

DOI:10.12170/20221229002

余王康, 杨勤丽, 王国庆, 等. 青藏高原雪深变化特征及其与气象要素的偏相关分析 [J]. 水利水运工程学报, 2023(6): 35-45. (SHE Wangkang, YANG Qinli, WANG Guoqing, et al. Analysis of the characteristics of snow depth variation on the Qinghai-Tibet plateau and its partial correlation with meteorological factors[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(6): 35-45. (in Chinese))

# 青藏高原雪深变化特征及其与气象要素的偏相关分析

余王康<sup>1</sup>, 杨勤丽<sup>1</sup>, 王国庆<sup>2</sup>, 金双彦<sup>3</sup>

(1. 电子科技大学 资源与环境学院, 四川 成都 611730; 2. 南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029; 3. 黄河水利委员会水文局, 河南 郑州 450004)

**摘要:** 为探析第三极地区积雪时空变化规律, 基于中国雪深长时间序列数据集(1979—2021)及中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018), 分析了青藏高原地区近40年雪深的时空变化特征及其与近地面气温、降水的偏相关性。时空变化分析结果显示, 青藏高原地区雪深在年尺度上呈现出以内部三大区域的雪深减少为主的变化趋势, 而这种趋势在月尺度及秋冬两季更为显著; 高原东部是雪深显著增加的主要区域。偏相关分析发现, 雪深在月、季和年尺度上均与气温有着较大的负相关性, 最大负偏相关系数约为-0.8; 雪深与降水在年、月尺度上有着以正相关为主且相似的空间分布, 在春、夏两季二者呈“东正西负”的相关性, 而大范围的正相关性(偏相关系数在0.4以上)集中在秋季。在日尺度上, 气温与延迟10 d后的雪深呈现出最大负相关性(偏相关系数为-0.733); 而降水则与延迟3 d后的雪深呈现出最高的正相关性(偏相关系数为0.064)。青藏高原雪深与气象要素的相关性表现出明显的时空异质性, 地形、融积时间乃至高原周围的季风与西风都可能是导致这种时空差异性的原因。

**关键词:** 积雪深度; 时空变化; 偏相关分析; 青藏高原

中图分类号: P426.63

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2023)06-0035-11

积雪作为地球陆表的重要组成部分及冰冻圈的重要组成部分, 是地球系统科学研究中不可缺少的气候变量<sup>[1-2]</sup>。在气候变化研究中, 积雪改变了地表吸收辐射的能力, 积雪的冻结和消融与温度密切相关, 同时也会对地表径流及水资源的分布产生影响, 因此积雪在地表能量收支、水循环、初级生产力及陆气交换等方面都发挥着重要作用<sup>[3]</sup>。青藏高原作为中国积雪覆盖的三大区域之一<sup>[4]</sup>, 具有除南极、北极之外最大的冰储量<sup>[5]</sup>, 同时作为亚洲10多条河流的发源地被称为“亚洲水塔”<sup>[6]</sup>, 所包含的淡水资源与下游地区人类的生存和发展息息相关, 而高原上积雪的变化对该地区的生态、水文、气象也具有极其重要的研究意义。

常用的积雪特征有积雪覆盖面积、雪深、雪水当量、积雪日数、积雪开始时间及积雪结束时间。对积雪造成的水文影响而言, 雪深数据更为重要。雪深, 即积雪深度, 是指积雪表面到地面的垂直深度<sup>[7]</sup>。近20年来, 大量学者以雪深为切入点对青藏高原地区的积雪变化开展研究。基于地面站点观测数据, 除多等<sup>[2]</sup>对近30年的积雪年际及季节变化进行了分析, 发现大部分台站的积雪在年际乃至季节尺度上都出现了减少趋势; You等<sup>[8]</sup>以更长的时间序列对1961—2005年青藏高原中部及东部区域的雪深观测数据进行分析, 结果显示雪深在1990年前以0.32 mm/10 a的速度增加, 而在1990年后以1.80 mm/10 a的速度减少, 这与Xu等<sup>[9]</sup>、BAI等<sup>[10]</sup>得出的“雪深先增后减”的结论相一致。随着被动微波遥感(PMV)在雪深反演中的应用, 田柳茜等<sup>[11]</sup>利用遥感数据产品分析了青藏高原雪深1979—2007年的变化状况, 发现雪深在高原南部普

收稿日期: 2022-12-29

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201100); 国家自然科学基金资助项目(52079026)

作者简介: 余王康(2000—), 男, 福建福州人, 博士研究生, 主要从事环境时空演变分析研究。

E-mail: 105435324@qq.com 通信作者: 杨勤丽(E-mail: qinli.yang@uestc.edu.cn)

遍减少,且雪深与气温和春季降水存在显著的负相关性;车涛等<sup>[1]</sup>利用遥感方法对青藏高原地区的积雪覆盖及雪深变化进行分析,指出积雪自1980—2018年以来呈下降趋势,并阐述了可能造成的气候、水文乃至灾害效应;Ma等<sup>[12]</sup>则利用遥感及再分析数据揭示了青海高原在1980—2018年内年际(-0.125 cm/10 a,  $p < 0.10$ ,  $p$ 为显著性水平,下同)和春季(-0.184 cm/10 a,  $p < 0.05$ )上的显著减少趋势,并指出青海高原上雪深与气温之间普遍负相关,与降水间“东正西负”的相关性分布格局;相似的结论还出现在Shen等<sup>[13]</sup>基于PMV遥感数据(高原平均雪深以0.24 cm/10 a的速率减少)及Zhang等<sup>[14]</sup>利用ERA5再分析资料(积雪年减少地区占83%,减少最大幅度达5 cm/10 a)的研究中;Bian等<sup>[15]</sup>基于PMV遥感观测和MERRA-2、JRA-55再分析数据集的多尺度雪深变化的对比分析显示,尽管在大多数研究场景下雪深的减少都表现为主要变化趋势,但其显著变化的情况仍取决于季节、区域并随使用的数据集而变化。

以上研究表明,青藏高原地区的积雪分布及变化具有较强的时空异质性,针对不同研究时段、不同方法获取的雪深数据,所得的结论也有所不同<sup>[1-2,8-15]</sup>。而针对雪深与其他因子之间的相关性,现有的分析多以相关系数为主,由于各个影响因子之间本就存在一定的关联性,仅进行相关系数的分析并不能排除其他相关因子对雪深的影响,Ma等<sup>[12]</sup>在研究中同样指出需要通过进一步的协方差或偏相关研究深入分析雪深变化与气候因素之间的关系。由此,本文基于车涛等<sup>[4,16-18]</sup>在国家青藏高原科学数据中心(TPDC)上发布的中国雪深长时间序列数据集(1979—2021年),研究青藏高原地区雪深的时空变化特征,同时结合阳坤等<sup>[19-21]</sup>在TPDC上发布的中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018年)中的降水、气温数据,进一步分析青藏高原地区雪深与气温、降水两种主要气象因子的偏相关性,以揭示青藏高原雪深时空变化的驱动机制。

## 1 资料及方法

### 1.1 研究区概况

青藏高原主要位于中国西部的西藏自治区和青海省及印度拉达克的部分区域,平均海拔在4 500 m以上,其经度范围为73°18'52"E至104°46'59"E,纬度范围为26°00'12"N至39°46'50"N<sup>[22]</sup>,总面积为 $2.5 \times 10^6$  km<sup>2</sup>。由于受高原地形影响,气象站点一般集中分布在东部及东南部等海拔较低的地区,在中、西部等海拔较高的地区则较为稀疏,而高海拔区正是积雪沉积较多的区域,因此遥感反演已成为青藏高原地区雪深乃至气象数据研究不可或缺的方法。受可用数据集覆盖范围的限制,本文以中国范围内的青藏高原为研究区域,具体位置和地形见图1。

### 1.2 数据与方法

本文选用的雪深数据为中国雪深长时间序列数据集(1979—2021年)(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368>),空间分辨率为0.25°,时间分辨率为天,ASCII文件涵盖了1979—2021年中国区域内的所有雪深数据。气温、降水数据为中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018年)(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49>)中的近地面气温、地面降水两个要素集,空间分辨率为0.10°,时间分辨率最高为3 h,存储格式为NETCDF格式。为与雪深数据对齐,选择日尺度的数据。

使用青藏高原区域为边界对雪深、气温、降水数据进行裁剪,随后将0.25°空间分辨率的雪深数据利用

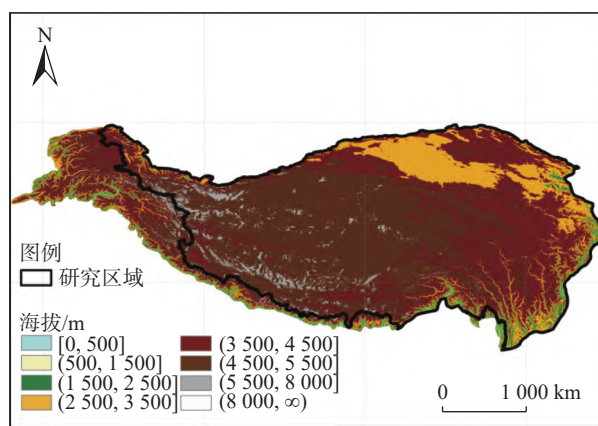


图1 研究区域位置和地形

Fig. 1 Location and topography of the research area

双线性插值方法重采样为与气象数据相同的  $0.10^\circ$  空间分辨率。裁剪和重采样后,将日尺度的数据分别转换为月、季节、年尺度的数据。参照站点数据质量控制要求<sup>[9]</sup>,本文将3—5月、6—8月、9—11月、12—次年2月分别作为每年的春季、夏季、秋季、冬季;而年的定义采用雪水文年<sup>[23]</sup>的定义,从9月至次年的8月。生成相应空间区域及时间尺度的数据后,采用线性回归法分析月、季、年尺度的雪深数据;采用偏相关分析法分析雪深数据和气温、降水数据在月、季、年尺度上的偏相关性,以此得到青藏高原地区雪深时空变化特征及其与气温、降水的偏相关性。

## 2 结果与分析

### 2.1 雪深数据年尺度变化

按照雪水文年的定义,提取了1979—2020年的年平均雪深数据。图2为基于线性回归得出的雪深数据在年尺度上的变化,采用 $p$ 值检验对变化趋势的显著性进行检验。

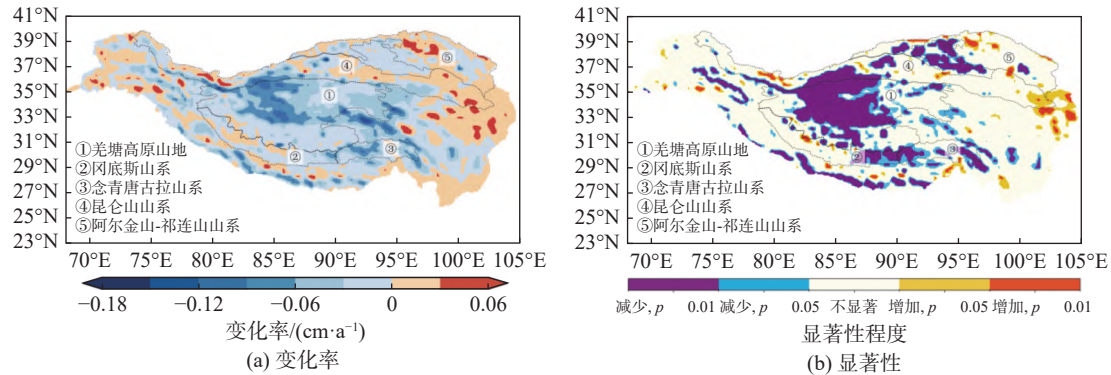


图2 1979—2020年青藏高原年尺度雪深变化

Fig. 2 The annual change rate of snow depth on the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2020

由图2可见,雪深数据在高原上的变化率为 $-0.189\sim 0.088$  cm/a。雪深减少地区主要集中于青藏高原中部及南部边缘,其中羌塘高原山地(这里的山地分区数据来源于南希等<sup>[24-25]</sup>在国家青藏高原科学数据中心(TPDC)上发布的“中国数字山地图”数据集(2015)(<https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/efa1dc3f-5f2d-4e60-8bf7-3ea4c6ec1929>),下同)的中部及中部偏北区域表现为雪深显著减小( $p < 0.01$ )且减小速率较大,位于高原中部偏南的冈底斯山系东部及与之相邻的念青唐古拉山系西部、阿尔金山-祁连山山系与昆仑山山系之间海拔较低处的雪深也表现出了显著减小的趋势,其他区域则表现为较显著减小( $p < 0.05$ )但减小速率较小(即减小速率小于  $0.06$  cm/a)或不显著( $p > 0.05$ )的变化。在大部分区域雪深都减小的情况下,高原东部及东南角等少部分区域的雪深却呈增加趋势,但雪深增加速率大多小于  $0.03$  cm/a。因此,从年尺度看,雪深呈现减少为主的趋势。

### 2.2 雪深数据月尺度变化

1979—2021年青藏高原月尺度雪深变化见图3。由图3可见,月尺度的雪深变化速率为 $-0.015\sim 0.008$  cm/mon。月尺度雪深增减的空间分布及增减速率与年尺度的(图2)几乎相同,这表明雪深在不同时间尺度上的变化趋势具有相似性。因月尺度更为精细,高原积雪的减小趋势与变化更明显。羌塘高原山地、唐古拉山系的大部分区域及冈底斯山系、念青唐古拉山系邻接的区域都表现出了显著减小( $p < 0.01$ )的趋势,而高原东部及东南部的横断山系部分区域则表现为显著增加( $p < 0.01$ )。

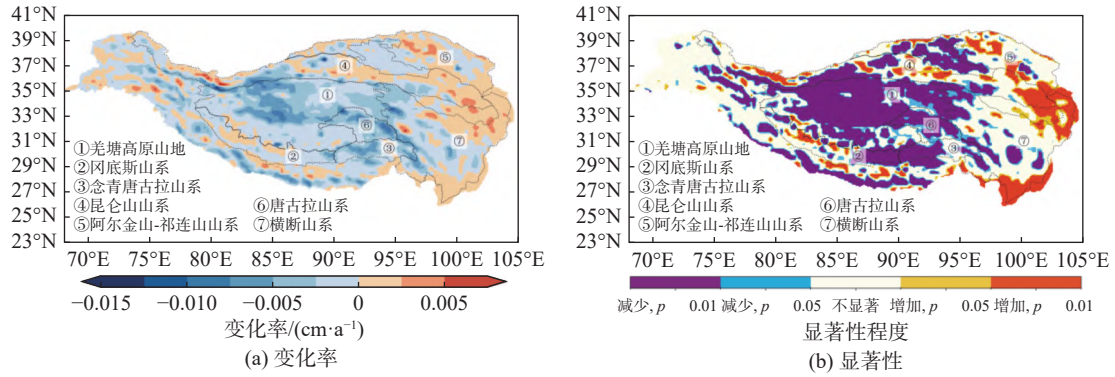
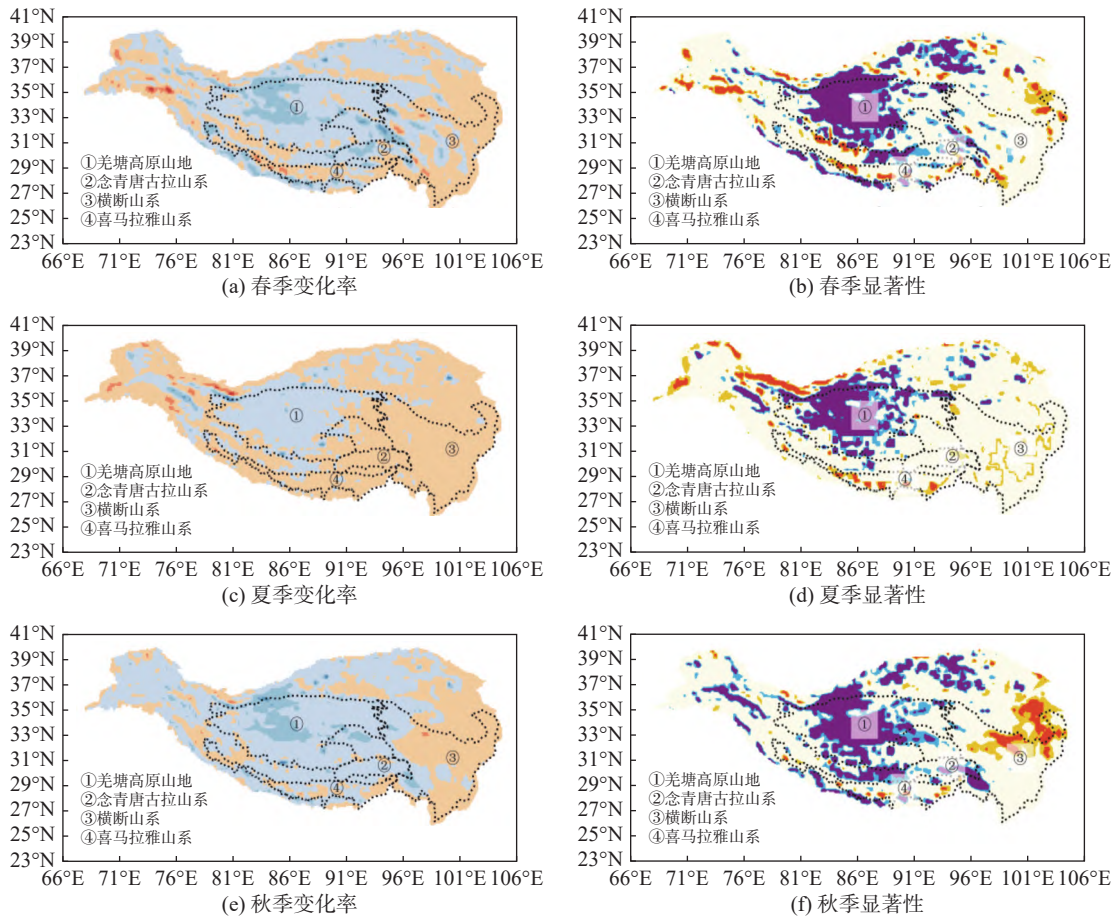


图3 1979—2021年青藏高原月尺度雪深变化

Fig. 3 The monthly-scale change rate of snow depth on the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2021

### 2.3 雪深数据季节尺度变化

按照前述季节的定义对青藏高原地区春、夏、秋、冬季的雪深变化进行分析。由图4可见,青藏高原雪深在春、夏、秋、冬季的变化特征明显不同。从变化率看,尽管雪深的减小仍是主要趋势,春季和秋季表现出了东部为主的区域增加、其他区域减少的变化特征;夏季雪深在除羌塘高原山地以外的其他区域都表现出较不显著( $p>0.05$ )的微弱上升趋势,这可能是由于夏季青藏高原积雪较为稀少。冬季相较于其他季节雪深减小的空间范围更大,唐古拉山系以东的横断山系中部区域也出现了雪深减小的情况,且在多数区域上雪深减小的速率明显快于其他时期。



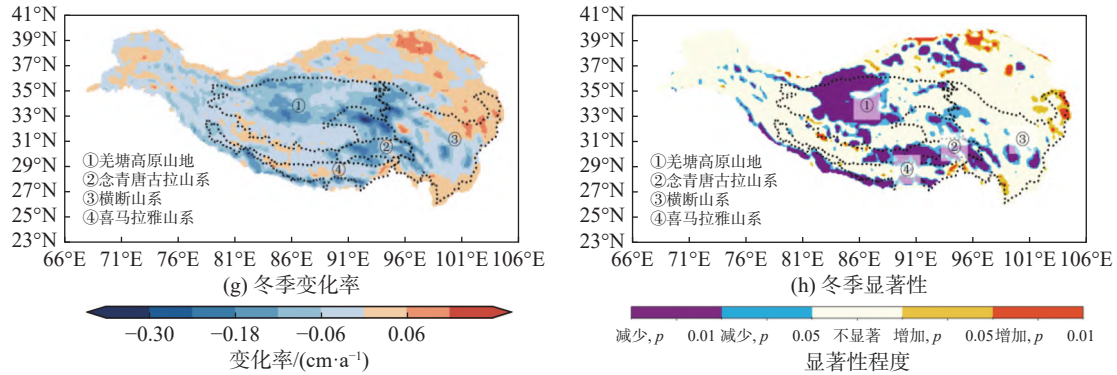


图 4 青藏高原季节尺度(1979—2021 年)雪深变化情况

Fig. 4 The seasonal-scale change rate of snow depth on the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2021

从变化的显著性看, 羌塘高原山地中部偏北及其附近区域在 4 个季节都表现出较为显著减小的趋势; 高原东部在 4 个季节中都出现了显著增加的情况, 但在秋季表现得最为集中且明显; 此外, 较为显著的变化有念青唐古拉山系区域雪深在冬季的显著减小及南部喜马拉雅山系区域在春、夏、秋分散出现的显著增加、在冬季出现的显著减小。

### 2.4 雪深与近地面气温的偏相关性分析

使用 1979—2018 年的雪深数据及与其对应的近地面气温、地面降水要素数据进行年、月及季节尺度上的偏相关性分析。

雪深与气温数据在年尺度上的偏相关性见图 5(a)。由图 5(a) 可见, 除高原西部及西北部少数区域外, 雪深与气温数据都呈较为明显的负相关性, 且在青藏高原中部最为明显, 偏相关系数小于-0.8, 而负相关系数整体呈现从中间向东西两侧递减的趋势。月尺度上的负相关更明显。图 5(b) 为雪深与气温数据在月尺度上的偏相关性, 由图 5(b) 可见, 在月尺度上, 整个高原地区都呈较强的负相关性, 大多数地区偏相关系数为-0.8~-0.4, 念青唐古拉山系附近的负相关性较强。

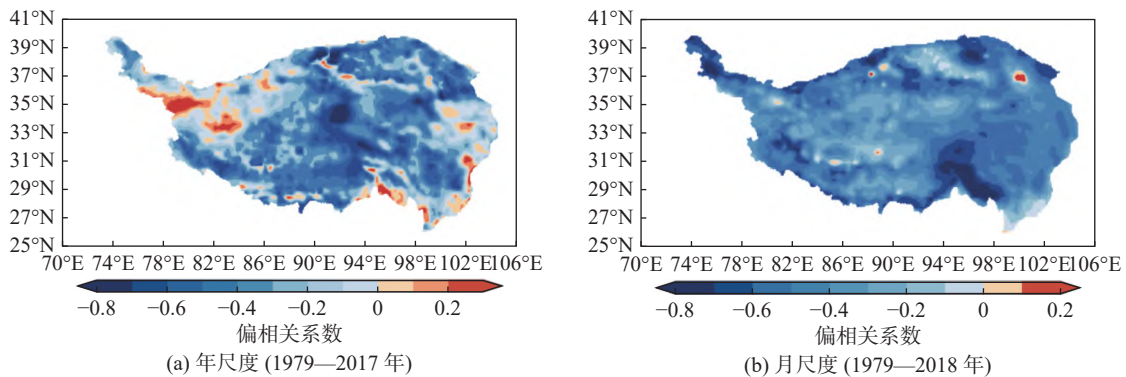


图 5 青藏高原地区雪深与气温在年、月尺度上的偏相关性

Fig. 5 The partial correlation between snow depth and temperature on both annual and monthly scales on the Qinghai-Tibet Plateau

季节尺度上, 大部分地区的雪深和气温仍保持明显的负相关(图 6), 偏相关系数为-0.6~-0.2, 负相关性的大小及分布范围按秋、冬、春、夏依次减少, 秋、冬两季是青藏高原积雪开始沉积的时期, 春季则是积雪开始消融的时期。将年尺度的相关性投射到季节上, 雪深与气温在青藏高原西北部的正相关性也表现出了明显的季节特点。正相关性(偏相关系数在 0~0.4)在春夏两季较为明显, 在秋冬两季则相对较小。综上所述, 雪深与气温总体上有较强的负相关性, 且负相关性存在着明显的季节差异, 秋季的负相关性较强。

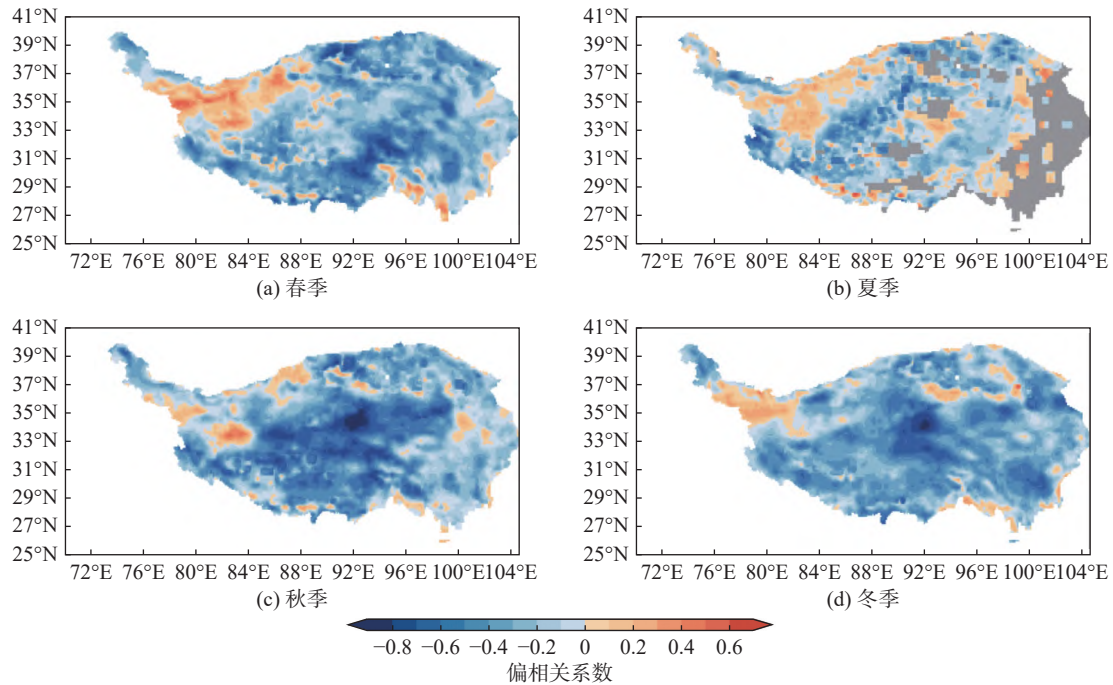


图6 青藏高原地区雪深与气温在季节尺度上的偏相关性(1979—2018年)

Fig. 6 The seasonal-scale partial correlation between snow depth and temperature on the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2018

### 2.5 雪深与降水的偏相关性分析

青藏高原雪深与降水在年、月和季尺度上的偏相关性结果见图7和图8,图9为年、月、季尺度上雪深与降水的偏相关系数箱线图。

由图7可见,年、月尺度上雪深与降水的相关性分布大致相同。除羌塘高原山地附近区域显现出具有一定特征的负相关性外,其他区域都以分布较为均匀的正相关性为主。

由图8可见,秋季高原积雪开始沉积,降水促成积雪的积累,雪深与降水呈现出较为广泛的正相关性,多数区域偏相关系数都在0.4以上;春、夏、冬三季,雪深则与降水呈现出西部负相关、东部正相关的形式,且春、夏两季负相关的区域明显较多,与一些研究<sup>[11-12,26]</sup>中得出的青藏高原雪深与春季降水呈负相关性以及整体上“东正西负”的格局反映出相似的信息。

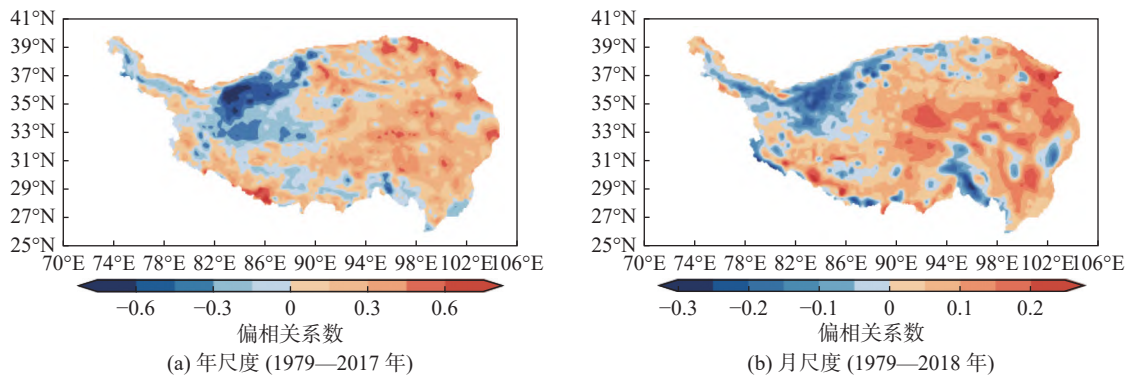


图7 青藏高原地区雪深与降水在年、月尺度上的偏相关性

Fig. 7 The annual and monthly-scale partial correlation between snow depth and precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau

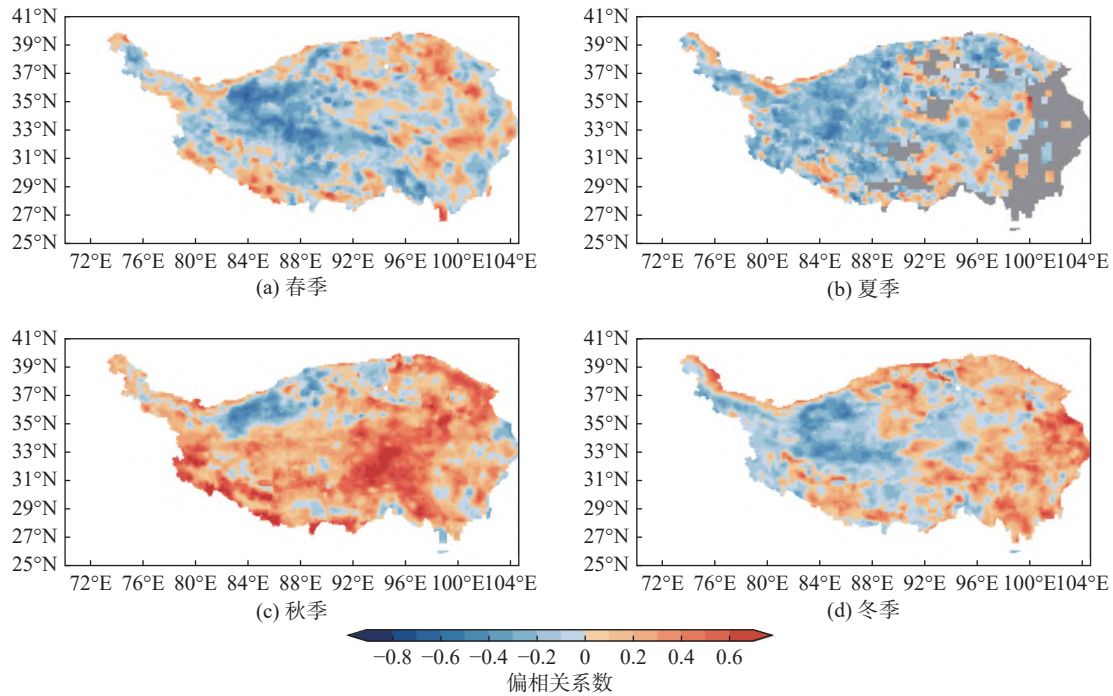


图 8 青藏高原地区雪深与降水在季节尺度上的偏相关性(1979—2018 年)

Fig. 8 The seasonal-scale partial correlation between snow depth and precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau from 1979 to 2018

雪深与降水间的偏相关性系数分布范围见图 9。雪深与降水的相关性在年尺度上更为显著,月尺度上的偏相关系数范围(-0.304~0.296)显著小于年尺度偏相关系数分布范围(-0.811~0.796)。与雪深、气温之间显著且稳定的负相关不同,雪深与降水仅在秋季尺度表现出较为普遍的正相关性,偏相关中位数在 0.2 上下;在年、月尺度以及冬季上二者的正相关性较为微弱,偏相关中位数在 0~0.1 之间;在春、夏两季上二者呈现出以负相关为主的偏相关性。综上所述,尽管在年、月际尺度上雪深与降水都存在着较广泛的微弱正相关性,但在春、夏两季,负相关性却较为集中地出现在高原西部,秋季雪深与降水之间广泛且强烈的正相关性同样值得关注。

### 2.6 雪深对气温、降水响应的延迟效应

由前文分析可得,高原大多数区域雪深与气温存在明显的负相关关系,与降水之间存在着一定的正相关性,且其相关性具有季节特点,如雪深与气温在秋、冬两季负相关性明显更大,雪深与降水在春、夏两季存在着明显的负相关性等。为进一步研究气温与降水对雪深变化的影响,以及该影响的延迟效应,本文针对青藏高原地区日平均气温、降水数据分别与延迟后的高原日平均雪深数据进行偏相关性分析,延迟效应分析结果见图 10。

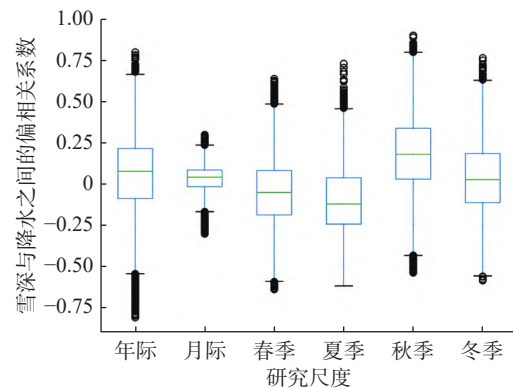


图 9 青藏高原地区雪深与降水在各尺度上的偏相关系数箱线图(矩形上边缘为其上四分位数,矩形中的线表示其中位数,下边缘为其下四分位数,矩形外的上下两横线分别为其上限及下限,圆圈表示其统计意义上的异常值)

Fig. 9 A boxplot illustrating the partial correlation between snow depth and precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau across different scales (The upper edge of the rectangle represents the upper quartile, the line within the rectangle represents the median, and the lower edge corresponds to the lower quartile. The upper and lower horizontal lines outside the rectangle indicate the upper and lower limits, respectively. Statistical outliers are represented by circles.)

由图10可见,延迟天数为10 d时,日尺度气温与雪深的负相关性达到最大,偏相关系数为-0.733,说明气温与10 d后的雪深数据相关性最大。同时,在较长的时间范围内,雪深都与气温呈较大的负相关性。

降水与3 d后雪深的偏相关系数达到最大,为0.064,一定程度上反映了降水转换为积雪的平均时间。随着延迟天数的增加,雪深与降水呈现出持续增大的负相关性,这种随时间增大的负相关性可能是部分季节中西部雪深与降水呈现负相关性的原因,该结果可能还受与降水相关的其他因素影响而不稳定。

基于日尺度气象因素对雪深影响的延迟效应探究,气温与雪深呈现出稳定的负相关性,降水与雪深呈较弱且不稳定的正相关性,已有多项研究表明青藏高原暖湿化<sup>[27-28]</sup>趋势,气温升高、降水增加与青藏高原地区逐年减少的雪深密切相关,高原独特的地形和较高的海拔令变化特征与相关性具有明显的空间异质性。从季节尺度上看,雪深的变化特征与相关性具有明显的季节特征,积雪积累与消融的时期(春季及秋季)其变化特征更为显著。不同季节的雪深变化与相关性差异可能也与季风、西风的变化和影响有关:高原东部雪深增加的区域恰与东亚季风的作用范围重合, Bao等<sup>[29]</sup>在研究中揭示了西风调节青藏高原冬季雪深的机制, Bamzai等<sup>[30]</sup>指出了喜马拉雅地区积雪与印度季风降水之间的正相关性。由此,雪深变化趋势以及相关性在季节上的不同,可能也与印度季风和西风的季节性迁移<sup>[31-32]</sup>有关。

### 3 结 语

1979—2020年青藏高原地区雪深在年尺度上呈现出以减小为主的趋势,且减小的趋势在月尺度及秋冬两季更为显著,幅度更大。从季节上看,春、秋季的积雪变化与年尺度在多数地区相似,说明积雪消融、沉积的春、秋两季对全年的雪深变化较为重要。考虑雪深与气温、降水的偏相关性,雪深在年、月、季尺度上都与气温呈现出显著的负相关性,其中月尺度上的负相关程度最大,分布最广,相关系数大多在-0.8~-0.4;雪深与降水之间的相关性在年、月尺度上有着相似的空间分布,但年尺度上的相关性程度(偏相关系数范围为-0.811~0.796)显著大于月尺度(偏相关系数范围为-0.304~0.296),季节尺度上较大的正相关性体现在秋季,大多数区域正相关性在0.4以上,说明秋季降水对于高原雪深变化发挥着重要作用,在春、夏两季二者的相关性则呈现出“东正西负”的分布格局。关于气温、降水对雪深影响的延迟效应,日尺度上,气温与延迟10 d后的雪深偏相关程度最高,相关系数为-0.733,且30 d内雪深都与气温保持着较强的负相关性;降水与延迟3 d后的雪深正相关性程度最高,相关系数为0.064,降水与雪深的偏相关性随延迟天数增加逐渐向负相关性过渡,可能受到了与降水相关的其他因素的影响。

青藏高原雪深变化特征与气象因子相关性在时空上都表现出明显的异质性,空间差异与高原起伏的地形和较高的海拔有关,季节上的差异也与青藏高原积雪积累与消融的时间高度对应。东亚季风、随季节迁移性变化的印度季风及西风的影响可能是导致高原地区雪深变化异质性的原因。对于日益减少的高原积雪,需要更多关于高原地区气候、水文过程的机理性研究来探究其中过程并对高原积雪进行及时的保护。

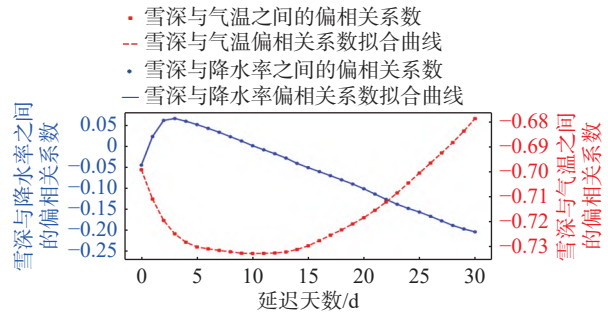


图10 青藏高原雪深与气温、降水率的偏相关系数随延迟天数的变化曲线

Fig. 10 The variation curve of partial correlation coefficient between precipitation, temperature and snow depth on the Qinghai-Tibet Plateau with the number of delay days



## 参 考 文 献:

- [1] 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. (CHE Tao, HAO Xiaohua, DAI Liyun, et al. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1247-1253. (in Chinese))
- [2] 除多,洛桑曲珍,林志强,等. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析[J]. *气象*, 2018, 44(2): 233-243. (CHU Duo, LUOSANG Quzhen, LIN Zhiqiang, et al. Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years[J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(2): 233-243. (in Chinese))
- [3] IPCC. Climate change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [4] CHE T, LI X, JIN R, et al. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. *Annals of Glaciology*, 2008, 49: 145-154.
- [5] YAO T D, THOMPSON L G, MOSBRUGGER V, et al. Third pole environment (TPE)[J]. *Environmental Development*, 2012, 3: 52-64.
- [6] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P, BIERKENS M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [7] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003. (China Meteorological Administration. Specification for ground meteorological observation[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003. (in Chinese))
- [8] YOU Q, KANG S, REN G, et al. Observed changes in snow depth and number of snow days in the eastern and central Tibetan Plateau[J]. *Climate Research*, 2011, 46(2): 171-183.
- [9] XU W F, MA L J, MA M N, et al. Spatial-temporal variability of snow cover and depth in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(4): 1521-1533.
- [10] BAI Shuying, SHI Jianqiao, SHEN Weishou, et al. Spatial-temporal variation of snow depth in Tibet and its response to climatic change in the past 30 years[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(1): 144-151.
- [11] 田柳茜,李卫忠,张尧,等. 青藏高原1979—2007年间的积雪变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5974-5983. (TIAN Liuxi, LI Weizhong, ZHANG Yao, et al. The analysis of snow information from 1979 to 2007 in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5974-5983. (in Chinese))
- [12] MA H, ZHANG G F, MAO R, et al. Snow depth variability across the Qinghai Plateau and its influencing factors during 1980—2018[J]. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 2023, 43(2): 1094-1111.
- [13] SHEN L, ZHANG Y, ULLAH S, et al. Changes in snow depth under elevation-dependent warming over the Tibetan Plateau[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2021, 22(9): e1041.
- [14] ZHANG C, MOU N X, NIU J, et al. Spatio-temporal variation characteristics of snow depth and snow cover days over the Tibetan Plateau[J]. *Water*, 2021, 13(3): 307.
- [15] BIAN Q Y, XU Z F, ZHENG H, et al. Multiscale changes in snow over the Tibetan Plateau during 1980-2018 represented by reanalysis data sets and satellite observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125(19): e2019JD031914.
- [16] 车涛,戴礼云. 中国雪深长时间序列数据集(1979—2021)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. (2022-06-15) [2022-12-29]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368>. (CHE Tao, DAI Liyun. Long-term series of daily snow depth dataset in China (1979-2021)[EB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center. (2022-06-15) [2022-12-29]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/df40346a-0202-4ed2-bb07-b65dfcda9368>. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] DAI L Y, CHE T, DING Y J, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(4): 1933-1948.
- [19] 阳坤,何杰. 中国区域地面气象要素驱动数据集(1979—2018)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. (2021-04-20) [2022-12-20]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49>. (YANG Kun, HE Jie. China meteorological forcing dataset (1979-2018)[EB/OL]. National Tibetan Plateau Data Center. (2021-04-20) [2022-12-20]. [https://](https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49)

- [data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49](https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49). (in Chinese))
- [20] HE J, YANG K, TANG W J, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 25.
- [21] YANG K, HE J, TANG W J, 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.
- [22] 张懿锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8. (ZHANG Yili, LI Bingyuan, ZHENG Du. A discussion on the boundary and area of the Tibetan Plateau in China[J]. *Geographical Research*, 2002, 21(1): 1-8. (in Chinese))
- [23] YAN Dajiang, MA Ning, ZHANG Yinsheng. Development of a fine-resolution snow depth product based on the snow cover probability for the Tibetan Plateau: validation and spatial-temporal analyses[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 604: 127027.
- [24] 南希, 李爱农, 邓伟. “中国数字山地图”数据集 (2015)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. (2022-06-08)[2022-12-20]. <https://cstr.cn/18406.11.Terre.tpdc.272523>. (NAN Xi, LI Ainong, DENG Wei. Data set of “Digital Mountain Map of China” (2015)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. (2022-06-08)[2022-12-20]. <https://cstr.cn/18406.11.Terre.tpdc.272523>. (in Chinese))
- [25] 邓伟, 李爱农, 南希, 等. 中国数字山地图[M]. 北京: 中国地图出版社, 2015. (DENG Wei, LI Ainong, NAN Xi, et al. Digital mountain map of China[M]. Beijing: SinoMaps Press, 2015. (in Chinese))
- [26] 乔德京, 王念秦, 李震, 等. 1980—2009水文年青藏高原积雪物候时空变化遥感分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(2): 137-143. (QIAO Dejing, WANG Nianqin, LI Zhen, et al. Spatio-temporal changes of snow phenology in the Qinghai-Tibetan Plateau during the hydrological year of 1980-2009[J]. *Climate Change Research*, 2018, 14(2): 137-143. (in Chinese))
- [27] YANG K, WU H, QIN J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79-91.
- [28] BIBI S, WANG L, LI X, et al. Climatic and associated cryospheric, biospheric, and hydrological changes on the Tibetan Plateau: a review[J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38(1): e1-e17.
- [29] BAO Y T, YOU Q L. How do westerly jet streams regulate the winter snow depth over the Tibetan Plateau?[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 53(1): 353-370.
- [30] BAMZAI A S, SHUKLA J. Relation between Eurasian snow cover, snow depth, and the Indian summer monsoon: an observational study[J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(10): 3117-3132.
- [31] YAO T D, BOLCH T, CHEN D L, et al. The imbalance of the Asian water tower[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 618-632.
- [32] SCHIEMANN R, LÜTHI D, SCHÄR C. Seasonality and interannual variability of the westerly jet in the Tibetan Plateau region[J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(11): 2940-2957.

## Analysis of the characteristics of snow depth variation on the Qinghai-Tibet plateau and its partial correlation with meteorological factors

SHE Wangkang<sup>1</sup>, YANG Qinli<sup>1</sup>, WANG Guoqing<sup>2</sup>, JIN Shuangyan<sup>3</sup>

(1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611730, China;

2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

3. Bureau of Hydrology, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** To investigate the patterns of snow change in the Third Pole region, this study examines the temporal and spatial characteristics of snow depth on the Qinghai-Tibet Plateau over the past 40 years. Additionally, it conducts a partial correlation analysis to assess the relationship between snow depth and near-surface temperature, as well as average precipitation. The analysis utilizes long-term datasets of daily snow depth in China (1979—2021) and the China meteorological forcing dataset (1979—2018). The results of the spatiotemporal variation analysis reveal a decreasing trend in snow depth across the Qinghai-Tibet Plateau, particularly in its three interior regions. This trend is more pronounced on a monthly scale, particularly during autumn and winter. However, the eastern part of the plateau experiences a significant increase in snow depth. The partial correlation analysis demonstrates a strong negative correlation between snow depth and temperature across all scales, with a maximum negative partial correlation coefficient of approximately  $-0.8$ . On the other hand, snow depth and precipitation exhibit similar spatial distribution but have distinct correlation patterns on an annual and monthly basis. Overall, the correlation between snow depth and precipitation follows a “positive in east and negative in west” distribution pattern during spring and summer, while autumn exhibits a more widespread positive correlation, with most areas showing a positive correlation above 0.4. On a daily scale, temperature exhibits the strongest negative partial correlation ( $-0.733$ ) with snow depth, with a 10-day delay, while precipitation demonstrates the highest positive correlation (0.064) with snow depth, with a 3-day delay. The variation characteristics of snow depth and its correlation with meteorological factors on the Qinghai-Tibet Plateau exhibit significant spatiotemporal heterogeneity. This heterogeneity can be attributed to factors such as topography, ablation and accumulation time, and the influence of monsoons and westerlies around the plateau.

**Key words:** snow depth; spatiotemporal variation; partial correlation analysis; Qinghai-Tibet Plateau