

春季青藏高原积雪年际变率的年代际转型对东亚夏季风影响的研究进展

张超 段安民*

厦门大学海洋与地球学院, 近海海洋环境科学国家重点实验室, 361102

摘要: 冬春青藏高原积雪异常是东亚夏季风的重要预测因子之一。本文系统回顾了近 20 年关于高原积雪年际变率的年代际转型影响东亚夏季风的相关研究, 主要结论如下: (1)1990s 初春季青藏高原积雪的年际变率从东西偶极型转变为全区一致型, 这主要受北太平洋、热带大西洋海温异常变化的影响, 也与南极涛动、北极涛动的变化密切相关; (2)春季青藏高原积雪年际变率的年代际转型可通过影响东亚高层的副热带西风急流和低层的水汽输送, 进而影响东亚夏季风降水格局变化; (3)青藏高原积雪异常可通过“高原大气河”的机制影响梅雨雨带; (4)大西洋年代际振荡可调节春季青藏高原积雪与梅雨降水关系的年代际变化, 当大西洋年代际振荡为正(负)位相时, 春季青藏高原积雪与梅雨的关系加强(减弱)。最后, 本文对青藏高原积雪异常影响东亚季风变化的关键科学问题进行了讨论与展望。

关键词: 青藏高原; 积雪; 东亚夏季风; 降水

文章编号: 2023306A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2309.23306

收稿日期: 2023-04-18; 网络预出版日期:

项目基金: 本研究由国家自然科学基金重点项目(42030602 和 42305016)和近海海洋环境科学国家重点实验室(厦门大学)博士后基金资助共同资助。

***通讯作者** amduan@xmu.edu.cn

Research progress on the influence of interdecadal transition of interannual variability of spring snow over the Tibetan Plateau on East Asian summer monsoon

Chao Zhang, Anmin Duan*

State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University,
Xiamen 361012, China

Abstract: Tibetan Plateau (TP) snow anomalies (TPSA) in winter-spring is one of the important predictors of the East Asian summer monsoon (EASM). This paper systematically reviews the studies on the impacts of the interdecadal transition of TPSA on the EASM in recent 20 years. The main conclusions are as follows: (1) interannual variability of the TPSA shows a striking shift from an east-west dipole to a mono-sign structure, which was affected by the sea surface temperature anomalies in the North Pacific and tropical Atlantic, and also bound up with the Antarctic Oscillation and Arctic Oscillation. (2) The interdecadal change of the TPSA in spring influences the EASM precipitation by impacting the subtropical westerly jet in the upper troposphere and the low-level moisture transport. (3) The TPSA can impact the Meiyu rain belt through the “TP atmospheric river” mechanism. (4) The Atlantic Multi-decadal Oscillation can modulate the relationship between the spring TPSA and the Meiyu precipitation. This relationship is robust (weak) during the positive (negative) phase of the Atlantic Multi-decadal Oscillation. Finally, this paper discusses the and prospects the key scientific issues in the influence of the TPSA on the EASM.

Keywords: Tibetan Plateau (TP); snow; East Asian summer monsoon; precipitation

1 引言

青藏高原(以下简称高原)冰雪覆盖的大值区是欧亚大陆数十条河流的发源地, 因此高原被誉为“亚洲水塔”(Immerzeel et al., 2010; Kraaijenbrink et al., 2021; Yao et al., 2022a, 2022b)。高原可通过跨极地的水汽输送成为“南北极的水汽窗口”, 亦可通过西风-季风相互作用实现跨半球的水汽输送, 从而构建起“世界水塔”独特的大气-水文功能体系(Xu et al., 2008; Immerzeel et al., 2020; Xu et al., 2021)。融化季节的高原积雪对周边河流和局地水汽的贡献可超过 65% (Bookhagen and Burbank, 2010; Kraaijenbrink et al., 2021; Zhang and Jia, 2022), 因此高原积雪的气候效应一直是科学界关注的热点问题。

除高原积雪的水文效应外, 隆升高原的积雪覆盖亦可通过对流层高层的扰动激发定常 Rossby 波, 进而影响周边甚至全球的气候异常(Xu et al., 2012; Henderson et al., 2018; Wang et al., 2018; Wang et al., 2020; You et al., 2020; Jia et al., 2021; Liu et al., 2022, 2023; Zhang et al. 2023b)。近年来观测和数值模式的模拟结果表明, 前期冬春高原积雪异常可显著影响东亚夏季风的年际和年代际变率(朱玉祥和丁一汇, 2007; Wu et al., 2012; Si and Ding, 2013; Xiao and Duan, 2016; Wang et al., 2020, 2021; Zhang et al., 2021; Zha and Wu, 2022)。

在年际尺度上, 冬春高原积雪可通过反照率效应调控高原非绝热冷却过程, 进而通过局地环流响应、西风-季风相互作用和海陆热力差异等多种途径影响东亚夏季风异常(Zhao et al., 2007; Wang et al., 2017, 2018, 2021; 车涛等, 2019; Zha and Wu, 2022); 另一方面, 冬春高原积雪异常亦可通过持续积雪强迫和积雪融水引发大尺度的大气水汽以及高原东移涡的发展, 进而影响江淮流域、日本和朝鲜半岛等东亚沿岸的夏季风雨带(段安民等, 2014; Liu et al., 2014; Xiao and Duan, 2016; Zhang et al., 2021)。

在年代际尺度上, 1990s 之后冬季高原积雪偏少有利于随后春夏高原感热和短波辐射增多, 并通过减弱海-陆热力对比使得东亚夏季风降水向北推进(Zhang et al., 2004; Si and Ding, 2013; Si, 2014; 段安民等, 2018); 同时, 1990s 之后, 当高原积雪偏少时有利于高层反气旋环流的响应, 后者南侧的东风会削弱东亚上空副热带西风急流的强度, 从而加强了厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)对东亚遥相关的影响, 进一步加强了对东亚夏季风降水的影响(Wu et al., 2012; You et al., 2020)。

值得注意的是, 近 50 年春季高原积雪的年际变率发生了显著的年代际变化, 使得春季高原积雪年际变率表现出年代际转型特征(Zhang et al., 2022, 2023a)。春

季高原积雪的年代际变化对东亚夏季风有何影响？春季高原积雪与东亚夏季风的联系是否受到太平洋年代际振荡(PDO)、大西洋年代际振荡(AMO)、南极涛动(AAO)、以及北极涛动(AO)等年代际背景信号的调控？ENSO 作为调控东亚夏季风的关键系统之一，春季高原积雪与东亚夏季风的联系是否与 ENSO 有关？本文将通过回顾和梳理近年来国内外相关研究，结合最新资料诊断分析，对上述问题予以解答，并对当前的研究不足和未来可能的研究方向提出建议。

2 数据和方法

本文使用的资料和数据包括：由 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)提供的 1966 年至今卫星反演的北半球积雪覆盖率(snow cover extent)数据(Robinson et al., 2012)，该数据链接为：<https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C00756>；由 Climatic Research Unit gridded Time Series (CRU TS)提供的 1901 至 2020 年逐月降水资料(Harris et al., 2020)，数据链接为：<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>；以及 European Center for Medium-Range Weather Forecasts' fifth generation reanalysis (ERA5) 提供的 1950 年至今的大气变量(Hersbach, 2019)，数据链接为：<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>。

本文使用高斯滤波技术对数据进行尺度分离：先对资料进行去趋势处理，再将低于 8 年的高频信号作为年际尺度信号，高于 10 年的低频信号作为年代际尺度信号。本文使用经验正交函数(EOF)提取高原积雪年际变率的主模态的空间分布。此外，本文使用了偏回归、滑动相关、以及 Student's t 双侧检验。

3 春季高原积雪年际变率的年代际转型

3.1 春季高原积雪年际变率的年代际转型特征

近 50 年秋季高原东部积雪年际变率的年代际转变时间出现在 1980s 中期(Qian et al., 2019, 2020)，而 ENSO 与春季高原东部积雪关系的转折以及后者对北美气候影响的突变时间均为 2000s 初期(Wang et al., 2020, 2021, 2023)，可见不同季节高原积雪发生年代际突变的时间有所不同。

近期研究表明，高原积雪的空间分布有显著的年代际转型特征，其突变年份为 1990(Zhang et al., 2022, 2023a; 张超, 2022)。图 1 为经验正交函数分解得到的 1990s 初前后春季高原积雪年际变率第一模态的空间分布。从春季高原积雪分布的第一模态可知：1990s 初春季高原积雪由东西偶极型转变为全区一致型(Zhang

et al., 2022, 2023a)。

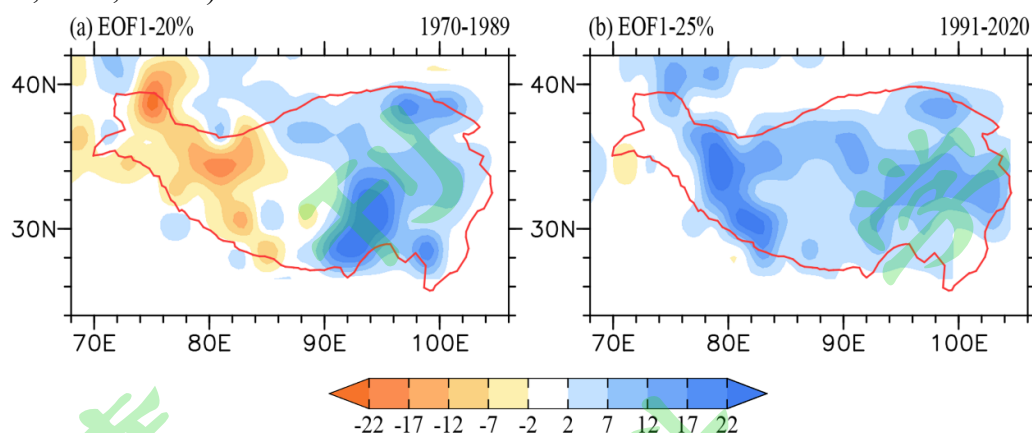


图 1 基于经验正交函数分解得到的(a)1970-1989 年和(b)1991-2020 年春季高原积雪(snow cover extent)年际分量的第一模态，其解释方差分别为 20%和 25%，单位为%。图片改自

Zhang et al., 2023a, 时间序列详情见该论文。

Figure 1 First empirical orthogonal function mode of interannual component of snow cover extent in spring during (a) 1970-1989 and (b) 1991-2020. The explained variance is 20% and 25%. Unit is %. Figure revised from Zhang et al., 2023a, and timeseries see this literature.

3.2 春季高原积雪年际变率的年代际转型成因

国内外研究分别从 ENSO、印度洋偶极子(IOD)、北大西洋海温异常、北极海冰、北极涛动(AO)和西北太平洋遥相关等海-冰-气相互作用的过程和途径广泛讨论了春季高原积雪的动力学成因，并指出海-冰-气相互作用引发的大尺度波列是春季高原积雪形成的重要原因(Smith and Bookhagen, 2018; Jiang et al., 2019; Wang et al., 2019, 2021; Zhang et al., 2019; li et al., 2020)。然而，这些研究主要关注高原东部或高原西部积雪年际变率的成因。

从海-气相互作用视角来看，1990s 之前春季高原偶极型积雪受到北太平洋海温异常的显著影响，而 1990s 之后春季高原全区一致型积雪异常主要受热带大西洋海洋异常的影响(张超，2022)。1990s 初之前，北太平洋冷海温异常激发的大尺度波列可沿西风急流传播至高原，并在高原东部形成气旋、西部形成反气旋，气旋东侧的西南风异常有利于孟加拉湾的暖湿水汽输送至高原东部，气旋西侧的东北风异常则可将高纬度干冷空气输送至高原西部，从而形成高原东西偶极型积雪分布(图 2a)；1990s 初之后，热带大西洋暖海温异常可通过热带 Kelvin 波和跨洋盆激发的中纬度 Rossby 波列，分别将孟加拉湾暖湿水汽和高纬度干冷空气输送至高原，再通过水汽与冷空气辐合影响高原全区一致型积雪分布(图 2b)。

从大气环流的主模态来看，Zhang et al. (2023a)发现南极涛动(AAO)和北极涛动(AO)是春季高原偶极型和全区一致型积雪分布的重要原因。研究指出，1990s初之前，AAO 负异常时可通过向北传至澳大利亚的波列和澳大利亚至高原的翻转环流将南极和高原联系起来，并在高原西部形成反气旋、东部形成气旋环流，从而影响高原东西偶极型积雪分布；1990s 初之后，AO 正异常时存在北极至高原的波列，并在高原上空形成气旋环流，进而影响高原全区一致型的积雪分布。

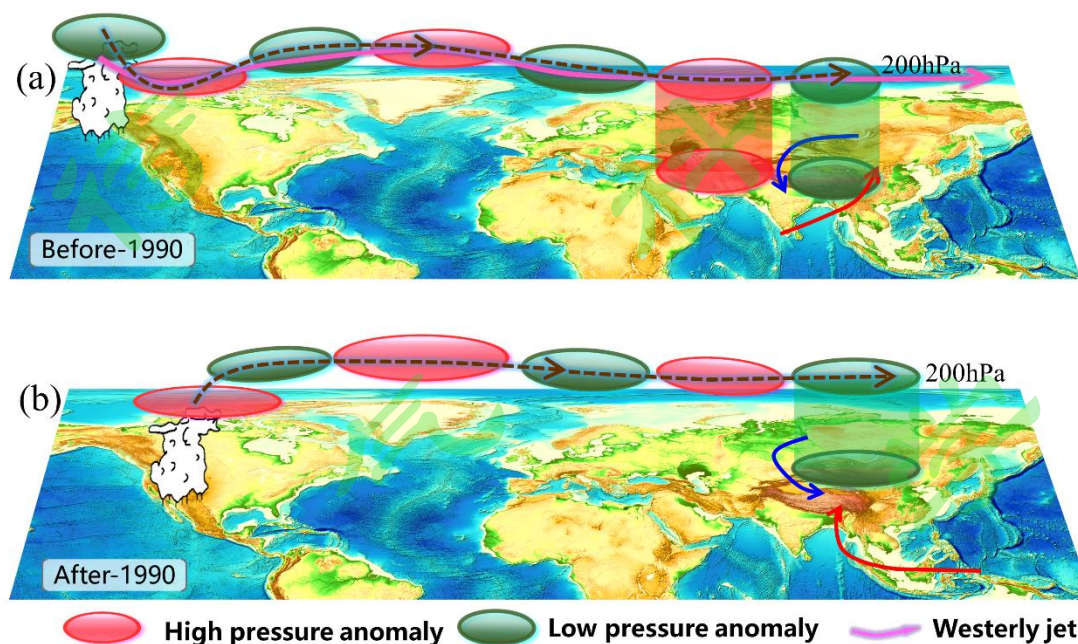


图 2 北太平洋和热带大西洋海-气相互作用影响 1990s 初春季高原(a)偶极型和(b)一致性积雪分布的示意图。

Figure 2 Schematic diagram shows the impacts of North Pacific (tropical Atlantic) ocean-atmosphere interaction on the (a) dipole and (b) monopole snow cover extent in spring around the early 1990s.

4 高原积雪分布对东亚夏季风影响的研究进展

4.1 高原积雪异常对气候系统的影响机理

积雪的反照率效应、水文效应和高空扰动是高原积雪作用于周边和遥远地区气候异常的主要方式。

积雪的反照率效应：高原积雪异常偏多时使得高原反照率偏高，导致更多短波辐射被反射到大气中，当陆面接收的短波偏少时，一方面使得陆面温度降低 (Wang et al., 2018, 2021, 2023)；另一方面，陆面接收的短波偏少致使高原向大气释放的长波辐射减少，进一步冷却高原上空的大气，使得高原上空形成冷源异常，

从而导致高原上空的整个对流层出现冷却异常(Wu and Li, 2016; You et al., 2020; Zha and Wu, 2022)。

高原积雪的水文效应应有两种, 一是积雪融水对河流径流的贡献。研究指出, 高原冰川分布在高原高海拔区域, 而高原积雪分布在高原大部分海拔地区(Smith and Bookhagen, 2018)。高原积雪融水可供给周边地区数十条河流, 且融化期积雪融水对河流径流的贡献超过 65%(Bookhagen and Burbank, 2010; Wulf et al., 2016; Kraaijenbrink et al., 2021); 高原积雪融水蒸发还可造成大气中的水汽增加(Zhang et al., 2004; Si and Ding, 2013; Xiao and Duan, 2016)。5-8 月是高原积雪变化影响大气水汽异常的主要时段, 且随着时间推移积雪引发大气的水汽发生明显的西移特征。高原积雪融水可形成大气中的水汽源, 同时积雪融化吸热引发局地的非绝热冷却, 从而激发高原上空的气旋环流, 该系统进一步作为驱动大尺度水汽输送的载体, 可将高原水汽源的水汽输送至下游地区, 从而形成高原独特的大气水文功能体系(Zhang and Jia, 2022)。

高原积雪覆盖矗立在对流层中层, 可直接影响对流层中高层的扰动异常(Zhang et al., 2004; Qian et al., 2020; Zhang et al., 2021, 2023b), 也可通过局地扰动影响高原涡的产生(Zhang et al., 2004; Xiao and Duan, 2016)。此外, 高原积雪异常还可通过高层扰动和局地冷却引发沿急流向太平洋、北美地区甚至大西洋传播的大气波列, 进而影响全球的气候异常(Qian et al., 2019; Wang et al., 2020; Zhang et al., 2023b)。

当前关于高原积雪影响大尺度大气环流的主要分歧在于积雪反照率效应的发生时间。早期的研究指出(Yasunari et al., 1991), 积雪的反照率效应集中在冬春时节, 而夏季则不存在。近年来的研究则认为即使在夏季, 隆升高原的积雪覆盖, 尤其是高原西部矗立在对流层中层的永久性积雪亦能通过反照率效应驱动大尺度环流异常(Wu and Li, 2016; Jin et al., 2018; Wang et al., 2018, 2021, 2023)。

4.2 东亚夏季风格局与高原积雪分布的关联

高原积雪不同空间分布形态与东亚夏季风的关系有明显差异(Xu et al., 2012; Si and Ding, 2013; Wang et al., 2017, 2018; Xiao and Duan, 2016; Zhang et al., 2021)。Si and Ding (2013)指出, 2000 年之前冬季高原东部积雪与长江以南夏季风降水显著正相关关系, 但 2000 年之后仅与江淮流域降水存在较弱的正相关。Xiao and Duan(2016)指出, 5 月高原西部积雪与江淮流域夏季降水存在显著的正相关关系。Wang et al.(2017)则认为, 冬春高原南部(中西部)积雪与华南夏季降水呈负(正)相

关, 冬春高原北部积雪与江淮流域夏季降水呈正相关、华北至东北呈负相关。然而, 也有研究认为夏季高原西部和南部积雪均与江淮流域至日本南部的夏季风降水呈正相关关系(Wang et al., 2018, 2021)。可见, 东亚夏季风降水与高原积雪分布的关联存在较大争议, 这与不同研究积雪资料和时段的选取有关。因此, 考虑高原积雪空间分布随时间的变化, 并探讨其与东亚夏季风之间的关联尤为必要。

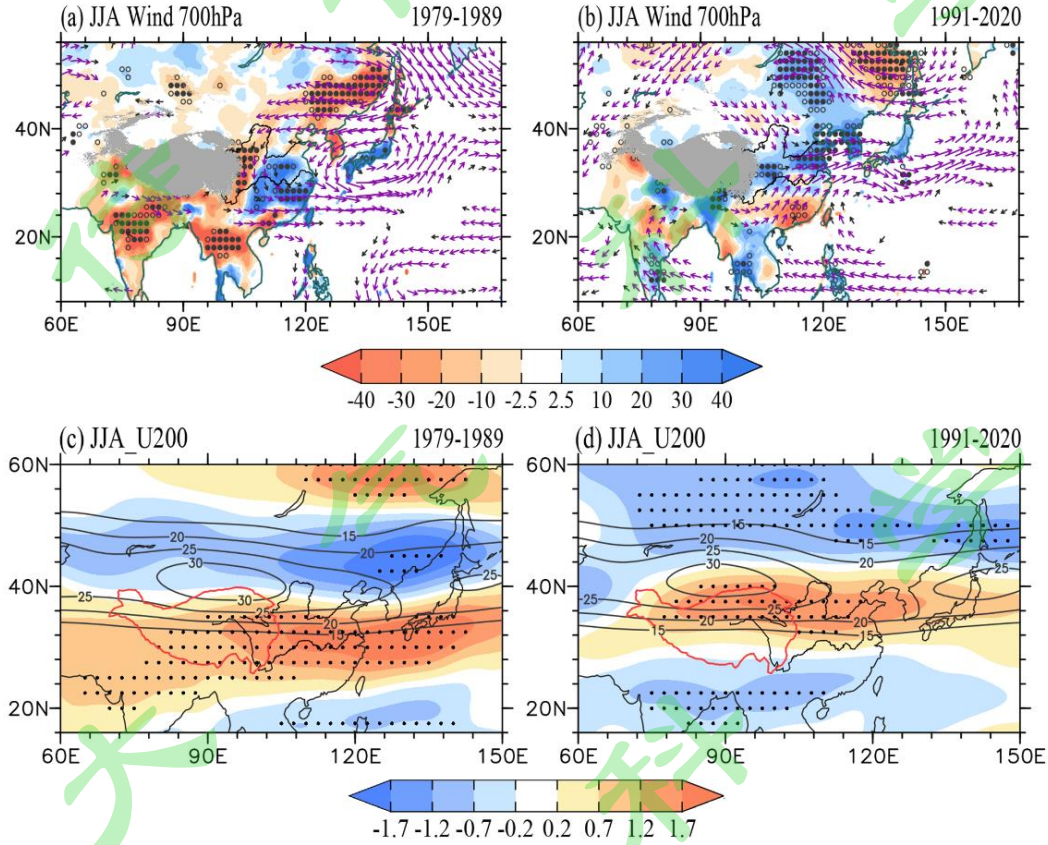


图 3 夏季(a)降水(mm/month)和 700-hPa 风场(m/s), (c)200-hPa 纬向风(m/s)对 1990 年之前春季高原偶极型积雪指数(指数乘以负 1)的偏回归系数。(b, d)同(a, c)但为 1990 年之后一致型积雪指数的偏回归系数, 其中冬春季的 ENSO 信号已剔除。等值线为 200-hPa 气候态风速大于 15m/s 的纬向风。空心 and 实心打点区域分别表示降水和风速异常的显著性大于 90%和 95%的区域, 紫色矢量为风速异常通过 95%的置信度区域。

Figure 3 Anomalies of summer (a) precipitation (mm/month) and 700 hPa wind (m/s), (c) 200 hPa zonal wind (m/s) obtained by partial regression onto the spring dipole snow index (index multiplied by minus one) after removing ENSO before 1990. (b, d) Same as in (a, c) but for the monopole snow index after 1990. Contours show the 200 hPa zonal wind that is more that 15 m/s. Open and dotted regions refer to the anomalies of precipitation and wind at the 90% and 95% confidence levels, respectively, and the wind in purple shows the 95% confidence level.

本文选取 1970-2020 年的 NOAA 提供的积雪资料,重新绘制了东亚夏季风降水与春季高原积雪分布变化的关联图(图 3)。1990 年之前(图 3a),春季高原西多东少的偶极型积雪分布对应随后江南至日本南部夏季风降水为正异常(中心大约位于 30°N),而西伯利亚东南部至日本北部为降水为负异常(中心位于 46°N);1990 年之后(图 3b),春季高原全区偏多的一致型积雪分布对应随后夏季风降水正异常区域北推到江淮流域至日本北部(中心大约位于 36°N),而降水负异常区域则北推至西伯利亚东部(中心位于 52°N)。可见,1990s 初之后,与春季高原积雪有关的东亚夏季风降水落区可能存在北移。

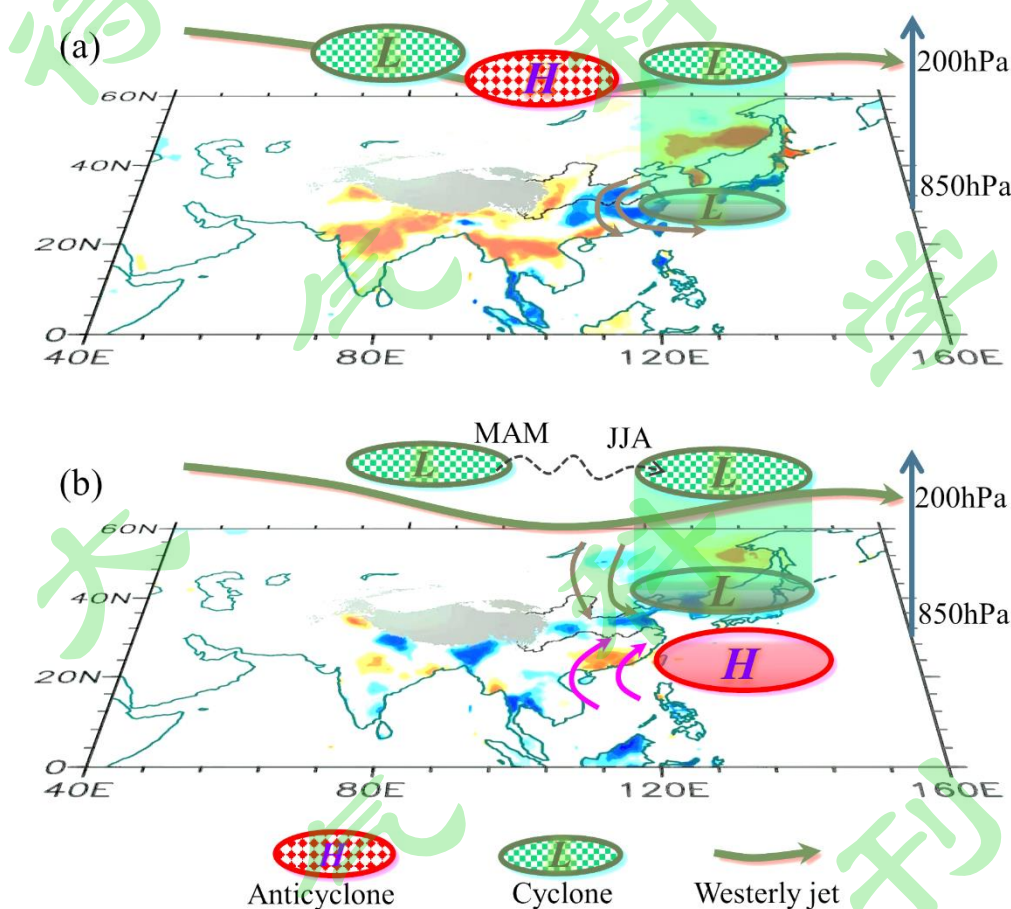


图 4 东亚夏季风降水受春季高原(a)偶极型积雪分布和(b)一致型积雪分布影响的机制示意图。

Figure 4 Schematic diagram depicts the effects of (a) dipole and (b) monopole snow cover extent in spring on the East Asian Monsoon precipitation.

4.3 高原积雪分布通过反照率效应影响东亚夏季风格局的物理机制

东亚夏季风受到前期冬春高原不同积雪分布的影响机制不尽相同。张超(2022)提出了春季高原偶极型与一致型积雪分布对东亚夏季风的影响机制(图 4),发现

在 1990s 初之前(图 4a), 春季高原东西偶极型积雪分布(西部积雪偏多而东部偏少)可通过积雪的反照率反馈过程引发高原上空西部冷却、东部加热的非绝热空间分布(Zhang et al., 2022), 进而激发对流层高层从高原西部至日本的气旋-反气旋-气旋型大气波列(C-A-C 型波列)。由于积雪的持续强迫, 该波列可持续到夏季。位于日本高空气旋南部的偏西风(北部的偏东风)异常加强(减弱)了副热带西风急流的南(北)部(图 3c), 使得江南-日本南部(西伯利亚东南部-日本北部)产生显著的上升(下沉)运动。同时, 该气旋系统可延伸至对流层低层, 有利于江南-日本南部的水汽辐合。可见, 春季高原偶极型积雪分布可通过积雪异常有关的高低空环流配置使得江南-日本南部夏季风降水偏多、西伯利亚东南部-日本北部夏季风降水偏少。

1990s 初以后(图 4b), 春季高原一致型积雪分布(全区积雪偏多)使得高原上空出现冷源异常并激发局地的低压环流(Zhang et al., 2022)。随着时间演变至夏季, 该低压系统东移至东北亚(Zhang et al., 2021), 其南部的偏西风(北部的偏东风)加强(减弱)了副热带西风急流的中心位置(急流以北区域, 图 3d), 因此江淮流域-日本北部(西伯利亚东部)出现显著的上升(下沉)运动。该气旋系统可延伸至对流层低层, 有利于江淮流域-日本北部的水汽辐合。因此, 春季高原一致型积雪分布可通过积雪异常有关的高低空环流配置使得江淮流域-日本北部降水偏多、西伯利亚东部降水偏少, 即 1990s 初以后春季高原积雪分布对东亚夏季风降水的影响北推。

1990s 初之后高原西部积雪异常对江淮梅雨的影响增强(Zhang et al., 2021)。其可能的物理机制为: 1990s 初春季高原持续积雪强迫位置由高原西南部转移至高原西北部, 积雪异常有关的扰动从沿着急流分布转变为远离急流分布。因此, 前一时段在急流波导作用下积雪异常容易激发大尺度的定常波(Wu and Li, 2016; Jin et al., 2018), 而后一时段波导作用减弱使得积雪异常有关的低压系统发生显著东移。随着环流演化至夏季, 前后时段积雪异常有关的低压异常分别控制在日本和东北亚地区, 其南侧的偏西风异常分别加速了西太平洋和江淮流域上空的副热带西风急流, 从而在后一时段对江淮梅雨的影响增强(Zhang et al., 2021; 张超, 2022)。

4.4 高原积雪通过“高原大气河”影响东亚夏季风的物理机制

高原积雪通过积雪融水不仅供给东亚数十条河流(Bookhagen and Burbank, 2010; Wulf et al., 2016; Smith and Bookhagen, 2018), 还可以影响大气中的水汽异

常(Yasunari et al., 1991; Xiao and Duan, 2016)。其中，高原积雪融水形成高原水汽源及水汽输送主要集中在春夏季节，积雪融水形成的水汽不仅影响高原局地，甚至可影响东亚夏季风降水(Xiao and Duan, 2016; Zhang and Jia, 2022)。

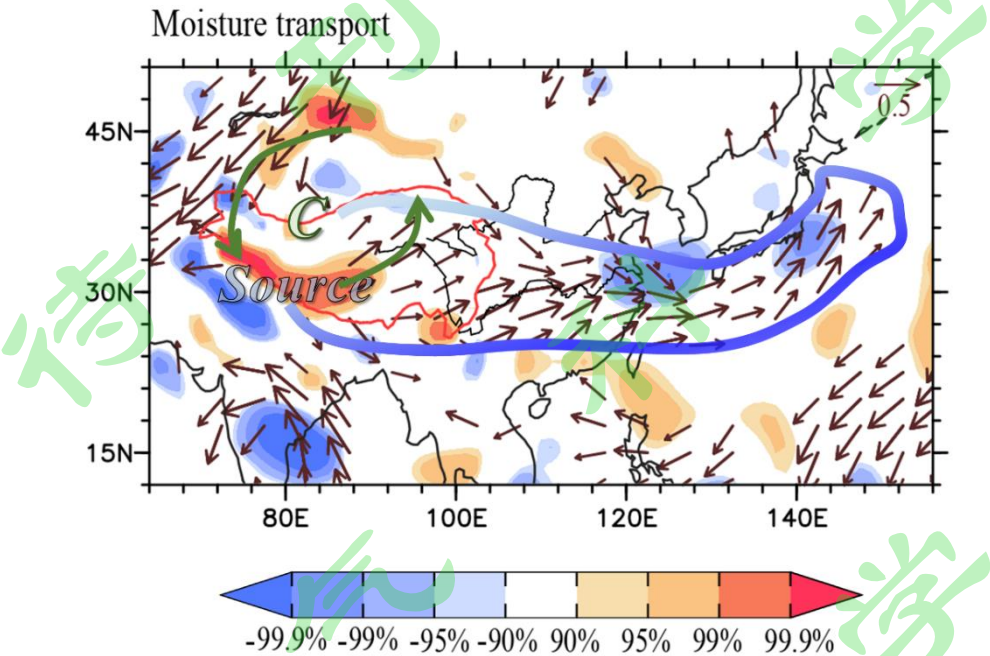


图 5 高原积雪通过“高原大气河”影响东亚降水的示意图。其中，矢量和填色分别表示高原 7 月积雪指数(高原 35°N 以南积雪面积指数)与整层水汽输送和水汽辐散异常的相关系数。填色由浅到深依次表示水汽辐散异常超过 90%、95%、99%和 99.9%的区域，矢量箭头表示水汽输送异常的显著性通过 95%的区域，字母 C 表示气旋。

Figure 5 Schematic diagram illustrates the influence of Tibetan snow on the East Asian Monsoon precipitation through the pathway of “Tibetan Atmospheric River”. Shading and vector refer to the coefficient between the July snow index (southern 35°N over the Tibetan) and water vapor. Shading from shallow to deep refers to the divergence of moisture exceeding 90%, 95%, 99% and 99.9%, respectively. Vector refers to the water vapor transport anomalies exceeding 95% confidence level, and “C” refer to the cyclone.

高原积雪变化通过水文效应影响东亚夏季风的机制如下(如图 5)，一是高原积雪变化引起水汽异常向下游输送的机理：当夏季高原积雪偏多时积雪融化吸热使高原形成异常冷源，并通过非绝热冷却激发高原上空的气旋环流异常(图 5 中用字母 C 表示)，该气旋东侧的西南风和副热带西风急流将高原上的水汽输送至下游。二是高原积雪变化形成高原水汽源的机理：高原气旋东南侧喇叭口状的风场利于局地的辐散运动，高压辐散区往往伴随晴天有利于更多太阳辐射达到该区

域,代表热力过程,同时积雪有关的西南风场异常与背景态风向一致,代表动力过程。在动力、热力的共同作用下,高原积雪的融化和蒸发过程加快,有利于积雪融水转移到大气中,从而形成高原上空的水汽源(Zhang and Jia, 2022)。

积雪异常引发的水汽输送经过高原东部、江南、江淮流域可至日本以东地区,对东亚夏季风雨带产生显著影响。高原积雪通过水文过程将高原西南部水汽源的水汽源源不断的输送至下游雨带区,如同河流般影响东亚夏季风,因此将其称为“高原大气河”机制。

4.5 春季高原积雪对东亚夏季风的预测作用

大量研究指出,高原前期冬春积雪异常是东亚夏季风的重要预测因子之一(Si and Ding, 2013; Xiao and Duan, 2016; Zhang et al., 2021; Zha and Wu, 2022)。Zhang et al. (2021)发现春季高原西部积雪异常可显著影响江淮梅雨的年际变率,且1990s初以后春季高原西部积雪异常对梅雨雨带的影响增强。为此,我们以1990s初分段,并将回报年份的20%-30%作为预测年份,其余年份作为训练年份以构建回归预测模型。基于该方案构建了前后两段含有春季高原积雪的梅雨预测模型,结果表明,根据该预测模型,春季高原积雪预测因子构建的回报模型对1990s之前的预测技巧较低,而1990s之后特别是近30年对江淮梅雨回报的相关系数为0.61,通过了0.01的可信度检验,因此具备较好的预测技巧。

5 春季高原积雪异常影响东亚夏季风的关键科学问题

5.1 海-气耦合信号和大气环流在年代际尺度上的调控作用

1990s初春季高原积雪的年代际转型及其与梅雨关系的年代际变化是否受到年代际尺度信号的调控尚不清楚。通过诊断PDO、AMO和积雪-梅雨的滑动相关可知(图6),AMO在1994年后从负位相转变到正位相,和春季高原积雪、积雪-梅雨关系的年代际转折年份较为接近;PDO在1976、2000、2013和2019年出现多次位相的转变,与春季高原积雪、积雪-梅雨关系的年代际转折均不一致。可见AMO可能调控高原积雪-梅雨关系的年代际变化:当AMO负位相时,积雪-梅雨的关系较弱,而AMO为正位相时,积雪-梅雨的关系增强。因此,今后在考虑高原积雪作为梅雨降水的预测因子时,需要关注AMO的位相。

本文还进一步分析了年代际尺度上大气主模态信号AAO和AO对积雪-梅雨关系的可能影响,结果表明AAO和AO在1970-2022年均有3个位相转变年份(图略),与积雪-梅雨关系的单个突变年份显然不同,因此AAO和AO在积雪

-梅雨关系的年代际变化中作用较弱。

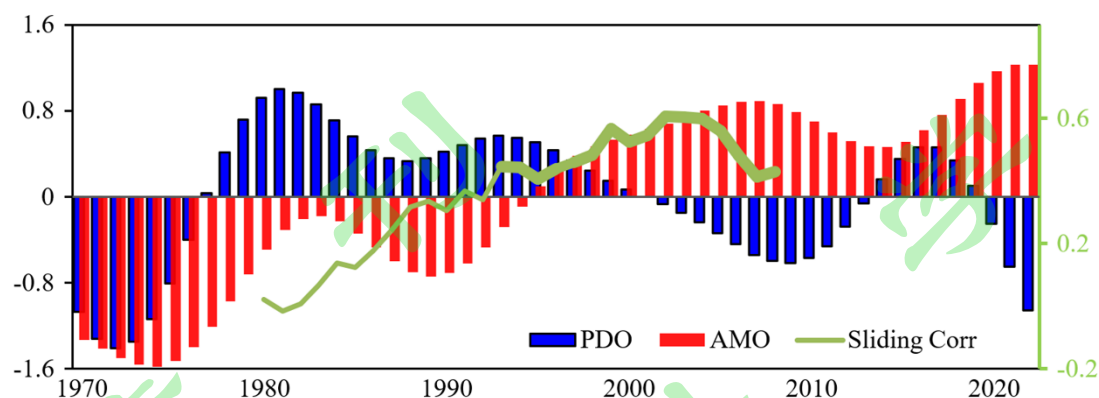


图 6 年代际时间尺度上, 标准化的春季 PDO(蓝色柱状图)和 AMO(红色柱状图)指数。年际时间尺度上, 春季高原西部积雪指数和梅雨指数 21 年的滑动相关系数(绿色曲线), 其中滑动相关系数超过 95%的时段已加粗表示。

Figure 6 PDO (blue bar) and AMO (red bar) on the interdecadal time scale. 21 year sliding correlation between the western Tibetan snow index in spring and Meiyu rainfall index on the interannual time scale (green curve), in which curve in thick refers to the correlation exceeding 95% confidence level.

5.2 典型东亚夏季风降水异常与春季高原积雪异常年份的关联

已有研究表明, 梅雨雨带与前期高原积雪异常密切相关(Xiao and Duan, 2016; Zhang et al., 2021)。这里首先要明确历史上是否存在前期高原积雪异常随后发生极端梅雨事件, 有多少年份存在这种情况。将各项指数的绝对值取 0.75 作为阈值, 梅雨指数大于阈值的极端梅雨年份共计 24 年, 春季高原西部积雪指数大于阈值年份共计 20 年。由图 7 可知, 春季高原西部积雪显著异常时, 随后有 9 年典型梅雨异常年份, 占典型梅雨异常年份的 38%。可见, 存在一定春季高原积雪显著异常年份对应随后夏季梅雨发生异常情况。其他典型梅雨异常年份可能与中高纬波动、热带海气相互作用等信号有关(Wu et al., 2012; You et al., 2020)。

此外, 年际尺度上, ENSO 作为梅雨降水的重要前兆因子之一, 也可能影响高原积雪-梅雨异常之间的联系。由图 7 可知, 高原积雪-梅雨异常的 9 个年份中, 有 4 年与 ENSO 处在同位相(空心圆表示), 有 5 年与 ENSO 处于反位相或 ENSO 信号很弱(实心圆表示)。可见, ENSO 与春季高原积雪对梅雨降水的影响有一定的互补性, 但 ENSO 的作用也存在不确定性, 这可能和 ENSO 的形态变化、转换速度有关(Wang et al., 2021, 2023)。因此, ENSO 对积雪-梅雨关系的调控作用

还有待今后深入研究。

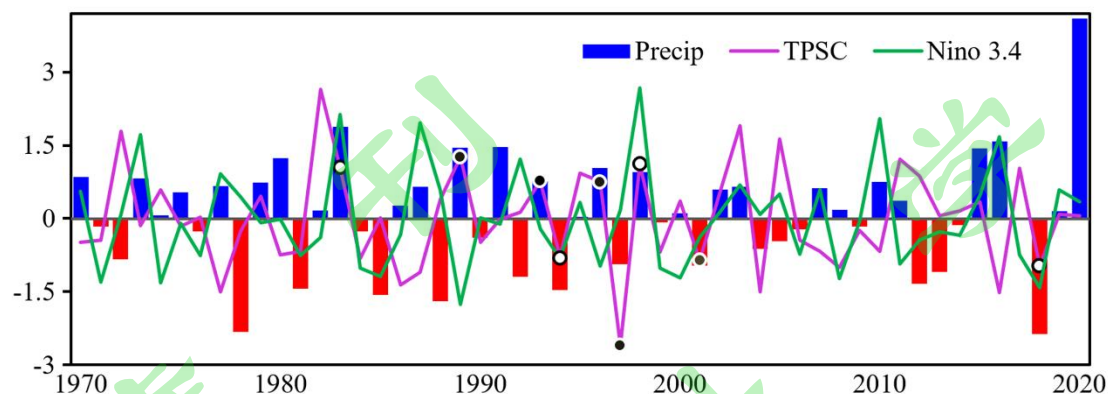


图 7 年际时间尺度上, 江淮梅雨指数(柱状图)、春季高原西部积雪指数(紫色曲线)和 Nino3.4 指数(绿色曲线)。各项指数以绝对值取 0.75 为阈值。黑色圆点表示积雪-梅雨指数同时大于阈值且处于同位相的年份, 即前期春季高原积雪异常随后发生典型梅雨异常年份, 实心圆表示这些年份中 Nino3.4 指数小于阈值或与梅雨指数位相相反, 即 Nino3.4 在这些典型梅雨年份中对梅雨的贡献较小或作用相反。

Figure 7 Meiuyu index (color bar), western Tibetan snow index in spring (purple curve) and Nino3.4 index (green line) on the interannual time scale. The threshold of indices is absolute value of 0.75. The black dots indicate the years when the snow-rainfall indices are both larger than the threshold value and in the same phase, i.e., the years when a typical rainfall anomaly occurs after an anomaly of the Tibetan snow in the early spring, while the solid circles indicate the years when the Nino3.4 index is smaller than the threshold value or in the opposite phase of the rainfall index, i.e., the contribution of the Nino3.4 to the rainfall is small or opposite to the rainfall in the years when the rainfall is typical.

6 总结与展望

本文围绕高原积雪年际变率的年代际转型对东亚夏季风格局影响, 系统回顾了春季高原积雪年际变率的年代际变化特征和成因, 高原冬春不同积雪分布对东亚夏季风格局的影响机制, 并提出以下几个未来需要关注的科学问题。

首先, 1990s 初春季高原积雪年际变率从偶极型转变为一致型(Zhang et al., 2022), 与 AMO 从负位相转变为正位相的年份接近。然而, AMO 位相的年代际转变能否影响春季高原积雪年际变率的年代际转型尚不清楚。因此, 不同位相的 AMO 与春季高原积雪年年际变率的关联与影响机制是亟需关注的科学问题。

其次, 1990s 初之后春季高原西部积雪对江淮梅雨的影响增强, 已有研究从

积雪的反照率效应视角给出了可能的影响机制(Zhang et al., 2021)。值得注意的是,“高原大气河”的源头位于高原西南侧,而 1990s 初之后高原持续积雪强迫的位置从高原西北侧转移至高原西南侧,即后一阶段高原西南侧积雪异常可能通过“高原大气河”的机制使得对梅雨的影响增强。因此,今后应进一步深入分析 1990s 初之后高原积雪通过“高原大气河”对梅雨影响增强的物理机制。

再次,积雪-梅雨关系的年代际转变与 AMO 位相的年代际变化较为一致,但 AMO 影响积雪-梅雨关系变化有怎样的物理过程和何种作用机制仍不清楚,是今后需要关注的问题之一。

最后,虽然地表热源和积雪作为高原下垫面强迫大气环流的影响因子,然而统计上冬季高原积雪与春季地表热源的联系并不显著(段安民等, 2018),意味着它们可能是驱动大气环流的独立因子。因此,在考虑东亚夏季风成因时,能否将高原地表热源和积雪作为独立因子综合考察对东亚夏季风的影响,还有待进一步研究。

参考文献:

- Bookhagen, B., and Burbank, D. (2010). Toward a complete Himalayan hydrological budget: Spatiotemporal distribution of snowmelt and rainfall and their impact on river discharge. *Journal of Geophysical Research*, 115, F03019. <https://doi.org/10.1029/2009JF001426>
- Harris, I., Osborn, T., Jones, P., and Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Henderson, G., Peings, Y., Furtado, J., and Kushner, P. (2018). Snow-atmosphere coupling in the Northern Hemisphere. *Nature Climate Change*, 8. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0295-6>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., Thépaut, J.-N. (2019). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). (Accessed on 22-Apr-2021). <https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>
- Immerzeel, W., Lutz, A., Andrade, M., Bahl, A., Biemans, H., Bolch, T., Hyde, S., Brumby, S., Davies, B., Elmore, A., Emmer, A., Feng, M., Fernández, A., Haritashya, U., Kargel, J., Koppes, M., Kraaijenbrink, P., Kulkarni, A., Mayewski, P., and Baillie, J. (2020). Importance and vulnerability of the world's water towers. *Nature*, 577. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1822-y>
- Immerzeel, W. W., Beek, L. P. H., and Bierkens, M. F. P. (2010). Climate Change Will Affect the

- Asian Water Towers. *Science*, 328. <https://doi.org/10.1126/science.1183188>
- Jia, X., Zhang, C., Wu, R., and Qian, Q. (2021). Influence of Tibetan Plateau autumn snow cover on interannual variations in spring precipitation over southern China. *Climate Dynamics*, 56(3), 767-782. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05497-8>
- Jiang, X., Zhang, T., Tam, C.-Y., Chen, J., Lau, N. C., Yang, S., and Wang, Z. (2019). Impacts of ENSO and IOD on Snow Depth over the Tibetan Plateau: Roles of Convections over the Western North Pacific and Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JD031384>
- Jin, R., Wu, Z., and Zhang, P. (2018). Tibetan Plateau capacitor effect during the summer preceding ENSO: from the Yellow River climate perspective. *Climate Dynamics*, 51, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3906-4>
- Kraaijenbrink, P., Stigter, E., Yao, T., and Immerzeel, W. W. (2021). Climate change decisive for Asia's snow meltwater supply. *Nature Climate Change*, 11, 1-7. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01074-x>
- li, F., Xin, W., Wang, H., Orsolini, Y. J., Cong, Z., Gao, Y., and Kang, S. (2020). Arctic sea-ice loss intensifies aerosol transport to the Tibetan Plateau. *Nature Climate Change*, 10, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0881-2>
- Liu, G., Wu, R., Zhang, Y., and Nan, S. (2014). The summer snow cover anomaly over the Tibetan Plateau and its association with simultaneous precipitation over the mei-yu-baiu region. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31. <https://doi.org/10.1007/s00376-013-3183-z>
- Liu, S., Wu, Q., Yao, Y., and Schroeder, S. (2023). The Role of Coupled North Pacific Atmosphere–Ocean Interactions in Impacts of Tibetan Plateau Snow Anomalies on the Northern Hemisphere Winter Atmospheric Circulation. *Journal of Climate*, 36, 1369-1385. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0261.1>
- Liu, S., Wu, Q., Yao, Y., Schroeder, S., and Wang, L. (2022). Impacts of Autumn-Winter Tibetan Plateau Snow Anomalies on North Atlantic-Europe and Arctic Climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127. <https://doi.org/10.1029/2021JD035791>
- Qian, Q., Jia, X., and Wu, R. (2019). Changes in the Impact of the Autumn Tibetan Plateau Snow Cover on the Winter Temperature Over North America in the mid-1990s. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JD030245>
- Qian, Q., Jia, X., and Wu, R. (2020). On the Interdecadal Change in the Interannual Variation in Autumn Snow Cover Over the Central Eastern Tibetan Plateau in the Mid-1990s. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. <https://doi.org/10.1029/2020JD032685>
- Robinson, D. A., Estilow, T. W., and Program, N. C. (2012). NOAA Climate Data Record (CDR) of Northern Hemisphere (NH) Snow Cover Extent (SCE), Version 1 [NCDC: C00756]. NOAA National Centers for Environmental Information. [Date Accessed: 06-03-2022]. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.7289/V5N014G9>
- Si, D. (2014). Inter-decadal variations, causes and future projection of the Asian summer monsoon.

- Si, D., and Ding, Y. (2013). Decadal Change in the Correlation Pattern between the Tibetan Plateau Winter Snow and the East Asian Summer Precipitation during 1979-2011. *Journal of Climate*, 26, 7622-7634. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00587.1>
- Smith, T., and Bookhagen, B. (2018). Changes in seasonal snow water equivalent distribution in High Mountain Asia (1987 to 2009). *Science Advances*, 4, e1701550. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1701550>
- Wang, C., Yang, K., Li, Y., Wu, D., and Bo, Y. (2017). Impacts of Spatiotemporal Anomalies of Tibetan Plateau Snow Cover on Summer Precipitation in Eastern China. *Journal of Climate*, 30, 885–903. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0041.1>
- Wang, Z., Wu, R., Chen, S., Huang, G., Liu, G., and Lihua, Z. (2018). Influence of Western Tibetan Plateau Summer Snow Cover on East Asian Summer Rainfall. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JD028016>
- Wang, Z., Wu, R., Chen, Z., Lihua, Z., Yang, K., Liu, K., and Yang, Y. (2021). Decreasing Influence of Summer Snow Cover Over the Western Tibetan Plateau on East Asian Precipitation Under Global Warming. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.787971>
- Wang, Z., Wu, R., Duan, A., and Qu, X. (2020). Influence of Eastern Tibetan Plateau Spring Snow Cover on North American Air Temperature and Its Interdecadal Change. *Journal of Climate*, 33. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0455.1>
- Wang, Z., Wu, R., and Jia, X. (2023). A Review of Impacts of the Tibetan Plateau Snow on Climate Variability over East Asia and North America. *Atmosphere*, 14, 618. <https://doi.org/10.3390/atmos14040618>
- Wang, Z., Wu, R., Yang, S., and Lu, M. (2021). An Interdecadal Change in the Influence of ENSO on the Spring Tibetan Plateau Snow-Cover Variability in the Early 2000s. *Journal of Climate*, 35, 1. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0348.1>
- Wang, Z., Wu, R., Zhao, P., Yao, S.-L., and Jia, X. (2019). Formation of Snow Cover Anomalies Over the Tibetan Plateau in Cold Seasons. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124. <https://doi.org/10.1029/2018JD029525>
- Wu, Z., and Li, J. (2016). Decadal to interdecadal variations of northern China heat wave frequency: impact of the Tibetan Plateau snow cover. In H. Volkert, J. Li, R. Grotjahn, and R. Swinbank (Eds.), *Dynamics and Predictability of Large-Scale, High-Impact Weather and Climate Events* (pp. 210-219). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107775541.018>
- Wu, Z., Li, J., Jiang, Z., and Ma, T. (2012). Modulation of the Tibetan Plateau Snow Cover on the ENSO Teleconnections: From the East Asian Summer Monsoon Perspective. *Journal of Climate*, 25, 2481-2488. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00135.1>
- Wulf, H., Bookhagen, B., and Scherler, D. (2016). Differentiating between rain, snow, and glacier

- contributions to river discharge in the western Himalaya using remote-sensing data and distributed hydrological modeling. *Advances in Water Resources*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.004>
- Xiao, Z., and Duan, A. (2016). Impacts of Tibetan Plateau Snow Cover on the Interannual Variability of the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Climate*, 29. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0029.1>
- Xu, X., Guo, J., Koike, T., Liu, Y., Shi, X., Zhu, F., and Zhang, S. (2012). "Downstream Effect" of Winter Snow Cover over the Eastern Tibetan Plateau on Climate Anomalies in East Asia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90C, 113-130. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2012-C08>
- Xu, X., Lu, C., Shi, X., and Gao, S. (2008). World water tower: An atmospheric perspective. *Geophys. Res. Lett*, 35. <https://doi.org/10.1029/2008GL035867>
- Xu, X., Sun, C., Chen, D., Zhao, T., Xu, J., Zhang, S., Li, J., Chen, B., Zhao, Y., Xu, H., Dong, L., Sun, X., and Zhu, Y. (2021). A vertical transport window of water vapor in the troposphere over the Tibetan Plateau with implications for global climate change. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 1149-1157. <https://doi.org/10.5194/acp-22-1149-2022>
- Yao, T., Bolch, T., Chen, D., Gao, J., Immerzeel, W. W., Piao, S., Su, F., Thompson, L., Wada, Y., Wang, L., Wu, G., Xu, B., Yang, W., Zhang, G., and Zhao, P. (2022a). The imbalance of the Asian water tower. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3, 1-15. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00299-4>
- Yao, T., Thompson, L., Chen, D., and Piao, S. (2022b). Reflections and future strategies for Third Pole Environment. *Nature Reviews Earth and Environment*, 3, 608-610. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00342-4>
- Yasunari, T., Kitoh, A., and Tokioka, T. (1991). Local and Remote Responses to Excessive Snow Mass over Eurasia Appearing in the Northern Spring and Summer Climate: A Study with the MRI-GCM. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 69, 473-487. https://doi.org/10.2151/jmsj1965.69.4_473
- You, Q., Wu, T., Shen, L., Pepin, N., Zhang, L., Jiang, Z., Wu, Z., Kang, S., and AghaKouchak, A. (2020). Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system. *Earth-Science Reviews*, 201, 103043. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103043>
- Zha, P., and Wu, Z. (2022). Contribution of the Tibetan Plateau Snow Cover to the Record-breaking Rainfall Over the Yangtze River Valley in June 2020. *Atmosphere-Ocean*, 1-13. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2151408>
- Zhang, C., Guo, Y., and Wen, Z. (2022). Interdecadal change in the effect of Tibetan Plateau snow cover on spring precipitation over Eastern China around the early 1990s. *Climate Dynamics*, 58(9), 2807-2824. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06035-w>
- Zhang, C., and Jia, X. (2022). The Seasonal Evolution of the Tibetan Plateau Snow Cover Related

- Moisture During Spring-to-Summer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(11), e2022JD036560. <https://doi.org/10.1029/2022JD036560>
- Zhang, C., Jia, X., and Wen, Z. (2021). Increased Impact of the Tibetan Plateau Spring Snow Cover to the Mei-yu Rainfall over the Yangtze River Valley after the 1990s. *Journal of Climate*, 34(14), 5985-5997. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-21-0009.1>
- Zhang, C., Jia, X., Duan, A., and Hu, D. (2023a). Interdecadal changes in the dominant modes of spring snow cover over the Tibetan Plateau around the early 1990s, *Journal of Climate*, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0487.1>
- Zhang, C., Duan, A., Jia, X., Hu, J., and Liu, S. (2023b). Snow cover on the Tibetan Plateau and Lake Baikal Intensifies the winter North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, GRL66338. <https://doi.org/10.1029/2023GL104754>.
- Zhang, Y., Li, T., and Wang, B. (2004). Decadal Change of the Spring Snow Depth over the Tibetan Plateau: The Associated Circulation and Influence on the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Climate*, 2780-2793. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<2780:DCOTSS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2780:DCOTSS>2.0.CO;2)
- Zhang, Y., Zou, T., and Xue, Y. (2019). An Arctic-Tibetan Connection on Subseasonal to Seasonal Time Scale. *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2018GL081476>
- Zhao, P., Zhou, Z., and Liu, J. (2007). Variability of Tibetan Spring Snow and Its Associations with the Hemispheric Extratropical Circulation and East Asian Summer Monsoon Rainfall: An Observational Investigation. *Journal of Climate*, 20, 3942-3955. <https://doi.org/10.1175/JCLI4205.1>
- 车涛, 郝晓华, 戴礼云, 李弘毅, 黄晓东, 和肖林. (2019). 青藏高原积雪变化及其影响. *中国科学院院刊*, 34(11), 1247-1253. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.007>.
- Che, T., Hao, X., Dai, L., Li, H., Huang, X., and Xiao, L. (2019) Snow Cover Variation and Its Impacts over the Qinghai-Tibet Plateau. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 34(11), 1247-1253. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.007>.
- 段安民, 肖志祥, 吴国雄, 和王美蓉. (2014). 青藏高原冬春积雪影响东亚夏季风的研究进展. *气象与环境科学*, 37(03), 94-101. <https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2014.03.012>.
- Duan, A., Xiao, Z., Wu, G., and Wang, M. (2014). Study Progress of the Influence of the Tibetan Plateau Winter and Spring Snow Depth on Asian Summer Monsoon. *Meteorological and Environmental Sciences*, 37(03), 94-101. <https://doi.org/10.16765/j.cnki.1673-7148.2014.03.012>.
- 段安民, 肖志祥, 和王子谦. (2018). 青藏高原冬春积雪和地表热源影响东亚夏季风的研究进展. *大气科学*, 42(04), 755-766.
- Duan, A., Xiao, Z., and Wang, Z. (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*, 42 (4): 755-766, <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17247>.

张超. (2022). 1990s 初春季青藏高原积雪分布的年代际转型及其对中国东部春夏降水的影响. 复旦大学博士学位论文, 1-103.

Zhang, C. (2022). Interdecadal change in the spatial patterns of spring snow cover over the Tibetan Plateau and its impacts on the spring-summer precipitation in Eastern China around the early 1990s. *Ph.D. Thesis, Fudan University*, 1-103.

朱玉祥和丁一汇. (2007). 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题. *气象科技*, 200(01), 1-8. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2007.01.001>

Zhu, Y., and Ding, Y. (2007). Influences of Snow Cover over Tibetan Plateau on Weather and Climate: Advances and Problems. *Meteorological Science And Technology*, 200(01), 1-8. <https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.2007.01.001>.