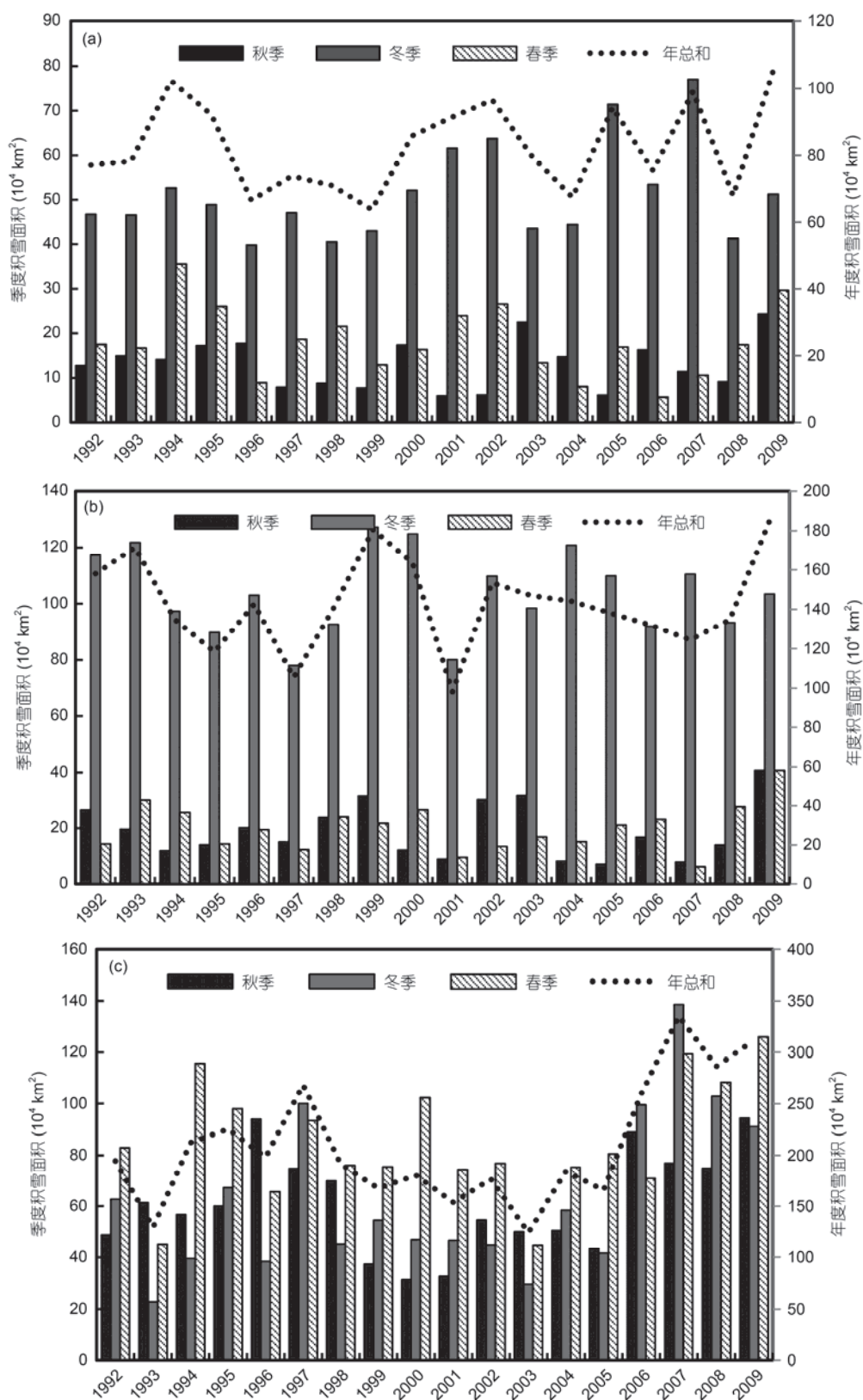


图6 1992~2010年新疆(a)、东北-内蒙古(b)和青藏高原(c)各季与年积雪总面积

Figure 6 Snow cover area of different seasons and years in Xinjiang (a), Northeast-Inner Mongolia (b), and Tibetan Plateau during 1992–2010 (c)

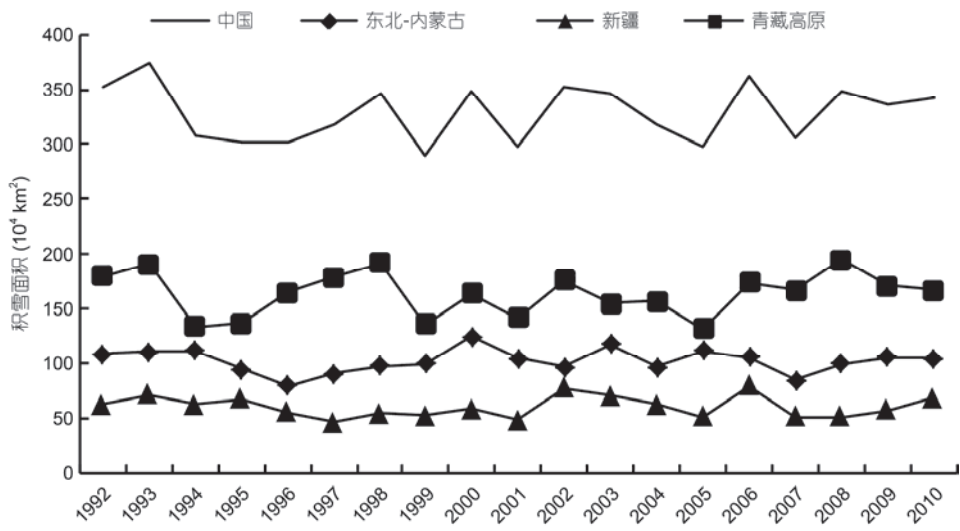


图7 1992~2010年中国及三大积雪区稳定积雪面积变化
Figure 7 Variation of stable snow cover area in China and its three major snow cover regions during 1992–2010

表3 三大积雪区积雪面积Mann-Kendall检验Z值
Table 3 Mann-Kendall test value Z of snow cover area in three major snow cover regions

	秋季	冬季	春季	年总和
新疆	0.00	1.29	-0.76	0.75
东北-内蒙古	-0.45	-0.08	0.37	-0.49
青藏高原	0.96	1.59	0.76	0.83

之后涨幅巨大,超越了以往数年的平均值,这也许是青藏高原积雪面积上涨的开端。

2.2.3 稳定积雪区变化分析

季节性积雪一般分为稳定积雪和不稳定积雪两类,一般采用年积雪覆盖日数大于或等于60天的地区为稳定积雪区^[1]。稳定积雪区作为我国雪水资源的主要储藏区之一,其每年积雪融化形成的春汛,对农业灌溉有重要意义。本文以研究期间19年稳定积雪面积的算术平均值为代表计算得出中国稳定积雪区面积为339万km²,在三大积雪区中,青藏高原地区稳定积雪面积最大,为168万km²;东北-内蒙古地区次之,为105万km²;新疆地区稳定积雪面积最小,为63万km²。由图7可得知,中国稳定积雪面积除年际波动较大以外,在研究期间并无显著的增长或减少趋势,且变化波动与青藏高原稳定积雪面积变化基本一致,说明中国稳定积雪面积受青藏高原雪量影响最大。从变化幅度来看,三大积雪区中新疆与东北-内蒙古地区稳定积雪面积年际波动都比较平缓,仅有青藏高原年际波动稍大,这意味着青藏高原地区积雪

稳定性低于新疆与东北-内蒙古地区,即年降雪日数变化较大。刘俊峰等^[5]对中国积雪稳定性的研究中也表明三大积雪区中青藏高原积雪空间稳定性最差。

3 结论与讨论

(1) 本文利用PBL模型估测了中国1992~2010年的积雪分布,所生成的SSM/I 5 d中国积雪分布图在与IMS, MOD10A2等积雪分布产品的比较中取得了较高的一致性,尤其是在中国西北与东北地区,各积雪产品估测出的积雪分布相差无几,并且PBL模型识别积雪与非积雪的准确率都要高于除IMS外的其他两种积雪产品。该积雪分布图年平均总体精度达到0.88,这为今后的研究提供了优质的积雪资料。

(2) 1992~2010年间,除青藏高原西北部以外,中国其他主要积雪区积雪日数都有显著下降趋势。石英等人^[38]的研究指出,由于气候变暖,未来中国大部分地区积雪开始的时间将推迟;积雪结束的时间将提前,而在中国东部和西北部分地区将推后。本文的结论则表明这种积雪的物候变化在过去20年已经

发生。除多等人^[39]指出1981~2010年间青藏高原平均积雪日数出现了明显的减少趋势,但由于他们使用的是气象站点数据,而青藏高原地区气象站主要分布在东部,因此这个结论并不包括西北部。事实上,青藏高原西北与东南地区积雪日数变化趋势是截然相反的,以往基于气象站点的研究中,大多忽略了对青藏高原西部的探讨。

(3) 本文按季节对三大积雪区积雪分布进行了对比,发现三大积雪区积雪季节分布特征并不一致,新疆和东北-内蒙古地区降雪主要集中在冬季,因而积雪面积都是冬季最大,春、秋季较小;青藏高原通常是春季积雪面积最大,并且秋、冬季积雪覆盖范围也很大。积雪季节性变化规律最明显的是新疆,其次是东北-内蒙古,最后则是青藏高原。研究期间,各地不同季节降雪范围未发生明显收缩或扩张。

(4) 中国稳定积雪区面积为339万 km^2 ,在三大稳定积雪区中,青藏高原地区稳定积雪面积最大,东北-内蒙古地区次之,新疆地区最小。本文研究表明,1992~2010年间三大积雪区稳定积雪面积无显著变化趋势,仅青藏高原地区年降雪日数波动较大。李培基等人^[1]利用1980年以前气象站点数据得出中国稳定

积雪区面积为420万 km^2 ,考虑到该研究年代较为久远,有可能之后稳定积雪面积有一定下降。而利用1997~2010年IMS逐日积雪分布产品计算得出的稳定积雪面积为300万 km^2 ,尽管只用10余年的数据计算稳定积雪面积会带来一定不确定性,但还是可以看出遥感与站点数据在统计积雪面积上存在较大差距。同时,这也再次说明了站点数据在监测大范围积雪时准确性要低于遥感数据。

(5) 尽管本文分析了1992~2010年中国三大积雪区积雪分布的时空变化规律,但并未对各地区积雪变化背后的成因进行深入探讨。如1993年,东北-内蒙古地区秋季积雪面积远低于春季,而青藏高原却恰好相反;又如2002年,东北-内蒙古秋季积雪面积远高于春季,但青藏高原则再次呈现出相反的变化,这种异常悬殊的差异是否是某种自然活动的信号依然有待考证。此外,因为目前中国气象数据网暂不提供2010年之后的积雪站点观测数据,所以仅靠遥感数据无法利用PBL模型估测之后几年的积雪分布。待站点数据更新后,将会进一步围绕引起不同地区积雪变化的成因与机制来完善当前研究,以获取更为全面的中国积雪变化特征。

致谢 该文图2,4涉及的地图经由国家测绘地理信息局审核,审图号:GS(2018)2959。

参考文献

- Li P J, Mi D S. Distribution of snow cover in China (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 1983, 5: 9-18 [李培基, 米德生. 中国积雪的分布. 冰川冻土, 1983, 5: 9-18]
- Negi H S, Kulkarni A V, Semwal B S, et al. Estimation of snow cover distribution in Beas basin, Indian Himalaya using satellite data and ground measurements. *Earth Syst Sci*, 2009, 5: 525-538
- Yan Y, Zhang Y J, Peng S, et al. Snow cover dynamics in and around the Shangri-La County, southeast margin of the Tibetan Plateau, 1974-2012: The influence of climate change and local tourism activities. *Int J Sust Dev World*, 2015, 22: 156-164
- Yu H, Zhang X T, Liang T G, et al. A new approach of dynamic monitoring of 5-day snow cover extent and snow depth based on MODIS and AMSR-E data from northern Xinjiang region. *Hydrol Process*, 2012, 26: 3052-3061
- Liu J F, Chen R S, Song Y X. Distribution and variation of snow cover in China (in Chinese). *Adv Clim Change Res*, 2012, 8: 364-371 [刘俊峰, 陈仁升, 宋耀选. 中国积雪时空变化分析. 气候变化研究进展, 2012, 8: 364-371]
- Wang C H, Wang Z L, Cui Y. Snow cover of China during the last 40 years: Spatial distribution and interannual variation (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2009, 31: 302-309 [王澄海, 王芝兰, 崔洋. 40 余年来中国地区季节性积雪的空间分布及年际变化特征. 冰川冻土, 2009, 31: 302-309]
- Xi S, Zhang Z F. Spatial and temporal analysis of snow cover in China in recent 50 years (in Chinese). *J Arid Meteorol*, 2013, 31: 451-456 [希爽, 张志富. 中国近 50 a 积雪变化时空特征. 干旱气象, 2013, 31: 451-456]
- Hu L Q, Li S, Liang F C. Analysis of the variation characteristics of snow covers in Xinjiang region during recent 50 years (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2013, 35: 793-800 [胡列群, 李帅, 梁凤超. 新疆区域近 50 a 积雪变化特征分析. 冰川冻土, 2013, 35: 793-800]
- Wang C H, Wang Z L, Shen Y P. A prediction of snow cover depth in the northern Xinjiang in the next 50 years (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2010, 32: 1059-1065 [王澄海, 王芝兰, 沈永平. 新疆北部地区积雪深度变化特征及未来 50 a 的预估. 冰川冻土, 2010,

- 32: 1059–1065]
- 10 Shen Y P, Su H C, Wang G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change(II): Hazards effects (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2013, 33: 1355–1370 [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应. 冰川冻土, 2013, 33: 1355–1370]
- 11 Sun Y H, Huang X D, Wang W, et al. Spatio-temporal changes of snow cover and snow water equivalent in the Tibetan Plateau during 2003–2010 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2014, 36: 1337–1344 [孙燕华, 黄晓东, 王玮, 等. 2003–2010 年青藏高原积雪及雪水当量的时空变化. 冰川冻土, 2014, 36: 1337–1344]
- 12 Wang Y T, He Y, Hou S G. Analysis of the temporal and spatial variations of snow cover over the Tibetan Plateau based on MODIS (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2007, 29: 855–860 [王叶堂, 何勇, 侯书贵. 2000–2005 年青藏高原积雪时空变化分析. 冰川冻土, 2007, 29: 855–860]
- 13 Zhao X M, Li D L, Cheng G Y. GIS-based spatializing method for estimating snow cover depth in Northeast China and its nabes (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2012, 29: 927–933 [赵晓萌, 李栋梁, 陈光宇. 基于 GIS 的东北及邻近地区积雪深度空间化方法. 干旱区研究, 2012, 29: 927–933]
- 14 Yang Q. Temporal and spatial distribution of snow cover and snowmelt runoff simulation in Northeast China (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Jilin: Jilin University, 2015 [杨倩. 东北地区积雪时空分布及其融雪径流模拟. 博士学位论文. 吉林: 吉林大学, 2015]
- 15 Zhang D W, Cong Z T, Ni G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data (in Chinese). *Adv Water Sci*, 2013, 24: 490–496 [章诞武, 丛振涛, 倪广恒. 基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析. 水科学进展, 2013, 24: 490–496]
- 16 Ma L J, Qin D H. Spatial-temporal characteristics of observed key parameters for snow cover in China during 1957–2009 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2012, 34: 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. 冰川冻土, 2012, 34: 1–11]
- 17 Wang C X, Li D L. Spatial-temporal variations of snow cover days and the maximum depth of snow cover in China during recent 50 years (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2012, 34: 247–255 [王春学, 李栋梁. 中国近 50 a 积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律. 冰川冻土, 2012, 34: 247–255]
- 18 Che T, Li X. Spatial distribution and temporal variation of snow water resources in China during 1993–2002 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2005, 27: 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. 冰川冻土, 2005, 27: 64–67]
- 19 Derksen C, Ledrew E, Walker A, et al. Influence of sensor overpass time on passive microwave-derived snow cover parameters. *Remote Sens Environ*, 2010, 71: 297–308
- 20 Nie J. The monitoring and prediction of snow disaster with remote sensing (in Chinese). *Disast Reduc Chin*, 2005, 5: 40–41 [聂娟. 业务化的雪灾遥感监测及预测. 中国减灾, 2005, 5: 40–41]
- 21 Hou H S, Yang H Y. A general introduction to MODIS snow products and its researching application (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2009, 24: 252–256 [侯慧妹, 杨宏业. MODIS 积雪产品及研究应用概述. 遥感技术与应用, 2009, 24: 252–256]
- 22 Zhang Y, Huang X D, Wang W, et al. Validation and algorithm redevelopment of MODIS daily fractional snow cover products (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2013, 30: 808–814 [张颖, 黄晓东, 王玮, 等. MODIS 逐日积雪覆盖率产品验证及算法重建. 干旱区研究, 2013, 30: 808–814]
- 23 Liu J F, Cheng R S. Studying the MODIS snow covered days by the use of MODIS Aqua/Terra snow cover products and *in situ* observations in North Eastern and Inner Mongolia region (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2011, 26: 450–456 [刘俊峰, 陈仁升. 东北-内蒙古地区基于 MODIS 单、双卫星积雪数据及常规积雪观测结合的积雪日数研究. 遥感技术与应用, 2011, 26: 450–456]
- 24 Tang Z G, Wang J, Li H Y, et al. Accuracy validation and cloud obscuration removal of MODIS fractional snow cover products over Tibetan Plateau (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 2013, 28: 423–430 [唐志光, 王建, 李弘毅, 等. 青藏高原 MODIS 积雪面积比例产品的精度验证与去云研究. 遥感技术与应用, 2013, 28: 423–430]
- 25 Li J Y, Yang X C, Xu B, et al. Snow monitoring using MODIS and AMSR-E in six main pastoral areas of China (in Chinese). *Sci Geograph Sin*, 2011, 31: 1097–1104 [李金亚, 杨秀春, 徐斌, 等. 基于 MODIS 与 AMSR-E 数据的中国 6 大牧区草原积雪遥感监测研究. 地理科学, 2011, 31: 1097–1104]
- 26 Yang X F, Zheng Z J, Yang Z D. Validation of AMSR-E snow depth products in Inner Mongolia (in Chinese). *Remote Sens Appl*, 2011, 6: 61–68 [杨晓峰, 郑照军, 杨忠东. AMSR-E 积雪产品在内蒙古地区的精度验证. 遥感应用, 2011, 6: 61–68]
- 27 Yan H, Zhang J H. Retrieval of snow depth in China by using SSM/I data (in Chinese). *J Mount Sci*, 2008, 10: 59–64 [延昊, 张佳华. 基于 SSM/I 被动微波数据的中国积雪深度遥感研究. 山地学报, 2008, 10: 59–64]
- 28 Li X J, Liu Y J, Zhu X X, et al. Snow cover identification with SSM/I data in China (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2007, 18: 12–20 [李晓静, 刘玉洁, 朱小祥, 等. 利用 SSM/I 数据判识我国及周边地区雪盖. 应用气象学报, 2007, 18: 12–20]
- 29 Wang X W, Xie H J, Liang T G. Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China. *Remote Sens Environ*, 2008, 112: 1479–1513

- 30 Ren Y Q, Liu H L, Bao A M, et al. Spatial and temporal characteristics of snow depth in the Tianshan Mountains derived from SSM/I and MODIS data (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 1178–1187 [任艳群, 刘海隆, 包安明, 等. 基于 SSM/I 和 MODIS 数据的天山山区积雪深度时空特征分析. *冰川冻土*, 2015, 37: 1178–1187]
- 31 Xu X C, Liu X P, Li X, et al. Global snow cover estimation with microwave brightness temperature measurements and one-class *in situ* observations. *Remote Sens Environ*, 2016, 182: 227–251
- 32 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 observations. *Remote Sens Environ*, 2006, 101: 257–269
- 33 Li W K, Guo Q H, Charles E. Can we model the probability of presence of species without absence data? *Ecography*, 2011, 34: 1096–1105
- 34 Yang J T, Jiang L M, Shi J C, et al. Monitoring snow cover using Chinese meteorological satellite data over China. *Remote Sens Environ*, 2014, 143: 192–203
- 35 Tian L Q, Li W Z, Zhang Y, et al. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2014, 34: 5974–5983 [田柳茜, 李卫忠, 张尧, 等. 青藏高原 1979–2007 年间的积雪变化. *生态学报*, 2014, 34: 5974–5983]
- 36 Wang L, Zhang Q, Chen Y, et al. Changes of warmer winter and winter temperature over China in the past 50 years (in Chinese). *Adv Clim Change Res*, 2007, 3: 26–30 [王凌, 张强, 陈峪, 等. 1956–2005 年中国暖冬和冬季温度变化. *气候变化研究进展*, 2007, 3: 26–30]
- 37 Chen Y, Ren G Y, Wang L, et al. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2009, 20: 539–545 [陈峪, 任国玉, 王凌, 等. 近 56 年我国暖冬气候事件变化. *应用气象学报*, 2009, 20: 539–545]
- 38 Shi Y, Gao X J, Wu J, et al. Simulation of the changes in snow cover over China under global warming by a high resolution RCM (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2010, 32: 216–221 [石英, 高学杰, 吴佳, 等. 全球变暖对中国区域积雪变化影响的数值模拟. *冰川冻土*, 2010, 32: 216–221]
- 39 Chu D, Yang Y, Luobu J C, et al. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981–2010 (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2015, 37: 1461–1472 [除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981–2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析. *冰川冻土*, 2015, 37: 1461–1472]

Summary for “1992–2010 年中国积雪时空变化分析”

Spatial-temporal variations analysis of snow cover in China from 1992–2010

Zhentaο Zhong¹, Xia Li^{2*}, Xiaοcong Xu^{1*}, Xiaοping Liu¹ & Zhijian He¹

¹ School of Geography and Planning, Guangdong Key Laboratory for Urbanization and Geo-simulation, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

² School of Geographic Sciences, Key Laboratory of Geographic Information Science (Ministry of Education), East China Normal University, Shanghai 200241, China

* Corresponding authors, E-mail: lixia@mail.sysu.edu.cn; xuxiaocong@mail.sysu.edu.cn

Snow cover is an important component of land cover on the Earth's surface and is also a good indicator of climate change. Hence, monitoring the spatial distribution and temporal variation of snow cover is of great significance to the study of the global water cycle and climate change. Traditional snow cover monitoring has been primarily based on *in situ* observations; however, the uneven and low-density distribution of meteorological stations made it difficult to reflect the overall picture of snow cover in some regions. To solve this problem, we used the Presence and Background Learning (PBL) algorithm to estimate the snow cover in China and obtained the 5 days (5 d) snow cover maps of the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I). The PBL model is a type of one-class classifier that needs no negative training sample in the training set. The cornerstone of this method is to combine SSM/I Brightness Temperature data and *in situ* observations to estimate the probability of the existence of snow cover based on the Artificial Neural Network (ANN). The estimation result indicates that the average annual overall accuracy of the PBL model in China is 0.88, which shows good agreement with the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) snow cover products. Compared with other snow cover products, such as MODIS/Terra Snow Cover 8-Day L3 Global 500 m Grid (MOD10A2) and AMSR-E/Aqua 5-Day L3 Global Snow Water Equivalent EASE-Grids(AE_5DSno), the performance of the PBL model is better at predicting the snow cover distribution in China. After obtaining the SSM/I 5d snow cover maps of China, we analysed the temporal and spatial variations of snow cover in China during 1992–2010 using the Mann-Kendall test, which included the variation of annual snow cover days, seasonal snow cover distribution and change characteristics, and the variation of the stable snow cover area. The results suggest that China's snow cover is primarily distributed in the Tibetan Plateau, Xinjiang, northeast China, and Inner Mongolia, which are all high altitude or high latitude regions. From 1992–2010, the following occurred. (1) The number of snow cover days decreased significantly in the three major snow cover regions of China due to rising temperatures, while there was an observably upward trend in the northwestern Tibetan Plateau with the increase of precipitation. (2) The snow cover area of Xinjiang and Northeast-Inner Mongolia reached its maximum in winter and was relatively small in the spring and autumn. The Tibetan Plateau's snow cover area is generally the largest in the spring, and it is also very large in the autumn and winter. Thus, the seasonal variation characteristics of snow cover there is not as obvious as that of the other two major snow regions. (3) In the four years of 1996, 2003, 2004 and 2006, the snow cover area in the spring in Xinjiang was much lower than that in the autumn, which indicates a “warmer winter” event caused by warmer than usual temperatures in the winter. (4) Although no significant change in the snow cover area was found in all regions during the study period, the change in snow cover on the Tibetan Plateau is particularly noteworthy due to its area having increased greatly since 2005, which might be the beginning of the increase of snow cover area in this region. (5) The stable snow cover area of China is 3.39 million km². In the three major snow cover regions, the stable snow cover area of the Tibetan Plateau is the largest (1.68 million km²), the Northeast-Inner Mongolia region is the second largest (1.05 million km²), and the Xinjiang region is the smallest (0.63 million km²). The stable snow cover area had no significant variation trend in China during 1992–2010—only the snow cover days of the Tibetan Plateau had a larger interannual fluctuation.

China, Presence and Background Learning Model, snow cover, spatial-temporal variation

doi: 10.1360/N972018-00199