

青藏高原冬春雪深异常对云南夏季降水的影响及可能机制

周彬彬¹, 王有香¹, 陈红^{2*}, 林朝晖², 张贺², 吴成来², 蒋燕¹, 陈凯¹, 张聪通¹

1 云南电力调度控制中心, 昆明 650011

2 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘要 基于中国区域长时间序列雪深资料和CN05中国区域格点降水资料, 本文利用奇异向量分解(SVD)和相关分析方法考察了云南地区夏季降水与前期青藏高原雪深的联系。结果表明, 冬、春季高原中西部雪深偏多对应云南大部夏季降水的偏多, 特别是云南北部金沙江流域和西南部区域降水偏多显著; 且这种影响关系独立于ENSO对云南夏季降水的影响。结合ERA5再分析资料进一步揭示了高原关键区雪深异常对云南夏季降水的影响机制, 指出前期高原中西部关键区积雪偏多时, 通过积雪的反照率效应可导致春季高原中西部及附近区域近地面气温偏低, 有利于南亚夏季风爆发偏晚, 南亚夏季风偏弱, 对应南亚季风低压偏弱, 高原南侧为异常西风, 有利于云南大部地区降水偏多。此外, 高原关键区前期积雪偏多还可激发高低空波列, 影响到东亚及我国西南的大气环流异常, 其中高层200 hPa 波列沿中高纬西风急流传播, 自高原西部经蒙古到达东北亚呈现明显的“负—正—负”位势高度异常传播, 东北亚为气旋性环流异常, 气旋性环流西侧的偏北气流有利于中高纬冷空气南下; 850hPa低层波列自高原西南侧往南海传播, 南海为异常反气旋环流。高原南侧西风和南海反气旋西北侧的西南风在云南上空形成低空切变, 有利于云南地区夏季降水; 同时冷空气南下到云南地区, 与暖湿气流汇合, 也有利云南地区夏季降水偏多。

关键词 高原积雪, 冬春雪深, 夏季降水, 青藏高原, 云南降水

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2023.23047

收稿日期 2023-05-22; **收修定稿** 2023-06-15

作者简介 周彬彬, 女, 1990年出生, 工程师, 主要从事电力系统运行控制、水电系统经济运行研究。E-mail: bbzhouchn@163.com

通讯作者 陈红, E-mail: chh@mail.iap.ac.cn

资助项目 云南电网有限责任公司科技项目, 中国科学院国际合作项目(No. 134111KYSB20200020), 国家自然科学基金项目(41975119), 国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”

Funded by Yunnan Power Grid Co., Ltd. Technology project, International Cooperation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. 134111KYSB20200020), Natural Science Foundation of China (41975119), National Key Scientific and Technological Infrastructure project “Earth System Numerical Simulation Facility”

Impacts of Tibetan Plateau winter and spring snow depth anomalies on summer precipitation in Yunnan and possible mechanism

ZHOU Binbin¹, WANG Youxiang¹, CHEN Hong², LIN Zhaohui², ZHANG He², Wu Chenglai²,
Jiang Yan¹, CHEN Kai¹, ZHANG Congtong¹

1 Yunnan Electric Dispatching and Control Center, Kunming 650011

2 International Center for Climate and Environment Sciences (ICCES), Institute of Atmospheric Physics (IAP), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Based on snow depth dataset over China and CN05 gridded precipitation data over China, the relationship between Tibet Plateau (TP) snow depth and the summer precipitation in the Yunnan Province are investigated by using Singular Vector Decomposition (SVD) and correlation analysis. The results show that the positive snow depth anomalies in the central and western TP during winter and spring can enhance summer precipitation in Yunnan, especially in the Jinsha River basin and the southwest of Yunnan, and the correlations between TP snow depth and Yunnan summer precipitation may be independent of the influence of ENSO on summer precipitation in Yunnan. The possible impact mechanism has been investigated through the diagnostic analyses using ERA5 reanalysis datasets, it is suggested that heavier snow depth in the key region of the TP lead to the lower surface air temperature in the central and western parts of the TP and nearby areas in spring, which is conducive to the late onset of the South Asian summer monsoon, hence weaker South Asian summer monsoon and the associated monsoon depression, along with the abnormal westerly wind to the south of the TP. Furthermore, colder surface temperature associated with heavier snow depth in the TP can also initiate the wave train at 200 hPa, which propagate from the western part of the TP through Mongolia to Northeast Asia along the westerly jet stream, and an anomalous cyclonic circulation can be found in Northeast Asia, which is conducive to the southward movement of the cold air in the middle and high latitudes, leading to more rainfall in Yunnan. Meanwhile, wave train at the 850 hPa can also be found, which spread from the

southwest side of the plateau to the South China Sea, leading to an anomalous anticyclone circulation in South China Sea. The anomalous low level shear over Yunnan is developed from the westerly wind on the south side of the plateau and the southwesterly wind on the northwest side of the South China Sea anticyclone, which is favorable for more precipitation in Yunnan. Meanwhile, cold air flows southward to Yunnan and converges with warm and humid air, which also contributes to enhanced summer precipitation in Yunnan.

Keywords Plateau Snow Cover, Winter and Spring Snow depth, Summer Rainfall, Tibetan Plateau, Yunnan Precipitation

1 引言

云南地处低纬高原，地形复杂，西北边为青藏高原，南邻孟加拉湾和南海两个热带海洋，受东亚季风和印度季风的共同影响，降水的年际变率较大，旱涝灾害频发。如2010年遭遇了百年一遇的大旱，造成2045万人受灾，直接经济损失近200亿元。2014年7月云南遭遇多轮强降雨，局部地区发生重大泥石流、山体滑坡灾害，因灾死亡106人，失踪72人，受伤311人。云南的降水主要集中在夏季，因此对云南地区夏季降水异常的准确预测对科学防灾减灾意义重大。

已有研究表明，影响云南夏季降水的因素是多方面的。相关学者从季风活动、海气相互作用、大气环流变化等方面进行分析研究并取得成果。有研究表明，南亚夏季风对云南降水的影响要大于东亚夏季风（Li et al., 2015）。刘瑜等（2007）认为西太平洋副热带高压面积和强度的增强、脊点偏西、位置偏南，会影响来自北方的冷空气南下，是造成云南夏季干旱的重要环流系统之一。夏季云南南部降水与南亚高压面积呈显著负相关（郭志荣等，2014）。肖子牛等（2016）的研究表明印度洋热带赤道地区低层东风加强和高空西风加强、亚洲地区中高纬度温度的升高是2002年云南夏季降水显著减少的重要原因。不少学者分析了云南夏季降水与海温的关系。研究认为El Niño年云南地区初夏降水容易偏少（张小玲等，1999；据建华等，2001）。云南夏季降水异常分布对ENSO发展和衰减阶段的响应存在明显差异，La Niña事件的发展阶段可作为影响云南夏季降水的一个强信号因子（刘丽等，2011）。云南西南部的夏季降水与前期孟加拉湾海温有显著的

正相关，滇东南的夏季降水只与前期南海的海温有显著的正相关（张云瑾和张天圣，2008）。

上述云南夏季降水影响因素的分析，主要关注的是外强迫海温和环流异常的影响。作为全球重要的积雪区，青藏高原积雪通过改变地表反照率等过程，直接影响高原地气间的能量和水分交换，进而对全球尤其是亚洲季风系统的变化起着十分重要的作用（Lin et al., 1996; Yao et al., 2012; 除多等, 2018; Xue et al., 2021）。以往研究集中探讨了高原积雪和东亚夏季降水的关系，大量诊断和数值模拟结果表明高原积雪主要通过季风影响我国降水时空分布，青藏高原积雪和东亚夏季风呈显著负相关，和夏季长江流域降水呈正相关，和华南、华北降水呈负相关（Chen and Wu, 2000; 陈兴芳和朱文玲, 2000; 张顺利和陶诗言, 2001; 吴统文和钱正安, 2000; Wu and Qian, 2003; Zhao et al., 2007; 李燕等, 2018; 段安民等, 2018; 王顺久等, 2017）。赵红旭（1999）利用高原台站1月雪深资料分析了高原雪深与云南夏季降水的关系，指出青藏高原积雪多的年份，昆明夏季降水偏多，云南大部7月降水偏多。但针对高原积雪对云南夏季降水的影响研究总体说来相对较少，且由于资料所限，以往的研究工作大多采用集中于高原东部的有限的站点观测资料来探讨高原积雪异常和大尺度旱涝的相关关系，高原西部积雪的作用考虑的较少。

空间分布均匀的高分辨率遥感雪深资料可以提供更高精度的青藏高原积雪信息（Che et al., 2008; 李小兰等, 2012），这些高分辨率观测资料的出现，为进一步揭示高原积雪对气候的影响提供了可能。基于此，本文采用1980-2019年中国长时间序列雪深资料、CN05降水资料及ERA5环流资料，利用奇异值分解（SVD）寻找不同季节青藏高原积雪与云南夏季降水之间的联系，并在此基础上，通过回归分析等方法研究高原关键区积雪异常对云南夏季降水的可能影响过程。

2 资料和方法

2.1 资料来源

本文所用积雪数据来源于国家青藏高原科学数据中心（[https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/\[2020-07-14\]](https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/[2020-07-14])）的中国雪深长时间序列数据集。该数据集提供1979年1月1日至2019年12月31日逐日的中国范围的积雪厚度分布数据。该数据集通过使用Che et al.(2008)的修正算法，对美国国家冰雪数据中心(NSIDC)处理的SMMR

(1979—1987年)、SSM/I (1987—2007年) 和SSMIS (2008—2019年) 逐日被动微波亮温数据 (EASE-Grid) 进行反演得到。雪深资料水平分辨率为25km。此套资料与台站观测资料在积雪稳定区分布较为一致, 具有较好的代表性 (李小兰等, 2012), 同时该数据集资料具有空间分辨率高、分布均匀和资料完整等优点。

使用的观测降水资料为CN05.1格点资料 (吴佳和高学杰, 2013)。CN05.1为CN05 (Xu et al., 2009) 数据的更新版本, 本文所用资料水平分辨率为 0.25° , 时长为1980-2019年。CN05资料是基于2400余个中国地面气象台站的观测资料, 采用“距平逼近”方法插值建立的高分辨率格点化数据集。

本文分析中的环流场资料来自欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 简称ECMWF) ERA5 第五代大气再分析数据集 (Hersbach et al., 2020, 2023), 该资料是通过数据同化将数值天气预报模型估计值与来自卫星的观测数据和地面观测数据相结合而得出的, 数据时段为1940年至今。本文所用ERA5数据时长为1980-2019年, 水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 使用到的物理场包括高度场、风场、温度场和水汽输送场等。

2.2 研究方法

本研究使用奇异值分解 (SVD) 来寻求云南夏季降水与青藏高原不同季节积雪之间的联系。SVD是以两个要素场的最大协方差为基础展开, 最大限度地从左右场分离出相互独立的耦合分布型, 从而揭示出两个场所存在的时域相关性的空间联系。它能够以最少的模态来描述两个要素间关系的主要特征。不少工作都表明, SVD方法计算简便, 所得耦合信号物理解释清晰, 在气象要素诊断分析中具有普适性, 特别适合于大尺度气象要素场的遥相关研究 (丁裕国和江志红, 1996)。本文以每年冬春季3个连续月 (如1-3月, JFM) 的形式, 进行季节尺度高原积雪与云南夏季降水的SVD分解。

此外, 本文也使用了相关分析、回归分析等常规的统计分析方法。考虑到高原积雪气候趋势的复杂性 (You et al., 2020), 且由于研究主要针对年际尺度时间上的联系, 因此将所有数据的线性趋势去除, 来分析积雪和降水的关系及可能影响机制。

3 结果分析

3.1 冬春季雪深与云南夏季降水的关系

奇异值分解 (SVD) 可以给出云南夏季降水和青藏高原冬春季雪深的协同变化特征,从而揭示高原雪深变化对云南降水的影响。图 1 给出的是高原冬季(DJF)雪深与云南夏季降水 SVD 分解第一模态的结果,第一模态的方差贡献率为 42%。夏季降水 SVD 分解图上显示,云南地区基本为正相关区,相关系数大于 0.5 的区域位于云南北部的金沙江流域及西南部分区域。除西北部区域外,其它区域相关基本都能通过 95%的显著性检验。冬季雪深的相关分布显示,除南北两侧边缘区外,高原 96°E 以西大部为显著的正相关区。从 SVD 分解的时间系数看,降水和雪深年际变化比较一致,两者相关为 0.71。总的来说, SVD 分解结果表明,冬季高原中西部雪深偏多,有利于云南夏季降水的偏多。

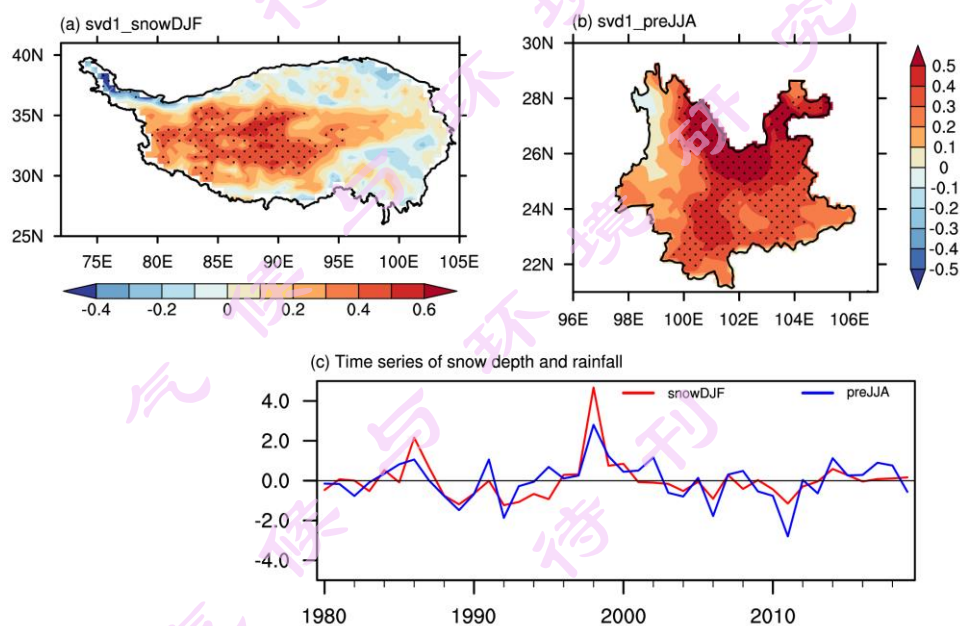


图 1 高原 DJF 雪深与云南夏季降水 SVD 分解第一模态异质相关分布和时间系数: (a) 高原 DJF 雪深, (b) 云南夏季降水, (c) 时间系数。(a) 和 (b) 图中带点区域为通过 95%显著性检验的区域。(c) 图中蓝线为 SVD 第一主模态对应的夏季降水的时间系数, 红线则为冬季雪深的时间系数。

Fig.1 Heterogeneous correlation of the first singular value decomposition (SVD) mode between the Tibetan Plateau (TP) snow depth and summer precipitation in Yunnan and the corresponding time series: (a) DJF TP snow depth, (b) summer precipitation in Yunnan, (c) the corresponding time series of snow depth (red line) and

rainfall (blue line). Regions above 95% confidence level are dotted in Fig (a) and (b).

JFM (1、2、3月平均)和FMA(2、3、4月平均)季节平均高原积雪与云南夏季降水的SVD第一模态与DJF结果(图1)十分相似。由图2可见,当青藏高原积雪表现为高原中西部多雪的模式时,降水云南降水模式显示为降水整体偏多,除西北部小部分区域外,降水为显著的正异常。JFM和FMA高原积雪与云南夏季降水SVD第一模态的时间序列(图略)相关系数分别为0.72和0.67。MAM(3、4、5月平均)高原雪深与云南夏季降水的SVD第一模态与DJF结果不一致(图略)。

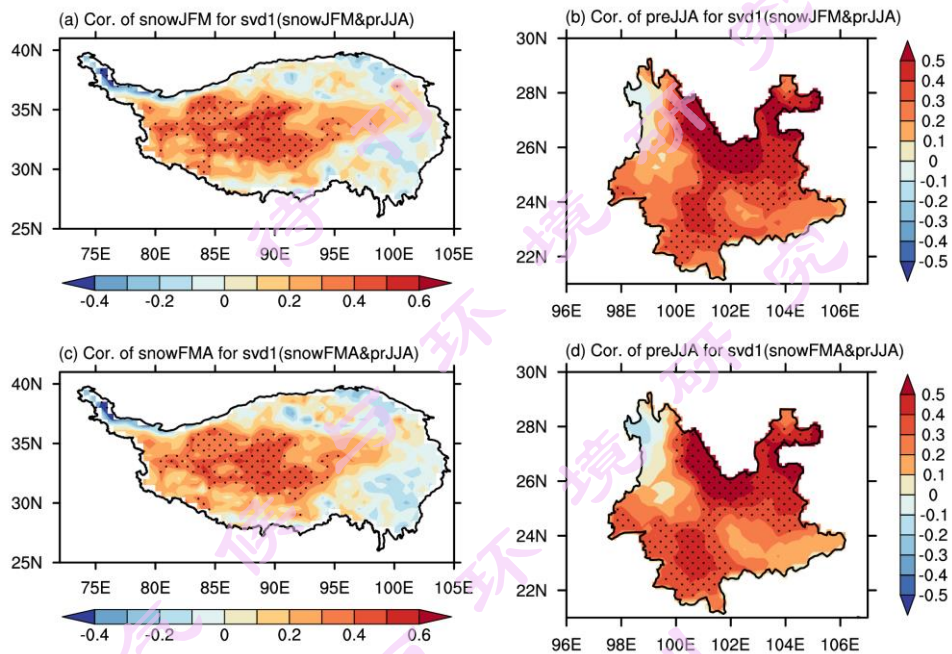


图2 高原雪深(左)与云南夏季降水(右)SVD分解第一模态异质相关分布:(a、b)高原JFM雪深与云南夏季降水,(c、d)高原FMA雪深与云南夏季降水。

图中带点区域为通过95%显著性检验的区域。

Fig.2 Heterogeneous correlation of the TP snow depth (left panel) and summer precipitation in Yunnan (right panel) for the SVD first mode. (a,b) for JFM TP snow depth and summer precipitation, (c,d) for FMA snow depth and summer precipitation.

Regions above 95% confidence level are dotted.

SVD分析给出的第一模态相关系数分布只是表征了响应信号最强的一种遥相关型,并不能完全代表降水对积雪变化的响应情况。为此,本文还对高原关键区的积雪与云南区域降水间的关系作了相关分析。将图1中SVD分解积雪相关显著的高原中西部区域(78-96°E, 29-36°N)选为高原积雪关键区。对高原积雪

关键区的积雪进行区域平均，作为高原积雪指数 (*ISD*)，并用于计算不同时间段的积雪指数 *ISD* 与云南夏季降水的相关。

图3给出了青藏高原DJF、FMA雪深指数与云南夏季降水相关的空间分布图。从冬季DJF雪深指数与夏季降水的相关来看，除西北部边缘区域外，其余区域两者均为正相关，显著正相关区域位于云南北部的金沙江流域及西南部分区域，这与SVD第一模态夏季降水相关大值区比较一致。从FMA雪深指数与夏季降水的相关来看，相关空间分布与图3(a)的比较接近，云南西北存在负相关区，其它区域基本为正相关，显著正相关也位于云南北部的金沙江流域及西南部分区域，只是西南的显著正相关区相比于图3(a)更偏向西南。总的来说，冬春季高原中西部雪深偏多，有利于云南夏季降水的增多，特别是云南北部的金沙江流域及西南区域，增多比较显著。

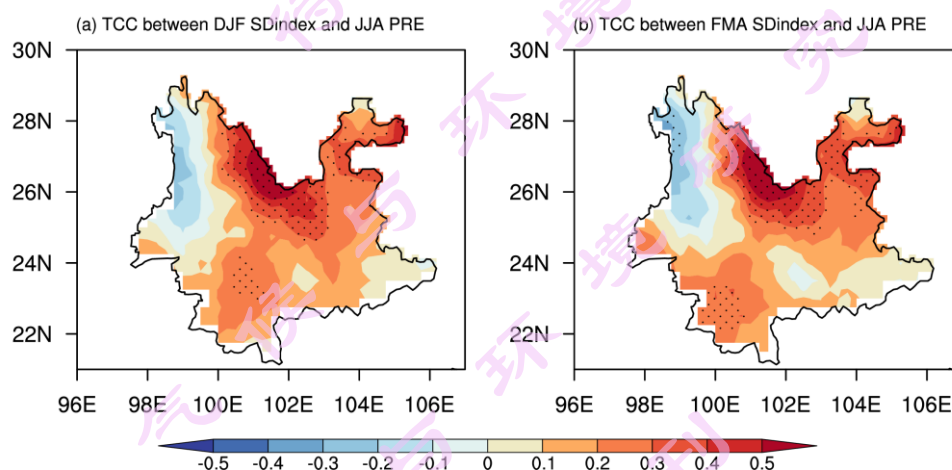


图3 DJF (a)、FMA(b) 雪深指数与云南夏季降水的相关，图中带点区域为通过90%显著性检验的区域。

Fig.3 Temporal correlation coefficients (TCCs) between summer precipitation in Yunnan and snow depth index in DJF (a), and in FMA (b). TCCs with black dots are statistically significant above 90% confidence level.

气候异常成因复杂，诸多影响因子对气候的作用是非线性的，高原积雪与中国降水之间的联系可能还存在其他因子的协同作用。ENSO是影响中国降水的重要因子，为了解积雪与云南降水的关系是否受ENSO的影响，本文计算了滤去ENSO信号后的雪深指数与云南夏季降水的相关。ENSO一般冬季发展最为强盛，本文将冬季NINO3区海温距平 (*Inino3*) 作为前期ENSO信号，通过一元线性回

归去除ENSO信号，可得到去除ENSO信号线性影响后的高原雪深 ISD_R ：

$$ISD_R = ISD - a * Inino3$$

式中的a为 ISD 向 $Inino3$ 的回归系数。我们计算了冬季雪深指数与冬季nino3指数相关，原始雪深指数与海温指数相关系数为0.23，扣除ENSO信号的雪深指数与NINO3指数相关为 $3.4 * 10^{-8}$ 。

图4为滤去ENSO信号后的雪深指数与云南夏季降水的相关。从图4上可见，去除ENSO作用后，高原中西部雪深与云南夏季降水的相关关系没有减弱，与图3相关分布比较一致，DJF积雪与降水的相关在除云南西北部小部分区域外，整个区域为正相关，显著相关区主要位于北部金沙江流域和云南西南部。FMA高原中西部雪深与云南夏季降水的相关关系在去除ENSO的影响后也没有明显变化，显著正相关也位于云南北部的金沙江流域及西南区域，西南部的显著正相关范围甚至还略有增大。此外，我们也计算了雪深指数与云南夏季降水及ENSO指数的偏相关系数（图略）。通过偏相关计算，也可以得到去除ENSO信号线性影响后的高原雪深与云南降水的关系。从计算结果来看，偏相关系数分布与图4是基本一致的。因此，从上述分析看，冬春季高原中西部关键区域雪深与云南夏季降水的关系基本不受ENSO的影响，是独立于前期ENSO信号的。

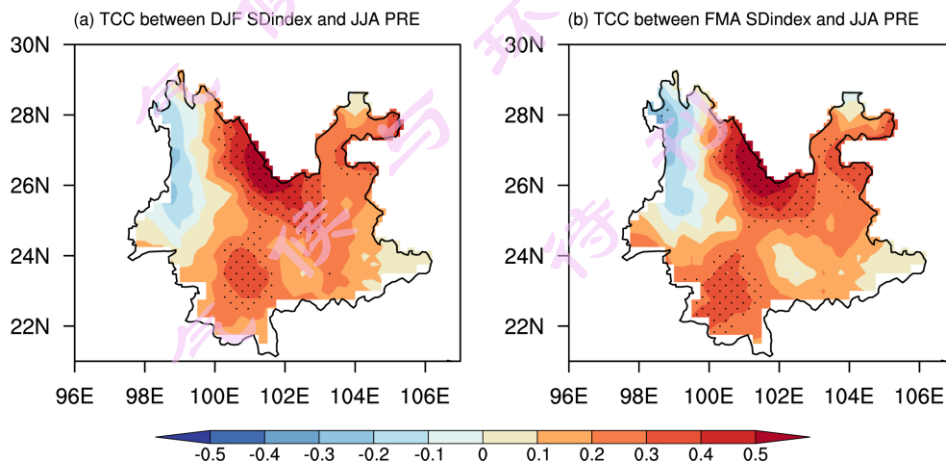


图4 去除冬季ENSO作用的DJF (a) 及FMA (b) 雪深指数与云南夏季降水的相关，图中带点区域为通过90%显著性检验的区域。

Fig.4 TCCs between summer precipitation in Yunnan and (a) DJF, and (b)FMA snow depth index after remove the effect of ENSO. TCCs with black dots are statistically significant above 90% confidence level.

3.2 高原关键区雪深对云南夏季降水影响的可能机制

通过上节分析可以知道，对应于前期高原中西部积雪偏多，云南夏季降水偏多。为探讨高原积雪影响云南夏季降水的过和途径，我们首先利用回归方法估算了大气环流场对高原积雪异常的响应情况。本节所使用的积雪指数为滤去ENSO信号的积雪指数。因为FMA积雪包含了冬季和春季的积雪信息，所以本节给出使用FMA积雪指数进行回归分析的结果，DJF、JFM积雪指数的回归结果与之非常接近。

图5给出了 FMA积雪指数回归的700hPa风场和500hPa高度场。从图5可以发现，当高原中西部积雪偏多时，北印度洋区域为东风异常，南亚夏季风偏弱，南亚季风低压偏弱，对应孟加拉湾西北部为反气旋环流，青藏高原南侧为异常偏西气流，偏西气流一直到达云南区域，加强了西边界的水汽输送。此外，高原中西部积雪偏多时，南海上为异常反气旋环流控制，有利于云南地区西南风的增强及其水汽的输送。刘华强等（2005）利用气候模式考察高原西部积雪的气候效应，发现西部积雪增多对应孟加拉湾北部至我国东南部为明显的反气旋环流差值带，与本文结果比较接近。

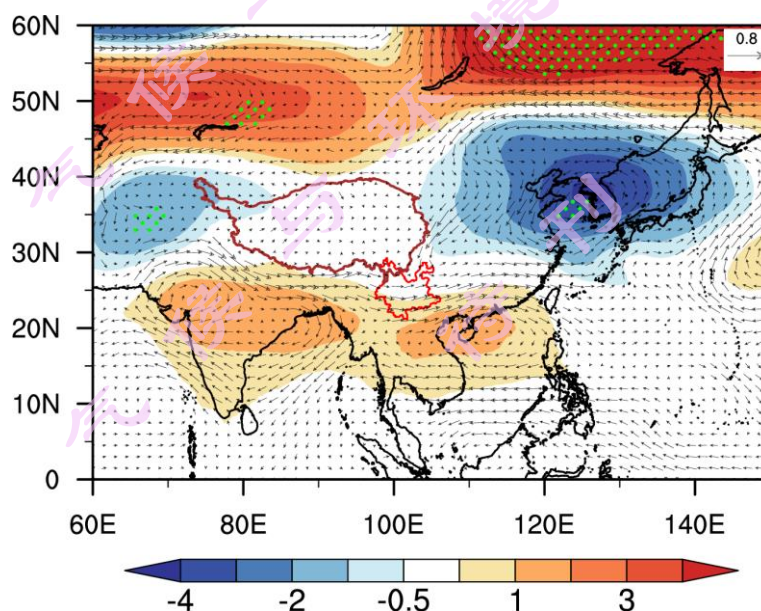


图5 FMA积雪指数回归的夏季700hPa风场（单位： m s^{-1} ）和500hPa高度场（单位：10位势米），图中绿色带点区域为高度场的回归场通过90%显著性检验的区域。

Fig.5 Regression pattern of 700 hPa wind (vectors; unit: m s^{-1}) and 500hPa geopotential height (shaded, unit: 10gpm) in summer with respect to FMA snow depth

index. Green dots denote where the regression coefficients exceed the 90% confidence level based on Student's t test.

高原南侧偏西气流，与南海反气旋西北侧的西南风在云南上空形成低空切变，有利于云南区域气流的辐合和抬升。已有研究也表明，中低空切变是云南夏季降水的主要动力机制（王秀英和王俊杰，2021）。从积雪指数回归的500hPa垂直速度场（图略）可以发现，500hPa等压面上云南上空为负相关，说明前期高原中西部积雪偏多时，云南区域为上升气流控制，有利云南夏季降水增多。此外，从图5还可以发现，对应于高原中西部积雪偏多，东北亚为异常气旋性环流，西侧冷空气南下到云南地区，与暖湿气流汇合，有利云南夏季降水的增多。

区域降水的变化与区域水汽辐合关系密切，即水汽辐合越强，降水越多。将水汽输送通量及散度回归到FMA积雪指数上（图6），发现东亚季风环流在菲律宾群岛周边向西水汽输送增强。该异常环流在我国南海和北孟加拉湾分别形成了两个反气旋异常。孟加拉湾反气旋引起的高原南侧西风异常携带水汽从云南的西边界向云南输送，南海反气旋在西南翼带动更多的气流从中南半岛进入云南地区，云南区域为负的水汽通量散度，水汽通量在云南地区辐合，有利于云南区域降水的形成。

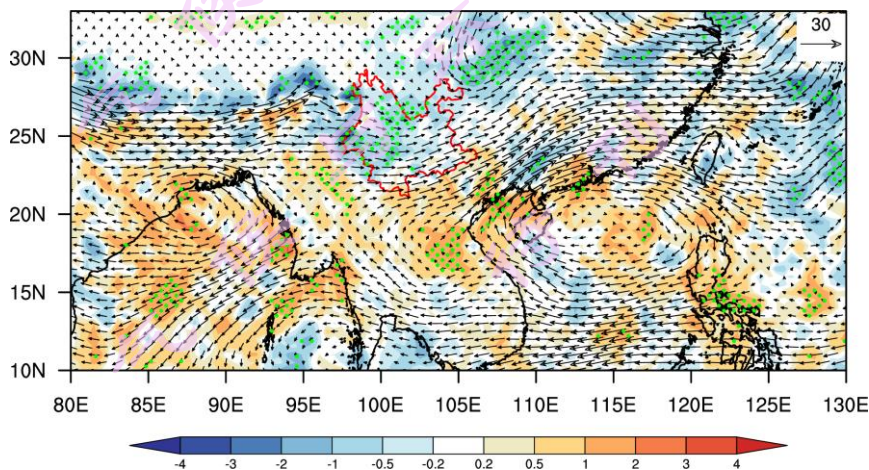


图6 FMA积雪指数回归的夏季整层水汽输送通量（单位： $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ ）和水汽输送通量散度（单位： $10^{-5}\text{kg}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ），图中绿色带点区为水汽输送通量散度的回归场通过90%显著性检验的区域。

Fig.6 Regression pattern of vertically integrated water vapor flux (vectors; unit: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$) and divergence (shaded, unit: $10^{-5}\text{kg}\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) in summer with respect to FMA

snow depth index. Green dots denote where the regression coefficients of water vapor flux divergence exceed the 90% confidence level based on Student's t test.

上述分析表明，高原中西部积雪偏多所对应的夏季大气环流是有利于云南夏季降水的。那么高原积雪是通过怎样的物理过程影响大气环流的？我们给出了FMA积雪指数回归的春季气温（图7）。由于冬春季高原中西部积雪的偏多，高原对大气的加热作用减弱，高原及周边地区呈现冷偏差。由图7可见，春季高原大部及高原西南侧南亚北部的近地面为冷偏差，500hPa上高原大部也为冷偏差。温度异常的这种分布，不利于青藏高原以南地区春末初夏对流层温度梯度的转向，进而导致亚洲夏季风爆发偏晚（张顺利和陶诗言，2001），南亚夏季风偏弱。由积雪指数回归的风场图（图5）也可见，北印度洋为东风异常，说明高原中西部积雪偏多，南亚夏季风偏弱。

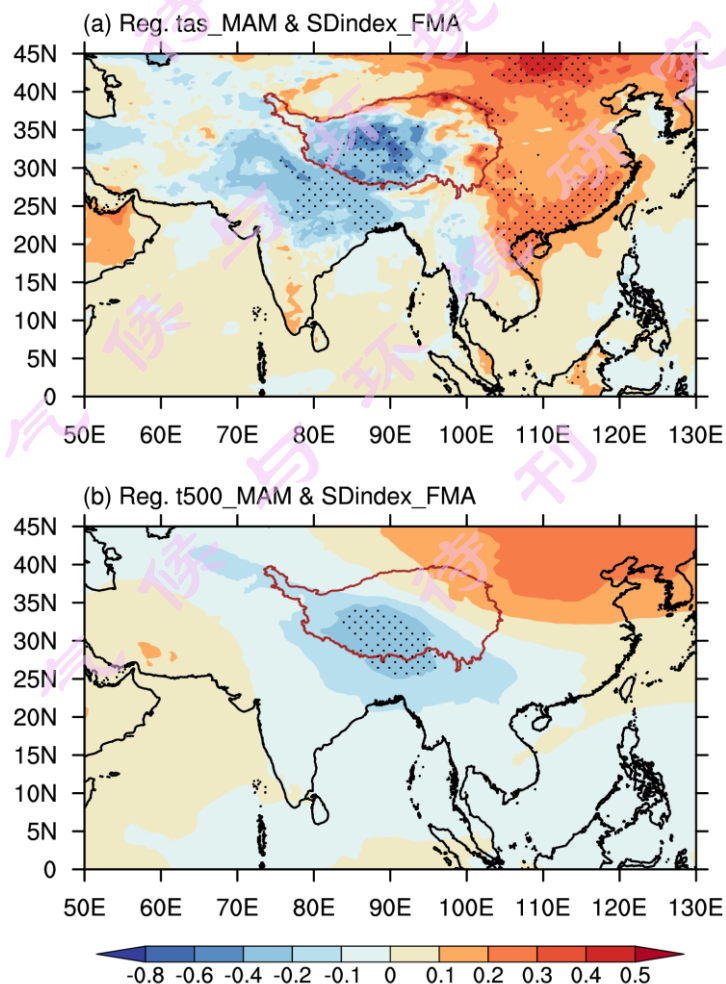


图7 FMA积雪指数回归春季 (a) 近地面和 (b) 500hPa气温 (单位: 度), 图中带点区为通过90%显著性检验的区域。

Fig.7 Regression pattern of spring (a) near surface temperature and (b) 500hPa air

temperature (unit: K) with respect to FMA snow depth index. Black dots denote where the regression coefficients exceed the 90% confidence level.

从FMA积雪指数回归的夏季气温场看(图8),夏季高原西部及高原以西区域近地面气温为负回归值,500hPa气温也是如此,这说明冬春季高原中西部积雪偏多,对应夏季高原西部及高原以西区域气温的偏低。由于夏季高原中东部的积雪已经融化,因此也只有冬春季高原西部的积雪异常能持续到夏季。图9给出了FAM积雪指数与5-8月高原雪深的时间相关,由图可见,冬春季高原中西部积雪偏多,对应5-6月高原西部雪深的偏多,7-8月积雪偏多区则在高原西部的边缘地区,夏季高原西部区域的积雪偏多有利于高原西部及附近区域气温偏低。

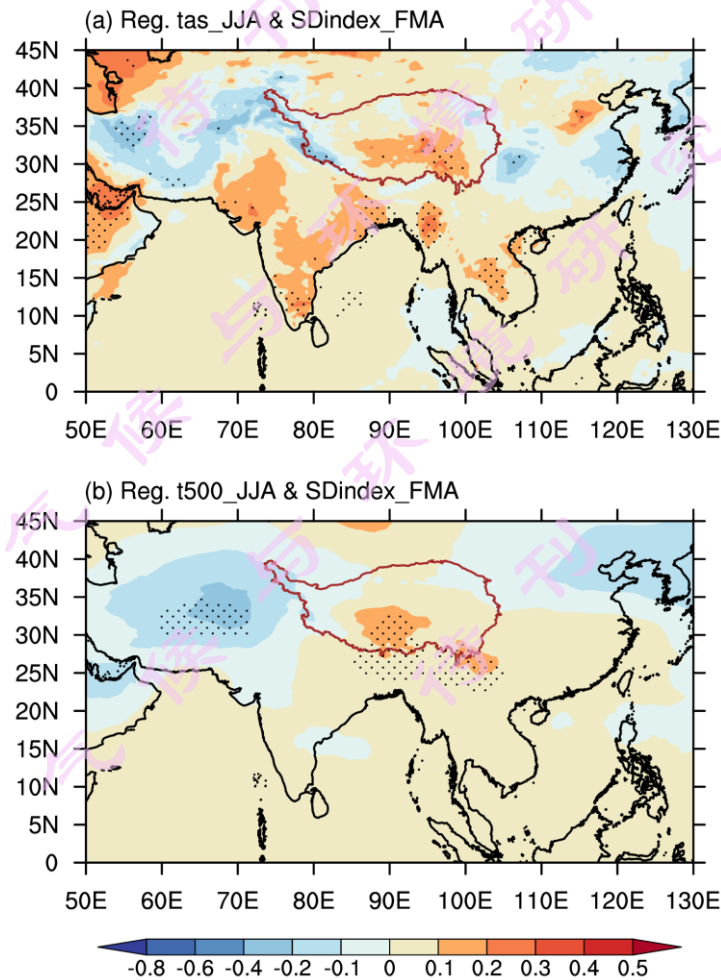


图8 FMA积雪指数回归夏季(a)近地面气温和(b)500hPa气温(单位:度),图中带点区为通过90%显著性检验的区域。

Fig.8 Regression pattern of summer (a) near surface temperature and (b) 500hPa air temperature (unit: K) with respect to FMA snow depth index. Black dots denote

where the regression coefficients exceed the 90% confidence level.

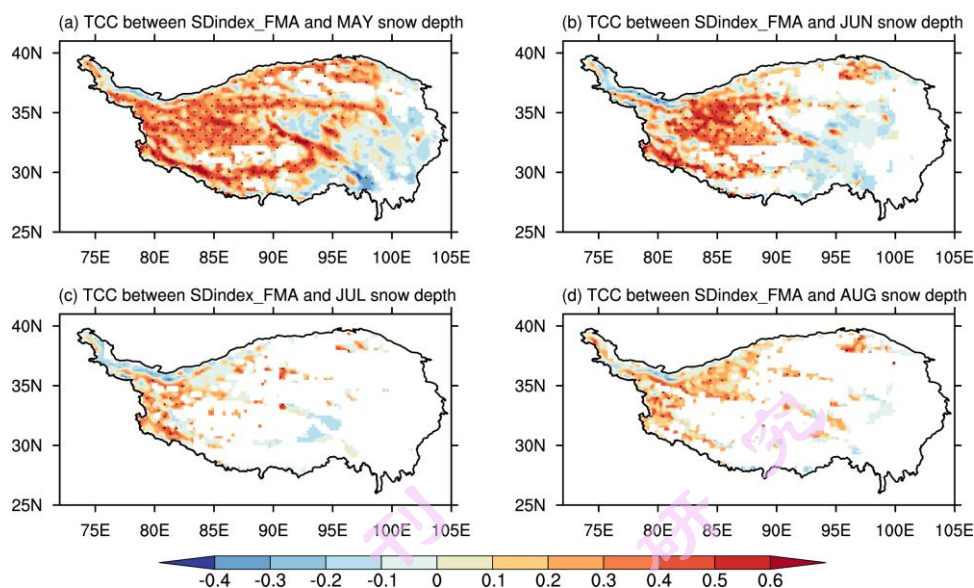


图9 FMA积雪指数与 (a) 5月、(b) 6月、(c) 7月和 (d) 8月高原雪深的时间相关

Fig.9 TCC between FMA snow depth index and snow depth in (a) May, (b) Jun, (c) July and (d) August. TCCs with black dots are statistically significant above 90% confidence level

已有研究表明，高原积雪异常所引发的表面热力状况改变，能激发高、低空的Rossby波列（霍飞等，2014），从而影响东亚环流。图10给出了FMA积雪指数回归的夏季200hPa和850hPa环流场。为了突出高原积雪与Rossby波之间的联系，去除纬向平均流对二者联系的影响，在回归前每个格点的各大气变量均去除其纬向平均值（霍飞等，2014）。从图10上可以发现，对流层高层自高原西部经蒙古到达东北亚呈现明显的“负—正—负”位势高度异常传播，东北亚为气旋性环流异常，气旋性环流西侧的偏北气流有利于中高纬冷空气南下。低层850hPa在高原南侧为“负—正—负”的波列，波列起源于高原西南侧，经孟加拉湾至中国南海，导致南海的反气旋性异常环流。

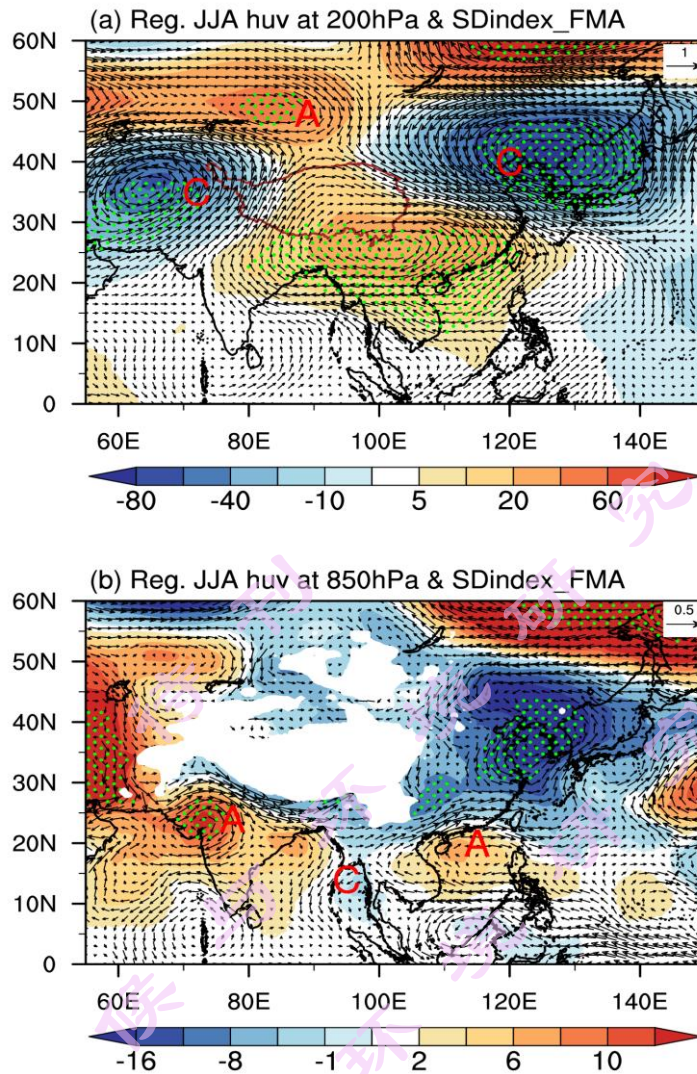


图10 FMA积雪指数回归的夏季 (a) 200hPa及 (b) 850hPa风场 (单位: m/s) 和高度场 (单位: 位势米), 图中绿色带点区为高度场回归场通过90%显著性检验的区域。

Fig.10 Regression pattern of summer wind (vectors; unit: m s^{-1}) and geopotential height (shaded, unit: m) at 200hPa (a) and 850hPa (b) with respect to FMA snow depth index. Green dots denote where the regression coefficients for geopotential height exceed the 90% confidence level based on Student's t test.

总的来说, 冬春季高原中西部积雪偏多时, 春季高原中西部及附近区域近地面气温降低, 南亚夏季风偏弱, 南亚季风低压减弱, 高原南侧为西风异常; 此外, 当前期高原中西部积雪偏多时, 夏季高原西部温度偏低, 激发高低空波列。高层波列沿中高纬西风急流传播, 东北亚为气旋性环流异常, 气旋性环流西侧的偏北气流有利于中高纬冷空气南下到云南地区, 与低纬来的暖湿气流汇合, 可导致云

南地区夏季降水偏多。低层波列自高原西南侧往南海传播，低层南海为反气旋环流，高原南侧西风和南海反气旋西北侧的西南风在云南上空形成低空切变，有利于云南夏季降水。

4 结论与讨论

基于1980-2019年总共40年的中国区域长时间序列雪深资料、CN05格点降水资料及ERA5大气再分析资料，研究前期青藏高原雪深与云南区域夏季降水的关系。从SVD分解结果来看，冬春季高原中西部雪深偏多，有利于云南夏季全域降水的偏多。计算前期高原关键区（中西部）区域平均雪深与云南夏季降水的关系发现，冬春季高原中西部雪深偏多对应云南大部夏季降水的偏多，特别是云南北部金沙江流域和西南部区域偏多显著。进一步的分析表明，去除前期ENSO影响后，高原雪深与云南夏季降水的这种相关关系变化很小，说明前期高原雪深与云南夏季降水的关系基本不受ENSO的影响。

利用线性回归方法初步揭示了冬春季高原关键区雪深对云南夏季降水的可能影响机制。结果表明，前期高原中西部积雪偏多时，对应春季高原中西部及附近区域近地面气温降低，南亚夏季风爆发偏晚，南亚夏季风偏弱，对应南亚季风低压减弱，高原南侧为西风异常；此外，当前期高原中西部积雪偏多时，夏季高原西部温度偏低，激发高低空波列。高层200 hPa 波列沿中高纬西风急流传播，自高原西部经蒙古到达东北亚呈现明显的“负—正—负”位势高度异常传播，东北亚为气旋性环流异常，气旋性环流西侧的偏北气流有利于中高纬冷空气南下。对流层低层850hPa波列自高原西南侧往南海传播，导致低层南海为反气旋环流；高原南侧西风和南海反气旋西北侧的西南风在云南上空形成低空切变，有利于上升运动，云南水汽辐合增强，夏季降水增多，同时冷空气南下到云南地区，与低纬度暖湿气流汇合，也导致云南地区降水偏多。

以往研究工作大多采用集中于高原东部的站点观测资料来探讨高原积雪异常和大尺度旱涝的相关关系，本文则利用包含整个高原区域的遥感积雪资料来进行相关研究，发现高原冬春季中西部雪深对云南夏季降水有重要影响，突出了高原西部积雪的作用。就本文研究结果来看，冬春季高原积雪与云南夏季降水间的相关性存在区域差异，有些区域相关不是很高，如云南西北区域，这说明云南降水并不仅仅与高原积雪有关，可能还受到其他多种因素的影响。此外，本文基于

对观测资料的诊断分析,揭示了前期高原积雪和云南夏季降水的关系及其可能影响机制,具体物理机制需要我们在下一步工作中从数值模拟的角度出发,利用数值模式对此问题进行深入研究。

参考文献 (References)

- Che T, Li X, Jin R, et al. 2008. Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China. *Annals of Glaciology*, 49: 145-154.
- Chen L T, Wu R G. 2000. Interannual and decadal variations of snow cover over Qinghai-Xizang plateau and their relationships to summer monsoon rainfall in China [J]. *Advance in Atmospheric Sciences*, 17(1): 18-30.
- 陈兴芳, 宋文玲. 2000. 欧亚和青藏高原冬春季积雪与我国夏季降水关系的分析和预测应用 [J]. *高原气象*, 19 (2) : 214-223。Chen Xingfang, Song Wenling. 2000. Analysis of relationship between snow cover on Eurasia and Qinghai-Xizang Plateau in winter and summer rainfall in China and application to prediction [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (2): 214-223. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2000.02.010
- 除多, 洛桑曲珍, 林志强, 等, 2018. 近30年青藏高原雪深时空变化特征分析 [J]. *气象*, 44 (2): 233-243. Chu Duo, Luosang Quzhen, Lin Zhiqiang et al. 2018. Spatio-temporal variation of snow depth on Tibetan Plateau over the last 30 years. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 44(2): 233-243.
- 丁裕国, 江志红. 1996. SVD方法在气象诊断分析中的普适性. *气象学报*, 54(3): 365-372. Ding Yuguo, Jiang Zhihong. 1996. Generality of singular value decomposition in diagnostic analysis of meteorological field. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 54(3): 365-372. DOI: 10.11676/qxxb1996.037
- 段安民, 肖志祥, 王子谦. 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展 [J]. *大气科学*, 42 (4): 755-766. Duan Anmin, Xiao Zhixiang, Wang Ziqian. 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: A review. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 42(4): 755-766. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247.
- 郭志荣, 李慧敏, 赏益, 等. 2014. 1961-2012年夏季南亚高压与中国云南地区降水的关系

- [J]. 气象与环境学报, 30(6): 68-74. Guo Zhirong, Li Huimin, Shang Yi, et al. 2014. Relationships between South Asian High and precipitation in Yunnan region in summer from 1961 to 2012 [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(6): 68-74.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 146(730): 1999-2049.
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. 2023. ERA5 monthly averaged data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), DOI:10.24381/cds.6860a573.
- 霍飞, 江志红, 刘征宇. 2014. 春夏季青藏高原积雪对中国夏末秋初降水的影响及其可能机制 [J]. 大气科学, 38 (2): 352-362, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13139. Huo Fei, Jiang Zhihong, Liu Zhengyu. 2014. Impacts of late spring Tibetan Plateau snow cover on early autumn precipitation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 352-362.
- 琚建华, 陈琳玲. 2003. ENSO对云南地区降水影响的年代际变化[J]. 热带气象学报, 19(2):191-196. Ju Jianhua, Chen Linling. 2003. The influence of ENSO events upon Yunnan precipitation and its interdecadal variations. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19(2):191-196.
- 李小兰, 张飞民, 王澄海. 2012. 中国地区地面观测积雪深度和遥感雪深资料的对比分析. 冰川冻土, 34 (4): 755-764. Li Xiaolan, Zhang Feimin, Wang Chenghai. 2012. Comparison and analysis of snow depth over China, observed and derived from remote sensing. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 34(4):755-764.
- Li Y G, He D, Hu J M, et al. 2015. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China 1960-2012[J]. International Journal of Climatology, 35(2): 245-258.
- 李燕, 闫加海, 张冬峰. 2018. 青藏高原冬春积雪异常和中国东部夏季降水关系的诊断与模拟[J]. 高原气象, 37(2): 317-324. Li Yan, Yan Jiamei, Zhang Dongfeng. 2018. Diagnosis and simulation on the relationship between snow depth over Qinghai-Tibetan Plateau and summer precipitation in eastern China. Plateau Meteorology (in Chinese), 37(2): 317-324. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2017.00040.
- Lin Z H , Zeng Q C and B. Ouyang. 1996. Sensitivity of the IAP two-level AGCM to surface albedo Variations. Theoretical and Applied Climatology, 55, 157-162.

- 刘丽, 杨若文, 邢冬, 等. 2011. ENSO 发展和衰减阶段对云南夏季降水的影响研究[J]. 热带气象学报, 27(2): 278-282. Liu Li, Yang Ruo-wen, Xing Dong, Cao Jie. 2011. The influence of developing and decaying stages of ENSO on summer precipitation in Yunnan. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 27(2): 278-282.
- 刘华强, 孙照渤, 王举, 等. 2005. 青藏高原东西部积雪效应的模拟对比分析.高原气象, 24 (3): 357-365。 Liu Huaqiang, Sun Zhaobo, Wang Ju, Min Jinzhong. 2005. Modeling study on anomalous snow cover effects over western and eastern parts of Qinghai Xizang Plateau. Plateau Meteorology (in Chinese). 24(3): 357-365.
- 刘瑜, 赵尔旭, 彭贵芬, 等. 2007. 2005年春末初夏云南异常干旱与中高纬度环流[J]. 干旱气象, 25(1): 32-37. Liu Yu, Zhao Erxu, PengGuifen, et al. 2007. Severe drought in the early summer of 2005 in Yunnan and Middle-high latitudes circulation. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 25(1): 32-37.
- 王秀英, 王俊杰. 2021. 云南夏季降水异常的影响因子及物理统计预测方法. 气象科技, 49 (2): 200-210. Wang Xiuying and Wang Junjie. 2021. Influencing factors and physical statistical prediction methods of summer rainfall anomaly in Yunnan. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 49(2): 200-210.
- 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 (5): 1153-1164. Wang Shunjiu. 2017. Progresses in variability of snow cover over the Qinghai-Tibetan Plateau and its impact on water resources in China. Plateau Meteorology (in Chinese), 36 (5): 1153-1164. DOI: 10. 7522/j. issn.1000-0534. 2016. 00117.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报, 56 (4): 1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 56 (4): 1102-1111.
- 吴统文, 钱正安. 2000. 青藏高原冬春季积雪异常与中国东部地区夏季降水关系的进一步研究[J]. 气象学报, 58 (5) : 571-582。 Wu Tongwen, Qian Zheng'an. 2000. Further analyses of the linkage between winter and spring snow depth anomaly over Qinghai-Xizang Plateau and summer rainfall of eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (5): 570-581. doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2000.05.006
- Wu T W, Qian Z A. 2003. The relation between the Tibetan winter snow and the Asian summer

- monsoon and rainfall: an observational investigation [J]. *Journal of Climate*, 2003, 16: 2038-2051.
- 肖子牛, 石文静, 段玮. 2016. 云南夏季降水量在21世纪初的突变减少及原因分析. *气象*, 42 (3): 261-270. Xiao Ziniu, Shi Wenjing, Duan Wei. 2016. Abrupt decrease of Yunnan summer rainfall in the early 21st century and its possible reasons. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 42(3): 261-270.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over china and its application in validating a RCM simulation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (4): 763–772.
- Xue Y K, Yao T D, Aaron A. Boone, et al. 2021. Impact of Initialized Land Surface Temperature and Snowpack on Subseasonal to Seasonal Prediction Project, Phase I (LS4P-I): organization and experimental design. *Geosci. Model Dev.*, 14: 4465–4494, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-4465-2021>.
- Yao T D, Thompson L, Yang W, et al, 2012. Different glacier status with atmosphere circulations in Tibetan Plateau and surroundings [J]. *Nature Climate Change*, 2(9): 663-667. DOI: 10.1038/nclimate 1580.
- You Q L, Wu T, Shen L C, et al. 2020. Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system. *Earth-Science Reviews*, 201, 103043.
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲季风影响的诊断及数值模拟研究[J]. *大气科学*, 25(3): 372-290. Zhang Shunli, Tao Shiyan. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (3): 372–290. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2001.03.07
- 张小玲, 据建华, 王三杉. 1999. El Niño对云南初夏降水的影响[J]. *热带气象学报*, 15(2): 168–176. Zhang Xiaoling, Ju Jianhua, Wang Sanshan. 1999. El NINO's impact on early summer precipitation in Yunnan. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 15(2): 168–176.
- 张云瑾, 张天圣. 2008. 亚洲热带近海海温与云南夏季降水的关系. *气象科技*, 36 (1): 31-34. Zhang Yunjun, Zhang Tiansheng. 2008. Relationship between SST over offshore waters of South and Southeast Asia and summer precipitation in Yunnan. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 36(1): 31-34.
- 赵红旭. 1999. 青藏高原积雪与云南夏季降水及气温的关系. *气象*, 25 (4): 48-51. Zhao

Hongxu. 1999. The relationship between the snow cover of the Qinghai-Tibet Plateau and the temperature and precipitation in summer in Yunnan province. Meteorological monthly (in Chinese), 25(4): 48-51.

Zhao P, Zhou Z J, Liu J P. 2007. Variability of Tibetan spring snow and its associations with the Hemispheric extratropical circulation and East Asian summer monsoon rainfall: An observational investigation [J]. J. Climate, 20(15): 3942-3955.

气候与环境研究
待刊