

# 基于 FY-3 号气象卫星的中国典型积雪覆盖区时空动态研究

李梁<sup>□□</sup>, 张佳华<sup>□</sup>, 孙中太<sup>□</sup>, 刘权<sup>□</sup>, 白云<sup>□</sup>, 张莎<sup>□</sup>, 杨姗姗<sup>□</sup>, 王霄鹏<sup>□</sup>

① 青岛大学计算机科学技术学院遥感信息与数字地球研究中心, 山东 青岛 266071

② 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室, 北京, 100094

□Max-Planck-Institute for Meteorology, 20146 Hamburg, Germany

\*联系人, E-mail: zhangjh@radi.ac.cn

2021-00-00 收稿, 2021-00-00 接受

中国科学院战略先导专项 A 类项目 (XDA19030402); 国家自然科学基金项目(41871253, 42071425)

**摘要:** 积雪作为地球上水资源的贮存方式之一, 对土壤湿度和淡水分布产生着重要的影响。中国领土南北跨越纬度约 50 度, 积雪分布广泛, 研究积雪时空动态具有重要意义。本文基于风云三号气象卫星的积雪产品数据 (Snow Cover, SNC), 提出了基于经验模态分解的趋势提取方法, 探讨了中国 2010-2019 年的积雪时空动态及变化趋势。结果表明: 1) 中国积雪覆盖频率 (Snow Cover Frequency, SCF) 具有显著的季节性特征, 呈现先增加后减少的特点, 每年二、三月达到当年最大 SCF, 东北的年际 SCF 有显著下降的趋势, 其他地区变化不大。2) 内蒙古和新疆的积雪覆盖率 (Snow Cover Rate, SCR) 近 10 年分别下降了 1.6% 和 1.5%, 其他地区 SCR 变化不显著; 主要积雪覆盖区 SCR 均在 2016 年发生由增加到减少的转变。本研究对掌握中国典型积雪覆盖区的时空动态以及后续探讨积雪与气温、降水等影响因子的关系有重要意义。同时通过风云三号气象卫星的数据得出相关成果, 加强风云三号卫星观测资料的应用。

**关键词:** 风云三号气象卫星; 积雪覆盖频率; 积雪覆盖率; 经验模态分解; 时空动态

积雪作为地球上重要的水资源之一, 融化的冰川积雪是许多淡水湖的源头 (张佳华等, 2008)。南北半球的中高纬度地区有着大量的积雪和冰川, 终年不化的积雪和季节性积雪广泛的存在于高海拔地区中 (孙燕华等, 2014)。季节性积雪对地热状况有着重要的反馈作用, 积雪开始和结束的时间、积雪覆盖范围与深度都会对区域内的土壤含水量造成影响 (杨林等, 2019), 进而对地气系统的辐射平衡、水文循环产生显著的影响 (唐志光等, 2017), 中国黄河中下游和长江中下游的旱涝灾害又受到二者的影响。相比于终年积雪, 季节性积雪对天气和气候的影响更为显著, 全世界 98% 的季节性积雪位于北半球, 北半球每年 12 月到次年 1 月的最大积雪面积占整个陆地的面积的 45% 以上, 欧亚大陆作为北半球的主要积雪区, 其积雪面积更是达到北半球积雪面积的 60% 以上 (杨林等, 2019; Lemake, 2007)。在全球变暖的气候变化背景下, 北半球的积雪面积正逐年下降, 中国的积雪面积也处在缓慢下降的趋势 (吴彦, 2005)。大量的积雪融化, 造成淡水湖泊和河流水面上升, 湿润空气中水分充足, 降水降雪频发, 易造成暴雪等极端天气气候事件, 对中国的农业生产和自然生态平衡造成严重的后果, 引发一系列问题。因此掌握中国的积雪时空动态变化是十分重要的。

对于大范围的积雪时空变化, 国内外近几十年已经开展了大量的研究工作。当前比较主流的获取积雪信息的方法主要有气象站点监测和卫星遥感数据获取。Huang et al. (2019) 人使用气象站点数据, 得出 1952-2012 年中国每年积雪持续时间在减少的结论。郝祥云等 (2018) 对锡林河流域周围选取 1981-2016 年的逐日气象数据, 发现近 35 年内雪深和积雪日数呈上升趋势, 且两者显著相关。气象站点数据虽然准确度较高, 方便记录, 但对高海拔和气候恶劣的地

36 区难以覆盖, 卫星遥感监测解决了此类难题。当前卫星遥感对积雪的监测分为主动微波遥感和被动微波遥感。主动微  
37 波遥感借助积雪与其他覆盖物在不同波段的反射系数不同来判别雪, 被动微波遥感可以全天候穿过云层, 提取地表的  
38 亮温, 通过雪深反演公式得到积雪深度。基于 Terra 和 Aqua 卫星上的 MODIS 传感器提供的 MOD10A1、MYD10A1  
39 积雪产品数据集, 空间分辨率 500m, 时间分辨率 1d, Huang et al. (2016) 利用此数据集对中国积雪面积、积雪天数  
40 进行了探讨, 结果表明短暂积雪分布区为中国的东部和东南部以及新疆和内蒙古的部分地区, 内蒙古、新疆北部和青  
41 藏高原为稳定积雪区, 新疆西天山和青藏高原山区是永久性积雪的主要地区。众多研究表明, 中国积雪面积在近几年  
42 年内逐步减少, 并且减少的速度也在加快 (Déry and Brown, 2007; Brown and Robinson, 2011)。中国积雪分布具有明  
43 显的空间差异性, 随着纬度的升高, 积雪逐步增多, 西部积雪明显多于东部; 山地积雪多于盆地和平原, 且山地积雪  
44 随着海拔的升高而增多 (李栋梁和王春学, 2011)。青藏高原作为世界第三极 (姚檀栋等, 2017; 除多等, 2017),  
45 地形复杂, 山脉、峡谷、盆地纵横交错, 近 20 年川西高原 (青藏高原东南缘和横断山脉一部分) 的积雪覆盖率整体  
46 呈缓慢减少的趋势, 积雪覆盖时间的空间分布差异明显, 随海拔的增高而增加, 其他地区变化不显著 (钟鼎杰等,  
47 2021)。高原积雪由于其海拔高, 持续时间长等特点, 持续作用于大气环流, 从而影响中国夏季降水量 (丁峰等,  
48 2009)。

49 总体上, 基于国产 FY-3 气象卫星对中国区域近 10 年的积雪状况的研究较少。为了采用国产卫星数据, 更加详细  
50 的对中国区域内近 10 年的积雪变化进行分析, 本文采用 FY-3 气象卫星的积雪覆盖产品数据, 对 2010-2019 年中国积  
51 雪覆盖频率 (SCF) 进行逐月演变分析和线性回归提取长期趋势, 提出基于经验模态分解 (Empirical Mode  
52 Decomposition, EMD) (Huang et al., 1997) 的 *EMDTrend* 指标来衡量 SCR 的长期趋势, 使用 Mann-Kendall 检验  
53 (符淙斌和王强, 1992; Wu et al., 2011) 方法衡量积雪覆盖率 (SCR) 的变化情况。

## 54 1 数据和方法

### 55 1.1 研究区

56 中国国土幅员辽阔, 南北跨越纬度约 50 度, 东西跨越经度约 62 度, 占欧亚大陆面积的 17.5%, 自南向北包含热  
57 带、亚热带、暖温带、中温带、寒温带 5 个温度带, 以及处于高原气候带的青藏高原周边地区 (郑景云等, 2010)。  
58 中国地势东低西高, 拥有高原、山岭、平原、丘陵、盆地等地形以及昆仑山脉、横断山脉等大小山脉 (方如康,  
59 1995), 复杂的地形、走向多样的山脉以及沿海与内陆城市的差别形成了多种多样的气候, 降雪的季节性特征显著,  
60 每年冬季为降雪频发时期, 而冬季降雪在地理位置上尤为不同, 积雪分布具有明显的空间异质性, 其中新疆、东北、  
61 青藏高原是积雪分布的重要区域 (Huang et al., 2016)。中国两大河流黄河、长江分别起源于青藏高原巴颜喀拉山脉  
62 和唐古拉山, 青藏高原的冰川积雪融化状况对黄河、长江中下游乃至中国大部河流域影响显著。因此本研究选择中  
63 国陆地领土为研究区, 如图 1 所示。

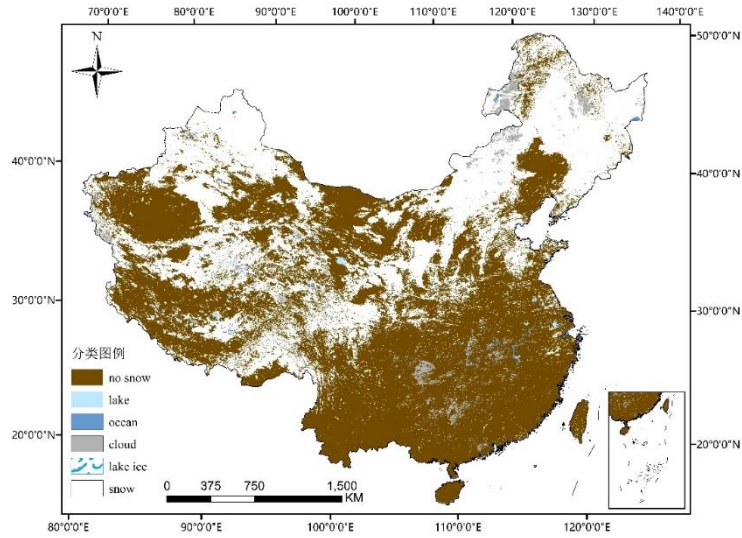


图 1 研究区范围及 MULSS 积雪覆盖数据分类示例

Fig.1 Study area and classification example of MULSS snow cover data

## 1.2 研究数据

风云三号(FY-3)气象卫星是中国继 FY-1 的第二代极轨气象卫星, 携带了中分辨率光谱成像仪、地球辐射探测仪、扫描辐射计、微波温度计等 11 台设备, 可以做到大气三维探测, 实现全球高分辨观测和全天候全天时工作(谷松岩等, 2022), 为天气预报、自然灾害和生态环境监测、军事服务等提供有力帮助, 搭载于 FY-3 上的中分辨率成像光谱仪相比于 MODIS 可活动角度更大, 扫描范围更广(范天锡, 2002)。通过风云气象卫星得到的遥感数据已发展出覆盖大气、陆表、海洋等多类型产品, 并且应用到数值模拟和预测等各种业务模式中(杨军等, 2018)。本研究中使用的数据来自风云卫星遥感数据网 (<http://satellite.nsmc.org.cn>) FY-3 的多仪器融合数据 (MULSS) 产生的积雪覆盖产品 (SNC), 该产品基于可见光红外扫描辐射计和中分辨率成像光谱仪融合而成, 通过归一化积雪指数对云和雪判别, 对像元逐个进行分类(杨军和董超华, 2011)。SNC 产品代码共有 11 个分类, 定义如表 1 所示, 分类实例如图 1。

表 1 MULSS 积雪产品编码及意义

Table1 The code and significance of MULSS snow cover products

FY-3 MULSS SNC coding	
Pixel value	Land-cover class
0	Missing data
1	No decision
11	Night
25	No Snow
37	Lake
39	Ocean
50	Cloud
100	Lake ice
200	snow
254	Detector saturated
255	Fill

78  
79  
80  
81  
82  
83  
84  
85  
86  
87  
88  
89

2010年9月至2016年5月的数据使用FY-3A产生的，2016年9月至2020年1月（最新）的数据为FY-3C的。该数据空间分辨率为1KM，时间分辨率为十天，定义每年9月至次年5月份为一个研究年份。分别选取30张FY-3A、15张FY-3C的栅格数据，共计约 $7.2 \times 10^8$ 个像元与作为真值参考的中国雪深长时间序列数据集（SD）比较。如表2所示，以五个指标对FY-3的积雪产品进行精度评估，FY-3A和FY-3C的积雪判别准确率分别为83.20%、85.82%。张帅等（2018）以MOD10C1（MYD10C1）全球日积雪覆盖数据集作为参考，对2010年至2014年风云三号MULSS积雪产品从总精度、偏差等多个方面做了评估，有雪期两者积雪分布趋势一致，在空间分布和时间演变上保持了较好的一致性。闵文彬等（2021）以2018年10月至2019年4月青藏高原的气象站点积雪观测数据做真值，MULSS积雪覆盖产品数据的精度为75.37%，其中积雪判别准确率为87.18%，误判率为12.81%。综上所述，FY-3的MULSS积雪产品质量稳定并拥有较高的精度，满足应用需求。

表2 FY-3 MULSS 积雪产品判识结果

Table1 The identification results of FY-3 MULSS SNC

	FY-3A (像元数/个)		FY-3C (像元数/个)	
	积雪	无雪	积雪	无雪
SD 积雪	113895494	29577637	52146145	14899874
SD 无雪	23002438	122303411	8547094	68796377
准确率	83.20%		85.92%	
召回率	79.38%		77.78%	
误判率	16.80%		14.08%	
漏判率	20.62%		22.22%	
总体精度	81.79%		83.76%	

大气科学学报  
优先出版稿

90 注：将SNC和SD同时有雪的像元数记为a，SNC和SD同时无雪的像元数记为b，SNC有雪而SD无雪的像元数记为

91 c，SNC无雪而SD有雪的像元数记为d。准确率为： $\frac{a}{a+c} \times 100\%$ ，召回率为： $\frac{a}{a+d} \times 100\%$ ，误判率为： $\frac{c}{a+c} \times$

92  $100\%$ ，漏判率为： $\frac{d}{a+d} \times 100\%$ ，总体精度为： $\frac{a+b}{a+b+c+d} \times 100\%$ 。

93 积雪覆盖频率（Snow Cover Frequency, SCF）为每个像元在一段时间内有积雪覆盖的天数除以总天数所得到的结  
94 果，反映积雪覆盖持续时间的总体特征（秦艳等，2018），具体定义如下：

95 
$$SCF_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{if_{snow}(k)}{nm} \times 100\% \quad (1)$$

96  $SCF_k$ 为n年内累计某月像元k的积雪覆盖频率，m为该月份的天数， $if_{snow}(k)=1$ 表示像元被积雪覆盖，  
97  $if_{snow}(k)=0$ 表示像元未被积雪覆盖（钟鼎杰等，2021）。

98 积雪覆盖率（Snow Cover Rate, SCR）为积雪覆盖的像元面积除以研究区总面积所得的结果，具体定义如下：

99 
$$SCR = \sum_{i=1}^n \frac{P_{i(1)}}{n} \quad (2)$$

100  $P_{i(1)}$ 为研究区内第i个为积雪的像元，n为总像元数。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 经验模态分解

积雪覆盖具有季节性特征和明显的周期，这种拥有周期性或季节性的长时间序列是非平稳的，经验模态分解（Empirical Mode Decomposition, EMD）（Huang et al., 1997）是 Huang 博士提出的一种处理非平稳数据的方法。EMD 在处理线性和非线性数据时均有良好的效果，相比于小波分析和傅里叶变换，EMD 基于数据自身驱动，无需基函数，每次分解根据约束条件（极值点的数量和过零点的数量之差小于等于 1；上下包络线的平均值为 0）判断是否为一个内涵模态分量（Intrinsic Mode Functions, IMF）。EMD 分解步骤如下：

- 1) 对原始序列去趋势和标准化处理，得到处理后的数据  $x(t)$ 。
- 2) 找到数据  $x(t)$  所有的上下极值点，用三次样条插值分别拟合上下极值点，得到极大值包络线和极小值包络线。
- 3) 求出上下包络线的平均值  $m(t)$ ，然后令：

$$h(t) = x(t) - m(t) \quad (3)$$

判断  $h(t)$  是否满足约束条件，如果不满足则重复步骤 2 和 3。

- 4) 每得到一阶 IMF 就从原序列中减去它，直到最后剩余部分  $r_n$  是单调序列或者常值序列，此时  $r_n$  为周期很长的波，因此可以将此看作数据的长期趋势（Wu et al., 2011；刘权和姚凤梅，2021）。

这样经过 EMD 就将原始序列  $x(t)$  分解成  $N$  阶 IMF 和一个代表趋势的序列：

$$x(t) = \sum_{i=0}^N IMF_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

#### 1.3.2 基于 EMD 的趋势提取

EMD 分解的  $r_n$  可以被看作数据随时间变化的趋势，但经过标准化处理和 EMD 分解的序列无单位、无物理意义。在量化不同研究区的数据时，无法对分解后的数据类比分析。为了解决这个问题，我们提出一个变量  $EMDTrend(t)$ ，该变量的求解过程如下：

$$R_n(t) = r_n(t) - r_n(1) \quad (5)$$

$$EMDTrend(t) = \frac{R_n(t)}{r_n(1)} \quad (6)$$

该变量代表了数据经分解后，以初始日期数据为基准的随时间的增量，可以表明数据的长期变化趋势。在对不同研究区对比时，以百分比的形式展现趋势变化。

#### 1.3.3 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验是一种非参数统计方法，常用于气象方面的数据变化检验，其特点是不要求数据服从正态分布、不受少数异常值和缺失值的影响（魏凤英，2007）。

对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，构造一个秩序列：

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad r_i = \begin{cases} 1 & x_i > x_j \\ 0 & x_i \leq x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i \quad (7)$$

秩序列  $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。在时间序列随机独立的假定下，计算累计数的期望值  $E(S_k)$  和方差  $var(S_k)$ ，定义统计量：

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (8)$$



$$var(s_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (9)$$

$$UF_k = \frac{S_k - E(s_k)}{\sqrt{var(s_k)}} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$UF_k$ 为标准正态分布，它是按时间序列 $x$ 顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算出的统计量序列，然后按时间序列 $x$ 的逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 计算出逆序列 $UF'_k$ ，使

$$UB_k = -UF'_k, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

若 $UF_k$ 的值大于 0，则表明原样本呈上升趋势，小于 0 则呈下降趋势。当它们超出临界线时，表明上升或下降趋势显著。若 $UB_k$ 与 $UF_k$ 两条曲线出现交叉点，且交叉在临界线之间，它们交叉点对应的时刻便是突变开始的时间。

## 2 结果和讨论

### 2.1 中国典型积雪区积雪覆盖频率 (SCF)

研究表明，中国积雪每年随着冬季的来临和结束呈现“增加-减少”的年际波动 (Huang et al., 2016) (下文中提到的年份均指每年 9 月至次年 5 月，如 2016 年指的是 2016 年 9 月至 2017 年 5 月，以此类推)，图 2 显示了 2010-2019 年中国 SCF 在秋、冬、春季的变化情况。

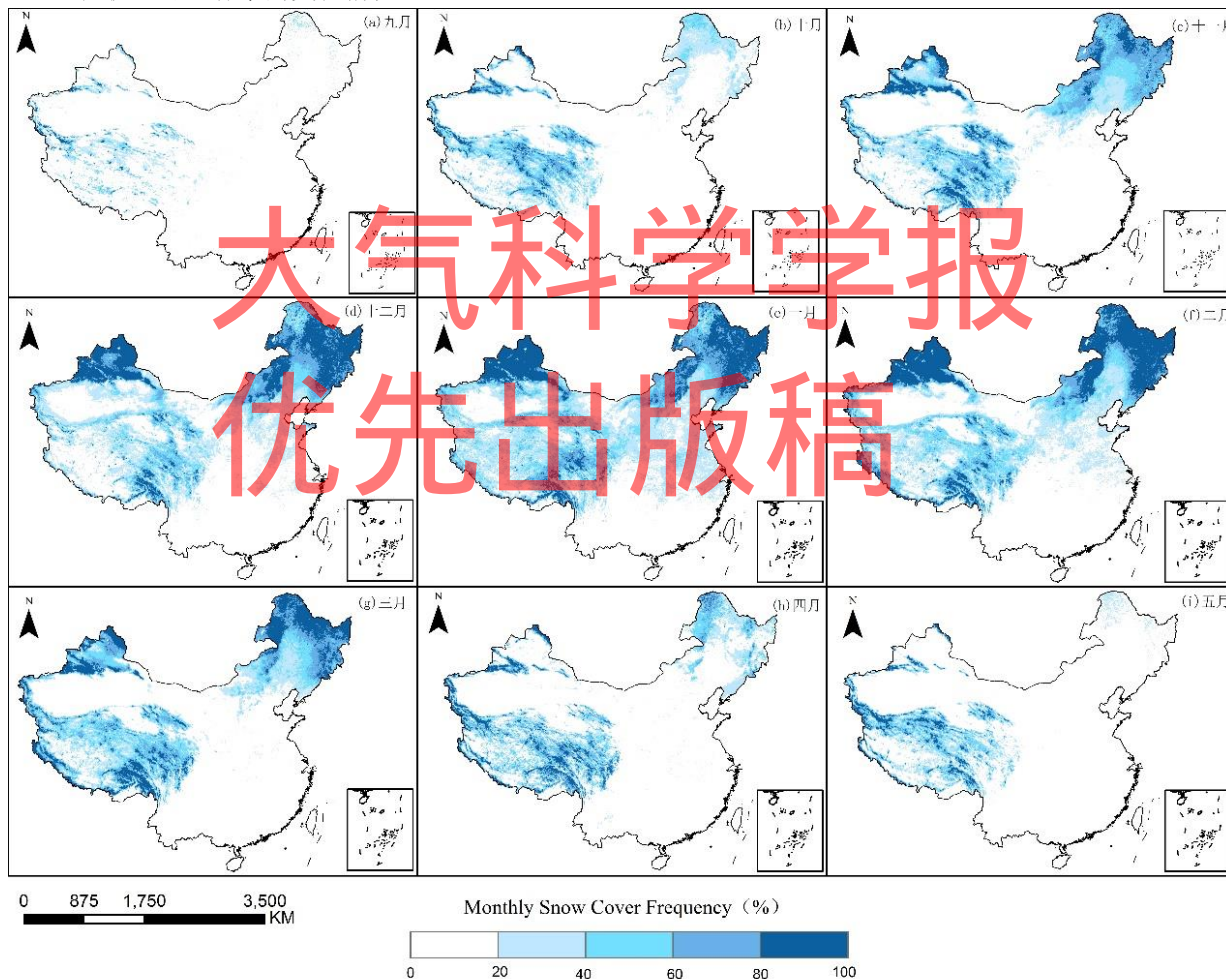


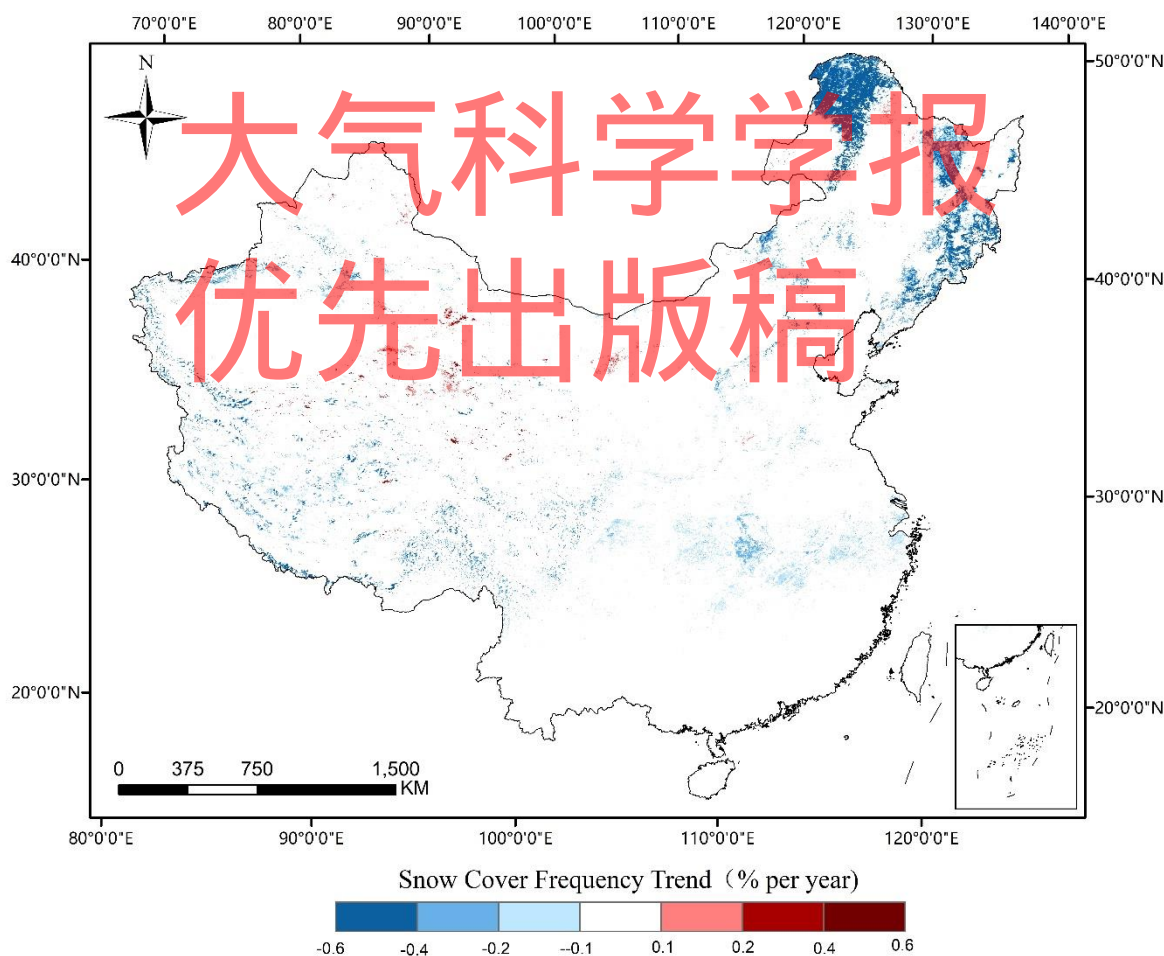
图 2 2010-2019 年秋、冬、春季中国逐月积雪覆盖频率

Fig.2 Monthly snow cover frequency in autumn, winter and spring of 2010-2019 in China

整体来看，典型积雪覆盖区有东北、新疆部分地区、青藏高原，SCF 在空间分布上差异明显 (覃郑婕等，2017)。新疆北部和东北地区的 SCF 季节性差异显著，每年九月该地区积雪偏少，随着冬季的来临，准噶尔盆地和大兴安岭北

151 部 SCF 显著增加。东北地区、新疆北部以及内蒙古东北部二月份的 SCF 可以达到 80%，华北平原和黄河中下游流域  
 152 SCF 达到 40%。进入春季后，黄河流域以南的地区积雪率先消融，SCF 减少至 0，东北和新疆北部四月底 SCF 逐渐减  
 153 少到 20%以下。青藏高原除昆仑山脉外也呈现出单峰的变化情况，昆仑山脉平均海拔为 5500-6000 米，海拔 5600-5900  
 154 米处为雪线（韩芳等，2014），终年不化的积雪覆盖在雪线之上，9 月时 SCF 达到 20%。青藏高原的月最大 SCF 相比  
 155 其他地区滞后一个月，昆仑山脉西部的 SCF 在四月达到 80%。五月份，中国大部分区域 SCF 为 0，青藏高原仍有大量  
 156 积雪，SCF 平均为 40%。青藏高原大部分地区的夏季平均温度在 10 摄氏度以下，高原腹地的年平均气温不足 0 摄氏  
 157 度，降雪落到地面，形成积雪和冰川，气温未达到积雪消融的程度（Leathers and Luff, 1997; 李海生等，2017），海拔  
 158 较高的区域冰川终年不化（Schmidt et al., 2010; Zhou et al., 2016）。尽管如此，青藏高原的积雪相比于世界上其它  
 159 的冰原地区融化的更快，过去的一百年里，青藏高原的升温速度是全世界的 2 倍（Monitoring and Programme, 2011），  
 160 升高了近 1.5 摄氏度，短期内的积雪消融会增加下游江河水量，但随着积雪冰川的减少，部分径流甚至会消失（王顺  
 161 久，2017）。

162 逐月 SCF 变化过程能较好的展现多年平均 SCF 季节性差异，但无法表明长时间 SCF 趋势在空间上的变化。因此  
 163 我们对每个像元使用基于最小二乘法的一元线性回归，对近 10 年的中国 SCF 空间分布进行趋势分析，并进行显著性  
 164 检验。图 3 4 显示了由 2010 年 9 月至 2020 年 1 月期间中国 SCF 通过显著性检验的年变化情况。



165 图 3 2010-2019 年中国 SCF 趋势显著性检验

166 Fig.3 Significance test of China's SCF trend from 2010 to 2019

167 中国 SCF 变化比较复杂，具有显著的空间异质性（陈海山等，2019），近 10 年 SCF 减少出现于大兴安岭、东北  
 168

169 平原、内蒙古中东部、华北平原以及长江中下游平原，西部塔里木盆地周边以及青藏高原西南部也处在减少的状态  
 170 (唐志光等, 2017; Zhao et al., 2007)，大部分地区 SCF 每年减少 0.1%至 0.2%，内蒙古中东部每年减少 0.35%。大  
 171 兴安岭和长白山脉附近处于显著减少( $p < 0.05$ )的现状，每年减少 0.5%。SCF 增加的地区偏少，黄土高原北部、祁连山  
 172 脉每年增加 0.2%，位于高原山地气候的柴达木盆地周边、昆仑山脉、巴颜喀拉山脉以及唐古拉山脉，SCF 每年增加  
 173 0.3%。显著增加( $p < 0.05$ )的地区有小兴安岭、柴达木盆地与祁连山脉交接的区域，每年增加 0.4%，这与 HUANG 等  
 174 (2016) 得出的中国东北部小兴安岭的积雪天数显著增加、青藏高原减少的研究结论十分吻合。总体上看，中国 SCF  
 175 趋势由东向西处于“减少-增加-减少”的现状，增加的多为海拔较高地形复杂的区域，大部分区域处于减少的状态 (陈  
 176 文倩等, 2018)，尤其我国东北部减少的非常明显。东北是中国纬度最高的地区，SCF 却逐年减少，具体原因后续需  
 177 结合气温、降水等因素进一步研究。

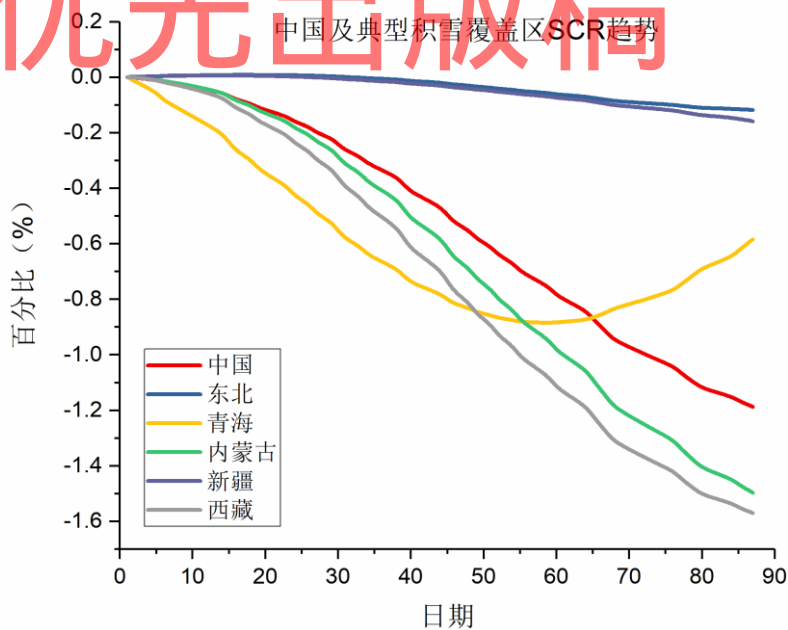
178 **2.2 积雪覆盖率**

179 表 3 中国典型积雪覆盖区 SCR 变化

180 Table 3 SCR changes in Typical snow cover areas in China

Region	Annual Average SCR (%)			Linear trend and Significance test		
	2010	2019	10years	Linear trend(%/year)	P value	Significance test
China	16.5	13.2	14.5	-0.18	0.94	Fail
Dongbei	36.2	24.1	31.4	-0.80	0.66	Fail
Qinghai	16.4	17.6	19.0	-0.04	0.82	Fail
Neimenggu	24.3	18.7	20.8	-0.54	0.75	Fail
Xinjiang	17.5	16.0	17.8	-0.03	0.04	Pass
Xizang	17.2	16.7	18.2	-0.06	0.60	Fail

大气科学学报  
 优先出版稿



182 图 4 中国典型积雪覆盖区 SCR 趋势

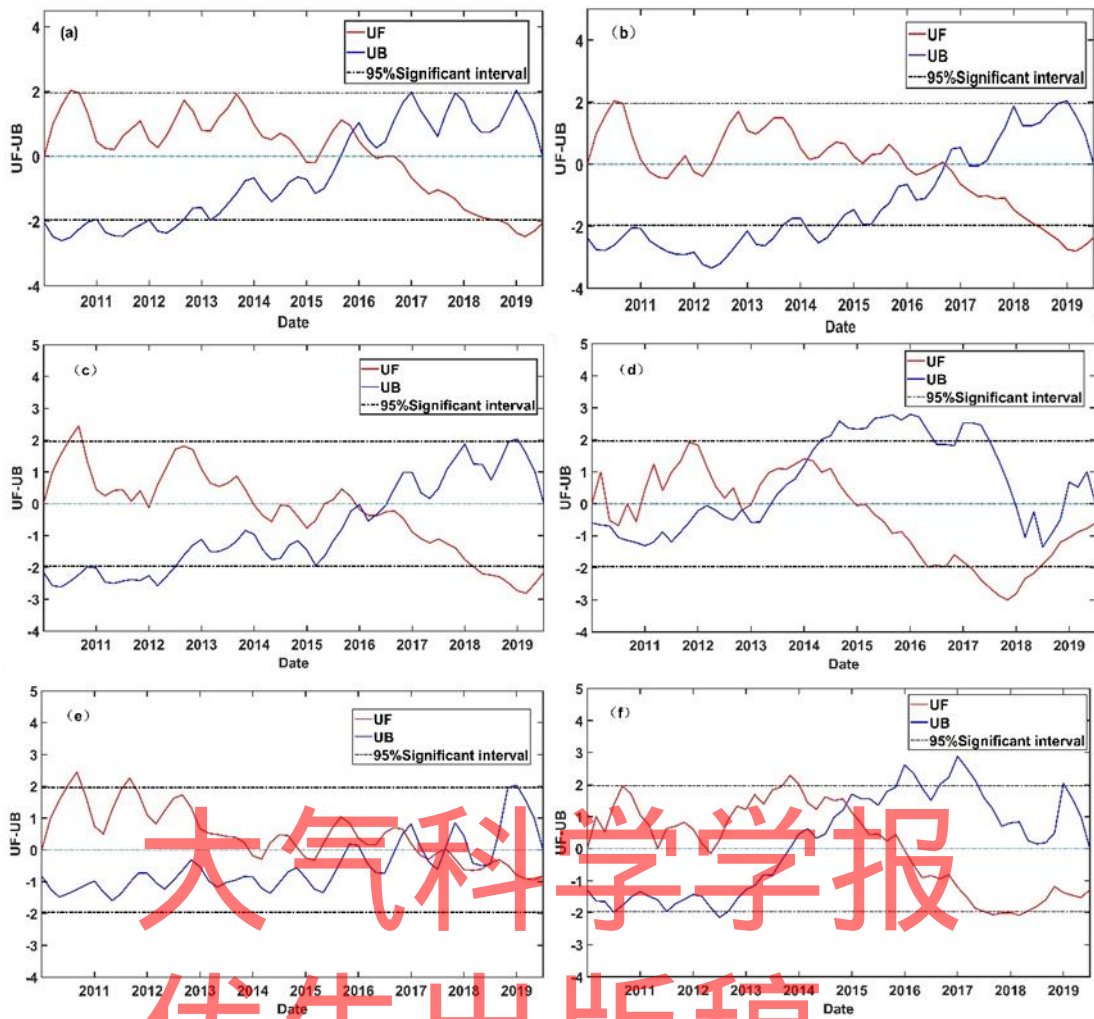
183 Fig.4 SCR trend in typical snow covered areas in China



186 逐月 SCF 和 SCF 趋势从季节性和空间差异两个方面说明了近 10 年中国 SCF 的演变情况。为了更深层次的对中国  
187 领土内积雪面积的变化进行分析，由 2010 年 10 月至 2020 年 1 月共 86 个月份的风云 SNC 产品，得出每月平均 SCR。  
188 鉴于对 SCF 分析时发现部分地区变化显著，如小兴安岭、东北平原、青藏高原、祁连山脉等，因此我们选取了东北、  
189 青海、内蒙古、新疆、西藏五个省份或地区对比研究。在对各地区的 SCR 进行线性回归前，使用差分法去除 SCR 的  
190 季节性周期，由表 2 的 SCR 线性趋势可以看到只有东北地区的 SCR 趋势通过了 0.05 显著性检验 ( $P < 0.05$ )，每年减  
191 少 0.03%。由此看出线性回归不能很好的拟合周期性数据，因此我们使用 EMD 提取 SCR 趋势，由图 4 分解得到的  
192 *EMDTrend* 趋势可以看到，内蒙古、西藏与中国整体的趋势均处于稳定缓慢减少的过程，内蒙古和西藏近 10 年 SCR  
193 下降了 1.5%，中国整体下降了 1.2%。青海的 SCR 在 *EMDTrend* 趋势中有一个“减少-增加”的波动，SCR 至 2016 年下  
194 降了 0.9%，随后开始增加，与 2009 年相比，最终下降了 0.6%。经过 EMD 分解的数据最后得到的是常值序列或单调  
195 序列，青海地区的 SCR 在提取四阶 *IMF* 后，不满足上下包络线均值为 0 的条件，因此我们选取第五阶 *IMF* 作为青海的  
196 *EMDTrend* 趋势。新疆和东北的 *EMDTrend* 趋势中 SCR 下降缓慢，10 年只减少了 0.2%，东北地区 2010 年-2012 年的  
197 SCR 有微小的增加。东北的 SCF 和 SCR 下降趋势基本吻合，但 SCF 和 SCR 有没有必然的联系并不能确定。SCR 表明  
198 的是积雪覆盖面积的变化情况，SCF 趋势由地表温度和地形多种因素影响，两者之间的相关性有待进一步考证<sup>错误!未找到引  
199 用源。</sup>。对东北近 10 年的 SCR 数据线性回归时，剔除周期项的影响后效果仍不好，*P* 值为 0.66，东北处于高纬度地区，  
200 每年冬季降雪非常丰富，有显著的季节性特征，*EMDTrend* 是 SCR 随着时间变化的非线性趋势，我们认为非线性趋势  
201 更具有代表性。

# 大气科学学报

## 优先出版稿



(a)中国 (b)东北 (c)内蒙古 (d)青海 (e)新疆 (f)西藏

图5 中国典型积雪覆盖区 MK 突变检验

Fig.5 Mann-Kendall test in typical snow covered areas in China

EMDTrend代表了SCR的长期变化趋势，为了进一步探究SCR在近10年的详细变化的情况，对SCR进行Mann-Kendall检验，结果如图6所示。中国、新疆以及西藏的SCR总体趋势都是先上升后下降，但发生转变的年份不同。中国2009年到2015年期间SCR呈上升的趋势，随后一直下降。新疆在2017年10月由上升转为下降，西藏则在2016年3月开始下降。东北、内蒙古和青海处于“上升-下降-上升”的波动中。东北地区在2011年10月至2012年10月以及2016年3月至2020年有两个下降的时期，在2018年底至2020年1月SCR显著下降。内蒙古在2010年10月至2014年1月SCR处于上升的趋势，随后开始下降，但在2015年11月至2016年6月有一个短暂的上升期，2018年10月至2020年1月显著下降。青海省在2011年前有一个短暂的下降期，随后开始上升，2015年3月继续下降，2017年以及2018年SCR显著下降。综上所述，中国典型积雪覆盖区SCR总体上均是先上升后下降的变化情况，发生转变的年份均在2016年。

### 3 结论

本研究基于FY-3号气象卫星的MULSS积雪产品数据集，在对原始数据集定位、拼接、裁剪、提取积雪信息的基础上，从SCF和SCR两个方面对中国近10年的积雪时空动态进行了比较深入的研究。对SCF从季节性演变和长时间

218 趋势两个方面在空间上的特征进行了分析。在 SCR 方面,本研究提出了一个基于 EMD 的  $EMDTrend$  变量来衡量 SCR  
219 的长期趋势,对中国典型积雪显著的五个地区使用了 Mann-Kendall 检验,来探究 SCR 的详细变化状况。

220 通过上述研究,主要结论如下:

221 (1) 中国的 SCF 具有显著的季节性特征,每年九月至次年五月,呈现先增加后减少的特点,这与大部分学者研究  
222 成果一致。新疆北部、东北地区、内蒙古中东部、青藏高原在每年 2 月份达到当年最大 SCF。春季开始,黄河流域积  
223 雪率先开始消融,除青藏高原外的其他地区在五月时,积雪基本消融,青藏高原的积雪因气温、地形等因素仍有保留。  
224 由东向西,我国 SCF 趋势处于“减少-增加-减少”的现状,增加的多为海拔较高地形复杂的区域(Zhao et al., 2007),  
225 如小兴安岭、柴达木盆地与祁连山脉交接的区域。东北地区、内蒙古北部、华北平原以及长江中下游流域处于减少的  
226 状态,尤其我国东北部减少的非常明显。希爽和张志富(2013)也指出东北地区的积雪天数在减少,造成东北 SCF 减少  
227 的趋势的原因,待基于 FY 系列精度更高的再处理资料发布后结合气温、地表温度等多种因素进一步分析。

228 (2) 对典型积雪覆盖区的 SCR 研究表明,内蒙古、西藏的 SCR 有长期下降的趋势,近 10 年分别下降了 1.6%、  
229 1.5%,下降的趋势逐渐变缓。青海在经历 6 年的下降后,有一个增加的趋势,至 2020 年最终下降了 0.6%。东北和新  
230 疆的 SCR 只下降了 0.2%,长期趋势比较稳定。中国典型积雪覆盖区的 SCR 在 2016 年至 2017 年均发生由增加到减少  
231 转变,造成变化的原因可能是副热带高压异常,影响了高空的水汽输送,对气温和降雪的变化造成了一定作用,最终  
232 导致 SCR 改变(余志豪和李海盛,2000;张人禾等,2016)。全球 SCR 减少已成为大多数学者的共识(希爽和张志  
233 富,2013;孙燕华等,2014),影响 SCR 减少的因素包括气温降水、地形、海拔、植被等(杨林,2019),史建桥  
234 (2014)指出风速也会影响积雪面积变化,这对我们后续研究工作有很大的启示。

235 本研究分析了我国积雪的时空变化动态,对掌握中国典型积雪覆盖区的时空动态变化有积极作用,后续将结合气  
236 象数据对造成 SCF 和 SCR 显著变化的原因进行探讨分析。

237  
238 致谢:中国气象局国家卫星气象中心提供了 FY-3 气象卫星的积雪产品在线下载服务。

## 240 参考文献(References)

- 241 Brown R. D.,Robinson D. A.,2011.Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922-2010 including an assessment of  
242 uncertainty[J].The Cryosphere,5(12):219-229.
- 243 陈多,达珍,拉巴卓玛,2019.西藏高原积雪覆盖空间分布及地形影响[J].地球信息科学学报,19(05):635-645. Chu D, Da Z, Laba Z M,2017.Spatio-  
244 temporal distribution patterns of snow cover on the Tibet and orographic impacts[J].Journal of Geo-information Science,19(5):635-645.(in Chinese).
- 245 陈海山,罗江珊,韩方红,2009.中国北方暴雪的年代际变化及其与大气环流和北极海冰的联系[J].大气科学学报, v.42;No.188(01):68-77. Chen H  
246 S,Luo J S,Han F H,2009.Interdecadal variation of heavy snowfall in northern China and its linkages with atmospheric circulation and Arctic sea  
247 ice[J].Trans Atmos Sci, v.42;No.188(01):68-77.(in Chinese).
- 248 陈文倩,丁建丽,马勇刚,等,2018.亚洲中部干旱区积雪时空变异遥感分析[J].水科学进展,29(1):11-19. Chen W Q,Ding J L,Ma Y G,et al.,2018.  
249 Spatial-temporal variability of snow cover in arid regions of Central Asia[J]. Advances in Water Science,29(1): 11-19.(in Chinese).
- 250 Déry,Stephen J,Brown R D,2007.Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback[J]. Geophysical  
251 Research Letters,34(22):60-64.
- 252 丁锋,孙照渤,刘敬乐,2009.青藏高原冬春雪深分布与中国夏季降水的关系[J].大气科学学报, v.32;No.133(06):783-791. Ding F,Sun Z B,Liu J  
253 L,2009.Correlations of Snow Depth over the Tibetan Plateau in Winter and Spring with Precipitation in Summer over China[J].Trans Atmos  
254 Sci.v.32;No.133(06):783-791.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2009.06.012.(in Chinese).
- 255 范天锡,2002.风云三号气象卫星的特点和作用[J].气象科技,(06):321-327. Fan T X.Characteristics and functions of FY-3 meteorological  
256 satellite[J].Meteorological Science and Technology,(06):321-327.(in Chinese).

257 方如康,1995.中国的地形[M].商务印书馆. Fang R K,1995.Topography of China[M].The Commercial Press.(in Chinese).

258 符淙斌,王强,1992.气候突变的定义和检测方法[J].大气科学,(04):482-493. Fu C B,Wang Q,1992.The Definition and Detection of the Abrupt

259 Climatic Change[J].Chin J Atmos Sci,(04):482-493.(in Chinese).

260 谷松岩,卢乃猛,吴琼,等,2022.FY-3 气象卫星降水探测能力分析与发展[J].海洋气象学报,42(02):1-10. Gu S Y,Lu N M,Wu Q,et

261 al.,2022.Analysis and prospect of precipitation detection capability of FY-3 meteorological satellites[J].Journal Of Marine Meteorology,42(02):1-

262 10.(in Chinese).

263 韩芳,张百平,谭靖,等,2014.山体基面高度对青藏高原及其周边地区雪线空间分布的影响[J].地理研究,33(01):23-30. Han F,Zhang B P,Tan J,

264 et al.,2014.The effect of mountain basal elevation on the distribution of snowline with different mountain basal elevations in Tibetan Plateau and

265 its surrounding areas[J].Geographical Research,33(1):23-30.(in Chinese).

266 Huang N E,Shen Z, Long S R,et al.,1998.The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series

267 analysis[J].Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences,454(1971):903-995.

268 Huang X D,Deng J,Ma X F,et al.,2016.Spatiotemporal dynamics of snow cover based on multi-source remote sensing data in China.The

269 Cryosphere,10(5),2453-2463.

270 Huang X D,Liu, C.,Wang, Y.,et al.,2019.Snow cover variations across China from 1952–2012, The Cryosphere Discuss.[preprint],

271 <https://doi.org/10.5194/tc-2019-152>,2019.

272 郝祥云,朱仲元,张圣微,等,2018.近 35a 锡林河流域积雪变化及其对气候的响应[J].干旱区研究,35(02):444-450. Hao X Y,Zhu Z Y,Zhang S

273 W,et al.,2018.Variation of Snow Cover and Its Response to Climate Change in the Xilin River Basin in Recent 35 Years[J].Arid Zone

274 Research,35(02):444-450.(in Chinese).

275 Leathers D J,Luff B L,1997.Characteristics of snow cover duration across the northeast United States of America[J].International Journal of

276 Climatology,17(14):1535-1547.

277 Lemke P,2007.Observations in snow, ice and frozen ground[J].Damien Cardinal:p4gs.18-19.

278 李栋梁,王春学,2011.积雪分布及其对中国气候影响的研究进展[J].大气科学学报,34(05):627-636. Li D L,Wang C X,2011.Research progress of

279 snow cover and its influence on China climate[J].Trans Atmos Sci,34(05):627-636.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.2011.05.013.(in Chinese).

280 李海生,李广,刘贤德,等,2017.祁连山不同海拔梯度下青海云杉林积雪消融过程研究[J].西北林学院学报,32(04):1-6. Li H S,Li G,Liu X D,et

281 al.,2017.Snowmelt Process in Picea crassifolia Forest Land at Different Elevations in Qilian Mountains[J].Journal of Northwest Forestry

282 University,32(04):1-6.(in Chinese).

283 刘权,姚凤梅,2021.基于快速多维经验模态分解的北半球冬季近地表气温和积雪覆盖频率变化趋势提取[J].中国科学院大学学报. Liu Q,Yao

284 F M,2021.Untangling of northern midaltitude near surface air temperature and snow cover frequency trends with multidimensional ensemble

285 empirical mode decomposition[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences.doi:10. 7523/j.ucas. 2021. 0060.(in Chinese).

286 Monitoring T A,Programme A,2011.Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere.[J]. Arctic Monitoring

287 and Assessment Programme, AMAP.

288 闵文彬,彭骏,李施颖,2021.青藏高原 FY-3C 卫星积雪产品评估[J].国土资源遥感,33(01):145-151. Min W B,Pen J,Li S Y,2021.The evaluation of

289 FY-3C snow products in the Tibetan Plateau[J].Remote Sensing for Land and Resources,33(1):145 -151.(in Chinese).

290 秦艳,丁建丽,赵求东,等,2018.2001-2015 年天山山区积雪时空变化及其与温度和降水的关系[J].冰川冻土,40(02):249-260. Qin Y,Ding J L,Zhao

291 Q D,et al.,2018.Spatial-temporal variation of snow cover in the Tianshan Mountains from 2001 to 2015,and its relation to temperature and

292 precipitation[J].Journal of Glaciology and Geocryology,40(2):249–260.(in Chinese).

293 覃郑婕,侯书贵,王叶堂,等,2017.青藏高原冬季积雪时空变化特征及其与北极涛动的关系[J].地理研究,36(04):743-754. Qin Z J,Hou S G,Wang

294 Y T,et al.,2017.Spatio-temporal variability of winter snow cover over the Tibetan Plateau and its relation to Arctic Oscillation[J].Geographical

295 Research,2017,36(04):743-754.(in Chinese).

296 Schmidt S,Weber B,Winiger M,2010.Analyses of seasonal snow disappearance in an alpine valley from micro- to meso-scale (Loetschental,

297 Switzerland)[J].Hydrological Processes,23(7):1041-1051.

298 史建桥,2014.基于遥感和 GIS 的青藏高原积雪时空变化及影响因子分析[D].南京信息工程大学.

299 孙燕华,黄晓东,王玮,等,2014.2003-2010 年青藏高原积雪及雪水当量的时空变化[J].冰川冻土,36(06):1337-1344. Sun Y H,Huang X D,Wang

300 Wei,et al.,2014.Spatio-temporal changes of snow cover and snow water equivalent in the Tibetan Plateau during 2003-2010[J].Journal of

301 Glaciology and Geocryology,36(6):1337-1344.(in Chinese).



- 唐志光, 王建, 王欣, 等, 2017. 基于 MODIS 数据的青藏高原积雪日数提取与时空变化分析[J]. 山地学报, 35(03):412-419. Tang Z G, Wang J, Wang X, et al., 2017. Extraction and Spatiotemporal Analysis of Snow Covered Days over Tibetan Plateau Based on MODIS Data[J]. Mountain Research, (03):412-419. (in Chinese).
- 魏凤英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版)[M]. 气象出版社. Weng F Y, 2007. Modern climate statistical diagnosis and Prediction Technology (Second Edition) [M]. China Meteorological Press. (in Chinese).
- 吴彦, 2005. 季节性雪被覆盖对植物群落的影响[J]. 山地学报, (05):40-46. Wu Y, 2005. Effects of Seasonal Snow Cover on Plant Community[J]. Mountain Research, 2005(05):40-46. (in Chinese).
- Wu Z H, Huang N E, Wallace J M, et al. On the time-varying trend in global-mean surface temperature[J]. Climate Dynamics, 2011, 37(3-4):759-773.
- 王顺久, 2017. 青藏高原积雪变化及其对中国水资源系统影响研究进展[J]. 高原气象, 36(05):1153-1164. Wang S J, 2017. Progresses in Variability of Snow Cover over the Qinghai-Tibetan Plateau and Its Impact on Water Resources in China[J]. Plateau Meteorology, 36(5):1153-1164. (in Chinese).
- 希爽, 张志富, 2013. 中国近 50a 积雪变化时空特征[J]. 干旱气象, 31(03):451-456. Xi S, Zhang Z F, 2013. Effects of South Asia high and western Pacific subtropical high on the summer precipitation anomalies over Southwest China[J]. Journal of Arid Meteorology, 31(03):451-456. (in Chinese).
- 杨军, 董超华, 2011. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用[M]. 科学出版社. Yang J, Dong C H, 2011. Business products and applications of a new generation of FY Polar Orbiting Meteorological Satellites[M]. Science Press. (in Chinese).
- 杨军, 咸迪, 唐世浩, 2018. 风云系列气象卫星最新进展及应用[J]. 卫星应用, 11:8-14. Yang J, Xian D, Tang S H, 2018. The latest development and application of Fengyun series meteorological satellites[J]. Satellite Application, 11:8-14. (in Chinese).
- 杨林, 马秀枝, 李长生, 等, 2019. 积雪时空变化规律及其影响因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 34(6):96-102. Yang L, Ma X Z, Li C S, et al., 2019. Research Progress in Spatiotemporal Variation of Snow Cover and the Influencing Factors[J]. Journal of Northwest Forestry University, 34(6):96-102. (in Chinese).
- 姚檀栋, 陈发虎, 崔鹏, 等, 2017. 从青藏高原到第三极和泛第三极[J]. 中国科学院院刊, 32(09):924-931. Yao T D, Chen F H, Cui P, et al., 2017. From Tibetan Plateau to Third Pole and Pan-Third Pole[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 32(9):924-931. (in Chinese).
- 余志豪, 李海盛, 2000. 含雪——气相互作用的大气环流模式及其青藏高原积雪模拟[J]. 气象科学, (03):289-297. Yu Z H, Li H S, 2000. A Gcm Including The Interaction Effects Between Snow And Atmosphere And Its Simulation Of Snow Over Plateau[J]. Scientia Meteorologica Sinica, (03):289-297. (in Chinese).
- 张佳华, 吴杨, 姚凤梅, 2008. 卫星遥感藏北积雪分布及影响因子分析[J]. 地球物理学报, (04):1013-1021. Zhang J H, Wu Y, Yao F M, 2008. Study on the snow distribution and influencing factors in Northern Tibet based on remote sensing information[J]. Chinese Journal of Geophysics. 51(4):1013-1021. (in Chinese).
- 张帅, 师春香, 梁晓, 等, 2018. 风云三号积雪覆盖产品评估[J]. 遥感技术与应用, 33(01):35-46. Zhang S, Shi C X, Liang X, et al., 2018. Assessment of FY-3 Snow Cover Product[J]. Remote Sensing Technology and Application, 33(01):35-46. (in Chinese).
- 张人禾, 张若楠, 左志燕, 2016. 中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响[J]. 应用气象学报, 27(05):513-526. Zhang R H, Zhang R N, Zuo Z Y, 2016. An overview of wintertime snow cover characteristics over China and the impact of Eurasian snow cover on Chinese climate[J]. J Appl Meteor Sci, 27(5):513-526. (in Chinese).
- Zhao X P, Li X, Vincent V. Salomonson., 2007. MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau[J]. Geophysical Research Letters, 34(6):137-161.
- 郑景云, 尹云鹤, 李炳元, 2010. 中国气候区划新方案[J]. 地理学报, 65(01):3-12. Zheng J Y, Yin Y H, Li B Y, 2010. A New Scheme for Climate Regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 65(1):3-12. (in Chinese).
- 钟鼎杰, 孙梦鑫, 张岳, 等, 2021. 2001-2020 年川西高原积雪时空变化及影响因素分析研究[J]. 干旱区资源与环境, 35(11):111-118. Zhong D J, Sun M X, Zhang Y, et al., 2021. Spatio-temporal variation and influencing factors of snow cover in West Sichuan plateau from 2001 to 2020[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 35(11):111-118. (in Chinese).
- Zhou H, Aizen E, Aizen V, 2016. Seasonal snow cover regime and historical change in Central Asia from 1986 to 2008[J]. Global & Planetary Change, 148(JAN.):192-216.

## Study on spatiotemporal dynamics of snow cover based on FY-3 meteorological satellite

## in typical regions of China

LI Liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Jiahua<sup>2</sup>, SUN Zhongtai<sup>1</sup>, LIU Chuan<sup>3</sup>, BAI Yun<sup>1</sup>, ZHANG Sha<sup>1</sup>, YANG Shanshan<sup>1</sup>, WANG Xiaopeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Remote Sensing Information and Digital Earth, College of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, 266071, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100094, China

<sup>3</sup>Max-Planck-Institute for Meteorology, 20146, Hamburg, Germany

**Abstract** As an important part of the cryosphere, snow cover has an important impact on atmospheric circulation and the hydrologic cycle. 98% of the seasonal snow in the world is located in the northern hemisphere. Eurasia continent is the main snow area in the Northern Hemisphere. China has a vast territory with nearly 50 degrees latitude across from north to south, and snow is widely distributed, which is important for studying spatial and temporal dynamics of snow cover. This paper proposes a trend extraction method based on empirical mode decomposition (EMD) based on the Snow Cover (SNC) data of FY-3 meteorological satellite and discusses the temporal and spatial characteristics and variation trends of Snow Cover in China during the past decade (2010-2019). The results show that: 1) China's Snow Cover Frequency (SCF) has significant seasonal characteristics, which increases first and then decreases, and reaches the maximum SCF in February and March each year. The inter-annual SCF in northeast China has a significant trend of decline, but there is little change in other regions. 2) Snow Cover Rate (SCR) in Inner Mongolia and Xinjiang has decreased by 1.6% and 1.5% in the last decade, respectively. SCR in other areas has not changed significantly. SCR in main snow covered areas changed from increase to decrease in 2016. This study is of great significance to understand the spatial and temporal dynamics of typical snow cover areas in China and to further explore the relationship between snow cover and air temperature, precipitation, and other influential factors. At the same time, relevant results are obtained from the data of the Wind Cloud Meteorological Satellite, and the application of the observation data of the FY-3 satellite is strengthened.

**Keywords** FY-3 meteorological satellite; Snow coverage rate; Snow cover frequency; Empirical mode decomposition; Spatiotemporal dynamics