

三江源地区冬季降水年代际变化特征及相关物理机制

王腾¹, 孙博², 王会军², 多典洛珠³, 卓永¹

1. 西藏昌都市气象局, 昌都 854000

2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3. 西藏自治区气象台, 拉萨 850001

摘要: 本文主要利用 1961/1962~2017/2018 年 CN05.1 资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究三江源地区(以下简称三江源)冬季降水的年代际变化特征及相关物理机制。结果表明:三江源冬季降水在 20 世纪 80 年代末期经历了一次由少到多的年代际增多。三江源冬季降水的年代际变化受乌拉尔山上空异常低压和贝加尔湖—中国东北部上空异常高压影响, 与中高纬北大西洋海气相互作用有关。从 20 世纪 80 年代末期开始, 中高纬北大西洋海温增暖可以导致海表面上空上升运动异常, 对流活动增强, 激发向东传播的大气环流波列, 引起乌拉尔山上空的异常低压和贝加尔湖—中国东北部上空的异常高压。在异常低压与异常高压的影响下, 极锋急流南移加强, 引起三江源高空辐散, 对流活动增强, 导致三江源冬季降水增多; 另一方面, 贝加尔湖—中国东北部上空异常高压还可以通过引起三江源上空异常东风, 引起三江源水汽通量辐合异常, 导致冬季降水增多。此外, 印度洋海温异常可能通过影响南支槽强度变化, 进一步调制三江源冬季降水。

关键词: 三江源; 冬季降水; 年代际变化; 大气遥相关; 海温异常

文章编号: 2022034C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2204.22034

Interdecadal variations of winter precipitation over the Three River

Source region in China and associated physical mechanisms

Wang Teng¹, Sun Bo², Wang Huijun², Duodian Luozhu³, Zhuo Yong¹

1. Qamdo Meteorological Service, Meteorology Bureau of Tibet Autonomous Region, Qamdo 854000, China

2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science and

Technology, Nanjing 210044, China

3. Meteorological Observatory of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China

收稿日期 2022-06-10; 网络与出版日期

作者简介 王腾, 男, 1985 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事青藏高原天气气候研究。E-mail: wangteng@nuist.edu.cn

通讯作者 孙博, E-mail: sunb@nuist.edu.cn

项目资助 国家自然科学基金资助项目(42088101)、西藏自治区自然科学基金资助项目(XZ202001ZR0014G,

XZ202101ZR0041G)

Funded by National Natural Science Foundation of China (42088101), Natural Science Foundation of Tibet Autonomous Region of China (XZ202001ZR0014G, XZ202101ZR0041G)

28 **Abstract:** This study investigates the interdecadal variations of winter precipitation and associated
29 physical mechanisms over the Three River Source (TRS) region based on gridded CN05.1 and
30 NCEP/NCAR reanalysis datasets for the period of 1961/1962~2017/2018. Results indicate that the
31 winter precipitation over the TRS region experienced an intensification in the late 1980s. The
32 decadal changes are modulated by the anomalous low over the Ural Mountains and the anomalous
33 high extending from Lake Baikal to Northeast China, which may be associated with the ocean–
34 atmosphere interaction over the North Atlantic. Specifically, after the late 1980s, the warm SST
35 anomalies over the mid-high latitudes of North Atlantic can contribute to the abnormal ascending
36 motions, strengthening the convection over that region and triggering the eastward wave train,
37 causing the anomalous low over the Ural Mountains and the anomalous high extending from Lake
38 Baikal to Northeast China. On the one hand, the coincidence of anomalous low and high induced
39 the enhancement and southward shift of the polar front jet, causing the upper-level divergence and
40 development of convection over the TRS region. On the other hand, the anomalous easterly wind
41 over the TRS caused by the anomalous high extending from Lake Baikal to Northeast China,
42 influenced the decadal intensification of winter precipitation over the TRS via inducing the
43 abnormal convergence of water vapor flux. In addition, the positive SST anomalies in the Indian
44 Ocean may also have influence on the interdecadal variations of winter precipitation over the TRS
45 region by affecting the south branch trough.

46 **Key words:** Three River Source, Winter precipitation, interdecadal variation, Atmospheric
47 teleconnection, SST anomaly

48 1 引言

49 近半个世纪以来，以全球变暖为主要特征的气候变化引起了全世界的广泛关注 (Wu et
50 al., 2007)。近几十年青藏高原气候明显变暖 (Song et al., 2014; Chen et al., 2013)，地表平
51 均温度升高了 1.8°C (Wang et al., 2008)，每 10 年 $0.3\sim0.4^{\circ}\text{C}$ 的升温速率几乎是同期全球平
52 均温度升温速率的 2 倍 (Zhu et al., 2013)，被认为是全球气候变化的预警器和放大器 (Yang
53 et al., 2006; 刘晓琼等, 2019)，一直受到国内外学者的关注，但直到现在，对青藏高原本身
54 气候变率的研究还是相对有限 (Liu and Yin, 2000)。

55 三江源地区（以下简称三江源）是青藏高原的重要组成部分，地处青藏高原腹地，是
56 长江、黄河、澜沧江的发源地，也是中国淡水资源的重要补给区。三江源是中国重要的生
57 态屏障，在水资源保护、径流调节和生态安全等方面发挥着不可替代的作用 (Liu et al.,
58 2008; Jiang and Zhang, 2016; Guo et al., 2018)，为进行有效生态系统保护，2021 年正式设立
59 三江源国家公园。

60 三江源降水主要发生在汛期（5~9 月）期间，汛期降水量约占年降水量的 90%，春、
61 夏、秋、冬等季节降水量分别约占年降水量 16%，60%，22%，2% (李林等, 2006)。自 20

62 世纪 60 年代以来，三江源年降水量呈增加的趋势（Liang et al., 2013; Yi et al., 2013; Shi et al.,
63 不同季节的降水量有着不同的年际变化和趋势变化（Cuo et al., 2013; Sun and Wang,
64 2018, 2019; 刘晓琼等, 2019）。观测数据表明，在过去的几十年间，三江源夏、秋季降水量
65 表现为减少的趋势，而冬、春季降水量呈现较明显的增多趋势（李林等, 2006; 李珊珊等,
66 2012）。

67 水汽输送和大尺度环流对降水变率有着重要影响（Wang et al., 2017; Dong et al., 2020）。
68 三江源春季降水的年际变化主要受自东向西方向的水汽输送异常的调制，该水汽输送异常
69 与春季欧亚大陆上空同期大气环流主导模态密切相关，进一步分析表明春季厄尔尼诺—南
70 方涛动（ENSO）也可以通过调控由南向北输送进入三江源的水汽年际变化，进一步影响
71 该地区春季降水（Sun and Wang, 2018）。受西太平洋副热带高压调制的向东南方向输送的
72 水汽与来自西北方向欧亚大陆的水汽对三江源夏季降水有着较为重要的影响（Sun and
73 Wang, 2014）。三江源夏季降水年际变化与同期北大西洋涛动（NAO）引起的欧亚大陆上空
74 大气环流异常有关（Sun and Wang, 2018）。在过去几十年间，三江源夏季降水的年际变化
75 与 NAO、印度洋海温、ENSO、东亚夏季风等气候系统的关系越来越密切（Sun and Wang,
76 2019）。在冬季的不同月份，三江源月降水量年际变化分别受北大西洋海温、热带中东太平
77 洋海温和 NAO 的影响（Wang et al., 2021）。此外，由全球升温引起的海洋蒸发和陆地蒸散
78 加强，可以加快地气水分循环，引起三江源冬季降水量的年代际变化（李林等, 2006）。

79 虽然三江源冬季降水量较其他季节偏少明显（李林等, 2006），但该区域冬季降雪对东
80 亚冬季及次年春、夏季气候和水资源有着重要影响（Mao, 2010; Liu et al., 2014），可以为河流
81 径流提供潜在来源，也可以作为缓冲区来调控河流流量，影响下游地区的水资源
82 （Räisänen, 2008; Deng et al., 2017），此外，冬季降水的多少可以直接影响积雪的变化（胡
83 豪然和梁玲, 2013; 张若楠等, 2015）。三江源位于青藏高原积雪变率最大区域（李栋梁等,
84 2011; 胡豪然和梁玲, 2014; 王澄海等, 2015; 除多等, 2017），该区域积雪可以改变下垫面到大
85 气的热量状况，通过对东亚夏季风的影响（Qian et al., 2003; Zhang et al., 2004; Xiao and Duan,
86 2016）调制下游地区降水（Si and Ding, 2013; Wang et al., 2017）。因此，对三江源冬季降水
87 变率的研究具有重要意义。

88 近几十年，青藏高原冬季降水表现出了明显的年代际变化特征（韦志刚等, 2003; 李林
89 等, 2006），那么三江源冬季降水的年代际变化特征是怎样的？与其相关的物理机制是怎样的？
90 因此，本文拟研究三江源冬季降水的年代际变化特征及相关物理机制，以期为理解与
91 预测三江源及周边地区气候变化提供参考，为政府做出关于水资源管理、生态环境安全和
92 防灾减灾等方面的决策提供科学依据。

93 本文章节安排如下：第二节介绍文中所用资料与方法；第三节分析了三江源冬季降水
94 的年代际变化特征；第四节根据三江源冬季降水的年代际变化特征，对比分析不同时段大
95 尺度环流的差异，并探讨海温强迫作用；第五节为本文的结论与讨论。

96 2 资料与方法

本文所用资料包括：CN05.1 降水资料（吴佳和高学杰，2013），水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ；美国国家环境预报中心和国家大气研究中心（National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research; NCEP/NCAR）的再分析数据集中的逐月资料（Smith et al., 2007），包括垂直方向从 1000~10 hPa 共 17 个气压层的位势高度、纬向风、经向风、垂直速度和比湿，水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ；ERSST_V5 海表面温度数据（Huang et al., 2017），水平分辨率为 $2.0^\circ \times 2.0^\circ$ 。

本文研究时段为 1961/1962~2017/2018 年，当年 12 月至次年 2 月为冬季，计算过程中采用 1961~2017 年的冬季平均作为气候态；研究的三江源区域范围为 $31.5^\circ\text{N} \sim 36.5^\circ\text{N}$, $89.5^\circ\text{E} \sim 102.5^\circ\text{E}$ （图 1）。所用方法主要有合成分析（文中合成分析均为后一时段平均减去前一时段平均）和回归分析，在检验合成分析结果显著性时采用 *t* 检验（Huang et al., 2013），在检验回归分析结果显著性时计算了有效自由度，然后根据计算出的有效自由度进行信度检验，计算公式如下（Zhang et al., 2021）：

$$N^* = N(1 - r_1 r_2) / (1 + r_1 r_2) \quad (1)$$

公式（1）中 N 为时间序列的样本量， r_1 和 r_2 为两个时间序列和滞后一个时次时间序列的自相关系数。

文中利用 Takaya 和 Nakamura 推导出的三维波作用通量描述 Rossby 波的传播特征，计算公式如下（Takaya and Nakamura, 2001）：

$$\mathbf{W} = \frac{p \cos \phi}{2 |\mathbf{U}|} \begin{pmatrix} \frac{U}{a^2 \cos^2 \phi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V}{a^2 \cos \phi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \phi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right] \\ \frac{U}{a^2 \cos \phi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \phi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \phi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \phi^2} \right] \\ \frac{f_0^2}{N^2} \left\{ \frac{U}{a \cos \phi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right] + \frac{V}{a} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \phi} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \phi \partial z} \right] \right\} \end{pmatrix} + \mathbf{C}_u M \quad (2)$$

公式（2）中 p 为气压除以 1000 hPa；基本流场 $\mathbf{U} = (U, V, 0)^\top$ 表示气候场； U 和 V 表示水平风场的纬向分量和经向分量； ϕ 表示纬度； λ 表示经度； a 表示地球的平均半径； ψ 表示地转流函数； $z = -H \ln p$ 是关于 $\ln p$ 的垂直坐标， H 表示标高； N 为 Brunt-Väisälä 频率； C_u 表示波沿 U 方向传播； M 与波活动动量有关，不随波动位相变化且量级较小，本文主要分析准静止波，因此 $C_u M$ 可以忽略不计。

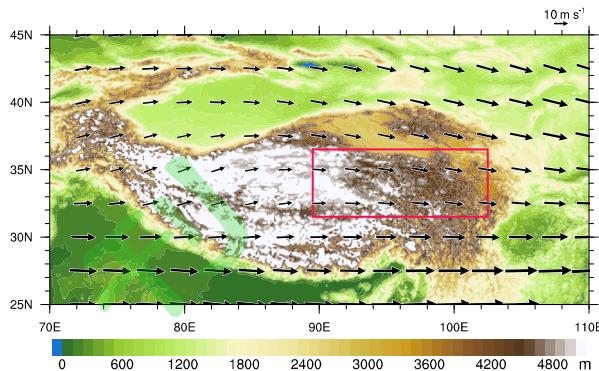
全球变暖会导致中低纬度位势高度的整体抬升，从而引起虚假的年代际信号（Huang and Li, 2015; Zhang et al., 2021），为消除全球变暖的影响，本文应用扰动位势高度（相对于纬向平均的差值）进行分析。

122

123 图 1 三江源区域地形 (阴影, 单位: m) 和 1961~2017 年冬季 500 hPa 风场气候态 (矢量, 单位: m s^{-1}), 红色矩形表示三江
124 源地区

125

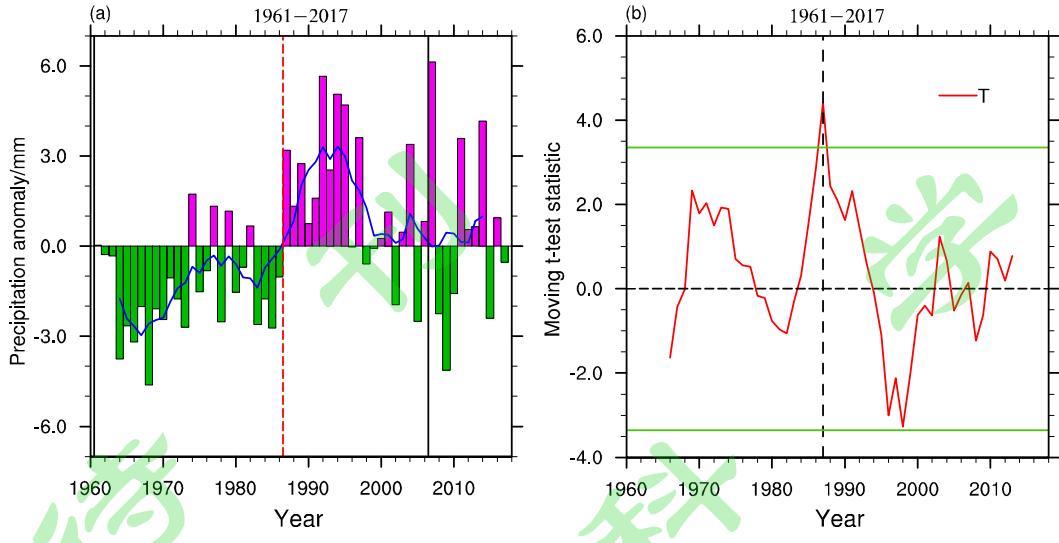
126 Fig. 1 Topography of the Three River Source (TRS) region (colored shading, unit: m) and climatology of winter 500 hPa winds for
127 1961~2017 (vectors, unit: m s^{-1}). The red rectangle denotes the domain of the TRS region



127 3 三江源冬季降水的年代际变化特征

128 1961~2017 年三江源冬季平均降水量为 11.3 mm, 呈增长趋势, 其增长速率为 0.6
129 mm/10 a, 通过 99% 的置信度检验。由三江源冬季降水距平时间序列 (图 2a) 可知, 三江
130 源冬季降水在 20 世纪 60 年代至 21 世纪 00 年代中期以年代际震荡变化为主, 其中 20 世纪
131 60 年代到 80 年代中期以负距平为主, 20 世纪 80 年代末期至 21 世纪 00 年代中期以正距平
132 为主; 进入 21 世纪 00 年代末期开始, 三江源冬季降水变化特征表现为年际波动变化。在
133 21 世纪 00 年代末期至 10 年代末期期间, 三江源冬季降水距平时间序列的 7 年滑动平均在
134 零线附近呈明显的波动变化, 并且波动幅度较小 (图 2a), 这进一步说明三江源冬季降水
135 变化特征在 21 世纪 00 年代末期以后呈年际波动变化。接下来本文选取三江源冬季降水年
136 代际变化特征最显著的 1961~2006 年作为气候背景进行分析。由滑动 t 检验的检验序列
137 (图 2b) 可知, t 值在 1987 年最大, 并通过 95% 的置信度检验, 这表明三江源冬季降水在
138 1987 年前后出现转折, 三江源 1961~1986 年平均冬季降水量为 9.8 mm, 1987~2006 年平
139 均冬季降水量为 12.8 mm。由上述分析可知, 在 1961~2006 年三江源冬季降水发生了 1 次
140 由少到多的年代际变化, 其中 1961~1986 年降水相对偏少, 1987~2006 年降水相对偏多,
141 此年代际变化与青藏高原冬季降水年代际变化基本一致 (韦志刚等, 2003; 李林等, 2006),
142 相似的年代际变化表明三江源冬季降水变化可能是青藏高原气候变化的一部分。

143 接下来为探讨三江源冬季降水年代际变化的物理机制, 将 1961~2006 年三江源冬季降
144 水分为 1961~1986 年降水偏少期 (P1) 和 1987~2006 年降水偏多期 (P2) 两个时段进行
145 研究。



146

147

148

图 2 1961~2017 年 (a) 三江源冬季降水距平时间序列 (单位: mm; 蓝色实线为 7 年滑动平均) 和 (b) 滑动 t 检验检验序列

(绿色实线表示通过 95% 的置信度检验)

149

Fig. 2 (a) Time series of anomalies of winter precipitation over the TRS region for the period of 1961~2017 (unit: mm; the blue solid line

150

4 三江源冬季降水年代际变化的相关机制

151

4.1 相关的大气环流特征

152

垂直速度是影响降水变化的关键因素 (Tao et al., 2017; Dong et al., 2019), 为研究三江源冬季降水年代际变化的原因, 首先分析了垂直速度在 P1 时段与 P2 时段的差异。

153

图 3a 显示了 P1 时段与 P2 时段 500 hPa 垂直速度 (见图 3a 中填色) 和 300 hPa 辐散风的差异 (见图 3a 中矢量)。如图 3a 所示, 三江源大部区域表现为显著负异常, 这表明三江源上空垂直上升运动在 P2 时段较 P1 时段偏强, 这与该地区高空异常辐散有关, 三江源高空异常辐散可以通过垂直方向上的动力抽吸作用引起了该地区上升运动的发展, 对流活动增强。冬季欧亚大陆上空 300 hPa 东亚极锋急流轴气候态位置位于 60°N 附近 (见图 3b 中蓝色实线)。通过 P1 时段与 P2 时段 300 hPa 纬向风的差异 (图 3b) 可知, 在欧亚大陆 40°N~55°N 区域上空纬向风呈显著的正异常, 这表明与 P1 时段相比, 在 P2 时段极锋急流位置偏南靠近三江源, 并且强度偏强。已有研究表明在高空西风急流中心入口区运动的气块会得到向左偏的非地转分量, 可以在急流南侧产生高层辐散 (丁一汇, 2005), 由此推断, 三江源高空异常辐散可能与极锋急流的南移加强有关。上述分析表明, 南移增强的极锋急流引起了三江源高空辐散, 通过抽吸作用加强了垂直上升运动, 为三江源在 P2 时段降水增多提供了有利的动力条件。

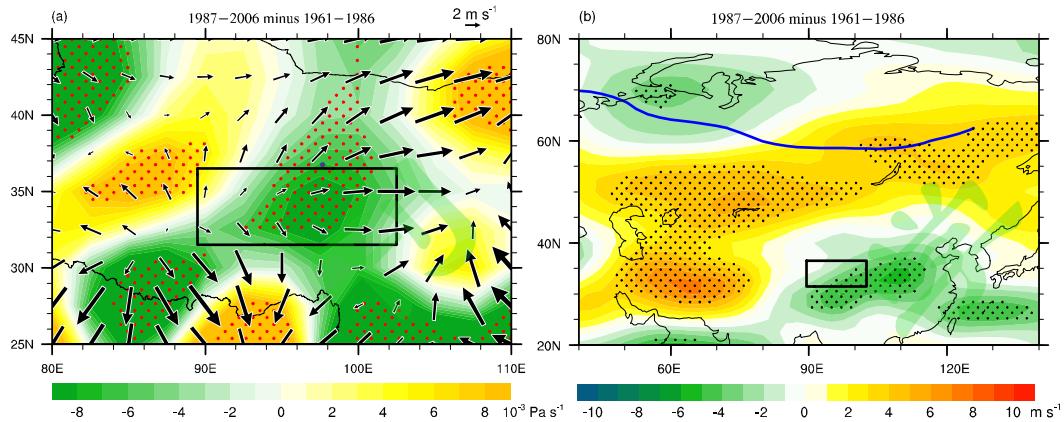


图 3 冬季 (a) 500 hPa 垂直速度场 (单位: 10^{-3} Pa s^{-1} ; 负值表示上升, 正值表示下沉)、300 hPa 辐散风场 (矢量, 单位: $m s^{-1}$)¹, (b) 300 hPa 纬向风场 (单位: $m s^{-1}$) 在 P2 和 P1 时段的均值差异。蓝色实线表示 1961~2006 年极锋急流轴气候态, 打点区表示通过 90% 的置信度检验, 黑色矩形表示三江源地区

Fig. 3 Average differences in winter (a) 500 hPa vertical velocity (unit: 10^{-3} Pa s^{-1} ; negative values represent upward motion and vice versa), divergent components (vector, units: $m s^{-1}$) and (b) 300 hPa zonal wind (units: $m s^{-1}$) between the periods of P2 and P1. The blue solid line represents the climatological polar front jet axis during 1961~2006, stippling denote the 90% confidence level, and the black rectangle denotes the domain of the TRS region

垂直运动异常与大尺度环流的年代际变异密切相关。因此, 分析了 500 hPa 风场和 500 hPa 扰动位势高度在 P1 时段与 P2 时段的差值分布 (图 4a, b)。如图 4a 所示, 乌拉尔山上空受异常气旋式环流控制, 贝加尔湖—中国东北部上空受异常反气旋式环流控制。受异常环流的影响, 极锋急流在 P2 时段增强且位置偏南。由图 4b 可知, 500 hPa 扰动位势高度异常的显著特征为: 中高纬北大西洋至贝加尔湖—中国东北部呈现“负正负正”的异常环流模态, 其负异常中心分别位于中高纬北大西洋上空和乌拉尔山上空, 正异常中心分别位于西欧上空和贝加尔湖—中国东北部上空。由上述分析可知, 乌拉尔山上空异常低压与贝加尔湖—中国东北部上空异常高压可能是引起极锋急流南移加强的重要系统。以往研究 (孙畅等, 2019; 刘胜胜等, 2021) 表明, 在冬季青藏高原水汽输送较弱, 水汽主要聚集在对流层低层, 因此选取 600hPa 水汽通量散度进行分析。由图 4c 可知, 三江源大部区域呈负异常, 说明 P2 时段较 P1 时段三江源水汽通量辐合, 这可能与三江源上空异常东风有关 (图 4a)。冬季三江源受偏西风控制 (见图 1 矢量), 与贝加尔湖—中国东北部异常高压有关的东风异常可以引起三江源东边界水汽输出减弱, 导致三江源水汽通量异常辐合, 有利于 P2 时段降水的发生。

以上结果表明, 在 20 世纪 80 年代末的一次跃变过程中, 垂直上升运动增强与水汽通量辐合是导致 P2 时段较 P1 时段降水偏多的主要原因, 与乌拉尔山上空异常低压和贝加尔湖—中国东北部上空异常高压有关。

192

193 图 4 冬季 (a) 500 hPa 风场 (C 表示气旋异常, A 表示反气旋异常; 单位: m s^{-1}), (b) 500 hPa 扰动位势高度场 (单位:
 194 gpm), (c) 600 hPa 水汽通量散度场 (单位: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 在 P2 和 P1 时段的均值差异。灰色阴影与打点区表示通过 90% 的置
 195 信度检验, 黑色矩形表示三江源地区

196 Fig. 4 Average differences in winter (a) 500 hPa wind (C indicates the cyclonic anomaly; A indicates the anticyclonic anomaly; unit: m s^{-1}),
 197 (b) 500 hPa eddy geopotential height (units: gpm) and (c) 600 hPa vapor flux divergence (units: $10^{-5} \text{ kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) between the periods of
 198 P2 and P1. Grey shadings and Stippling denote the 90% confidence level and the black rectangle denotes the domain of the TRS region

199 4.2 北大西洋海温的影响

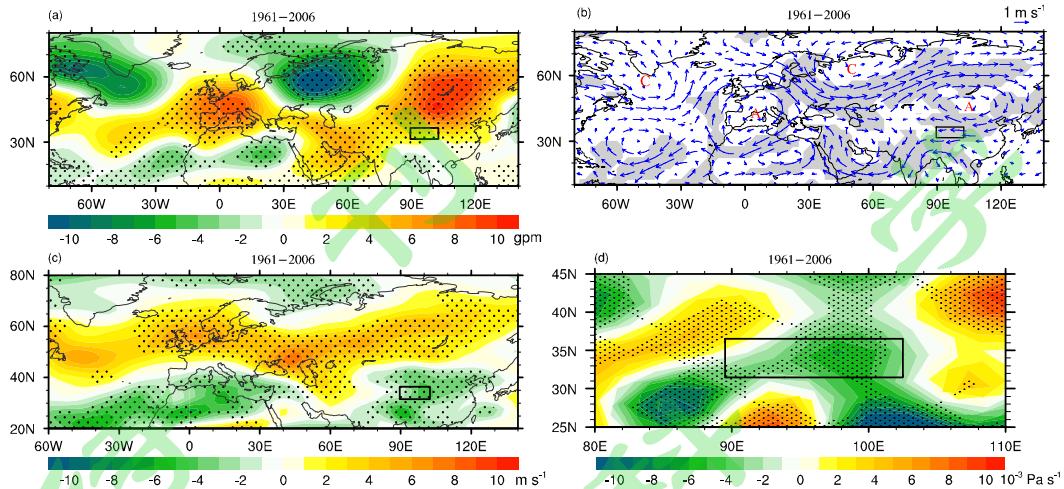
200 通过对三江源冬季降水转折前后大气环流差异的分析可知, 三江源冬季降水年代际变
 201 化与中高纬北大西洋至贝加尔湖—中国东北部的异常波列有关。图 5b 显示了与异常波列相
 202 关的波作用通量, 由此可知, 该纬向波列波源位于中高纬北大西洋, 通过一条路径向东传
 203 播, 引起了乌拉尔山上空异常低压与贝加尔湖—中国东北部上空异常高压。考虑到海温是
 204 影响大气环流异常的重要因素, 本文分析了三江源冬季降水转折前后海温的差异 (图 5a)。
 205 由图 5a 可知, 中高纬北大西洋海温呈显著的正异常, 这表明该区域海温在 P2 时段较 P1 时
 206 代偏暖。异常暖海温可以通过加强海表面上升运动, 引起海面上空对流活动异常, 激发从
 207 中高纬北大西洋延伸至贝加尔湖—中国东北部的大气遥相关波列。以上分析表明, 中高纬
 208 北大西洋至贝加尔湖—中国东北部的异常波列可能与中高纬北大西洋海温增暖有关。

209

210 图 5 冬季 (a) 海温场 (单位: $^{\circ}\text{C}$), (b) 300hPa 扰动位势高度场 (单位: gpm) 和相关的波作用通量 (矢量, 单位: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)
 211 在 P2 和 P1 时段的均值差异, (c) 1961~2006 年三江源冬季降水时间序列和北大西洋海温指数标准化 7 年滑动平均。打点
 212 区和等值线表示通过 90% 的置信度检验, 黑色矩形表示三江源地区, 黄色矩形表示计算北大西洋海温指数所选区域
 213 Fig. 5 Average differences in winter (a) SST (unit: $^{\circ}\text{C}$), (b) 300 hPa eddy geopotential height (units: gpm) and the corresponding wave
 214 activity flux (vector, unit: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) between the periods of P2 and P1, (c) the 7-year running averages of the standardized time series of TRS
 215 precipitation (Pre; blue) and North Atlantic SST index (NASST; $25^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 30^{\circ}\text{W}$; red) in winter during 1961~2006.
 216 Stippling and purple contour lines denote the 90% confidence level, the black rectangle denotes the domain of the TRS region and the
 217 yellow rectangle denotes where the SST anomalies are used for the calculation of NASST

218 为进一步探究中高纬北大西洋海温对三江源冬季降水的影响, 本文选取北大西洋
 219 $25^{\circ}\text{N} \sim 41^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} \sim 30^{\circ}\text{W}$ 区域的海温, 计算其区域平均作为冬季北大西洋海温指数。在
 220 1961~2006 年间中高纬北大西洋海温也经历了与三江源冬季降水相似的年代际变化 (图
 221 5c), 相关系数为 0.69, 通过 90% 的置信度检验, 其特征为: 20 世纪 60 年代至 80 年代为负
 222 异常, 90 年代至 2006 年为正异常。图 6 显示了 500 hPa 扰动位势高度、500 hPa 风、500 hPa
 223 垂直速度和 300 hPa 纬向风对冬季北大西洋海温指数 7 年滑动平均时间序列的年代际回归,
 224 500 hPa 扰动位势高度异常在中高纬北大西洋至贝加尔湖—中国东北部上空表现为“负正负
 225 正”的分布 (图 6a), 乌拉尔山上空为气旋式环流异常、贝加尔湖—中国东北部上空为反
 226 气旋式环流异常 (图 6b), 300 hPa 纬向风在 $40^{\circ}\text{N} \sim 55^{\circ}\text{N}$ 区域呈显著正异常 (图 6c), 三江
 227 源上空呈异常垂直上升运动 (图 6d), 并且受异常东风影响 (图 6b), 上述环流异常特征与
 228 4.1 节分析的大气环流异常特征基本一致, 这进一步表明中高纬北大西洋海温增暖在三江源

229 冬季降水年代际变化中起到了重要作用。

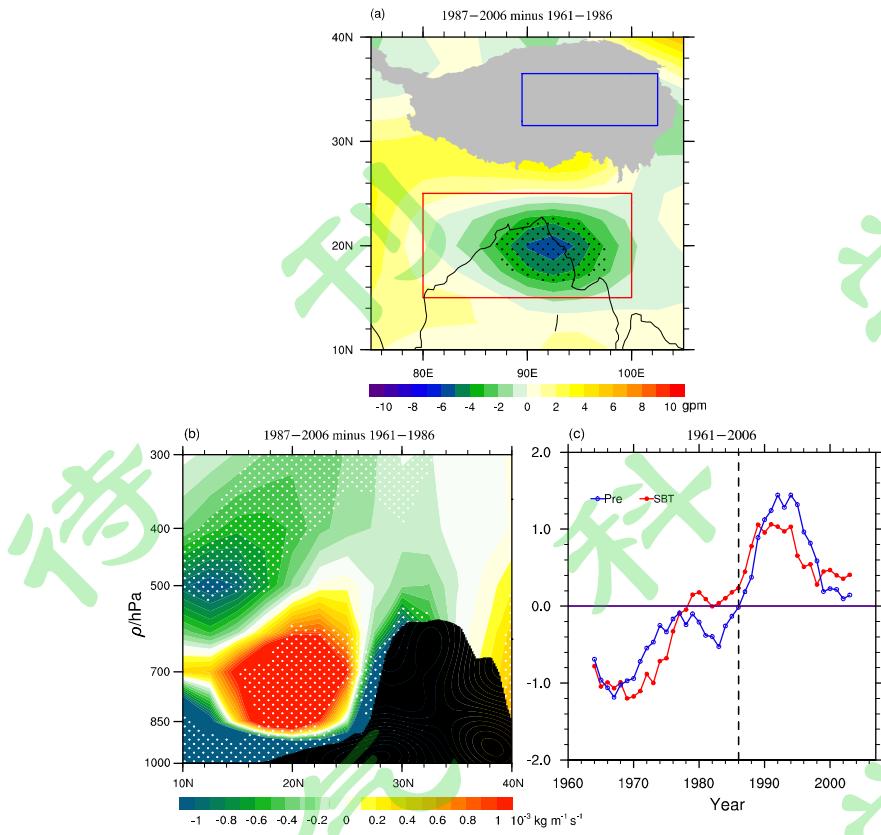


230
231 图 6 1961~2006 年冬季 (a) 500 hPa 扰动位势高度场 (单位: gpm), (b) 500 hPa 风场 (C 表示气旋异常
232 常; 单位: $m s^{-1}$), (c) 300 hPa 纬向风场 (单位: $m s^{-1}$), (d) 500hPa 垂直速度场 (单位: $10^{-3} Pa s^{-1}$, 负值表示上升, 正值表
233 示下沉) 对北大西洋海温指数年代际分量的回归场, 灰色阴影和打点区表示通过 90% 的置信度检验, 黑色矩形表示三江源地区
234 Fig. 6 Regression of the interdecadal component of (a) 500 hPa eddy geopotential height (units: gpm), (b) 500 hPa wind (C indicates the
235 cyclonic anomaly, A indicates the anticyclonic anomaly; unit: $m s^{-1}$), (c) 300 hPa zonal wind (units: $m s^{-1}$), (d) 500 hPa vertical velocity
236 (unit: $10^{-3} Pa s^{-1}$, negative values represent upward motion and vice versa) onto the interdecadal component of the North Atlantic SST
237 index for the winter during the period of 1961~2006. Grey shadings and Stippling denote the 90% confidence level and the black
238 rectangle denotes the domain of the TRS region

239 4.3 印度洋海温的影响

240 南支槽作为青藏高原冬季降水的重要影响系统 (索渺清和丁一汇, 2009), 可以通过输
241 送水汽影响高原地区冬季降水变化 (梁潇云等, 2002; 林志强等, 2014), 那么三江源冬季降
242 水的年代际变化是否与南支槽有关? 为探讨这一问题, 本文采用 700 hPa 相对涡度的区域平
243 均 ($15^{\circ}N \sim 25^{\circ}N$, $80^{\circ}E \sim 100^{\circ}E$) 作为南支槽强度指数 (Wang et al., 2011), 分析 1961~
244 2006 年冬季南支槽强度的年代际变化, 如图 7c 所示, 冬季南支槽强度的年代际变化与三江
245 源冬季降水的年代际变化具有较好的一致性。由图 7a 可知, 700 hPa 扰动位势高度差异在
246 孟加拉湾上空呈显著的负异常, 这表明冬季南支槽强度在 P2 时段较 P1 时段偏强, 并且经
247 向水汽输送异常在 850 hpa 以上为由南向北输送 (图 7b), 这意味着与 P1 时段相比由南支
248 槽引起的经向水汽输送在 P2 时段增多, 有利于三江源冬季降水在 P2 时段发生。

249 由图 5a 可知, 印度洋海温呈显著的正异常, 这表明印度洋海温在 P2 时段较 P1 时段偏
250 暖。Lu and Ren (2016) 通过研究印度洋海温对南支槽的影响指出, 自 1950 年代以来, 印
251 度洋海温是南支槽在年代际尺度上增强的一个主要因素, 可以通过非绝热加热作用使得海
252 平面气压降低, 引起西风异常, 在孟加拉湾地区激发气旋性的罗斯贝波, 导致南支槽增强。
253 由此推断, 1961~2006 年冬季南支槽强度的年代际变化可能与印度洋海温增暖有关, 印度
254 洋海温可能通过影响南支槽强度调制三江源冬季降水的年代际变化。



255

256 图 7 冬季 (a) 700 hPa 扰动位势高度场 (单位: gpm), (b) 经向水汽输送场沿 $89.5^{\circ}\text{E} \sim 102.5^{\circ}\text{E}$ 平均的气压-纬度剖面 ($10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)
257 在 P2 和 P1 时段的均值差异, (c) 三江源冬季降水时间序列和南支槽强度指数标准化 7 年滑动平均。打点区表示通过
258 90% 的置信度检验, 蓝色矩形表示三江源地区, 红色矩形表示南支槽区域

259 Fig. 7 Average differences in winter (a) 700 hPa eddy geopotential height (units: gpm)
260 and pressure-latitude cross section of the
261 meridional water vapor transport (unit: $10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) between the periods of P2 and P1, (c) the 7-year running averages of the
262 standardized time series of TRS precipitation (Pre; blue) and strength index of south branch trough (SBT; $15^{\circ}\text{N} \sim 25^{\circ}\text{N}, 80^{\circ}\text{E} \sim 100^{\circ}\text{E}$;
263 red) in winter during 1961~2006. Stippling denotes the 90% confidence level, the blue rectangle denotes the domain of the TRS region
and the red rectangle denotes the range of southern branch trough

264 以往研究表明三江源冬季降水年际变化与热带太平洋海温有关 (Wang et al., 2021), 但
265 与三江源冬季降水年代际变化相关的热带太平洋海温异常 (图 5a) 未显示出显著的信号,
266 因此热带太平洋海温对三江源冬季降水年代际变化影响可能较弱。

267 5 结论和讨论

268 本文利用 CN05.1 格点降水资料与 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了 1961~2017 年期间
269 三江源冬季降水的年代际变化特征, 并探讨了相关的物理机制, 得到了以下主要结论。

270 (1) 在 1961~2006 年期间, 三江源冬季降水具有明显的年代际振荡变化特征, 其中
271 20 世纪 60 年代到 80 年代中期降水相对偏少, 80 年代末期到 2006 年降水相对偏多, 降水转
272 折年份出现在 1987 年, 2006 年以后三江源冬季降水变化特征表现为年际波动变化。

273 (2) 三江源上空对流活动的增强与水汽通量的辐合是引起该地区冬季降水年代际增多

274 的主要影响因素，与乌拉尔山上空异常低压和贝加尔湖—中国东北部上空异常高压有关。
275 在乌拉尔山上空异常低压和贝加尔湖—中国东北部上空异常高压的影响下，极锋急流在 P2
276 时段较 P1 时段偏南且加强，靠近三江源，引起该地区高空辐散，垂直上升运动加强，对流
277 活动增强，导致三江源冬季降水的年代际增加。此外，贝加尔湖—中国东北部上空的异常
278 高压可以引起三江源上空东风异常，使得该地区水汽通量辐合异常，有利于冬季降水在 P2
279 时段增多。

280 (3) 三江源冬季降水的年代际变化可能与中高纬北大西洋海温和印度洋海温有关。中
281 高纬北大西洋海温增暖可以激发向东传播的遥相关波列，引起乌拉尔山上空异常低压和贝
282 加尔湖—中国东北部上空异常高压，通过影响极锋急流调制三江源冬季降水；印度洋海温
283 增暖可以通过调制孟加拉湾上空南支槽强度，进一步影响三江源冬季降水的年代际变化。

284 本文探讨分析了北大西洋海温和印度洋海温对三江源冬季降水年代际变化的影响机制。
285 然而，除了海温的年代际变率影响外，北极海冰对中高纬度环流变化及青藏高原气候要素
286 也有着重要影响 (Blackport and Screen, 2019; Chen et al., 2021; Duan et al., 2022)，其与三江
287 源冬季降水年代际变化的关系值得深入研究。此外，下一步需要利用数值模式分析北大西
288 洋海温和印度洋海温对三江源冬季降水年代际变化是协同作用还是独立影响。

289 参考文献 (References)

- 290 Blackport R, Screen J A. 2019. Influence of Arctic sea ice loss in autumn compared to that in
291 winter on the atmospheric circulation [J]. Geophysical Research Letters, 46(4): 2213–2221.
292 doi:10.1029/2018GL081469
- 293 Chen H, Zhu Q, Peng C H, et al. 2013. The impacts of climate change and human activities on
294 biogeochemical cycles on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Global Change Biology, 19(10):
295 2940–2945. doi:10.1111/gcb.12277
- 296 Chen Y H, Duan A M, Li D L. 2021. Connection between winter Arctic sea ice and west Tibetan
297 Plateau snow depth through the NAO [J]. International Journal of Climatology, 41(2): 846–861.
298 doi:10.1002/joc.6676
- 299 除多, 洛桑曲珍, 杨志刚, 等. 2017. 1981–2010 年青藏高原降雪日数时空变化特征 [J]. 应用气
300 象学报, 28(3): 292–305. Chu Duo, Luosang Quzhen, Yang Zhigang, et al. 2017. Spatiotemporal
301 variations of snowfall days over the Tibetan Plateau from 1981 to 2010 [J]. Journal of Applied
302 Meteorological Science (in Chinese), 28(3): 292–305. doi:10.11898/1001-7313.20170304
- 303 Cuo L, Zhang Y X, Wang Q C. 2013. Climate Change on the Northern Tibetan Plateau during 1957–
304 2009: Spatial Patterns and Possible Mechanisms [J]. Journal of Climate, 26(1): 85–109.
305 doi:10.1175/JCLI-D-11-00738.1
- 306 Deng H J, Pepin N C, Chen Y M. 2017. Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau
307 [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(14): 7323–7341.
308 doi:10.1002/2017JD026524

- 309 丁一汇. 2005. 高等天气学(第二版) [M]. 北京: 气象出版社, 266pp. Ding Yihui. 2005. Advenced
310 Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. 2nded. Beijing: China Meteorological Press, 266pp.
- 311 Dong D H, Tao W C, Lau L, et al. 2019. Interdecadal variation of precipitation over the Hengduan
312 mountains during rainy seasons [J]. Journal of Climate, 32(12): 3743–3760. doi:10.1175/JCLI-
313 D-18-0670.1
- 314 Dong Y Y, Zhai J Q, Zhao Y, et al. 2020. Teleconnection patterns of precipitation in the Three-River
315 Headwaters region, China [J]. Environmental Research Letters, 15(10): 40–50.
316 doi:10.1088/1748-9326/aba8c0
- 317 Duan A M, Peng Y Z, Liu J P, et al. 2022. Sea ice loss of the Barents-Kara Sea enhances the winter
318 warming over the Tibetan Plateau [J]. npj Climate and Atmospheric Science, 5(1): 1–6.
319 doi:10.1038/s41612-022-00245-7
- 320 Guo D L, Sun J Q, Yu E T. 2018. Evaluation of CORDEX regional climate models in simulating
321 temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric and Oceanic Science
322 Letters, 11(3): 219–227. doi:10.1080/16742834.2018.1451725
- 323 Huang B Y, Thorne P W, Banzon V F, et al. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature,
324 Version 5 (ERSSTv5): Upgrades, Validations, and Intercomparisons [J]. Journal of Climate,
325 30(20): 8179–8205. doi:10.1175/JCLI-D-16-0836.1
- 326 Huang R H, Liu Y, Feng T. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over Eastern China
327 around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J].
328 Chinese Science Bulletin, 58(12): 1339–1349. doi:10.1007/s11434-012-5545-9
- 329 胡豪然, 梁玲. 2013. 近 50 年青藏高原东部冬季积雪的时空变化特征 [J]. 地理学报, 68(11):
330 1493–1503. Hu Haoran, Liang Ling. 2013. Spatial and temporal variations of winter snow over
331 east of Qinghai-Tibet Plateau in the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese),
332 68(11): 1493–1503. doi:10.11821/dlxz201311005
- 333 胡豪然, 梁玲. 2014. 近 50 年青藏高原东部降雪的时空演变 [J]. 地理学报, 69(7): 1002–1012.
334 Hu Haoran, Liang Ling. 2014. Temporal and spatial variations of snowfall in the east of Qinghai-
335 Tibet Plateau in the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 69(7): 1002–1012.
336 doi:10.11821/dlxz201407012
- 337 Huang Y Y, Li X F. 2015. The interdecadal Variation of the western Pacific subtropical high as
338 measured by 500 hPa eddy geopotential height [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 8:
339 371–375. doi:10.3878/AOSL20150038
- 340 Jiang C, Zhang L B. 2016. Effect of ecological restoration and climate change on ecosystems: a case
341 study in the Three-Rivers Headwater Region, China [J]. Environmental Monitoring and
342 Assessment, 188(6): 382. doi:10.1007/s10661-016-5368-2
- 343 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(5):
344 627–636. Li Dongliang, Wang Chunxue. 2011. Research progress of snow cover and its influence
345 on China climate [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(5): 627–636.
346 doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2011.05.014

- 347 李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 2006. 近 43 年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究 [J]. 自
348 然资源学报, 21(1): 79–85. Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, et al. 2006. Study on climate change
349 trend and its catastrophe over “Sanjiangyuan” region in recent 43 years [J]. Journal of Natural
350 Resources (in Chinese), 21(1): 79–85. doi:10.3321/j.issn:1000-3037.2006.01.010
- 351 李珊珊, 张明军, 汪宝龙, 等. 2012. 近 51 年来三江源区降水变化的空间差异 [J]. 生态学杂志,
352 31(10): 2635–2643. Li Shanshan, Zhang Mingjun, Wang Baolong, et al. 2012. Spatial difference
353 of precipitation variation in Three-River headwaters region of China in recent 51 years [J].
354 Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 31(10): 2635–2643. doi:10.13292/j.1000-
355 4890.2012.0394
- 356 梁潇云, 钱正安, 李万元. 2002. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析 [J]. 高原气象,
357 21(4): 359–367. Liang Xiaoyun, Qian Zhengan, Li Wanyuan. 2002. Analyses on circulation
358 patterns and water vapor fields of snow disaster weather in eastern pasture areas of Qinghai-
359 Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21(4): 359–367. doi:10.3321/j.issn:1000-
360 0534.2002.04.004
- 361 林志强, 假拉, 薛改萍, 等. 2014. 1980–2010 年西藏高原大到暴雪时空分布及环流特征分析 [J].
362 高原气象, 33(4): 900–906. Lin Zhiqiang, Jia La, Xue Gaiping. 2014. Spatial-temporal
363 distribution and general circulation of heavy snow over Tibet Plateau in 1980–2000 [J]. Plateau
364 Meteorology (in Chinese), 33(4): 900–906. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00069
- 365 Liu G, Wu R G, Zhang Y Z. 2014. Persistence of snow cover anomalies over the Tibetan Plateau
366 and the implications for forecasting summer precipitation over the Meiyu-Baiu region [J].
367 Atmospheric and Oceanic Science Letters, 7(2): 115–119. doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0074
- 368 Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. 2008. Grassland degradation in the “Three-River Head-waters” region,
369 Qinghai Province [J]. Journal of Geographical Sciences, 18(3): 259–273. doi:10.1007/s11442-
370 008-0259-2
- 371 刘胜胜, 周顺武, 吴萍, 等. 2021. 青藏高原东部冬季降水对北极涛动异常的响应 [J]. 气象学报,
372 79(04): 558–569. Liu Shengsheng, Zhou Shunwu, Wu Ping, et al. 2021. Response of winter
373 precipitation in eastern Tibetan Plateau to Arctic Oscillation [J]. Journal of Applied
374 Meteorological Science (in Chinese), 79(4): 558–569. doi:10.11676/qxb2021.034
- 375 Liu X, Yin Z Y. 2000. Spatial and temporal variation of summer precipitation over the eastern
376 Tibetan Plateau and the North Atlantic Oscillation [J]. Journal of Climate, 14(13): 2896–2909.
377 doi:10.1175/1520-0442(2001)014<2896:SATVOS>2.0.CO;2
- 378 刘晓琼, 吴泽洲, 刘彦随, 等. 2019. 1960–2015 年青海三江源地区降水时空特征 [J]. 地理学报,
379 74(9): 1803–1820. Liu Xiaoqiong, Wu Zezhou, Liu Yansui, et al. 2019. Spatial-temporal
380 characteristics of precipitation from 1960 to 2015 in the Three Rivers' Headstream Region,
381 Qinghai, China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 74(9): 1803–1820.
382 doi:10.11821/dlx201909008
- 383 Lu B, Ren H L. 2016. SST-forced interdecadal deepening of the winter India-Burma trough since

- 384 the 1950s [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(6): 2719–2731.
385 doi:10.1002/2015JD024393
- 386 Mao J Y. 2010. Interannual variability of snow depth over the Tibetan Plateau and its associated
387 atmospheric circulation anomalies [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3(4): 213–218.
388 doi:10.1080/16742834.2010.11446875
- 389 Qian Y F, Zheng Y Q, Zhang Y, et al. 2003. Responses of China's summer monsoon climate to snow
390 anomaly over the Tibetan Plateau [J]. *International Journal of Climatology*, 23(6): 593–613.
391 doi:10.1002/joc.901
- 392 Räisänen J. 2008. Warmer climate: Less or more snow? [J]. *Climate Dynamics*, 30(2–3): 307–319.
393 doi:10.1007/s00382-007-0289-y
- 394 Shi H Y, Li T J, Wei J H, et al. 2016. Spatial and temporal characteristics of precipitation over the
395 Three-River Headwaters region during 1961–2014 [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*,
396 6: 52–65. doi:10.1016/j.ejrh.2017.03.004
- 397 Si D, Ding Y H. 2013. Decadal change in the correlation pattern between the Tibetan Plateau winter
398 snow and the East Asian summer precipitation during 1979–2011 [J]. *Journal of Climate*, 26(19):
399 7622–7634. doi:10.1175/JCLI-D-12-00587.1
- 400 Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2007. Improvements to NOAA's historical merged
401 land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. *Journal of Climate*, 21 (10): 2283–2296.
402 doi:10.1175/2007JCLI2100.1
- 403 索渺清, 丁一汇. 2009. 冬半年副热带西风南支槽结构和演变特征研究 [J]. *大气科学*, 33(03):
404 425–442. Suo Miaoqing, Ding Yihui. 2009. The structures and evolutions of the wintertime
405 southern branch trough in the subtropical westerlies [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*
406 (in Chinese), 33(3): 425–442. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2009.03.03
- 407 Song C, Pei T, Zhou C H. 2014. The role of changing multiscale temperature variability in extreme
408 temperature events on the eastern and central Tibetan Plateau during 1960–2008 [J]. *International
409 Journal of Climatology*, 34(14): 3683–3701. doi:10.1002/joc.3935
- 410 Sun B, Wang H J. 2014. Moisture sources of semiarid grassland in China using the Lagrangian
411 Particle Model FLEXPART [J]. *Journal of Climate*, 27(6): 2457–2474. doi:10.1175/JCLI-D-13-
412 00517.1
- 413 Sun B, Wang H J. 2018. Interannual variation of the spring and summer precipitation over the Three
414 River Source region in China and the associated regimes [J]. *Journal of Climate*, 31(18): 7441–
415 7457. doi:10.1175/JCLI-D-17-0680.1
- 416 Sun B, Wang H J. 2019. Enhanced connections between summer precipitation over the Three-River-
417 Source region of China and the global climate system [J]. *Climate Dynamics*, 52(5–6): 3471–
418 3488. doi:10.1007/s00382-018-4326-9
- 419 孙畅, 王子谦, 杨崧. 2019. 青藏高原西侧地区冬季降水的年际变率及其影响因子 [J]. *大气科
420 学*, 43(2): 350–360. Sun Chang, Wang Ziqian, Yang Song. 2019. Interannual variability of winter
421 precipitation over the western side of Tibetan Plateau and its impact factors [J]. *Chinese Journal*

- 422 of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(2): 350–360. doi:10.3878/j.issn.1006-
423 9895.1805.17305
- 424 Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for
425 stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. Journal of
426 the Atmospheric Sciences, 58(6): 608–627. doi:10.1175/1520-
427 0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2
- 428 Tao W C, Huang G, Wu R G, et al. 2017. Asymmetry in summertime atmospheric circulation
429 anomalies over the northwest Pacific during decaying phase of El Niño and La Niña [J]. Climate
430 Dynamics, 49(5–6): 2007–2023. doi:10.1007/s00382-016-3432-9
- 431 Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East
432 Asia [J]. Geophysical Research Letters, 35(14): 1–5. doi:10.1029/2008GL034330
- 433 Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau
434 snow cover on summer precipitation in Eastern China [J]. Journal of Climate, 30(3): 885–903.
435 doi:10.1175/JCLI-D-16-0041.1
- 436 王澄海, 李燕, 王艺. 2015. 北半球大气环流及其冬季风的年代际变化对青藏高原冬季降雪的
437 影响 [J]. 气候与环境研究, 20(4): 421–432. Wang Chenghai, Li Yan, Wang Yi. 2015. Impacts of
438 interdecadal variability of circulation and winter monsoon on winter snowfall over the Tibetan
439 Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20(4): 421–432. doi:
440 10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14169.
- 441 Wang T M, Yang S, Wen Z P, et al. 2011. Variations of the winter India-Burma Trough and their
442 links to climate anomalies over southern and eastern Asia [J]. Journal of Geophysical Research:
443 Atmospheres, 116(D23118). doi:10.1029/2011JD016373
- 444 Wang T, Sun B, Wang H J. 2021. Interannual variations of monthly precipitation and associated
445 mechanisms over the Three River Source region in China in winter months [J]. International
446 Journal of Climatology, 41(4): 2209–2225. doi:10.1002/joc.6954
- 447 Wang Z Q, Duan A M, Yang S, et al. 2017. Atmospheric moisture budget and its regulation on the
448 variability of summer precipitation over the Tibetan Plateau. Journal of Geophysical Research:
449 Atmospheres, 122(2): 614–630. doi:10.1002/2016JD025515
- 450 韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 2003. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. 大气科学, 27(2):
451 157–170. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. 2003. Interannual and interdecadal
452 variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of
453 Atmospheric Sciences (in Chinese), 27(2): 157–170. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.02.03
- 454 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及其它资料的对比 [J]. 地球物理
455 学报, 56(4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over
456 China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in
457 Chinese), 56(4): 1102–1111. doi:10.6038/cjg20130406
- 458 Wu S H, Yin Y H, Zheng D, et al. 2007. Climatic trends over the Tibetan Plateau during 1971–2000

- 459 [J]. Journal of Geographical Sciences, 17(2): 141–151. doi:10.1007/s11442-007-0141-7
- 460 Xiao Z X, Duan A M. 2016. Impacts of Tibetan Plateau snow cover on the interannual variability of
461 the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Climate, 29(23): 8495–8514. doi:10.1175/JCLI-
462 D-16-0029.1
- 463 Yang X C, Zhang L L, Zhang W, et al. 2006. Climate change in Mt. Qomolangma region since 1971
464 [J]. Journal of Geographical Sciences, 16(3): 326–336. doi:10.1007/s11442-006-0308-7
- 465 Yi X S, Li G S, Yin Y. 2013. Spatiotemporal variation of precipitation in the Three-River Headwater
466 Region from 1961 to 2010 [J]. Journal of Geographical Sciences, 23(3): 447–464.
467 doi:10.1007/s11442-013-1021-y
- 468 Zhang D P, Huang Y Y, Zhou B T, et al. 2021. Is there interdecadal variation in South Asian High?
469 [J]. Journal of Climate, 34: 8089–8103. doi:10.1175/JCLI-D-21-0059.1
- 470 张若楠, 张人禾, 左志燕. 2015. 中国冬季积雪变异及其与北极涛动的联系 [J]. 大气科学, 39(03):
471 634–642. Zhang Ruonan, Zhang Renhe, Zuo Zhiyan. 2015. Winter snow cover variability over
472 China and its relation to Arctic Oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
473 Chinese), 39(03): 634–642. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1405.14170
- 474 Zhang Y, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau:
475 The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon [J]. Journal of
476 Climate, 17(14): 2780–2793. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2780:DCOTSS>2.0.CO;2
- 477 Zhu X H, Wang W Q, Fraedrich K. 2013. Future climate in the Tibetan Plateau from a Statistical
478 Regional Climate Model [J]. Journal of Climate, 26(24): 10125–10138. doi:10.1175/JCLI-D-13-
479 00187.1