

1 青藏高原冬季积雪与华南前汛期降水年际变率的联系

2

3 **摘要** 利用 1979–2018 年青藏高原（高原）卫星积雪、华南地区 261 站逐日降水及 ERA5 再分析  
4 资料，探讨了高原冬季积雪与华南前汛期降水的联系。结果表明：1) 高原西部积雪与华南前汛  
5 期降水的正相关关系最为稳定，其主要影响前汛期的锋面降水，对夏季风降水的影响较小；2)  
6 华南前汛期在高原西部积雪偏多年比偏少年偏早 20 天，使得前汛期降雨日数偏多，持续时间偏  
7 长，总降水量偏多，而降水强度受积雪的影响较小；3) 高原积雪偏多年，积雪的冷却作用形成  
8 了低层异常反气旋环流，而东亚沿岸为“+-”的位势高度异常，中纬度“西高东低”的环流配  
9 置有利于中高纬冷空气南侵，使得华南上空温度偏低，同时偏强偏南的西太平洋副热带高压加强  
10 了低纬地区偏南气流和水汽输送。3-4 月锋面在华南北部南北摆动，四月初偏北干冷空气南侵和  
11 偏南暖湿气流的持续北推使得锋面加强，触发了前汛期的较早建立；积雪偏少年冷空气和偏南暖  
12 湿气流均较弱，华南北部锋面在四月初中断，四月中下旬华南北部锋面在偏北弱冷空气和偏南暖  
13 湿气流的共同作用下重新建立，从而华南前汛期开始偏晚。

14 **关键词** 青藏高原；积雪深度；华南前汛期；开始日期；锋面

15

16 华南地区降水集中在每年 4–9 月，年降水量可超过 2000 mm，是我国降水最为充沛的地区之  
17 一。根据影响天气系统的差异和不同气候特征，华南雨季可划分为前汛期（4—6 月）和后汛期  
18 （7—9 月）（李江南等，2002；池艳珍等，2005；强学民和杨修群，2008）。前汛期降水占全年  
19 降水量的 40%~50%，且降水强度大，是华南地区大范围洪涝灾害发生的主要时段（Luo, 2017）。  
20 前汛期强降水常发生在锋前 200~300km 的暖区，具有显著的“暖区暴雨”特征（黄士松等，1986）。  
21 前汛期暖区暴雨强、持续时间长、灾害影响大，甚至可发生在无明显天气尺度系统强迫的低空偏  
22 南气流中（Wang et al., 2014; Li et al., 2021），日常业务预报极为困难，有时事后也难以系统解释  
23 （林良勋，2006；吴乃庚等，2020）。因此，华南前汛期降水是业务预报和气象研究中的难点之  
24 一。

25 华南前汛期降水的复杂性还体现在不同阶段环流特征、降水性质的差异上。夏季风爆发前后，  
26 华南地区水汽源地、大气环流、热力状况等均有较大不同，使得季风爆发前后两个时段的降水特  
27 征也明显不同（Li et al., 2020）。池艳珍等（2005）指出前汛期锋面降水主要集中在 4 月，这期间  
28 华南大气层结稳定，西北太平洋副热带高压南侧西南暖湿气流和北方冷空气是影响降水的两个  
29 主要系统；而夏季风降水集中在 6 月，此时大气层结不稳定且对流非常旺盛，以孟加拉湾、中南

30 半岛和越赤道气流影响为主。李春晖等（2007）认为前汛期初期主要是锋面降水过程，当南海夏  
31 季风爆发推进到华南上空时又形成了另一个峰值降水，不宜将华南前汛期降水作为一个整体进行  
32 研究。因此，前人通过华南上空高层风场、低层假相当位温、南海夏季风爆发时间等动力和热力  
33 途径将前汛期降水划分为锋面降水和夏季风降水（郑彬等，2006；马玉坤等，2015；Jiang et al.,  
34 2017；刘亚楠等，2019）。华南前汛期锋面降水和夏季风降水的划分有助于加深对前汛期降水的  
35 理解，为提升前汛期降水预测能力提供新的思路（马玉坤等，2015）。

36 青藏高原（高原）积雪是影响华南前汛期降水的一个重要陆面因子，可以将高原积雪作为华  
37 南前汛期降水的预测因子（陈烈庭和阎志新，1979；陈烈庭，1998；蔡学湛，2001）。马慧和陈  
38 槟华（2005）指出高原前冬春积雪偏多有利于6月华南降水增多。高原3月份积雪偏少（多），  
39 东印度洋出现异常西（东）风，有（不）利于南海夏季风的爆发（于乐江和胡敦欣，2008），从  
40 而影响前汛期季风降水的开始时间。然而，高原冬春积雪年际异常敏感区变化具有显著的多尺度  
41 空间差异性（伯玥等，2014），积雪反照率的空间差异性也会造成空间非均匀的高原地表加热，  
42 导致中国东部降水对高原积雪的响应不同（王澄海和崔洋，2011；杨凯等，2017）。Wu and Qian  
43 （2003）指出高原冬季积雪存在不同的异常模态，应考虑积雪区域差异性对降水的不同影响。通  
44 过资料分析和数值模拟，Wang et al.（2017）研究发现高原冬春南部积雪偏多有利于长江流域和  
45 东北地区夏季降水偏多，而华南降水偏少；当高原北部积雪偏多时，华南和华北降水偏多，长江  
46 流域降水偏少。Zhao and Moore（2004）发现高原东部和西部积雪与印度夏季降水的关系在1985  
47 年以前是反相的，而1985年以后高原东部积雪的作用减小，西部积雪与印度夏季降水的关系由  
48 负相关转为正相关。因此，高原积雪的空间差异性对后期的降水有着极大的影响。

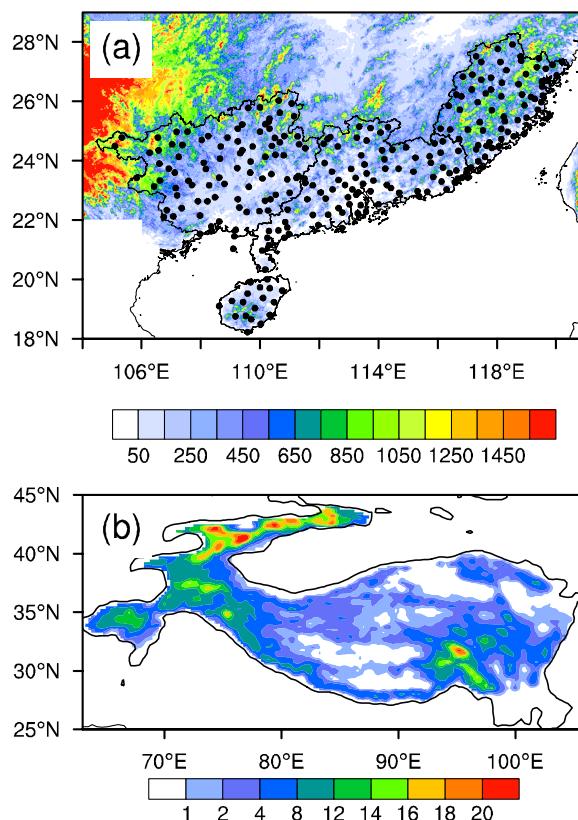
49 综上可见，华南前汛期降水和高原积雪存在显著的联系，但无论是前汛期降水还是高原积雪  
50 的时空差异性同样显著，以往大多数研究都将前汛期降水和高原积雪作为一个整体来考虑。为加  
51 深对高原积雪与华南前汛期降水的联系，减小作为前期预测因子的高原冬季积雪对前汛期降水预  
52 测的不确定性，本文将通过资料分析找到高原前冬积雪影响华南前汛期降水的敏感区，探讨其与  
53 两种不同性质的降水的联系及可能影响机制。

## 54 1 数据和方法

55 本文使用的数据有：（1）青藏高原逐月卫星积雪深度和雪水当量分别来源于国家青藏高原科  
56 学数据中心中国雪深长时间序列数据集（Che et al., 2008）和美国国家冰雪数据中心（Armstrong  
57 et al., 2005），水平分辨率均为25公里。这两套积雪数据集可有效反应高原积雪异常信号，在高  
58 原积雪气候效应的研究中已得到广泛引用（Liu et al., 2014; Bao and You, 2019; Chen et al., 2020）；

59 (2) 中国气象局国家气象信息中心提供的华南 261 个地面气象站逐日降水数据，其中广西、广  
60 东、海南和福建分别有 90 站、86 站、66 站和 19 站（图 1a 黑色圆点）；(3) 欧洲中期天气预报  
61 中心第五代逐日全球再分析资料 (ERA5; Hersbach et al., 2020)，空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ；(4) 国  
62 家气候中心提供的华南前汛期开始、结束时间和总降水量 (中国气象局, 2017)。雪水当量时间  
63 长度为 1979—2007 年，其余数据时间长度均为 1979—2018 年。本文取前一年 12 月和当年 1-2  
64 月共三个月的平均为冬季。

65 华南前汛期降水由锋面降水和季风降水两种不同性质的降水组成。有些研究 (Jiang et al.,  
66 2017; 刘亚楠等, 2019) 直接采用南海夏季风爆发日期作为划分依据，但通常南海夏季风爆发后  
67 北推到华南地区仍需 1-2 月，甚至更长时间 (郑彬等, 2006; 马玉坤等; 2015)。因此，本文采  
68 用郑彬等 (2006) 考虑华南上空环流转换的划分方法，使得两类降水的划分更为合理，即华南上  
69 空 ( $20\text{--}23^\circ\text{N}$ ,  $110\text{--}120^\circ\text{E}$ )  $100\text{hPa}$  纬向风由西风转为东风并稳定维持 5 天以上。值得注意的是  
70 这里划分的锋面降水和夏季风降水是基于华南地区大气环流差异进行划分，与一般天气过程区分  
71 的锋面降水、暖区降水 (黄士松等, 1986) 有所区别。本文利用 ERA5 再分析资料和该判据计算  
72 获得每一年季风降水的开始时间，将发生在前汛期开始时间和季风降水开始时间之间的降水划分  
73 为锋面降水，季风降水开始时间到前汛期结束之间的降水记为季风降水。合成分析和相关系数的  
74 显著性检验均采用 t 检验方法。

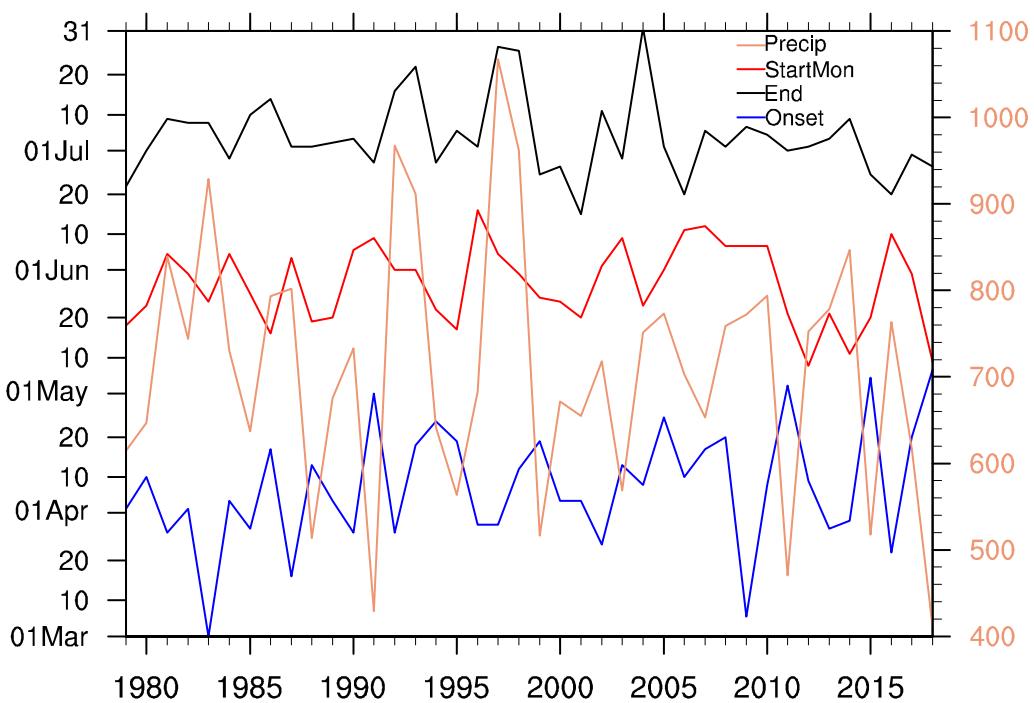


76 图 1 (a) 华南地区 261 个气象站的位置 (黑色圆点) 及地形高度 (单位: m) 和 (b) 高原冬季  
77 积雪深度气候态空间分布 (单位: cm)。黑色实线为 2000 米地形等高线

78 Fig.1 (a) Spatial distributions of the 261 meteorological stations (black dots) over South China and  
79 orographic height (shaded, units: m). (b) Climatology of the winter snow depth over the Tibetan  
80 Plateau (TP; units: cm) and the black curves depict the 2000 m orographic height.

## 81 2 高原积雪与华南前汛期降水的联系

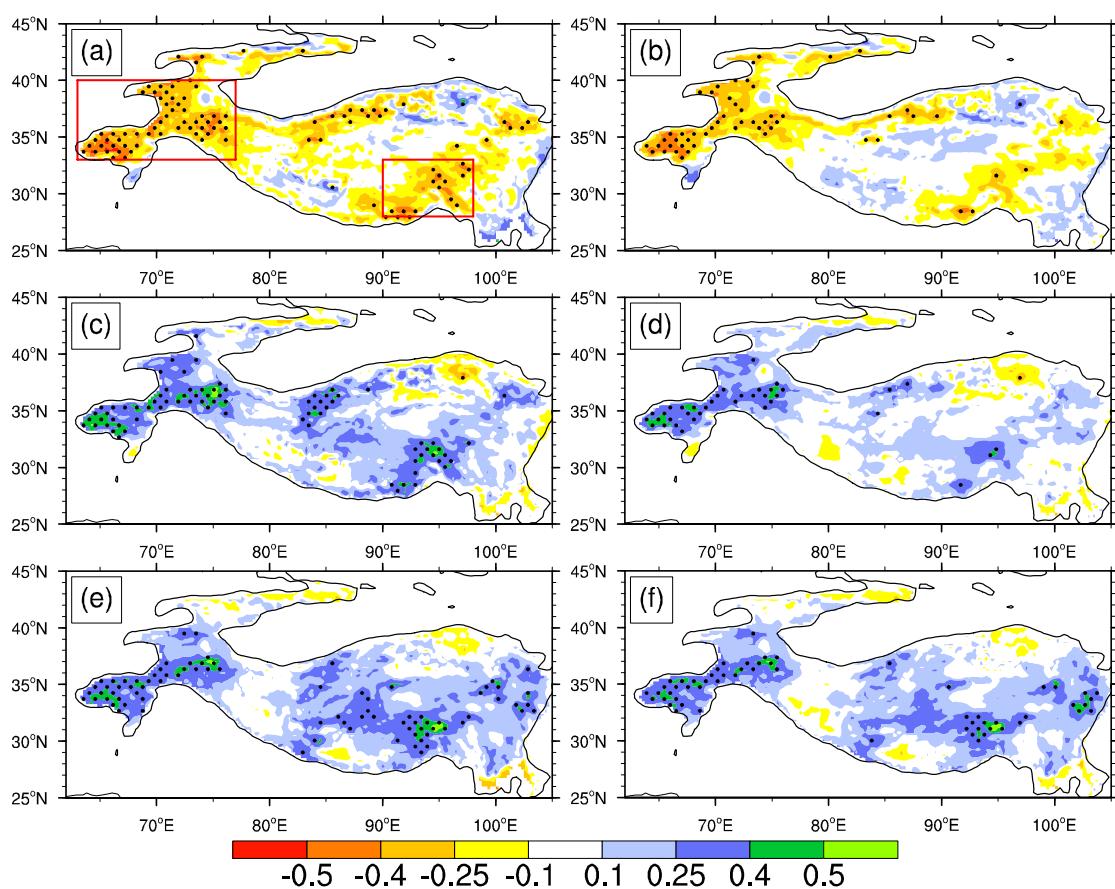
82 图 1b 为高原冬季积雪深度的空间分布。可以看到高原冬季积雪存在显著的空间差异性，高  
83 原中部及东北部是积雪较少的区域，而 80°E 以西和东南部是积雪最深的两个地区，气候平均最  
84 大雪深超过 20cm。图 2 为 1979–2018 年华南前汛期开始、结束、持续、季风降水开始时间及年  
85 总降水量的时间序列。这几个量都存在显著的年际变化特征，开始时间有略微推迟的趋势。华南  
86 前汛期平均在 4 月 7 日开始，7 月 4 日结束，平均持续时间为 89 天，年平均降水量为 709.39mm，  
87 季风降水平均在 5 月 28 日开始。



88  
89 图 2 1979–2018 年华南前汛期开始日期 (蓝色)、结束日期 (黑色)、总降水量 (棕色, 单位:  
90 mm) 及季风降水开始时间 (红色)

91 Fig.2 The onset (blue), end (black) and start of monsoon precipitation (red) dates and total  
92 precipitation (brown, units: mm) of the first rainy season (FRS) over South China during the  
93 period 1979–2018.

95 为了解华南前汛期降水与高原冬季积雪的关系，将前汛期开始时间、结束时间和总降水量分  
 96 别与前冬积雪求相关（图 3）。可以看到高原西部和东南部这两个区域的积雪与华南前汛期的关  
 97 系最显著。当这两个区域的积雪偏多时，华南前汛期开始时间偏早（图 3a），持续时间偏长（图  
 98 3c），总降水量偏多（图 3e）。当高原积雪和前汛期各变量的长期趋势去除后，高原西部的显著  
 99 相关区仍然稳定存在，而高原东南部的显著面积明显减少，相关系数减小（图 3b,d,f）。因此，  
 100 高原东南部和中北部积雪与华南前汛期降水的关系并不稳定，而高原西部积雪是与前汛期降水关  
 101 系最为稳定的前期信号。



102  
 103 图 3 1979—2018 年华南前汛期开始时间 (a–b)、持续时间 (c–d) 和总降水量 (e–f) 与高原冬  
 104 季积雪深度的相关系数。左列为原始场，右列为去除长期趋势。图 a 中两个红色方框分别  
 105 表示高原西部 ( $33\text{--}40^\circ\text{N}$ ,  $63\text{--}77^\circ\text{E}$ ) 和东南部 ( $28\text{--}33^\circ\text{N}$ ,  $90\text{--}98^\circ\text{E}$ )。打点区为通过 95%  
 106 显著性检验，黑色实线表示 2000 米地形等高线（下同）

107 Fig.3 Correlation coefficients between the onset date of the FRS (a-b), length of the FRS (c-d) and  
 108 total precipitation of FRS and snow depth over the TP during the period 1979–2018. Left  
 109 columns are the raw series and detrend results are shown in the right columns. The two red  
 110 boxes in (a) outlines the western ( $33\text{--}40^\circ\text{N}$ ,  $63\text{--}77^\circ\text{E}$ ) and southeastern TP ( $28\text{--}33^\circ\text{N}$ ,  $90\text{--}98^\circ\text{E}$ ), respectively. Dotted areas indicate the correlation coefficients significant at the 95%

112 confidence level and black lines outline the 2000 m orographic height

113

114 选取两个显著区域（图 3a 两个红色方框）分别代表高原西部和东南部，并与华南前汛期降  
115 水量相关（表 1）。去除长期趋势后，高原西部积雪深度与华南前汛期开始时间、持续时间和总  
116 降水量的相关系数有所减小，但仍通过了 99% 的显著性检验。而高原东南部积雪在去除长期趋  
117 势后仅与华南总降水量显著相关。无论是高原西部还是东南部积雪，都与前汛期的结束时间无显  
118 著的相关性，说明高原积雪主要影响前汛期的开始时间，从而使得前汛期持续时间增长。当前高  
119 原积雪产品仍存在一定的不确定性，为了进一步明确高原冬季积雪与华南前汛期的联系，用这两  
120 个区域 1979—2007 年卫星雪水当量分别与前汛期开始时间、持续时间和降水量计算相关系数（表  
121 1），得到的结论与积雪深度一致，验证了高原西部积雪是与华南前汛期联系最为紧密的区域。相  
122 对而言积雪深度与前汛期降水的关系更稳定（表 1），时间也更长（1979-2018 年），样本量更多。  
123 因此，后文的分析主要讨论高原西部积雪与华南前汛期降水的联系。

124

125 表 1 高原西部和东南积雪（雪水当量）与华南前汛期开始、结束、持续时间及总降水量的相关  
126 系数（加粗和倾斜、加粗、倾斜分别表示通过 99%、95% 和 90% 的显著性检验）

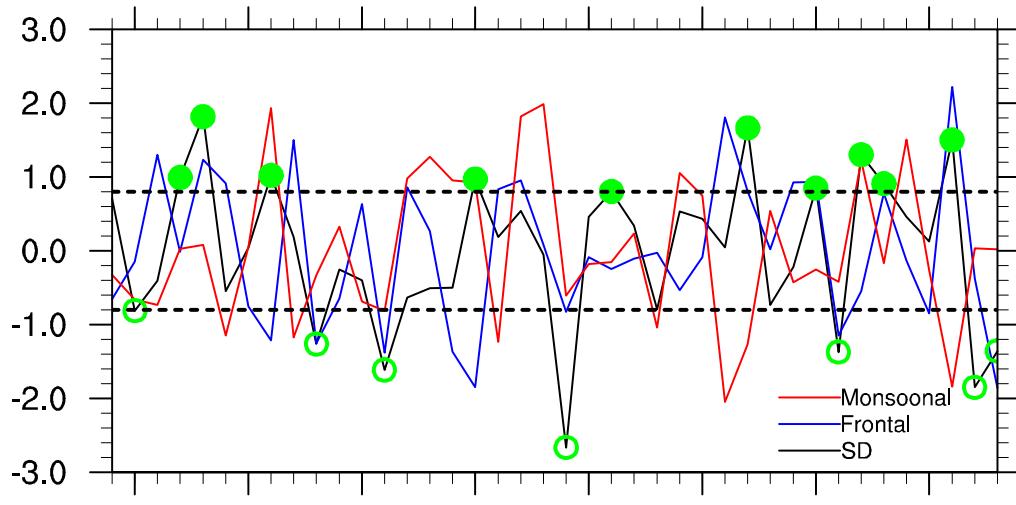
127 Table 1 Correlation coefficients between the western and southeastern TP snow depth (snow water  
128 equivalent) and onset date, end date, length and total precipitation of the FRS (Bold and italic,  
129 bold and italic indicate the correlation coefficients significant at the 99%, 95% and 90%  
130 confidence level, respectively.)

区域	数据	开始时间		结束时间		持续时间		总降水量	
		原始	去趋势	原始	去趋势	原始	去趋势	原始	去趋势
西部	积雪深度	<b>-0.52</b>	<b>-0.47</b>	0.19	0.15	<b>0.50</b>	<b>0.44</b>	<b>0.49</b>	<b>0.47</b>
	雪水当量	<b>-0.52</b>	<b>-0.41</b>	0.11	0.21	<b>0.44</b>	<b>0.41</b>	0.33	<b>0.40</b>
东南	积雪深度	<b>-0.33</b>	-0.21	0.25	0.21	<b>0.39</b>	0.28	<b>0.41</b>	<b>0.39</b>
	雪水当量	-0.18	-0.25	0.15	-0.05	0.22	0.15	<b>0.37</b>	0.27

### 131 3 高原积雪典型年份华南前汛期降水特征

132 华南前汛期降水由锋面降水和夏季风降水两部分组成（郑彬等，2006）。图 4 给出了高原西  
133 部积雪深度、华南前汛期锋面降水和季风降水的标准化时间序列。将华南前汛期降水分两部分  
134 后，积雪与华南锋面降水的相关系数为 0.36（通过 95% 显著性检验），而与季风降水的相关系数  
135 仅为 0.13，说明锋面降水与高原积雪的关系更为密切，受积雪的影响更大，而季风降水受积雪的  
136 影响较小。选取超过积雪深度  $\pm 0.8$  个标准差的年份作为典型年份，获得 10 年多雪年（1982-1983、

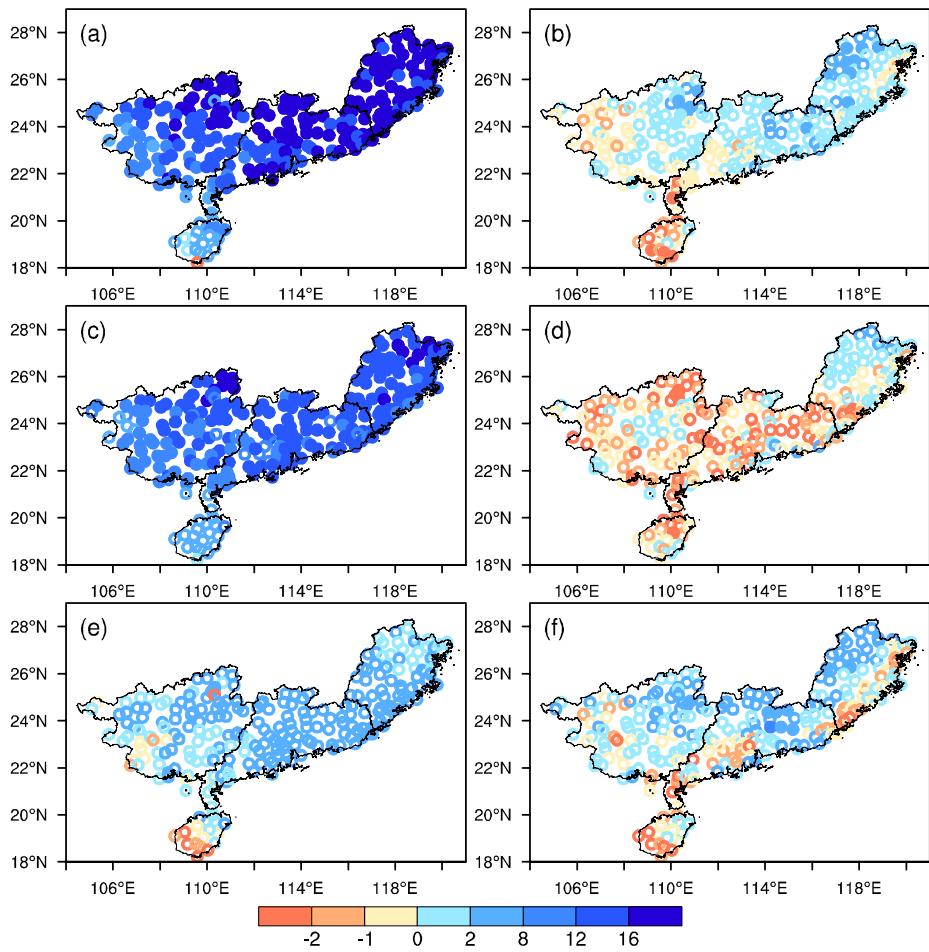
137 1986、1995、2001、2007、2010、2012–2013 和 2016) 和 7 年少雪年 (1980、1988、1991、1999、  
138 2011、2017–2018 年)。



139  
140 图 4 1979—2018 年高原西部冬季积雪 (黑色)、华南前汛期锋面降水量 (蓝色) 和季风降水量  
141 (红色) 的标准化时间序列。虚线表示积雪深度  $\pm 0.8$  个标准差, 绿色实(空)心圆为多(少)  
142 雪年

143 Fig.4 Standardized time series of the snow depth over the western TP (black), frontal precipitation  
144 (blue) and monsoonal precipitation of the FRS over South China during the period 1979–2018.  
145 The dash lines show the  $\pm 0.8$  standard deviation of the snow depth over the western TP. Green  
146 solid (open) dots represent the above (below) normal snow years over the western TP

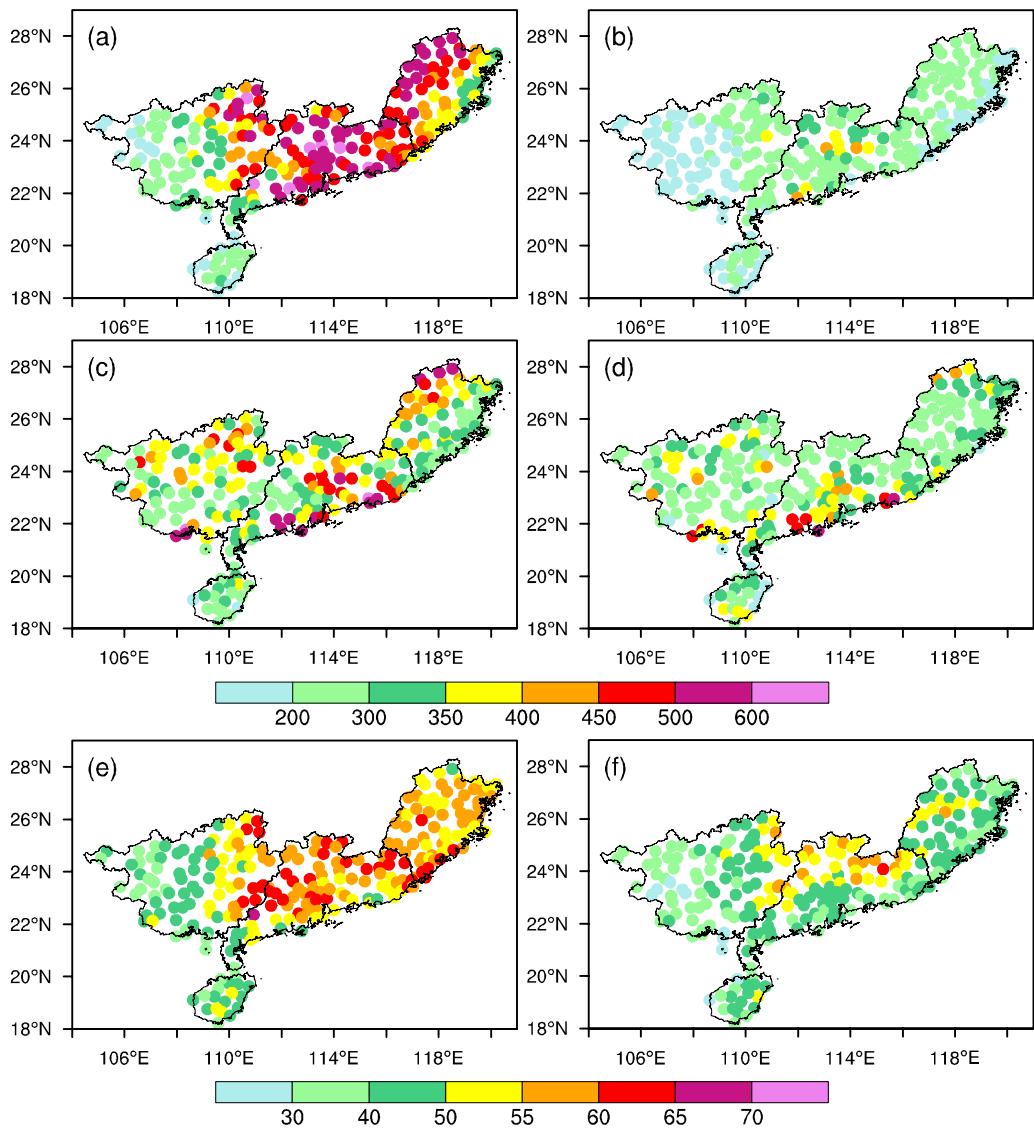
147  
148 在多雪年, 前汛期平均开始时间为 4 月 3 日, 较气候态提前 4 天, 而在少雪年前汛期平均开  
149 始时间为 4 月 23 日, 较气候态偏晚 16 天。多雪年和少雪年季风降水开始时间分别为 5 月 26 日  
150 和 24 日, 相差不大。前汛期开始时间的差异使得多雪年平均锋面降水时长比少雪年多 21.8 天。  
151 图 5 为高原积雪典型年份华南前汛期降水日数和日降水量合成差值场。可以看到, 在多雪年华南  
152 前汛期降雨日数明显比少雪年偏多, 福建、广东和广西东北部偏多 16 天以上, 广西南部和海  
153 南地区在 8 天以下 (图 5a)。这主要是锋面降水日数 (图 5c) 偏多的贡献, 季风降雨日数虽然也  
154 偏多 (图 5e), 但并不显著。从日平均降水量看 (图 5b-f), 总降水和季风降水日平均降水量略  
155 有增强, 而锋面日平均降水略微减弱, 但均没有通过显著性检验。此外, 通过对小雨、中雨、大  
156 雨和暴雨日数和日降水量的统计也发现主要是锋面降水期间各量级降雨日数的明显增多, 日平均  
157 降水量也无显著差异 (图略)。可见, 高原多雪年有利于华南前汛期开始提前, 使得华南降水日  
158 数增多, 积雪对降水强度的影响较小。



159  
160 图 5 前冬高原西部多雪年与少雪年华南前汛期降水日数(左列, 单位: 天)和日平均降水量(右  
161 列, 单位:  $\text{mm d}^{-1}$ )的合成差值场。(a-b) 为前汛期, (c-d) 为锋面降水, (e-f) 为季风  
162 降水, 实心圆表示通过 95% 显著性检验  
163

164 Fig.5 Composite differences of the rainy days (left column, units: day) and daily rainfall (right  
165 column, units:  $\text{mm d}^{-1}$ ) between above and below normal snow years. (a-b) the FRS, (c-d)  
166 frontal precipitation, (e-f) monsoonal precipitation. Solid circles indicate differences at 0.05  
167 significance level

168 在高原多雪年华南降雨强度无明显变化的情况下, 降雨日数的显著增多必然导致前汛期降水  
169 量的增多。伍红雨等 (2015) 也指出华南开汛偏早有利于降水偏多。在多雪年, 福建、广东大部  
170 和广西东部地区前汛期锋面降水量均在 450mm 以上 (图 6a), 比少雪年 (图 6b) 偏多 150mm 以  
171 上, 季风降水量的差异在 100mm 以内。多雪年锋面降水量的增多使得华南大部地区锋面降水比  
172 例超过 50%, 但广西西部和海南仍以季风降水为主 (图 6e)。在少雪年 (图 6f), 仅广东北部为  
173 以锋面降水为主, 其余地区则以季风降水为主。



174

175 图 6 前冬高原西部多雪年(左列)与少雪年(右列)华南前汛期锋面降水量(a-b, 单位: mm),

176 季风降水量(c-d, 单位: mm)及锋面降水量占前汛期总降水量百分比(e-f, 单位: %)

177 Fig.6 Frontal (a-b) and monsoonal (c-d) precipitation (units: mm) of the FRS over South China and

178 percentage (e-f, units: %) of frontal precipitation in above (left column) and below (right

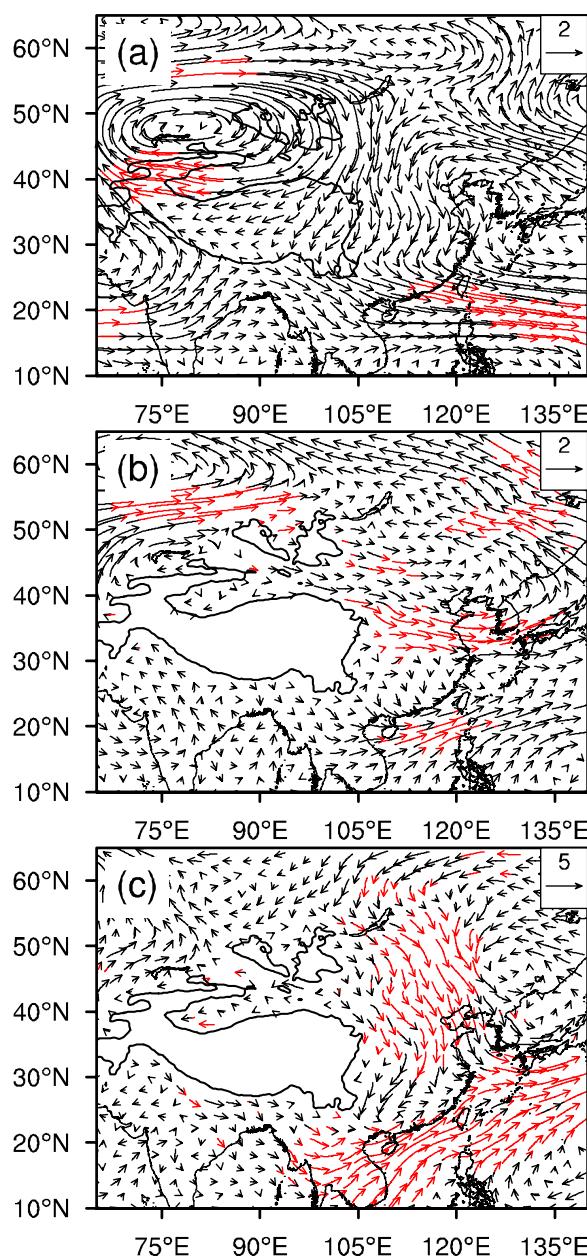
179 column) normal snow years of the western TP

180 

#### 4 高原积雪异常对华南开汛的影响

181 上述分析表明, 高原西部积雪的异常主要是有利于华南前汛期开始时间提前, 从而导致了降  
182 水日数和降水总量的显著增多。那么高原积雪是通过什么途径触发了华南前汛期较早开始呢?183 高原积雪偏多, 可以通过水文效应和反照率效应使得高原陆面加热减弱(张顺利和陶诗言,  
184 2001; Wang et al., 2017), 积雪的冷却作用在低空形成异常的反气旋环流(图 7a)。吴树炎等(2018)  
185 指出高原多雪年西太平洋地区 500 hPa 位势高度距平为“+ -” 的三极型分布, 副高位置异常偏

186 南,且北移明显推迟(陈烈庭,2001)。图7a可以看到三月份西太平洋地区500 hPa也存在“+-”  
 187 的三极型位势高度异常,西高东低的环流形势使得中国东部偏北气流明显增强(图7a)。一方面  
 188 西高东低的环流配置有利于偏北气流将冷空气往低纬输送,另一方面西太平洋副热带高压偏强偏  
 189 南有利于华南沿岸低层西南气流加强,持续为华南输送水汽(图7b)。这样的大气环流形势有利  
 190 于冷暖空气在华南上空交汇从而形成锋面。华南前汛期降水及其建立与冷暖空气活动形成的锋面  
 191 密切相关(强学民和杨修群,2008;罗艳艳等,2015;许冠宇等,2018)。到了4月初(19候),  
 192 偏北干冷空气和偏南暖湿气流在华南上空交汇更加明显,有利于形成降水,从而激发前汛期较早  
 193 建立(图7c)。

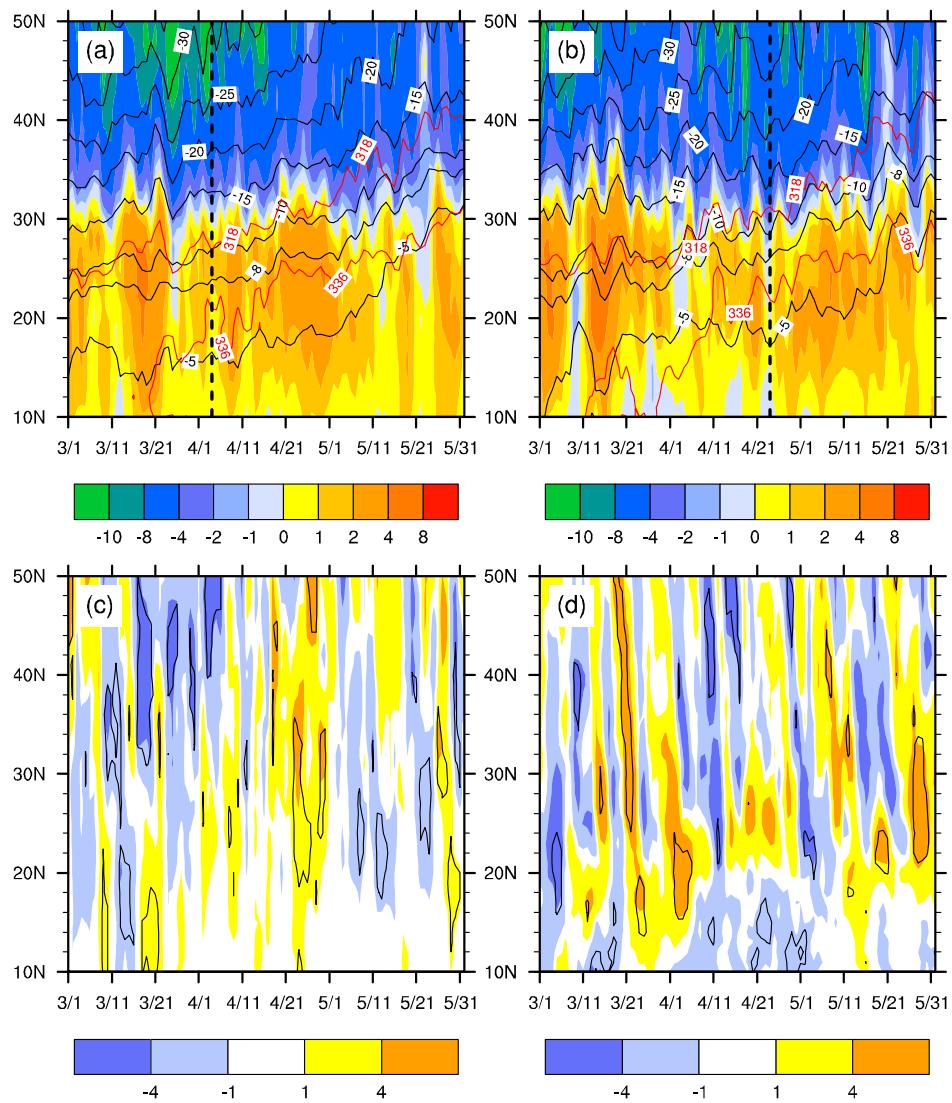


194  
 195 图7 高原多雪年与少雪年合成的三月平均(a)500 hPa风场,(b)850 hPa风场及(c)19候850  
 196 hPa风场的差值场。红色箭头表示通过了90%显著性检验,单位: $m s^{-1}$

197 Fig.7 Composite differences of (a) 500 hPa wind filed, (b) 850 hPa wind field in March and (c) the 19<sup>th</sup>  
198 pentad 850 hPa wind field between above and below normal TP snow years. Red arrows indicate  
199 statistical significance at 90% confidence level

200

201 冷空气和暖湿空气活动特征可进一步用 500 hPa 平均偏北风和 850 hPa 上 336K 假相当位温  
202 表示（罗艳艳等，2015）。高原多雪年，中高纬地区三月份 500 hPa 偏北风可超过  $10 \text{ m s}^{-1}$ ，且可  
203 维持到四月中旬（图 8a）。而少雪年中高纬地区偏北风从三月中旬到四月中旬基本维持在  $8 \text{ m s}^{-1}$   
204 以下（图 8b）。多雪年 4 月以前中高纬地区偏北风比少雪年大  $4 \text{ m s}^{-1}$ （图 8c），一股股冷空气的  
205 南侵使得多雪年华南上空温度较少雪年明显偏低。500 hPa 上  $-5^\circ\text{C}$  ( $-10^\circ\text{C}$ ) 等温线维持在  $16^\circ\text{N}$   
206 ( $26^\circ\text{N}$ ) 超过一个月，而在少雪年  $-5^\circ\text{C}$  等温线维持在  $18^\circ\text{N}$  以北， $-10^\circ\text{C}$  等温线在  $26^\circ\text{N}$  以北。由  
207 于多雪年华南上空温度较低，当低层暖湿空气（336K 假相当位温线）在四月初第一次向北推进  
208 到  $20^\circ\text{N}$  时，此时华南上空 850 hPa 假相当位温比少雪年偏高  $4 \text{ K}$  以上（图 8d），冷暖空气的交  
209 汇有利于垂直运动发展，触发了华南前汛期的开始（图 8a）。在少雪年，当暖湿偏南气流在四月  
210 中旬第一次北推到  $20^\circ\text{N}$  时，由于冷空气活动偏弱，华南前汛期仍未能开始。



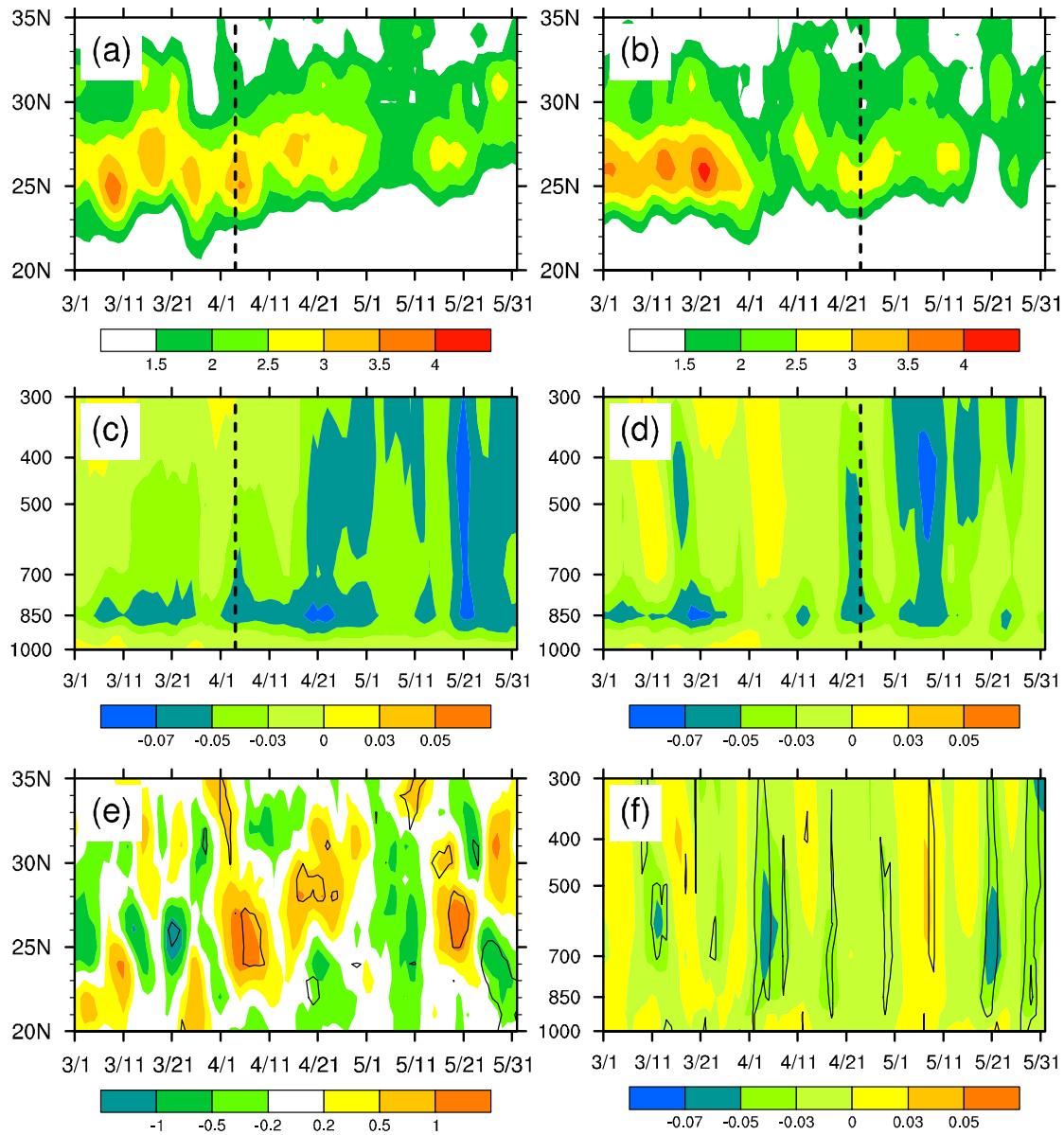
211

212 图 8 前冬高原西部多雪年 (a) 与少雪年 (b) 合成的 3—5 月华南地区 ( $105\text{--}120^\circ\text{E}$ ) 500 hPa  
 213 平均经向风 (填色, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )、温度 (黑色实线, 单位:  $^\circ\text{C}$ ) 及 850 hPa 假相当位温  
 214 (红色实线, 单位: K)。(c) 和 (d) 分别为多雪年与少雪年合成的 500 hPa 平均经向风  
 215 和 850 hPa 假相当位温差值场, 实线表示通过 90% 显著性检验的区域。(a) 和 (b) 中虚  
 216 线表示华南前汛期开始时间

217 Fig.8 Composite of 500 hPa meridional wind (shaded, units:  $\text{m s}^{-1}$ ), temperature (black curves,  
 218 units:  $^\circ\text{C}$ ) and 850 hPa potential pseudo-equivalent temperature (red curves, units: K) in above  
 219 (a) and below (b) normal snow years from March to May over South China ( $105\text{--}120^\circ\text{E}$ ).  
 220 Differences in 500 hPa meridional wind and 850 hPa potential pseudo-equivalent temperature  
 221 between above and below normal snow years are depicted in (c) and (d), respectively. And the  
 222 solid lines outline the statistical significance at 90% confidence level. Dash lines in (a) and (b)  
 223 indicate onset dates of the FRS

224

225 华南地区锋面更能清楚表现冷暖空气交汇的特征,而假相当位温具有良好的动力学和热力学  
226 意义,对锋区的指示作用明显(李真光等,1988;陈翔翔等,2012)。因此,这里使用850 hPa  
227 的纬向梯度密集带代表锋区。高原多雪年,华南北部的锋面在26°N附近南北摆动,表明冷暖空  
228 气活跃,交替进退,其中心可南压到25°N,锋面在3—5月都较为活跃(图9a)。当四月初,华  
229 南上空对流活跃,垂直速度( $-0.05 \text{ Pa s}^{-1}$ )第一次向上延伸到700 hPa以上时华南开汛(图9c)。  
230 虽然少雪年华南北部锋区在四月以前较多雪年强,但其中心一直稳定维持在偏北(26°N)位置,  
231 且没有南北摆动的特征(图9b),说明冷暖空气日际活动不明显、不活跃。四月初冷空气进一步  
232 减弱且偏南暖湿气流也未能加强(图8b),华南北部锋面消失。四月中旬偏北冷空气和偏南暖湿  
233 气流活动增强后锋区在28°N附近重新建立(图9b)。随着偏北冷空气的进一步增强和偏南暖湿  
234 气流持续北推(图8b),锋区逐渐南压到26°N,此时华南上空垂直速度急速增大(图9d),华南  
235 前汛期在四月下旬开始。从多雪年和少雪年假相当位温纬向梯度(图9e)和垂直速度(图9f)  
236 的差异看,4月初假相当位温纬向梯度在高原多雪年自北向南有明显增强的趋势,并且在华南北  
237 部(25—26°N)位温梯度异常最强。与此同时,华南上空整层垂直上升运动显著增强,并且向上  
238 延伸到300 hPa,有利于高原多雪年华南前汛期开始偏早。



239

240 图 9 同图 8, 但为 850hPa 假相当位温纬向梯度 (a-b, 单位:  $10^{-5} \text{ K m}^{-1}$ ), 华南地区 (22~25°N,241 105~120°E) 平均垂直速度 (c-d, 单位:  $\text{Pa s}^{-1}$ ) 及多雪年与少雪年假相当位温纬向梯度

242 (e) 和垂直速度 (f) 的差异。(e) 和 (f) 中实线表示通过 90% 显著性检验的区域

243 Fig.9 Same as Fig.8, but for the zonal gradient of the 850 hPa potential pseudo-equivalent

244 temperature (a-b, units:  $10^{-5} \text{ K m}^{-1}$ ), the averaged vertical velocity (c-d, units:  $\text{Pa s}^{-1}$ ) over

245 South China (22~25°N, 105~120°E) and differences in potential pseudo-equivalent temperature

246 (e) and vertical velocity (f) between above and below snow depth years. Solid lines in (e) and (f)

247 indicate statistical significance at the 90% confidence level.

248 

## 5 结论

249 本文研究了 1979–2018 年高原前冬积雪与华南前汛期降水的关系, 初步探讨了高原积雪对前

250 汛期锋面降水和季风降水的影响，主要结论如下：

251 (1) 高原西部( $33\text{--}40^\circ\text{N}$ ,  $63\text{--}77^\circ\text{E}$ )冬季积雪与华南前汛期降水的关系最稳定。高原西部  
252 积雪偏多，有利于华南前汛期开汛偏早，持续时间偏长，降水量偏多。

253 (2) 高原西部多雪年，华南前汛期开汛日期较积雪偏少年提前20天，而季风降水开始时间  
254 差异不大。积雪使华南开汛日期提前，从而主要影响了华南前汛期锋面降水日数，对降水强度和  
255 季风降水的影响均较小。多雪年华南大部地区以锋面降水量为主，锋面降水量较少雪年偏多150  
256 mm以上。

257 (3) 高原西部多雪年，积雪的冷却作用在高原西部低层形成反气旋异常环流，而中国东部  
258 沿岸为“++”的位势高度异常。“西高东低”的环流配置使得中国东部地区偏北冷空气活跃，华  
259 南上空气温偏低。偏南偏强的西太平洋副热带高压增强了低层偏南暖湿气流，锋面在华南北部( $26$   
260  $^\circ\text{N}$ )南北摆动。四月初， $850\text{ hPa}$ 假相当位温线( $336\text{ K}$ )第一次北推到 $20^\circ\text{N}$ 以北时，冷暖空气  
261 的交汇就触发了华南较早开汛。而在少雪年，中国东部地区冷空气和低纬偏南暖湿气流均较弱，  
262 华南北部锋面在四月初中断，不利于华南开汛。四月中下旬，中高纬冷空气和低纬暖湿气流再次  
263 活跃，暖湿空气的持续北推使得华南北部锋面重新建立，当锋面南压到 $25^\circ\text{N}$ 华南前汛期开始。  
264

## 265 参考文献( References )

---

266 Armstrong R L, Brodzik M J, Knowles K, et al., 2005.Global monthly EASE-Grid snow water equivalent climatology.

267 NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, doi:10.5067/KJVERY3MIBPS.

268 Bao Y, You Q L. 2019. How do westerly jet streams regulate the winter snow depth over the Tibetan Plateau? [J] Clim  
269 Dyn, 53:353-370.

270 Che T, Li X, Jin R, et al., 2008.Snow depth derived from passive microwave remote-sensing data in China[J]. Ann  
271 Glaciol, 49:145-154.

272 Chen Y H, Duan A M, Li D L. 2020. Atmospheric bridge connecting the Barents sea ice and snow depth in the mid-west  
273 Tibetan Plateau[J]. Front Earth Sci,8:265.

274 Chen Y, Luo Y L, 2018.Analysis of paths and sources of moisture for the South China rainfall during the presummer rainy  
275 season of 1979-2014[J]. J Meteor Res, 32(5):744-757.

276 Hersbach, H., and Coauthors, 2020.The ERA5 global reanalysis[J]. Q J R Meteorol Soc, 146:1999-2049.

277 Jiang Z N, Zhang D L, Xia R D, et al., 2017. Diurnal variations of presummer rainfall over Southern China[J]. J Clim,  
278 30(2):755-773.

- 279 Jiang Z, Zhang D L, Xia R, et al., 2017.Diurnal variations of presummer rainfall over southern China[J]. J Clim,  
280 30(2):755-773.
- 281 Li M X, Luo Y L, Zhang D L, et al., 2021.Analysis of a record-breaking rainfall event associated with a monsoon coastal  
282 megacity of South China using multi-source data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 59:6404-6414.
- 283 Li Z H, Luo Y L, Du Y, et al., 2020.Statistical Characteristics of Pre-summer Rainfall over South China and Associated  
284 Synoptic Conditions[J]. J Meteor Soc Japan, 98(1):213-233.
- 285 Liu G, Wu R G, Zhang Y Z, et al. 2014.The summer snow cover anomaly over the Tibetan Plateau and its association  
286 with simultaneous precipitation over the Mei-yu-Baiu region[J]. Adv Atmos Sci, 31:755-764.
- 287 Luo Y L, 2017.Advances in understanding the early-summer heavy rainfall over South China[M]. The Global Monsoon  
288 System: Research and Forecast. 3rd Editon, Chang, C.-P., H.-C. Kuo, N.-C. Lau, and R. H. Johnson (eds.), World  
289 Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol. 9, World Scientific, 215-226.
- 290 Wang C H, Yang K, Li Y L, et al., 2017.Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer  
291 precipitation in eastern China[J]. J Clim, 30(3):885-903.
- 292 Wang H, Luo Y L, Jou B J-D, 2014.Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme rainfall event  
293 during SCMREX: Observational analysis[J]. J Geophys Res Atmos, 119:13206-13232.
- 294 Wu T W, Qian Z A, 2003.The relation between the Tibetan Plateau winter snow and the Asian summer monsoon and  
295 rainfall: An observational investigation[J]. J Clim, 16(12):2038-2051.
- 296 Zhao H X, Moore G W K, 2004.On the relationship between Tibetan snow cover, the Tibetan Plateau monsoon and the  
297 Indian summer monsoon[J]. Geophy Res Lett, 31(14): L14204.
- 298 伯玥, 李小兰, 王澄海, 2014.青藏高原地区积雪年际变化异常中心的季节变化特征[J].冰川冻土, 36(6):1353-1362.
- 299 Bo Y, Li X L, Wang C H, 2014.Seasonal characteristics of the interannual variations centre of the Tibetan Plateau  
300 snow cover[J]. J Glaciol Geocryol, 36(6): 1353-1362.
- 301 蔡学湛, 2001.青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响[J].应用气象学报, 12(3):358-367. Cai X Z,  
302 2001.The influence of abnormal snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and east Asian monsoon on early rainy  
303 season rainfall over South China[J]. J Appl Meteor Sci, 12(3):358-367.
- 304 陈烈庭, 1998.青藏高原冬春季异常雪盖与江南前汛期降水关系的检验和应用[J].应用气象学报, 9(增刊):1-8. Chen  
305 L T, 1998.Test and application of the relationship between anomalous snow cover in winter and spring over  
306 Qinghai-Xizang Plateau and the first summer rainfall in Southern China[J]. J Appl Meteor Sci, 9(sup):1-8.
- 307 陈烈庭, 阎志新, 1979.青藏高原冬春积雪对大气环流和我国南方汛期降水的影响[M]. 中长期水文气象预报文集,  
308 北京: 水利电力出版社, 185-194. Chen L T, Yan Z X, 1979.Impact of Himalayan winter-spring snow cover on

- 309 atmospheric circulation and on southern Chinese rainfall in the rainy season[M]. Collected Papers on Medium- and  
310 Long-Term Hydrologic and Meteorological Forecasts, Beiging: Water Conservancy and Power Press, 185–194.
- 311 陈烈庭.2001.青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用[J].大气科学, 25 (2): 184-192. Chen L  
312 T. 2001.The Role of the anomalous snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO in the great floods of  
313 1998 in Changjiang river valley[J]. Chin J Atmos Sci, 25(2):184-192.
- 314 陈翔翔, 丁治英, 刘彩虹, 等,2012.2000—2009 年 5、6 月华南暖区暴雨形成系统统计分析[J]. 热带气象学报, 28(5):  
315 707-718. Chen X X, Ding Z Y, Liu C H, et al., 2012.Statistic analysis on the formation system of warm-sector  
316 heavy rainfall in May and June from 2000-2009[J]. J Trop Meteor, 28(5): 707-718.
- 317 池艳珍, 何金海, 吴志伟, 2005.华南前汛期不同降水时段的特征分析. 南京气象学院学报, 28(2):163-171. Chi Y Z,  
318 He J H, Wu Z W, 2005. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South  
319 China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 28(2):163-171.
- 320 黄士松, 李真光, 包澄澜, 等, 1986.华南前汛期暴雨[M]. 广州: 广东科技出版社, 55-100. Huang S S, Li Z G, Bao  
321 C L, et al., 1986.Rain storms in the first rainy season in South China[M]. Guangzhou: Guangdong  
322 Science&Technology Press, 55-100.
- 323 李春晖, 梁建茵, 郑彬, 等, 2007.南海夏季风北推时间及相关环流变化特征[J].应用气象学报, 18 (2): 202-210.  
324 Li C H, Liang J Y, Zheng B, et al., 2007.The period of South China Sea summer monsoon advanced northward with  
325 the related circulation change features[J]. J Appl Meteor Sci, 18(2):202-210.
- 326 李江南, 王安宇, 蒙伟光, 等, 2002.广东省前汛期和后汛期降水的气候特征[J].中山大学学报 (自然科学版),  
327 41(3):91-94. Li J N, Wang A Y, Meng W G, et al., 2002.The climatological characteristics of precipitation of the  
328 presummer rainy season and second rainy season in Guangdong province[J]. Acta Scientiarum Naturalium  
329 Universitatis Sunyatseni, 41(3): 91-94.
- 330 李真光, 邓良铁, 薛惠娴, 等, 1988.华南前汛期大范围暴雨的合成分析[J]. 热带气象, 4(2):97-106. Li G Z, Deng  
331 L T, Xue H X, et al., 1988.A composite analysis on widespread torrential rainfalls during first rainy season in South  
332 China[J]. J Trop Meteor, 4(2):97-106.
- 333 林良勋,2006.广东省天气预报技术手册[M]. 北京: 气象出版社, 143-152. Lin L X,2006.Technical guidance on  
334 weather forecasting in Guangdong Province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 143-152.
- 335 刘亚楠, 王东海, 李国平, 等, 2019.南海夏季风爆发前后华南前汛期降水日变化对比分析[J].热带气象学报,  
336 35(3):365-378. Liu Y N, Wang D H, Li G P, et al., 2019.A comparative study of the diurnal variations of annually  
337 first rainy season rainfall in South China before and after the onset of the South China Sea summer monsoon[J]. J  
338 Trop Meteor, 35(3): 365-378.

- 339 罗艳艳, 何金海, 邹燕, 等, 2015. 华南前汛期雨涝强、弱年的确定及其环流特征对比[J]. 气象科学, 35(2):160-166.
- 340      Luo Y Y, He J H, Zhou Y, et al., 2015. Determination of strong and weak rain-waterlogging years in pre-rainy season  
341      over South China and their circulation features comparison[J]. Scientia Meteor Sinica, 35(2):160-166.
- 342      马慧, 陈桢华, 2005. 2005 年 6 月华南暴雨的气候背景[J]. 广东气象, 4:14-16. Ma H, Chen Z H, 2005. Diagnostic  
343      analysis on the climate background of “05.6” Huanan rainstorm[J]. Guangdong Meteor, 4:14-16.
- 344      马玉坤, 张培群, 王式功等. 2015. 华南前汛期夏季风降水开始日期的确定[J]. 干旱气象, 33 (2): 332-339. Ma Y  
345      K, Zhang P Q, Wang S G, et al., 2015. The start date of summer monsoon rainfall in pre-flood season in South China.  
346      J Arid Meteo, 33(2):332-339.
- 347      强学民, 杨修群, 2008. 华南前汛期开始和结束日期的划分[J]. 地球物理学报, 51(5):1333-1345. Qiang X M, Yang X Q,  
348      2008. Onset and end of the first rainy season in South China[J]. Acta Geophy Sin, 51(5):1333-1345.
- 349      王澄海, 崔洋, 2011. 东亚夏季风建立前青藏高原地气温差变化特征[J]. 气候与环境研究, 16 (5): 586-596. Wang C H,  
350      Cui Y, 2011. Characteristics of the difference of temperature between surface and atmosphere over the Tibetan  
351      Plateau in the early stage of East Asian summer monsoon onset[J]. Climatic Environ Res, 16 (5):586-596.
- 352      吴乃庚, 温之平, 邓文剑, 等, 2020. 华南前汛期暖区暴雨研究新进展[J]. 气象科学, 40(5):605-616. Wu N G, Wen Z  
353      P, Deng W J, et al., 2020. Advances in warm-sector heavy rainfall during the first rainy season in South China[J].  
354      Scientia Meteor Sinica, 40(5):605-616.
- 355      吴树炎, 顾建峰, 刘海文, 等. 2018. 高原冬季雪深与重庆夏季降水的年际关系研究[J]. 成都信息工程大学学报, 33  
356      (2): 184-189. Wu, S Y, Gu, J F, Liu, H W, et al., 2018. Interannual relationship between winter snow depth over  
357      Tibetan Plateau and summer precipitation over Chongqing[J]. J Chengdu Univ Info Tech, 33(2):184-189.
- 358      伍红雨, 杨崧, 蒋兴文, 2015. 华南前汛期开始日期异常与大气环流和海温变化的关系[J]. 气象学报, 73(2):319-330.  
359      Wu H Y, Yang S, Jiang X W, 2015. Anomalous onset date of the first rainy season in South China and its relationship  
360      with the variation of the atmospheric circulation and SST[J]. Acta Meteorologica Sinica, 73(2): 319-330.
- 361      许冠宇, 杨浩, 王晓芳, 等, 2018. 华南前汛期典型旱涝年降水的低频特征及其与冷空气的关系[J]. 气象科学,  
362      38(2):167-176. Xu G Y, Yang H, Wang X F, et al., 2018. Study on the low-frequency features of precipitation in  
363      serious flood and drought pre-flood seasons over South China and its relationship with cold air[J]. Scientia Meteor  
364      Sinica, 38(2):167-176.
- 365      杨凯, 胡田田, 王澄海, 2017. 青藏高原南、北积雪异常与中国东部夏季降水关系的数值试验研究[J]. 大气科学, 41(2):  
366      345-356. Yang K, Hu T T, Wang C H, 2017. A numerical study on the relationship between the spring-winter snow  
367      cover anomalies over the northern and southern Tibetan Plateau and summer precipitation in East China[J]. Chin J  
368      Atmos Sci, 41 (2): 345-356.

369 于乐江, 胡敦欣, 2008.青藏高原春季积雪在南海夏季风爆发过程中的作用[J].地球物理学报, 51(6):1682-1694. Yu  
370 L J, Hu D X, 2008.Role of snow depth in spring of Tibetan Plateau in onset of South China Sea summer monsoon[J].  
371 Acta Geophy Sin, 51(6): 1682-1694.  
372 张顺利, 陶诗言, 2001.青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究[J].大气科学, 25(3):372-390. Zhang S  
373 L, Tao S Y, 2001.The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon[J]. Chin J Atmos  
374 Sci, 25(3): 372-390.  
375 郑彬, 谷德军, 李春晖, 等, 2007.华南前汛期的锋面降水和夏季风降 II.空间分布特征[J]. 大气科学, 31(3):495-504.  
376 Zheng B, Gu D J, Li C H, et al., 2007. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South  
377 China. Part II: Spatial patterns[J]. Chin J Atmos Sci, 31(3): 495-504.  
378 郑彬, 梁建茵, 林爱兰, 等, 2006.华南前汛期的锋面降水和夏季风降水 I. 划分日期的确定[J].大气科学,  
379 30(6):1207-1216. Zheng B, Liang J Y, Lin A L, et al., 2006.Frontal rain and summer monsoon rain during  
380 pre-rainy season in South China. Part I: Determination of the division dates[J]. Chin J Atmos Sci, 30(6):1207-1216.  
381 中国气象局. 2017.中国雨季监测指标 华南汛期 (QX/T395-2017), 12pp. China Meteorological Administration. 2017.  
382 Monitoring indices of rainy season in China-Flood season in South (QX/T395-2017), 12pp.  
383  
384

385 **Connections between winter snow depth over the Tibetan Plateau**  
386 **and the interannual variation of precipitation during the first rainy**  
387 **season in South China**

388 XIAO Zhixiang<sup>1,2</sup>, LU Weiping<sup>1,2</sup>, LUO Xiaoli<sup>3</sup>

389 <sup>1</sup>Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China

390 <sup>2</sup>Laboratory of Beihai National Climate Observatory, Nanning 530022, China

391 <sup>3</sup>Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China

392

393 **Abstract:** Based on the satellite derived snow depth over the Tibetan Plateau (TP), daily rainfall data of 261  
394 meteorological stations in South China (SC) and the ERA5 reanalysis dataset during 1979-2018, relationships  
395 between the TP winter snow depth and precipitation during the first rainy season (FRS) in SC have been  
396 investigated. Results show that: (1) Connections between snow depth over the western TP and precipitation during  
397 the FRS in SC are the most robust and the TP snow depth mainly affects frontal precipitation of the FRS, whereas  
398 it shows less impact on summer monsoonal rainfall. (2) Onset date of the FRS in above normal TP snow years is  
399 about 20 days earlier than that in below normal snow years, leading to more rainy days, longer of the FRS and

400 more rainfall during the FRS. However, rainfall intensity during the FRS shows small difference between different  
401 types of the TP snow years. (3) The TP is colder in above normal snow year and the cooling effect stimulates an  
402 abnormal anticyclonic circulation over the TP. However, tripole anomaly patterns of 500 hPa geopotential height  
403 occur at East Asian coastal region. Configurations of the circulation facilitate cold air in middle-high latitude  
404 regions invade SC, which makes a colder SC. And the enhanced northwest Pacific subtropical high intensifies the  
405 low-level southerly flow and water vapor supplement. The front swings northward-southward in northern part of  
406 the SC during March-April. The FRS has been established once the dry cold northerly and the warm-wet southerly  
407 flow invade the SC in early April. In below normal TP snow years, both the cold northerly and warm southerly  
408 flow are weak and inactivity and the front in northern part of the SC is interrupted in early April. When the  
409 northerly and southerly flow invades the SC in mid-to-late April, the front is reverted and the FRS occurs later.

410 **Key words:** Tibetan Plateau; snow depth; the first rainy season in South China; onset date; front

411