

# 近40a青藏高原冬季极端降雪的变化特征分析

刘 通, 施红霞\*, 杨文豪

成都信息工程大学, 大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室/气候与环境变化联合实验室, 四川成都

Email: \*shx@cuit.edu.cn

收稿日期: 2021年8月24日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

## 摘 要

在全球变暖的背景下对青藏高原(简称高原)冬季极端降雪的时空变化特征进行研究, 将对高原及周边地区政府部门在水资源的管控和利用方面有一定的参考意义。本文利用高原40个气象台站观测的1980~2019年冬季的逐日降水数据, 运用百分位阈值法确定冬季极端降雪量阈值, 进一步对极端降雪量、极端降雪频次、极端降雪强度以及极端降雪对降雪的贡献率(极端降雪量与总降雪量之比)的时空变化特征进行分析。结果表明: 1) 高原冬季极端降雪量阈值、极端降雪量及极端降雪强度均呈现自东南向西北递减的空间分布特征, 极端降雪频次主要在高原中东部存在大值区, 其他地区较小, 且极端降雪频次东南部大值区范围大于其他极端降雪指数; 2) 1980~2019年高原冬季极端降雪量、极端降雪频次呈现显著增加的趋势, 极端降雪强度增加趋势不显著。极端降雪量与极端降雪频次、强度的关系表明极端降雪的增加主要是与极端降雪频次的增加有关; 3) 高原冬季极端降雪对总降雪的贡献率在空间上呈现自西南向东北递减的分布特征, 时间上, 贡献率呈现增加的趋势。总的来说, 1980~2019年高原冬季极端降雪呈显著增加趋势, 在总降雪中的占比也是增加的, 这主要是与极端降雪事件的增多有关。

## 关键词

青藏高原, 极端降雪, 时空变化

## Variation Characteristics of Extreme Snowfall in Winter over the Tibetan Plateau in Recent 40 Years

Tong Liu, Hongxia Shi\*, Wenhao Yang

School of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province/Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

\*通讯作者。

## Abstract

Under the background of global warming, studying the temporal and spatial variation characteristics of extreme snowfall in winter over the Tibetan Plateau (TP) will be of realistic reference to the management and utilization of water resources by government departments on the TP and its surrounding areas. In this paper, based on the daily precipitation data of 40 stations on the TP from 1980 to 2019, the percentile threshold method is used to determine the winter extreme snowfall threshold of each station, furthermore, the temporal and spatial variation characteristics of extreme snowfall, extreme snowfall frequency, extreme snowfall intensity and contribution rate of extreme snowfall to total snowfall (the ratio of extreme snowfall to total snowfall) are discussed. The results show that: 1) Extreme snowfall threshold, extreme snowfall and extreme snowfall intensity decreased from southeast to northwest of the TP, however, extreme snowfall frequency had larger value in the middle east of the TP, and with little value in other areas, and the range of large value of extreme snowfall frequency was larger than that of the other extreme snowfall indexes; 2) Both extreme snowfall amount and frequency indicated significantly increasing trend in winter over the TP during 1980~2019, while extreme snowfall intensity had an insignificantly rising trend. The increase of extreme snowfall is mainly related to the increase of extreme snowfall frequency; 3) The contribution rate of extreme snowfall to the total snowfall decreased from southern to northeast of the TP, and contribution rate presented an increasing trend during 1980~2019. Overall, both the extreme snowfall and contribution rate had an increasing trend during 1980~2019, which is mainly related to the increase of extreme snowfall events.

## Keywords

Tibetan Plateau, Extreme Snowfall, Temporal and Spatial Variation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

IPCC 第五次气候变化评估报告指出, 1880 年至 2012 年全球平均地表温度升高了 0.85℃, 而 1951 年至 2012 年的升温速率为 0.12℃/10a, 几乎是自 1880 年升温速率的两倍, 主要是由于一系列的人为因素, 包括人口剧增、温室气体的大量排放、对海洋以及土地等自然生态环境的严重破坏等。进一步, 大量地球系统模式预估到 21 世纪后期全球将继续变暖 1.0℃~3.9℃ [1]。全球变暖会对自然环境带来一系列的重大影响, 不仅限于气温升高直接造成的冰川融化、极地地区冰盖消融而导致的海平面不断上升等自然环境的变化, 全球各地区的极端天气与气候事件的频发也与此有着十分复杂的联系。全球气候变化导致极端天气气候事件越来越频繁地发生, 这给世界各国带来了越来越严重的生命和财产损失[2]。由此, 极端事件相关的问题已成为亟待研究的重要内容。

青藏高原(下称高原)位于亚洲中部, 平均海拔 4000 m 以上, 是世界上海拔最高、地形最为复杂的高

原, 被称为“世界屋脊”和“地球第三极”[3]。由于高原特殊的地理环境和气候条件, 其上分布着大范围的积雪、冻土、冰川等冰冻圈分量, 使得高原成为众多国内外大江大河的发源地, 包括我国的长江、黄河, 雅鲁藏布江等, 因而高原冰雪储存量对于维持季节性淡水资源至关重要[4]。在全球气候变暖的背景下, 高原已经历了显著的变暖和增湿的过程[5]。但由于气温的上升, 一方面使得更多的降水是以降雨的形式落到地面, 另一方面, 更多的降雪落到地面之后难以积累[6], 这从根本上影响了高原积雪、冰川等的形成, 进而对高原周边地区水资源产生一定的影响。因此, 研究高原降雪的变化对高原及周边地区水资源的管理和利用有着重要的意义。

近年来, 对高原降雪方面也展开了较多的研究工作。除多等研究发现高原降雪日数呈明显减少趋势, 且呈双峰型分布特点[7]。朱晓凡等对青海省降雪初始终止日期和降水的时空变化特征进行研究, 发现大部分地区降雪初始日期都在逐渐推迟, 而降雪终止日期有所提前[8]。胡豪然等[9], 蒋文轩等[10]发现高原东部降雪存在较大的空间差异性, 降雪表现出明显的年代际变化特征。刘义花等[11]研究表明1961~2018年青海高原地区降雪量呈明显减少的趋势, 速率可达3.7 mm/10a。可见, 在全球气候变暖的背景下, 高原降雪已呈现显著的响应。全球气候变暖使得极端事件不断增加, 导致各类自然灾害频发, 风险急增[12]。有众多研究表明, 在我国东北、西北等地区极端降雪均呈现显著增加的趋势[13][14][15], 但高原地区目前关于极端降雪方面的研究较少。因此, 本论文在前人研究的基础上, 对高原极端降雪的时空变化特征进行研究, 这将为高原地区气候变化预测、灾害风险研究以及水资源管控和利用方面提供参考价值。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料介绍

依据数据的连续性、时段、台站迁移等情况, 选取了1980~2019年冬季(12月, 1月, 2月) 40个台站的气温、降水的日值数据(台站分布如图1), 数据来源中国国家气象信息中心(<http://www.nmic.cn/>), 该气象数据经过了严格的质量控制, 数据完整性和准确性良好。

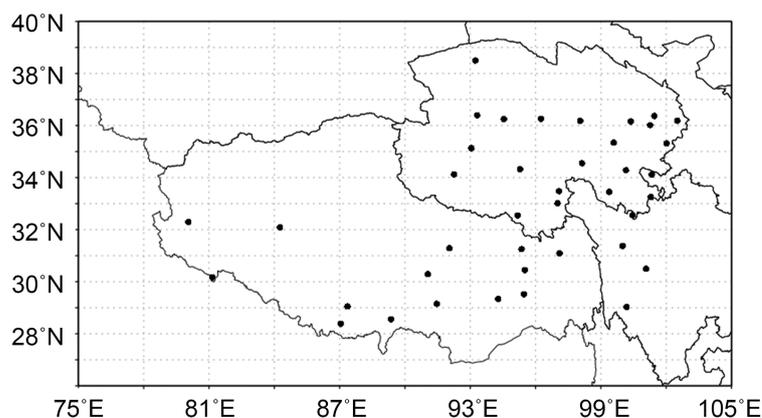


Figure 1. The distribution of stations over the Tibetan Plateau  
图1. 青藏高原气象台站分布

### 2.2. 研究方法

由于高原降雪的空间差异性较大, 为了充分考虑各区域之间的差异性, 有效的消除这种局限性[16], 本文使用百分位阈值法对高原极端降雪进行定义。

1) 百分位阈值法

将各站点冬季降雪的日值数据按升序排列，取累计百分比达到 95%的降雪量作为该站点的极端降雪量阈值，超过该阈值的降雪事件即为极端降雪事件。并定义各极端降雪指数，详见表 1。

Table 1. The definition of extreme snowfall index

表 1. 各极端降雪指数定义

极端降雪指数	定义
极端降雪量	各站点超过该站点极端降雪量阈值的降雪事件的降雪量之和
极端降雪频次	各站点超过该站点极端降雪量阈值的降雪事件的次数
极端降雪强度	极端降雪量与极端降雪频次的比值
极端降雪贡献率	极端降雪量占总降雪量的比例

2) 本文还使用了线性回归、相关系数等统计方法，计算公式可参考[17]。

3. 青藏高原冬季极端降雪的时空变化特征

3.1. 青藏高原冬季极端降雪阈值的空间分布

图 2 给出了高原冬季极端降雪量阈值的空间分布。可以看出，高原冬季极端降雪量阈值存在着较为明显的空间差异性，整体呈自东南向西北递减的分布特征。冬季极端降雪量阈值介于 1.0~10.5 mm 之间，最小值为 1.0 mm 左右，位于青海省北部的柴达木盆地，最大值约为 10 mm 左右，位于高原西南部边缘，在高原东南部也存在一大值中心。总的来说，在山脉南麓的迎风坡，降水量明显大于高原其他地区，冬季极端降雪量阈值也较大。

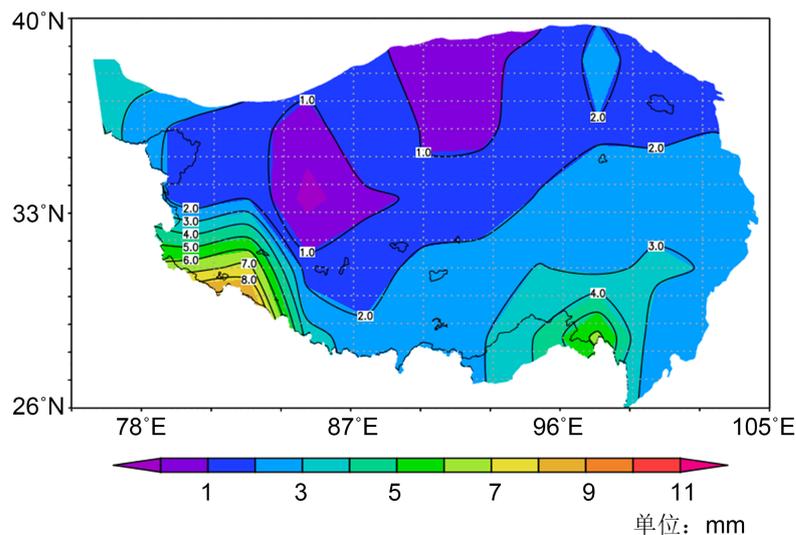


Figure 2. The spatial distribution of threshold of extreme snowfall in winter over the Tibetan Plateau

图 2. 青藏高原冬季极端降雪量阈值空间分布

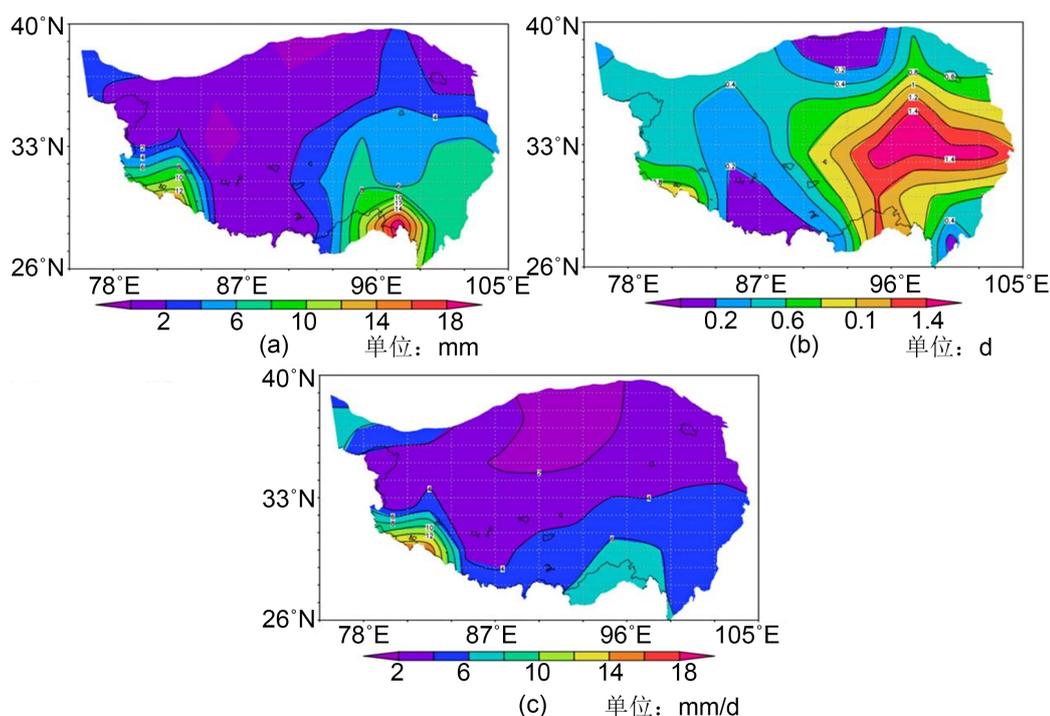
3.2. 青藏高原冬季极端降雪量、频次、强度的空间分布

图 3 给出了 1980~2019 年多年平均的高原冬季极端降雪量、频次、强度的空间分布。可以看出，冬

季极端降雪量介于 0.27~18.48 mm 之间, 空间分布差异性较大, 极端降雪量最小的地区位于喜马拉雅山北侧的背风坡, 最大值位于青藏高原东南部的迎风坡。由图 3(a)可以看出高原冬季极端降雪量整体的空间分布特征与冬季总降雪量以及冬季极端降雪量阈值的分布特征相似, 都呈现出自东南向西北递减的分布特征。位于高原西南部边缘喜马拉雅山南侧迎风坡的普兰和高原东南部的藏南地区的极端降雪量较多, 西藏南部、西北部、青海北部极端降雪量较少, 这种分布特征是受到大气环流系统以及地形地理特征的共同影响[18]。

多年平均的冬季极端降雪频次在 0.07~1.98 d 之间, 空间差异性较大, 最小值为拉孜地区, 40 年间仅发生了 3 次极端降雪事件, 最大值为清水河地区, 位于青海省南部。由图 3(b)可以看出, 在青海南部、四川西北部以及西藏东部的部分地区冬季极端降雪频次较大, 其他地区的极端降雪频次则较小, 其中西藏南部、青海西北部等地区最小。

高原冬季极端降雪强度介于 1.3~16.4 mm/d 之间, 其中, 波密与普兰两个台站的极端降雪强度最大, 二者位于迎风坡, 受地形因素影响, 其冬季极端降雪强度分别达到了 11.7 mm/d 和 16.4 mm/d, 其余站点则介于 1.3~6.2 mm/d 之间, 远小于这两个站点。由图 3(c)可以看出, 高原冬季极端降雪强度整体上呈自东南向西北递减的空间分布特征, 但变化幅度相较极端降雪量、极端降雪频次更小, 除普兰附近小范围区域外, 其他地区的空间差异性较小。



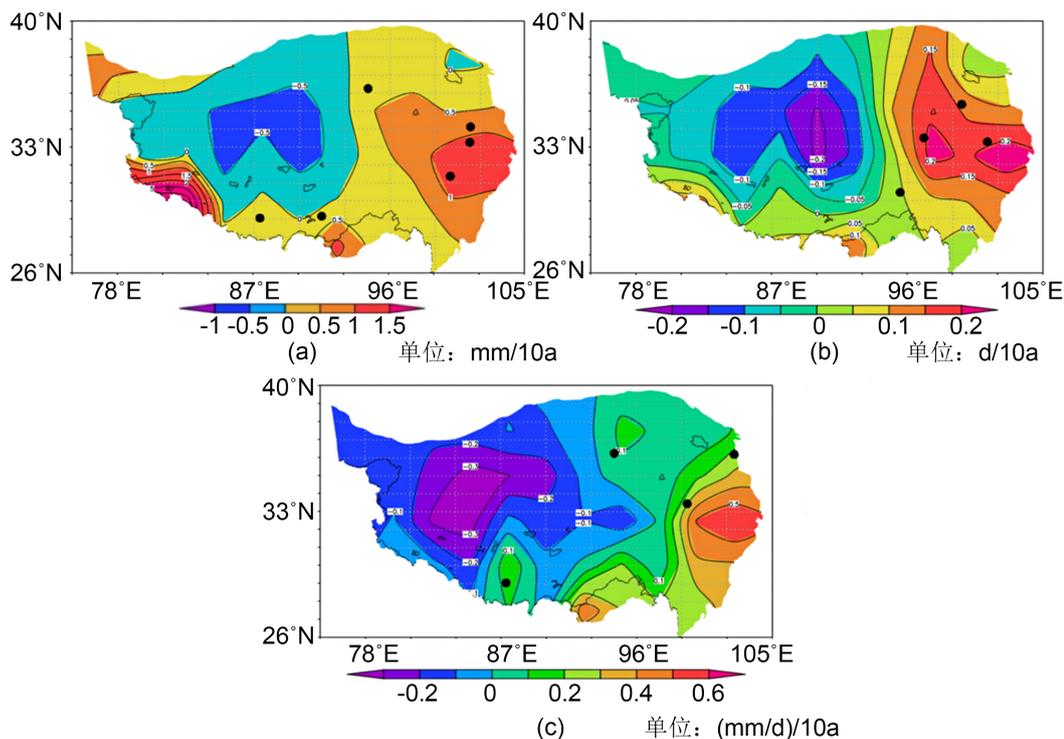
**Figure 3.** The spatial distribution of extreme snowfall mount (a), frequency (b) and intensity (c) in winter over the Tibetan Plateau

**图 3.** 青藏高原冬季极端降雪量(a)、频次(b)、强度(c)的空间分布

总体来看, 高原中西部的大部分地区以及高原东北部地区的极端降雪量、极端降雪频次、强度都较小, 而高原东南部、西南部边缘是极端降雪量、频率及强度的大值区。

图 4 给出了高原冬季极端降雪量、频次、强度的空间趋势分布。图 4(a)表明冬季极端降雪量呈现出高原东部及南部增加, 西部及西北部减小的空间分布特征, 极端降雪频次也基本呈现出相似的空间分布

特征(图 4(b)), 极端降雪频次变化率介于 $-0.15\sim 1.95$  mm/10a 之间。由图 4(c)可以看出, 高原冬季极端降雪强度变化趋势整体为东增西减的空间分布特征, 变化率在 $-0.47\sim 0.73$  (mm/d)/10a 之间。总的来说, 高原东南部极端降雪的增加可能是极端降雪频次、强度的增加有关, 而高原西南部边缘地区极端降雪的增加主要是和极端降雪频次的增加有关。



**Figure 4.** The spatial distribution of trend of extreme snowfall mount (a), frequency (b) and intensity (c) in winter over the Tibetan Plateau during 1980~2019

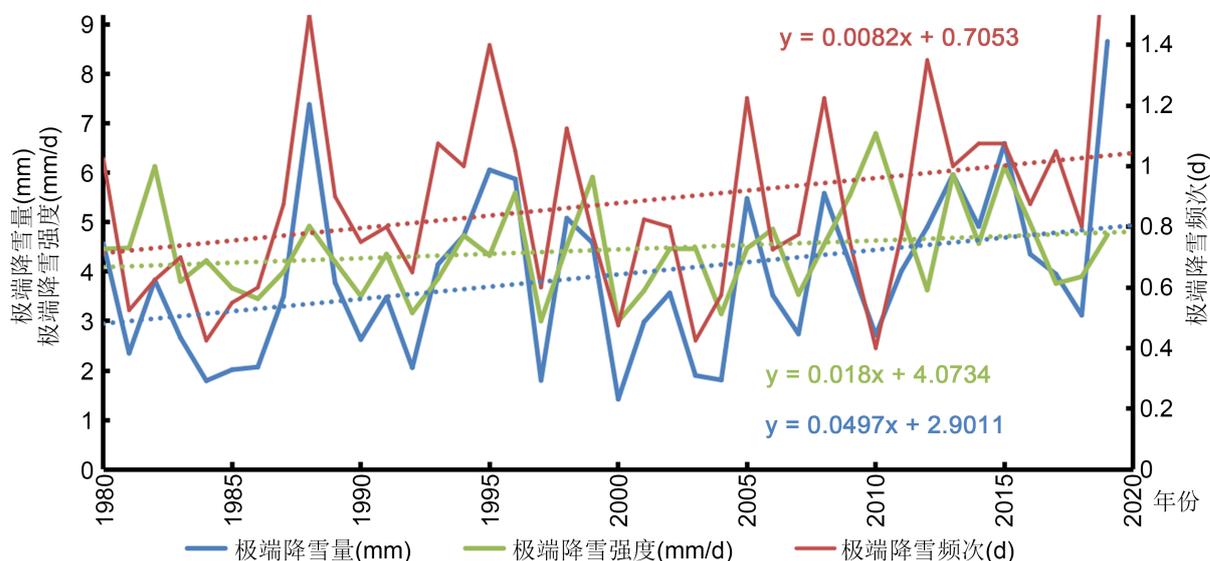
**图 4.** 1980~2019 年青藏高原冬季极端降雪量(a)、频次(b)、强度(c)变化趋势空间分布

### 3.3. 青藏高原冬季极端降雪量、频次、强度的时间变化

图 5 给出了 1980~2019 年高原冬季极端降雪量、频次、强度的年际变化。由图可以看出三者皆呈现为增加趋势, 极端降雪量的增加速率为  $0.497$  mm/10a ( $P > 95\%$ ), 极端降雪频次的增加速率为  $0.082$  d/10a ( $P > 90\%$ ), 极端降雪强度的增加速率为  $0.180$  (mm/d)/10a ( $P > 80\%$ )。极端降雪量和极端降雪频次的变化趋势十分相似, 二者之间相关系数为  $0.908$  ( $P > 99.9\%$ ), 而极端降雪量与极端降雪强度的相关系数为  $0.508$ 。这可能意味着, 高原地区冬季的极端降雪量增多主要是与极端降雪频次的增多有关。

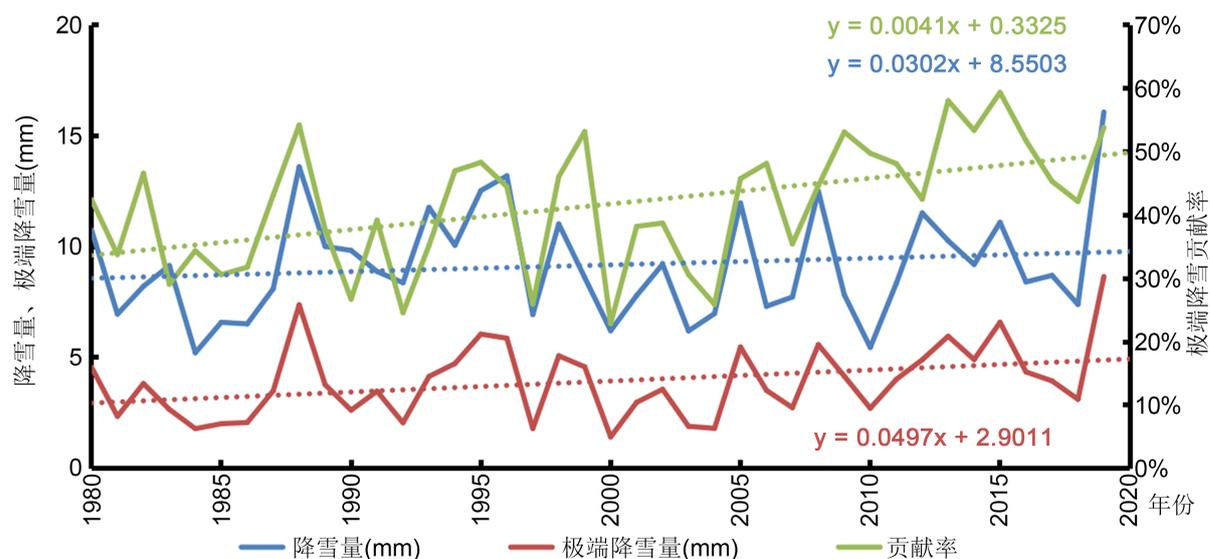
### 3.4. 青藏高原冬季极端降雪对冬季降雪的贡献率的时空分布

为了进一步分析高原冬季极端降雪量和冬季总降雪量之间的关系, 图 6、图 7 给出了 1980~2019 年高原冬季极端降雪量对总降雪量的贡献率的时空变化。图 6 表明高原冬季降雪量整体上呈增加趋势, 增加速率为  $0.302$  mm/10a, 冬季极端降雪量也呈增加趋势, 增加速度高于冬季总降雪量的增加速度, 极端降雪在总降雪中的占比介于  $22.9\%\sim 59.4\%$  之间, 多年平均值为  $41.6\%$ , 最大值  $59.4\%$  出现在 2015 年, 最小值  $22.9\%$  出现在 2000 年, 2000 年以后贡献率的增长速度更为明显。由于冬季极端降雪量的增长速率超过了冬季总降雪量的增长速率, 贡献率整体上呈显著的增加趋势( $P > 99.5\%$ ), 增加速率可达  $4.1\%/10a$ 。



**Figure 5.** The interannual variations of extreme snowfall mount, frequency and intensity in winter over the Tibetan Plateau during 1980~2019

**图 5.** 1980~2019 年青藏高原冬季极端降雪量、频次、强度的年际变化



**Figure 6.** The interannual variations of the contribution rate of extreme snowfall to snowfall in winter over the Tibetan Plateau during 1980~2019

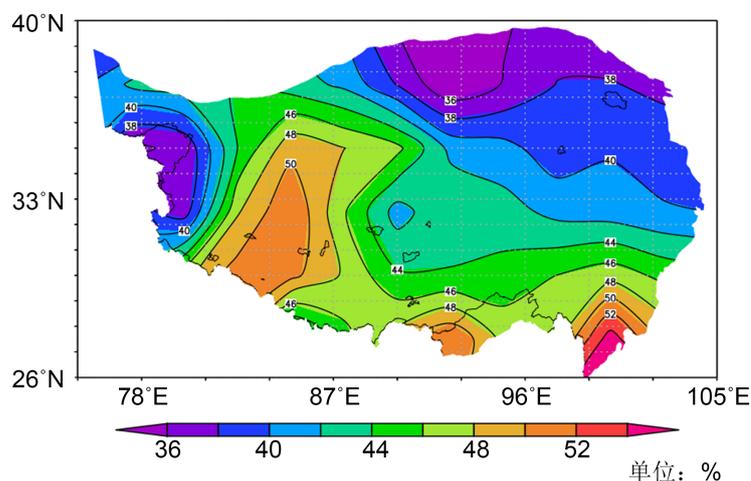
**图 6.** 1980~2019 年青藏高原冬季降雪量、极端降雪量及极端降雪贡献率的年际变化

图 7 给出了冬季极端降雪贡献率的空间分布。可以看出，高原冬季极端降雪对总降雪的贡献率介于 31%~52% 之间，最小值位于高原北部柴达木盆地，最大值出现在高原西南部和高原东南部。整体来看，冬季极端降雪贡献率呈现自西南向东北递减的空间分布特征。高原中西部地区、藏南地区和川西高原的冬季极端降雪贡献率较大，高原东北部以及西北部地区贡献率较小。

#### 4. 结论

本文利用 1980~2019 年的台站观测的气温、降水逐日资料，结合百分位阈值法、线性回归等统计方

法,对高原冬季极端降雪(极端降雪量、极端降雪频次、极端降雪强度以及极端降雪对降雪的贡献率)的时空分布特征进行分析。得出以下主要结论:



**Figure 7.** The distribution of the contribution rate of extreme snowfall to snowfall in winter over the Tibetan Plateau during 1980~2019

**图 7.** 1980~2019 年青藏高原地区冬季极端降雪贡献率的空间分布

1) 高原地区冬季极端降雪量阈值、极端降雪量及极端降雪强度整体上都呈自东南至西北递减的空间分布特征,而极端降雪频次的空间分布特征主要表现为高原中东部地区较大,其他地区较小;

2) 从趋势变化来看,空间上,极端降雪量、频次、强度的变化趋势整体上都呈东增西减的分布特征。时间上,1980~2019 年高原冬季极端降雪量、极端降雪频次均呈现显著增加的趋势,而极端降雪强度增加趋势不显著;

3) 高原冬季极端降雪量与极端降雪频次、极端降雪强度相关系数分别为 0.908、0.508,这表明高原冬季极端降雪量的增加主要是与极端降雪频次的显著增加有关;

4) 高原冬季极端降雪对降雪的贡献率在空间上呈自西南向东北逐渐减小的分布特征,大值中心主要位于高原东南部及高原南部边缘地区,极端降雪量的大值区基本仍是贡献率的大值区。从时间变化来看,1980~2019 年贡献率以 0.41%/100a 的速度在增加,这表明高原冬季降雪的增加主要是与极端降雪事件的增加有关。

## 参考文献

- [1] 赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 全球变暖与气候突变[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 114-120.
- [2] 徐雨晴, 苗秋菊, 沈永平. 2008 年: 气候持续变暖, 极端事件频发[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(1): 56-60.
- [3] 马耀明, 胡泽勇, 王宾宾, 等. 青藏高原多圈层地气相互作用过程研究进展和回顾[J]. 高原气象, 2021, 40(6): 1-22.
- [4] Immerzeel, W.W., Van Beek, L.P.H. and Bierkens, M.F.P. (2010) Climate Change Will Affect the Asian Water Towers. *Science*, 32, 1382-1385. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>
- [5] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 郭正堂, 崔鹏, 陈发虎, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. 科学通报, 2015, 60(32): 3023-3035.
- [6] 马丽娟, 秦大河, 卞林根, 效存德, 罗勇. 青藏高原积雪的脆弱性评估[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(5): 325-331.
- [7] 除多, 洛桑曲珍, 杨志刚, 杨勇. 1981-2010 年青藏高原降雪日数时空变化特[J]. 应用气象学报, 2017, 28(3):

---

292-305.

- [8] 朱晓凡, 张明军, 王圣杰, 李效收, 董蕾, 任正果. 1962-2012 年青海省降雪初始终止日期和降雪日数的时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 761-770.
- [9] 胡豪然, 梁玲. 近 50 年青藏高原东部降雪的时空演变[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 1002-1012.
- [10] 蒋文轩, 假拉, 肖天贵, 罗布坚参, 周振波. 1971-2010 年青藏高原冬季降雪气候变化及空间分布[J]. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1211-1218.
- [11] 刘义花, 鲁延荣, 周强, 李红梅, 刘彩红. 1961-2017 年青海高原降雪时空变化分析研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(4): 809-817.
- [12] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. <http://www.ipcc.cn>.
- [13] 王玉娟, 刘晓燕, 白爱娟, 祁栋林, 肖宏斌, 欧建芳. 1961-2017 年三江源地区极端降雪指数变化特征分析[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(6): 108-115.
- [14] 赵求东, 赵传成, 秦艳, 苒亚平. 中国西北干旱区降雪和极端降雪变化特征及未来趋势[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 81-90.
- [15] 张林梅, 张建, 李建丽. 阿勒泰地区冬季极端降雪事件变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 89-95.
- [16] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端降水事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(z1): 1-10.
- [17] 黄嘉佑, 李庆祥, 等. 气象数据统计分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [18] 邹进上, 曹彩珠. 影响青藏高原降雪的若干因子研究[J]. 水科学进展, 1991(1): 42-49.