

# 中国西南地区 5 月降水与阿拉伯海季风关系的年代际变化

经皓童<sup>1,2</sup> 孙建奇<sup>2,3</sup> 于水<sup>2</sup> 华维<sup>1</sup>

1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 本文利用 1960~2017 年中国西南地区 115 个台站观测降水资料和日本气象厅发布的 55 年再分析资料集, 研究了中国西南地区 5 月降水变异的主导模态及其与阿拉伯海季风的关系。结果显示, 中国西南地区 5 月降水的第一主导模态主要表现为全区一致的变异特征; 该模态与同期 5 月阿拉伯海季风强度异常关系密切, 但两者的关系在 20 世纪 70 年代后期发生了显著的年代际变化。在 1960~1976 年, 阿拉伯海季风异常所引起的低层大气环流和水汽输送异常主要集中在阿拉伯海到孟加拉湾一带; 此时, 阿拉伯海季风异常所引起的大气环流不能到达中国西南地区, 因此它对中国西南地区 5 月降水的影响偏弱。但在 1981~2017 年, 阿拉伯海季风异常可以导致整个北印度洋到南海地区的大气环流异常, 进而引起中国西南地区水汽和垂直运动的变化, 最终对该地区 5 月降水产生显著的影响。进一步的研究显示, 阿拉伯海季风与中国西南地区 5 月降水关系的变化可能与季风自身的年代际变率有关。阿拉伯海季风在 20 世纪 70 年代末之前变率偏弱, 其引起的环流异常也偏弱; 相反在 20 世纪 70 年代末之后, 其变率增强, 它引起的大气环流异常也偏强可以延伸到中国西南地区, 进而影响到西南地区的 5 月降水。因此, 季风变率的强弱可能在其影响中起着非常重要的作用。

关键词: 中国西南地区; 降水; 阿拉伯海季风; 年代际变率

## Decadal variability in the relationship between May rainfall

---

稿件编号 2020195B; 文章编号: doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

收稿日期 2020-12-31; 网络预出版日期

作者简介 经皓童, 女, 1997 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: jinghaotong@mail.iap.ac.cn

通讯作者 孙建奇, E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41825010, 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) XDA23090102

Founded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41825010), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA23090102)

24                   **over Southwest China and Arabian Sea Monsoon**

25                   JING Haotong<sup>1,2</sup> SUN Jianqi<sup>2,3</sup> YU Shui<sup>2</sup> HUA Wei<sup>1</sup>

26                   *1 School of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*

27                   *2 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy  
28 of Sciences, Beijing 100029*

29                   *3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

30                   **Abstract** This study investigated the dominant mode of anomalous precipitation in May over  
31 Southwest China associated with the Arabian Sea monsoon using the 115-station observations and  
32 Japanese 55-year reanalysis for the period of 1960-2017. The result indicates that the leading mode  
33 of May precipitation over Southwest China exhibited approximately consistent variability over the  
34 region. The variability of the mode showed a close relationship with the Arabian Sea monsoon, but  
35 the relationship experienced an interdecadal change around the late 1970s. In 1960-1976, the  
36 anomalous atmospheric circulations and water vapor transportation associated with the Arabian Sea  
37 monsoon were mainly over the Arabian Sea to the Bay of Bengal. The Arabian Sea monsoon had a  
38 weak influence on the May precipitation over Southwest China during the period. However, in 1981-  
39 2017, the anomalous Arabian Sea monsoon was related to larger-scale atmospheric anomalies from  
40 the northern Indian Ocean to the South China Sea. Such atmospheric anomalies can lead to  
41 anomalous water vapor and vertical motion over Southwest China. Therefore, the Arabian Sea  
42 monsoon can significantly influence May precipitation over Southwest China during the period.  
43 Further analysis indicates that the change in the relationship between the Arabian Sea monsoon and  
44 May precipitation over Southwest China could be related to the change in decadal variability of the  
45 Arabian Sea monsoon. Over the period before the late 1970s, the Arabian Sea monsoon's variability  
46 was relatively weaker and its related atmospheric circulations anomalies were also weaker. In  
47 contrast, after the late 1970s, the Arabian Sea monsoon's variability became stronger, and the related  
48 atmospheric circulation anomalies extended more eastward, covering Southwest China.  
49 Consequently, the Arabian Sea monsoon can significantly influence the May precipitation over  
50 Southwest China after the late 1970s. This result indicated that the variability of monsoon could  
51 play an important role in its influence.

52                   **Keywords:** Southwest China; precipitation; Arabian Sea monsoon; decadal variability

53      **1 引言**

54      中国西南地区地形复杂，山脉纵横，沟谷遍布，地势落差巨大。该地区地质  
55      板块活动频繁，生态环境脆弱，极易发生由降水导致的山洪、滑坡、泥石流等地  
56      质次生灾害（李永华等, 2012; 马洁华等, 2019）。2016年夏季四川、云南省多县  
57      的累计日降水量达到100~200毫米，西南地区发生特大洪涝灾害，农田被毁、房  
58      屋倒塌，交通、通讯、电力等设施中断，给当地造成非常严重的经济损失和较大的  
59      的社会影响。因此加强对西南地区降水的研究对于该地区的防灾减灾工作极为重  
60      要。

61      西南地区雨季为5~9月，降水主要集中在夏季6~8月，它的变异机制复杂，  
62      受到多个气候因子影响。在夏季6~8月，南亚夏季风和东亚夏季风共同影响了西  
63      南东部地区的降水。南亚夏季风和东亚夏季风同时增强时，从孟加拉湾和南海向  
64      西南东部地区输送大量的水汽，该地区降水增多；二者同时减弱时，该地区位于  
65      异常气旋式环流的西缘，偏干的北风异常不利于该地区降水发生（桓玉和李跃清，  
66      2018）。作为南亚夏季风的重要成员，对流层低层位于阿拉伯海和孟加拉湾地区的  
67      季风环流向中国西南地区输送大量水汽，其中一支气流沿东北向直接到达西南  
68      地区，另一支则向东到达南海地区后折向北到达西南地区东部（Zhang, 2001;  
69      Huang and Cui, 2015; 杨柳等, 2018）。阿拉伯海和孟加拉湾地区也因此成为西南  
70      地区夏季降水的重要水汽源地（Huang and Cui, 2015）。

71      邻近青藏高原的热力作用可以影响西南地区的大气环流，进而影响到西南地  
72      区的降水异常（赵平和陈隆勋, 2001; 刘新等, 2002; 陈忠明等, 2003; 周浩等, 2010;  
73      李永华等, 2011）。南亚高压作为对流层上部强大的大气活动中心，其面积、强  
74      度、脊线位置等都与西南地区的降水有着紧密联系。当夏季南亚高压位置偏北（偏  
75      南）时，有利于出现西南地区夏季降水偏少（偏多）的环流形势；6月南亚高压  
76      的面积变大、强度增强、脊线东移有利于西南地区降水的发生，而8月伴随着南  
77      亚高压的增强和东伸，西南地区降水有所减弱（杜银和谢志清, 2002; 李永华等,  
78      2012; 魏维等, 2012; Wei et al., 2015）。南亚高压还可与西太平洋副热带高压（西  
79      太副高）耦合影响西南地区夏季的旱涝变化，第31候南亚高压东脊点与西太平  
80      洋副热带高压西脊点之间的经距相比前一年经距的差异越大，我国西南地区（尤  
81      其是中、东部地区）夏季降水偏多（张宇等, 2013）。

82 除了大气环流外，海温异常也是影响西南雨季降水的重要因子。例如，热带  
83 太平洋和印度洋海温异常通过影响 Walker 环流和局地 Hadley 环流可以显著影响  
84 西南地区夏季降水（唐佑民等, 1997; 马振锋和谭友邦, 2004; 鲍媛媛等, 2007; 李  
85 永华等, 2012; Liu et al., 2018; Wang et al., 2018）。北大西洋海温异常，如三极子  
86 海温异常模态，能够激发出向下游传播的 Rossby 波列进而影响西南地区降水  
87 （Zuo et al., 2013; Li et al., 2017）。

88 5月是西南地区雨季开始的时期，降水在这旱季—雨季过渡时期的变化尤为  
89 剧烈（秦剑, 1997; Cao et al., 2017）；同时5月是该地区大春作物的关键生育阶  
90 段，因此研究5月降水的变异机理能够为当地农业生产提供科学指导（琚建华和  
91 李绚丽, 1999; Wang 和 LinHo, 2002）。但目前针对西南地区5月降水变异机制的  
92 研究仍然较少。已有的不多研究主要关注了南亚地区热力异常(Cao et al., 2017)、  
93 欧亚中高纬遥相关(Deng et al., 2016) 和 ENSO (杨亚力等, 2011) 等因子对西南  
94 地区部分省市5月降水的影响。

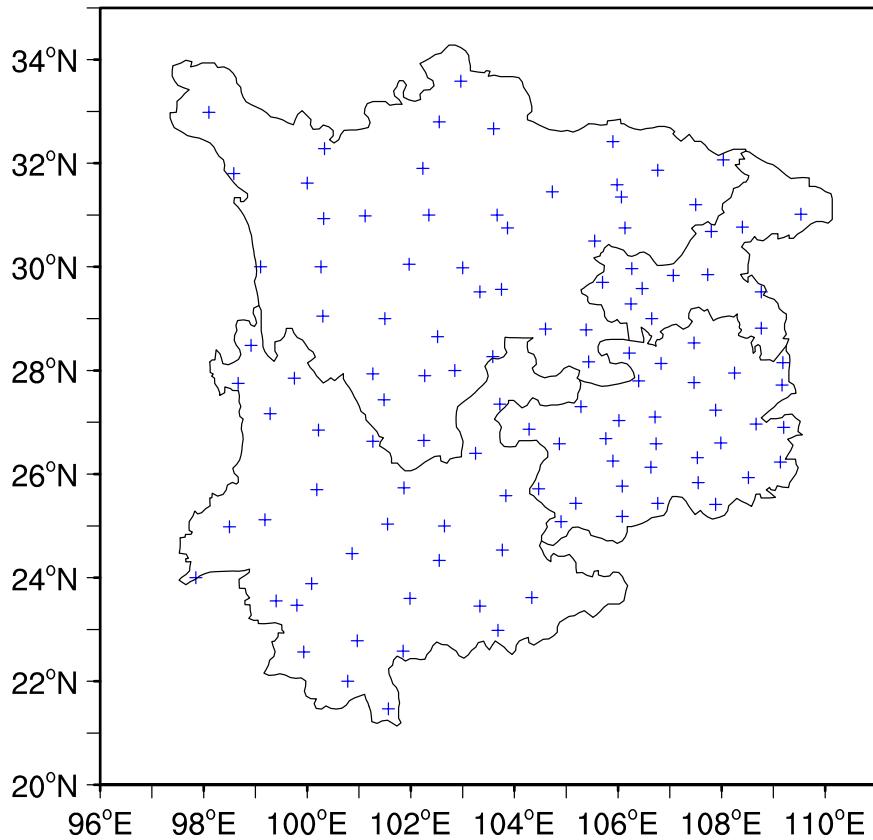
95 阿拉伯海季风通常于5月增强爆发。伴随着阿拉伯海季风的增强爆发，阿拉  
96 伯海和孟加拉湾上空的异常气旋性环流东扩，印度洋上西风异常增强，青藏高原  
97 南部地区水汽输送和上升运动增强，降水增加（朱敏和张铭, 2006 ; Xiang and  
98 Wang, 2013; Liu et al., 2019）。那么阿拉伯海季风异常与5月西南地区降水的联  
99 系如何？这个问题目前关注不够，需要开展深入研究，以增强对西南地区5月降  
100 水变异机理的认识。

## 101 2 资料

102 与前人研究区域一致（罗玉等, 2015），本文中西南地区（ $21^{\circ}\text{N} \sim 34^{\circ}\text{N}$ 、 $97^{\circ}$   
103  $\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$ ）包括云南省、四川省、贵州省和重庆市。降水资料为中国气象局发布  
104 的839个台站的逐日观测降水数据。在这839个台站中，有117个位于西南地  
105 区。由于西南地区大部分站点资料起始于1960年，故选用1960~2017年的5月  
106 降水数据进行研究。考虑到数据缺测的影响，我们选取了缺测数据长度占总时间  
107 长度小于5%的站点，并利用站点其他年份同一天降水量的平均值对缺测值进行  
108 了插补。最后得到115个有效站点，站点分布如图1所示。

109 本文采用的大气环流资料是日本气象厅发布的55年再分析资料集(Japanese  
110 55-year Reanalysis, JRA-55) (Kobayashi et al., 2015)。该资料的水平分辨率为

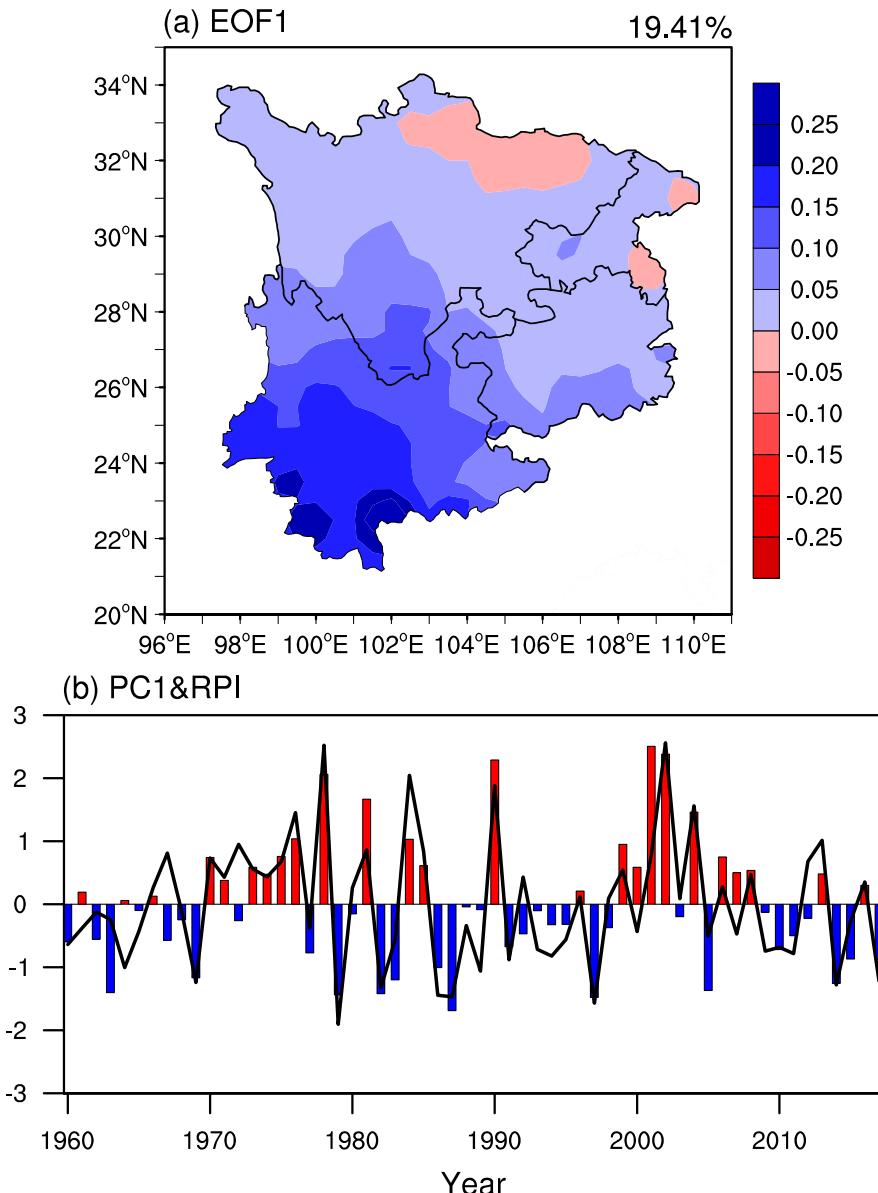
111  $1.25^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ , 垂直方向为 37 层, 本文分析的气象要素主要包括位势高度、水平  
112 风、垂直速度、比湿和可降水量。



113  
114 图 1 中国西南地区 115 个站点分布图  
115 Fig. 1 Locations of 115 observation stations over Southwest China

### 116 3 西南地区 5 月降水的主导模态及其与阿拉伯海季风的关系

117 图 2 是对中国西南地区 5 月降水进行经验正交函数 (Empirical Orthogonal  
118 Function, EOF) 分解得到的第一模态 (EOF1) 及其时间序列 (principal component,  
119 PC1)。EOF1 基本呈现出降水异常的全区一致型分布, 降水变率最大位于云南,  
120 这与西南地区 5 月降水气候态空间分布型极为相似 (图略)。PC1 显示, 西南地  
121 区降水的主导模态呈现出很强的年际变化, 说明该地区 5 月降水呈现出明显的旱  
122 涝变化特征。PC1 与西南地区区域平均降水序列的相关为 0.82, 进一步表明全区  
123 一致型的变化特征是西南地区 5 月降水的主要特征。在后续研究中, 我们将主要  
124 基于西南地区区域平均的降水指数 (Regional Precipitation Index, RPI) 开展研究。



125  
126 图 2 1960~2017 年西南地区 5 月降水的 (a) EOF1 模态和 (b) 其对应的 PC1 时间序列和 RPI  
127 时间序列。(b) 中柱状图代表 PC1，折线图代表 RPI。

128 Fig. 2 The EOF1 mode (a) and the corresponding principal component (PC1) of precipitation over  
129 Southwest China and PRI in May during 1960-2017. Bar in (b) represents PC1 and the black curve  
130 represents RPI

131 本论文中阿拉伯海季风指数（Arabian Sea Monsoon Index, ASMI）的定义与  
132 Xiang 等 (2013) 一致，为 850 hPa 纬向西风在 5°~15°N, 50°~75°E 的区域平均。  
133 1960~2017 年，阿拉伯海季风与西南地区 5 月降水存在联系，ASMI 和西南地区  
134 RPI 的相关为 0.39，通过 99% 的信度检验（表 1）。为了进一步检验两者关系的  
135 稳定性，我们计算了 ASMI 和西南地区 RPI 的 21 年滑动相关。可以看出，二者  
136 的关系在 20 世纪 70 年代后期发生年代际变化，之后两者关系显著增强(图 3a)。

137 此外，23 年（图 3b）和 19 年（图 3c）年滑动检验的结果表明，阿拉伯海季风与  
138 西南地区 5 月降水关系的年代际转折几乎不受滑动窗口长度的影响。因此，我们  
139 将整个时段划分为 1960~1976 和 1981~2017 年两个时段作进一步的研究。结果显示，  
140 在 1981~2017 年，两个指数相关系数为 0.55，通过 99% 的信度检验；而在  
141 1960~1976 年，二者的相关系数仅为 -0.39，并不显著。以上结果表明，在 20 世  
142 纪 70 年代末之后，阿拉伯海季风与西南地区 5 月降水存在密切联系。

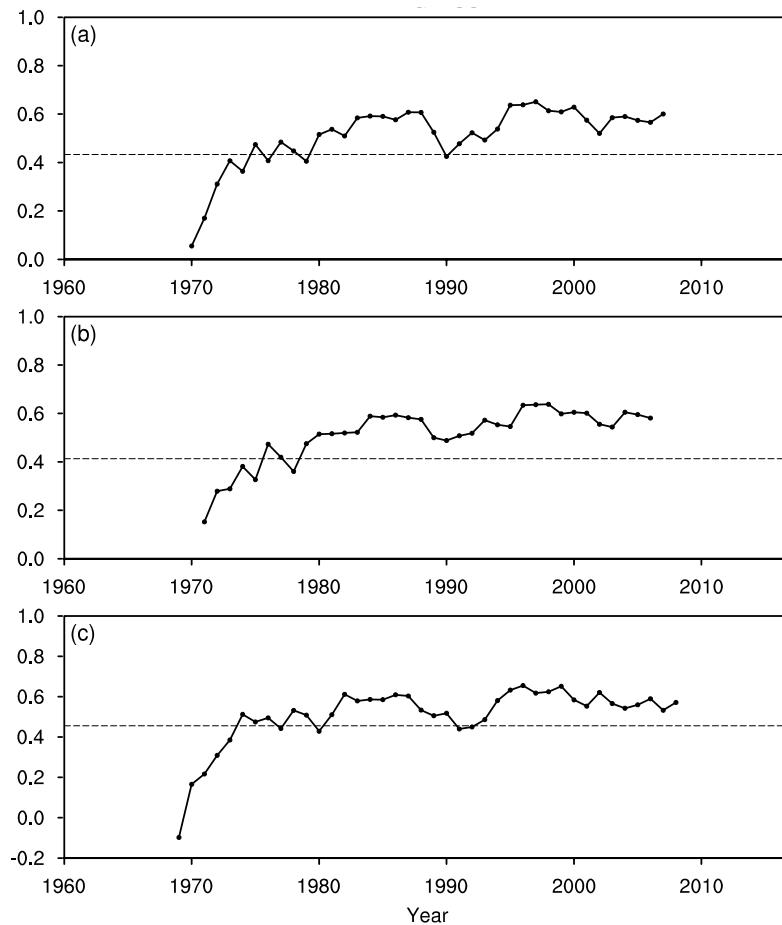
143 表 1 RPI 与 ASMI 在各时段的相关系数。\*代表通过 99% 的信度检验

144 Table 1 The correlation coefficient between RPI and ASMI in each period

145 \* indicates the correlations significant at the 99% confidence levels

	RPI (1960~2017)	RPI (1960~1976)	RPI (1981~2017)
ASMI	0.39*	-0.39	0.55*

146

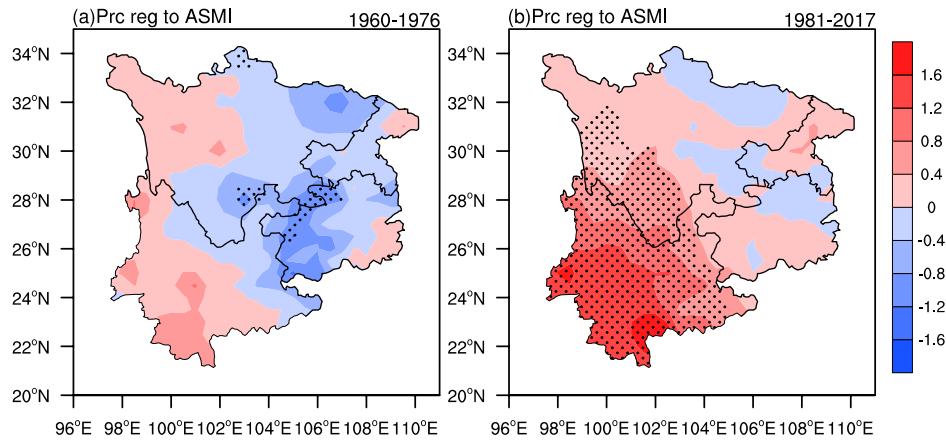


147

148 图 3 1960~2017 年 ASMI 和 RPI 的 (a) 21 年, (b) 23 年和 (c) 19 年滑动相关。黑色虚线  
149 代表通过 99% 的信度检验。

150 Fig. 3 Running correlation coefficient between ASMI and RPI with windows of (a) 21-year, (b) 23-  
151 year, and (c) 19-year. The dashed line indicates the 99% confidence levels

152 从 ASMI 回归的降水空间场上也可以发现，1960~1976 年，ASMI 与西南地  
 153 区 5 月降水的相关系数正负相间，总体较弱（图 4a）。但在 1981~2017 年，几乎  
 154 整个西南地区 5 月降水与 ASMI 的相关系数都为正值，显著相关区位于四川省西  
 155 南部和整个云南省（图 4b），该分布与西南地区降水 EOF1 的空间分布相一致。  
 156 这进一步说明，在 20 世纪 70 年代末之后，阿拉伯海季风成为影响西南地区 5 月  
 157 降水的一个重要因素。



158  
 159 图 4 标准化的 ASMI 回归的 (a) 1960~1976 和 (b) 1981~2017 西南地区 5 月降水异常场 (单  
 160 位: mm/day)。打点区域代表通过 95% 信度检验。

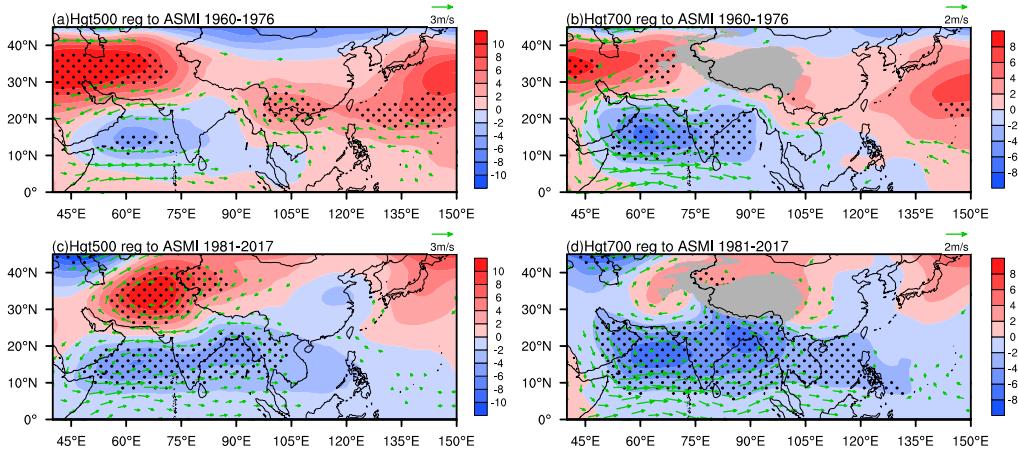
161 Fig. 4 Precipitation anomalies (unit: mm/day) over Southwest China in May regressed onto  
 162 standardized ASMI during (a) 1960-1976 and (b) 1981-2017. The dotted areas indicate significant  
 163 anomalies at the 95% confidence level

#### 164 4 阿拉伯海季风异常影响西南 5 月降水的物理过程

165 第 3 节的结果显示，阿拉伯海季风与中国西南地区 5 月降水的关系存在年代  
 166 际变化。在本节，我们将分析阿拉伯海季风在两个时段所对应的环流异常，来研  
 167 究其影响西南地区 5 月降水的物理过程。

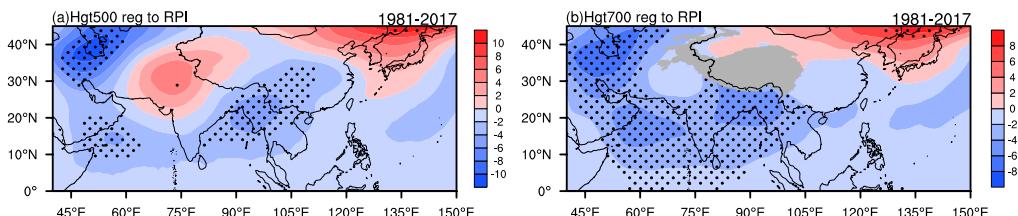
168 图 5 中给出了 5 月阿拉伯海季风在不同时期所对应的环流异常。可以看到，  
 169 在 1960~1976 年，当阿拉伯海季风在 5 月偏强时，北半球副热带印度洋上空为负  
 170 位势高度异常（图 5a 和 5b），尤其以低层 700 hPa 最为明显。同时，西亚上空为  
 171 显著的位势高度正异常，与印度洋上的位势高度负异常构成南—北向的偶极型环  
 172 流异常模态；此时，西太副高也倾向于偏西、偏南，对西南地区的影响较大，而  
 173 印缅槽处于阿拉伯海季风和西台副高的过渡区，印缅槽附近的位势高度异常较弱。  
 174 在 1981~2017 年，当阿拉伯海季风偏强时，它伴随着更大尺度的大气环流异常，  
 175 显著的负位势高度异常占据了整个北半球副热带印度洋到南海区域；此时，西太

176 副高由于受到阿拉伯海季风环流的影响而位置偏东、偏北，印缅槽显著加深，其  
177 环流可以影响到中国西南地区（图 5c 和 5d）。



178  
179 图 5 标准化的 ASMI 回归的 1960~1976 年 5 月 (a) 500 hPa 和 (b) 700 hPa 位势高度异常  
180 场 (单位: gpm) 和风场异常场 (单位: m/s)。 (c-d) 与 (a-b) 类似, 但为 1981~2017 年的  
181 回归结果。打点区域代表通过 95%信度检验, 绿色矢量代表通过 95%信度检验的风场异常  
182 场。

183 Fig. 5 Atmospheric circulation anomalies (units: gpm for geopotential height anomalies and m/s for  
184 wind anomalies) regressed onto standardized ASMI at (a) 500 hPa and (b) 700 hPa during 1960-  
185 1976. (c-d) are the same as (a-b), but during 1981-2017. The dotted areas indicate significant  
186 anomalies at the 95% confidence level, and the green vectors represent the wind anomalies at the  
187 95% confidence level



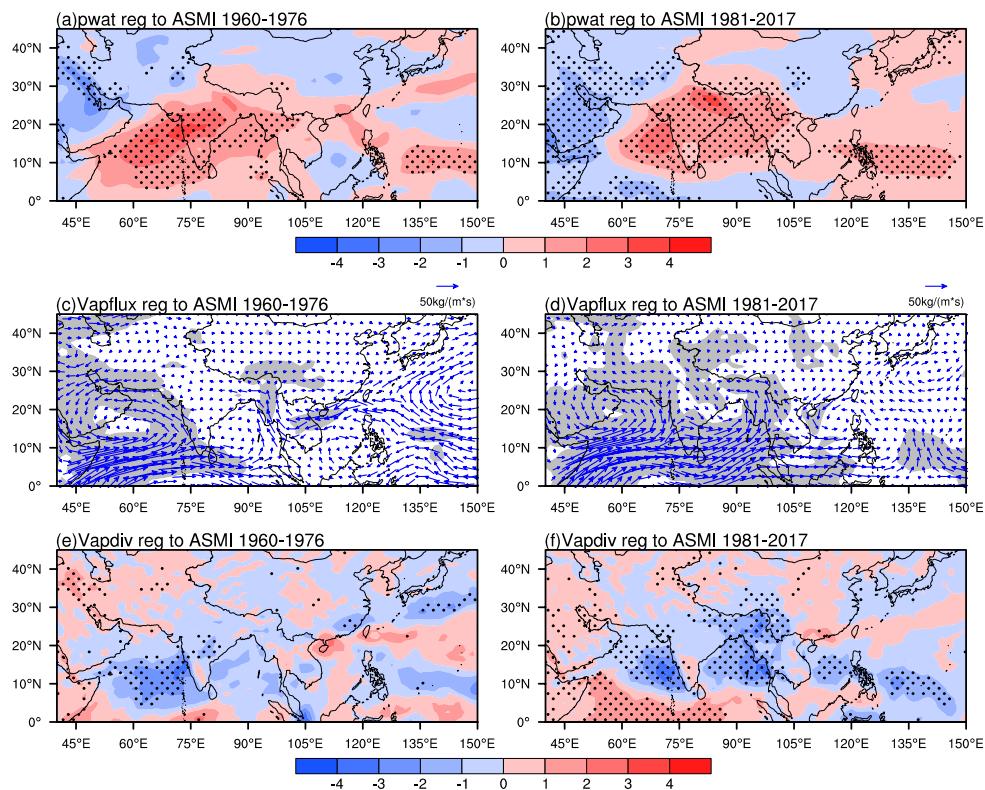
188  
189 图 6 西南地区 5 月标准化的 RPI 回归的 1981~2017 年 5 月 (a) 500 hPa 和 (b) 700 hPa 位  
190 势高度异常场 (单位: gpm)。打点区域代表通过 95%信度检验。

191 Fig. 6 Geopotential height anomalies (unit: gpm) regressed onto standardized RPI at (a) 500 hPa  
192 and (b) 700 hPa during 1981-2017. The dotted areas indicate significant anomalies at the 95%  
193 confidence level

194 图 6 给出了 1981-2017 年西南地区 5 月 RPI 回归的位势高度异常。可以看到，  
195 西南地区降水偏多时，在北半球副热带印度洋上空存在显著的位势高度负异常，  
196 同时印缅槽显著加深。这样的环流形势与同时期阿拉伯海季风异常所对应的  
197 大气环流异常非常相似，这也进一步证明阿拉伯海季风是该时期西南地区 5 月降

198 水的重要影响因子。

199 在 1960~1976 年, 当阿拉伯海季风偏强时, 可降水量异常增多的区域主要集  
200 中在阿拉伯海、印度中南部到孟加拉湾部分地区(图 7a)。此时偏强的西风异常  
201 主要位于北半球副热带西印度洋, 并在印度洋上空形成显著的气旋性环流异常。  
202 阿拉伯海地区的水汽一部分伴随着气旋性环流异常向印度西侧地区输送, 另一部  
203 分水汽继续向西输送至孟加拉湾地区(图 7c)。受此影响, 显著的水汽通量散度  
204 异常局限在阿拉伯海地区, 导致该地区可将水量增多(图 7e)。而在中国西南地  
205 区, 可降水量与水汽输送及辐合异常都比较弱, 这说明在 20 世纪 70 年代末之前  
206 阿拉伯海季风对西南地区 5 月水汽条件的影响较小, 进而不会对该地区降水产生  
207 显著影响。

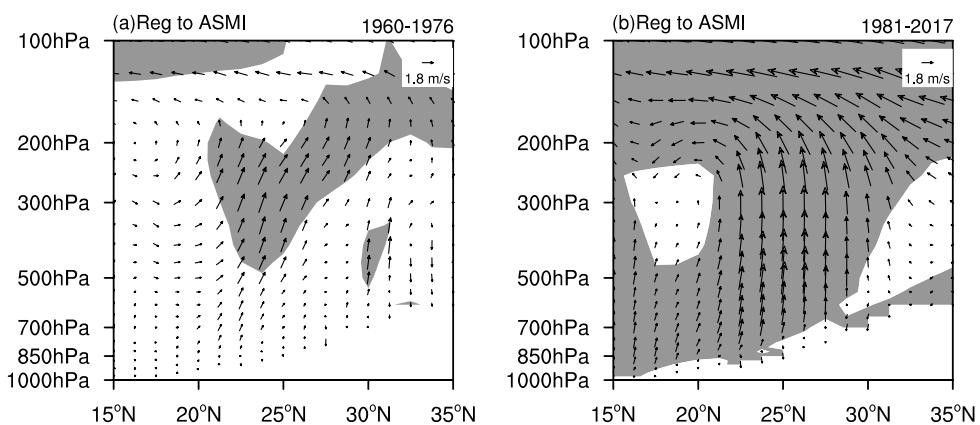


208  
209 图 7 标准化的 ASMI 回归的 (a) 1960~1976 年和 (b) 1981~2017 年 5 月可降水量异常场(单  
210 位:  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) (阴影区域代表通过 95%信度检验)。(c-d) 与 (a-b) 类似, 但为回归的整层积  
211 分水汽通量异常(单位:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ )。(e-f) 与 (a-b) 类似, 但为回归的整层积分水汽通量散  
212 度异常(单位:  $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ )。打点区域代表通过 95%信度检验。

213 Fig. 7 Precipitable water anomalies (unit:  $\text{kg}/\text{m}^2$ ) regressed onto standardized ASMI during (a) 1960-  
214 1976 and (b) 1981-2017. The gray shadings indicate significant anomalies at the 95% confidence  
215 level. (c-d) are the same as (a-b), but for regressed vertical Integrated water vapor flux anomalies  
216 (unit:  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ). (e-f) are the same as (a-b), but for regressed divergence anomalies of the vertical

217 integrated water vapor flux (unit:  $10^{-5} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ). The dotted areas indicate significant anomalies at  
218 the 95% confidence level

219 在 1981~2017 年, 从阿拉伯海到中南半岛与中国西南地区都呈现出显著的可  
220 降水量正异常 (图 7b)。伴随着偏强的阿拉伯海季风, 从北半球副热带西印度洋  
221 至海洋性大陆地区存在偏强的西风异常, 在孟加拉湾地区盛行异常西南气流, 该  
222 气流向北可延伸至中国西南地区, 从而为孟加拉湾和中国西南地区带来充沛的水  
223 汽输送 (图 7d)。在水汽辐合场上也可以看到, 孟加拉湾和中国西南地区出现了  
224 显著的水汽辐合 (图 7f)。上述研究表明, 在 20 世纪 70 年代末之后, 阿拉伯海  
225 季风异常所引起的环流变化可以显著地影响中国西南地区的水汽条件变化, 进而  
226 对该地区降水的变化产生作用。



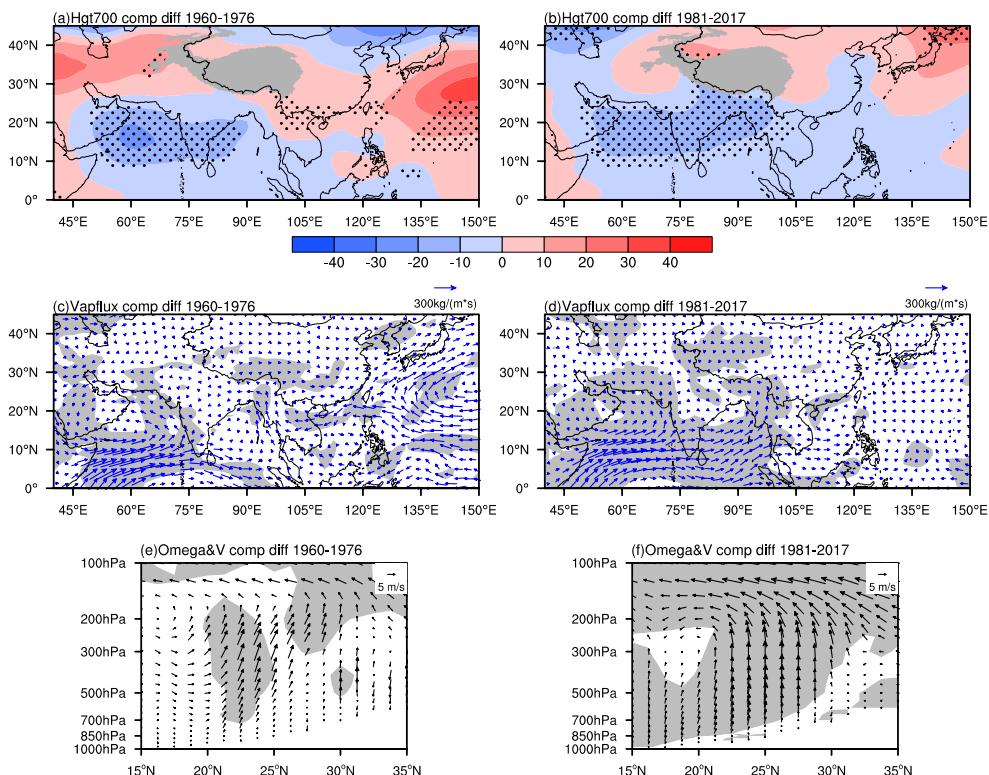
227  
228 图 8 标准化的 ASMI 回归的 (a) 1960~1976 年和 (b) 1981~2017 年 5 月沿 95°~105° E 平均  
229 的经圈环流异常 (经向风单位: m/s; 垂直速度单位: Pa/s; 垂直速度单位乘以了 -150)。阴  
230 影区域代表通过 95% 信度检验。

231 Fig. 8 The mean meridional circulation along 95° E to 105° E anomalies (units: m/s for meridional  
232 wind and Pa/s for vertical velocity; in the figure the vertical velocity is multiplied by -150) regressed  
233 onto standardized ASMI during (a) 1960-1976 and (b) 1981-2017. The gray shadings indicate  
234 significant anomalies at the 95% confidence level

235 对于降水, 除了水汽条件外, 动力条件也非常重要。为此, 我们进一步分析  
236 了前、后时期阿拉伯海季风对局地经圈环流的影响。图 8 给出了两个时段 ASMI  
237 回归的沿 95°~105° E 平均的经圈环流异常。可以看到, 在 1960~1976 年, 阿拉  
238 海季风对西南地区对流层中低层垂直运动的影响较弱, 显著相关的环流异常仅  
239 位于对流层上层 (图 8a)。但在 1981~2017 年, 阿拉伯海季风能够显著地影响印  
240 缅槽, 进而影响西南地区对流层整层的垂直运动。当阿拉伯海季风偏强时, 印缅  
241 槽显著加深 (图 5d), 槽前的西南地区上升运动偏强 (图 8b), 这为西南地区降

242 水的发生提供了重要的动力条件。

243 通过上述的回归结果可以发现,在 1981~2017 年阿拉伯海季风显著地影响中  
244 国西南地区的水汽输送和垂直运动,从而影响该地区的降水。进一步以 ASMI 的  
245 时间序列 0.75 倍标准差为阈值挑选出阿拉伯海季风的强弱年份,对位势高度等  
246 物理量进行合成分析。可以看到,前后两个时段的合成结果与 ASMI 的回归结果  
247 基本一致(图 9)。在 1981 年之后,阿拉伯海季风异常所伴随的大气环流异常明  
248 显东伸,可以影响到向中国西南地区的水汽输送并引起该地区垂直运动的变化,  
249 从而可以造成中国西南地区降水的变化。

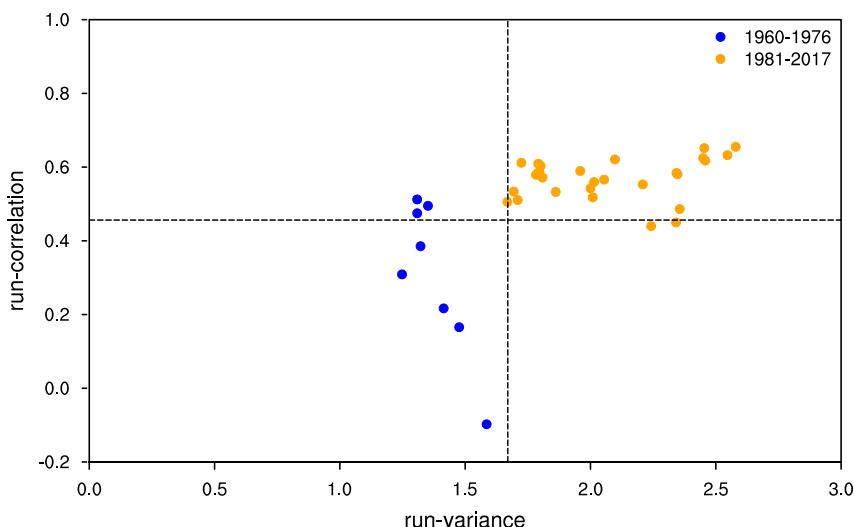


250  
251 图 9 (a) 1960~1976 和 (b) 1981~2017 年 ASM 强、弱年合成的 5 月位势高度异常 (单位:  
252 gpm)。(c-d) 与 (a-b) 类似,但为合成的整层积分水汽通量异常 (单位: kg/(m·s))。(e-f)  
253 与 (a-b) 类似,但为合成的沿 95°~105°E 平均的经圈环流异常 (经向风单位: m/s; 垂直速  
254 度单位: Pa/s; 垂直速度单位乘以了 -150)。(a-b) / (c-f) 中的打点/阴影区域代表通过 95%  
255 信度检验。

256 Fig. 9 Composited geopotential height anomalies (unit: gpm) between strong and weak ASM years  
257 in May during (a) 1960-1976 and (b) 1981–2017. (c-d) are the same as (a-b), but for compositated  
258 vertical integrated water vapor flux anomalies (unit: kg/(m·s)). (e-f) are the same as (a-b), but for  
259 compositated latitude-pressure cross section of meridional circulation averaged between 95°E and  
260 105°E (units: m/s for meridional wind and Pa/s for vertical velocity; in the figure the vertical  
261 velocity is multiplied by -150). The dotted areas in (a-b) indicate significant anomalies at the 95%

262 confidence level. The gray shadings in (c-f) indicate significant anomalies at the 95% confidence  
263 level

264 已有研究显示,气候系统变率的增强会增强其气候影响(Sun and Yuan, 2009)。  
265 为此,我们进一步考察了阿拉伯海季风的变率及其与中国西南地区降水关系。图  
266 10 给出了 ASMI 的 19 年滑动标准差(横轴)和 ASMI 与中国西南地区 5 月 RPI  
267 的 19 年滑动相关系数(纵轴)的散点图。以横坐标 1.67 (ASMI 的 0.9 倍标准  
268 差)为界,当阿拉伯海季风变率偏弱时,阿拉伯海季风与西南季风降水的关系偏  
269 弱,仅有 46.2% 的滑动窗口对应的相关系数通过 95% 的信度检验。而当阿拉伯海  
270 季风变率偏强时,阿拉伯海季风与西南季风降水的关系偏强,有 92.6% 的滑动窗  
271 口对应的相关系数通过 95% 的信度检验。由图 10 可知,ASMI 的变率在 20 世纪  
272 70 年代后期存在明显的年代际突变。1960~1976 年对应 ASMI 的标准差为 1.61,  
273 阿拉伯海季风变率偏弱,阿拉伯海季风异常与中国西南地区 5 月降水关系较弱。  
274 1981~2017 年对应 ASMI 的标准差为 2.00,阿拉伯海季风变率偏强,阿拉伯海季  
275 风异常与中国西南地区 5 月降水关系显著增强。因此,在研究阿拉伯海季风与中  
276 国西南地区 5 月降水的关系时,需要关注季风变率的强弱。



277  
278 图 10 ASMI 的 19 年滑动标准差与 ASMI-RPI 的 19 年滑动相关的散点图。横虚线为 95%  
279 的信度检验对应的相关系数值,竖虚线为 1.67。蓝色(黄色)圆点代表滑动窗口的中心年份位  
280 于 1960-1976(1981-2017)年的时段。

281 Figure. 10 Scatterplot of 19-year sliding standard deviations of ASMI and 19-year sliding  
282 correlation coefficients between ASMI and RPI. The horizontal dotted line indicates significant  
283 correlation at the 95% confidence level, and the vertical dotted line is 1.67. The blue (yellow) dot  
284 represents the periods with central year is in 1960-1976 (1981-2017)

285      **5 总结与讨论**

286      5月是中国西南地区旱季—雨季的转折时期，该时期降水异常会显著地影响  
287      当季农事活动（晏红明等, 2003; 汤阳等, 2013）。本文首先利用 EOF 方法提取其  
288      变化的主导模态，进而分析它与同期阿拉伯海季风的联系。EOF 结果表明，西南  
289      地区 5 月降水第一主导模态表现为全区一致的变化特征，大值中心位于云南地  
290      区，这与该地区 5 月气候态降水的空间格局类似。

291      在过去 50 多年，西南地区 5 月降水与阿拉伯海季风变异的关系呈现出年代  
292      际变化，其中在 1960~1976 年二者关系较弱，但在 1981~2017 年两者呈现出显著  
293      的正相关。在 1960~1976 年，阿拉伯海季风异常所引起的大气环流异常主要位于  
294      阿拉伯海至孟加拉湾地区；此时，季风异常对中国西南地区的水汽输送影响较弱，  
295      从而与西南地区降水的关系并不紧密。但在 1981~2017 年，阿拉伯海季风异常所  
296      引起的大气环流异常能够从阿拉伯海延伸至中国南海地区，由此在孟加拉引起西  
297      南气流，加强向中国西南地区的水汽输送。另外，在该时段，阿拉伯海季风异常  
298      能够显著影响印缅槽，从而在槽前的中国西南地区产生显著的垂直运动异常。通  
299      过对降水相关的动力和水汽条件的影响，阿拉伯海季风能够在 20 世纪 70 年代末  
300      显著地影响中国西南地区的 5 月降水。

301      本文进一步初步探讨了 5 月阿拉伯海季风与中国西南地区降水关系年代际  
302      变化的可能原因，发现阿拉伯海季风变率的强弱可能起着重要的作用。当阿拉伯  
303      海季风变率偏弱时，它所对应的环流异常主要位于阿拉伯海到孟加拉湾东部地区，  
304      因此它对中国西南地区降水的响应偏弱。而当其偏强时，阿拉伯海季风异常能够  
305      导致整个北印度洋到南海地区的大气环流异常，从而显著影响地影响中国西南地  
306      区的降水。

307      5 月是亚洲季风区气候干—湿季节转换的过渡月份，也是亚洲夏季风爆发的  
308      关键时期。在该时期，亚洲不同地区的降水变异机制复杂且影响因子较多。在阿  
309      拉伯海、印度半岛和中南半岛等地区，5 月降水的年际变化受到欧洲—西亚遥相  
310      关和 ENSO 等因素的显著影响，它们通过对大气环流异常的调制使得对流层中  
311      高层的温度梯度增强，进而导致北印度洋对流层低层的西风带增强，有利于南亚  
312      5 月降水增多 (Deng et al., 2016)。前期冬季太平洋海温异常对西太平洋副热带高  
313      压强度和位置的影响也是造成中国南方 5 月降水异常的重要原因 (严华生等,

314 2002)。在中国西南地区,5月作为旱季—雨季的转折时期,该时期降水异常会显  
315 著地影响当季农事活动。本文揭示了5月阿拉伯海季风强度与同期中国西南地区  
316 降水的关系,未来需要继续深入开展其他气候系统对该地区5月降水的变化影  
317 响;此外,除了季风强度,季风爆发早晚对中国西南地区5月降水存在怎样的影  
318 响也需要做进一步的研究。

319

## 320 参考文献 (Reference)

- 321 鲍媛媛,康志明,金荣花,等. 2007. 川渝地区夏季旱涝与海温异常浅析[J]. 气象,  
322 33(05): 89-93. Bao Y Y, Kang Z M, Jin R H, et al. 2007. Analysis of floods and  
323 droughts in Chongqing and East Sichuan[J]. Meteorological Monthly (in Chinese),  
324 33(05): 89-93.
- 325 Cao J, Zhang W K, Tao Y. 2017. Thermal Configuration of the Bay of Bengal-Tibetan  
326 Plateau Region and the May Precipitation Anomaly in Yunnan[J]. J. Climate,  
327 30(22): 9303-9319.
- 328 陈忠明,闵文彬,刘富明. 2003. 青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的  
329 关联[J]. 气象, 29(05): 9-12. Chen Z M, Min W B, Liu F M. 2003. Relationship  
330 between surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation in  
331 Sichuan Basin during summer[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29(05):  
332 9-12.
- 333 Deng M Y, Lu R Y, Chen W, et al. 2016. Interannual variability of precipitation in May  
334 over the South Asian monsoonal region[J]. Int. J. Climat., 36(4): 1724-1732.
- 335 杜银,谢志清. 2002. 中国西南地区夏季降水的年际变化及与南亚高压的关系[J].  
336 四川气象, 22(4): 8-13. Du Y, Xie Z Q. 2002. Interannual variation of summer  
337 precipitation in Southwest China and its relationship with South Asia High[J].  
338 Sichuan Meteorology (in Chinese), 22(4): 8-13.
- 339 桓玉,李跃清. 2018. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异  
340 常的关系[J]. 高原气象, 37(6): 1563-1577. Huan Y, Li Y Q. 2018. The synergy  
341 between the East Asian summer monsoon and the south Asian summer monsoon  
342 and its relations with anomalous rainfall in southern China[J]. Plateau  
343 Meteorology (in Chinese), 37(6): 1563-1577.
- 344 Huang Y J, Cui X P. 2015. Moisture Sources of Torrential Rainfall Events in the Sichuan  
345 Basin of China during Summers of 2009-13[J]. Journal of Hydrometeorology,

- 346 26(6): 1906-1917.
- 347 瞿建华, 李绚丽. 1999. 云南初夏降水与前期大气环流的关系[J]. 高原气象, 18(1):  
348 63-70. Jü J H, Li X L. 1999. A study on relation between the preceding circulation  
349 and the rainfall in Yunnan during early summer[J]. Plateau Meteorology (in  
350 Chinese), 18(1): 63-70.
- 351 Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, et al. 2015. The JRA-55 Reanalysis: General  
352 Specifications and Basic Characteristics[J]. Journal of the Meteorological Society  
353 of Japan, 93(1): 5-48.
- 354 Li G, Chen J P, Wang X, et al. 2017. Remote impact of North Atlantic sea surface  
355 temperature on rainfall in southwestern China during boreal spring[J]. Climate  
356 Dyn., 50(1-2): 541-553.
- 357 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2012. 热带太平洋-印度洋海表温度变化及其对西  
358 南地区东部夏季旱涝.[J]. 热带气象学报, 28(2): 145-156. Li Y H, Lu C H, Xu  
359 H M, et al. 2012. Anomalies of sea surface temperature in Pacific-Indian Ocean  
360 and effects on drought/flood in summer over eastern of Southwest China[J].  
361 Journal of tropical meteorology (in Chinese), 28(2): 145-156.
- 362 李永华, 青吉铭, 李强, 等. 2012. 夏季南亚高压的年(代)际变化特征及其对西  
363 南地区东部旱涝的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 34(9): 71-81. Li Y  
364 H, Qing J M, Li Q, et al. 2012. Inter-annual and inter-decadal variations of South  
365 Asian High in summer and its influences on flood/drought over Western Southwest  
366 China[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition) (in Chinese),  
367 34(9): 71-81.
- 368 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝  
369 的关系[J]. 大气科学, 35(3): 422-434. Li Y H, Lu C H, Xu H M, et al. 2011.  
370 Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the  
371 Tibetan Plateau and drought/ flood in eastern Southwest China[J]. Chinese Journal  
372 of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(3): 422-434.
- 373 Liu J P, Ren H L, Li W J, et al. 2018. Diagnosing the leading mode of interdecadal  
374 covariability between the Indian Ocean sea surface temperature and summer  
375 precipitation in southern China[J]. Theor. Appl. Climatol., 135(3-4): 1295-1306.
- 376 刘新, 李伟平, 吴国雄. 2002. 夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关  
377 分析[J]. 气象学报, 60(3): 267-277. Liu X, Li W P, Wu G X. 2002. Interannual

- 378 variation of the diabatic heating over the Tibetan Plateau and the northern  
379 hemispheric circulation in summer[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),  
380 60(3): 267-277.
- 381 Liu Y, Chen H P, Zhang G Q, et al. 2019. The advanced South Asian monsoon onset  
382 accelerates lake expansion over the Tibetan Plateau[J]. Science Bulletin, 64(20):  
383 1486-1489.
- 384 罗玉, 范广洲, 周定文, 等. 2015. 西南地区极端降水变化趋势[J]. 气象科学,  
385 35(5): 581-586. Luo Y, Fan G Z, Zhou D W, et al. 2015. Extreme precipitation  
386 trend of Southwest China in recent 41 years[J]. Journal of the Meteorological  
387 Sciences, 35(5): 581-586.
- 388 马洁华, 孙建奇, 汪君, 等. 2019. 2018年夏季我国极端降水及滑坡泥石流灾害预  
389 测[J]. 大气科学学报, 42(1): 93-99. Ma J H, Sun J Q, Wang J, et al. 2019. Real-  
390 time prediction for 2018 JJA extreme precipitation and landslides[J]. Transactions  
391 of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 93-99.
- 392 马振锋, 谭友邦. 2004. 预测川渝地区汛期降水量的一种物理统计模型[J]. 大气  
393 科学, 28(1): 138-145. Ma Z F, Tan Y B. 2004. A physical statistic model for  
394 predicting the rainfall during flood season in Sichuan-Chongqing region[J].  
395 Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28(1): 138-145.
- 396 秦剑. 1997. 低纬高原天气气候[M]. 气象出版社, 210. Qin J. 1997. Weather and  
397 Climate in Low Latitudes Plateau[M]. China Meteorological Press (in Chinese):  
398 210.
- 399 Sun J Q, Yuan W. 2009. Contribution of the sea surface temperature over the  
400 Mediterranean-Black Sea to the decadal shift of the summer North Atlantic  
401 Oscillation[J]. Adv Atmos Sci, 26(4): 717-726.
- 402 汤阳, 杨若文, 胡金明, 等. 2013. 海表温度异常与中国低纬高原 5 月降水的  
403 ESVD 研究[J]. 热带气象学报, 29(3): 449-457. Tang Y, Yang R W, Hu J M, et al.  
404 2013. ESVD analysis of the anomaly of Sea Surface Temperature and the  
405 precipitation over low-latitude Plateau of China[J]. Journal of tropical  
406 meteorology (in Chinese), 29(3): 449-457.
- 407 唐佑民, 翟武全, 许金洪. 1997. 我国西南地区夏季降水异常与太平洋海温季节  
408 演变的关系[J]. 海洋与湖沼, 28(1): 88-95. Tang Y M, Zhai W Q, Xu J H. 1997.  
409 The relationship between summer precipitation anomalies in Southwest China and

- 410 the seasonal evolution of SST in the Pacific Ocean[J]. Oceanologia Et Limnologia  
411 Sinica (in Chinese), 28(1): 88-95.
- 412 Wang B, LinHo. 2002. Rainy Season of the Asian-Pacific Summer Monsoon[J]. J.  
413 Climate, 15(4): 386-398.
- 414 Wang L, Huang G, Chen W, et al. 2018. Wet-to-dry shift over Southwest China in 1994  
415 tied to the warming of tropical warm pool[J]. Climate Dyn., 51(7-8): 3111-3123.
- 416 魏维, 张人禾, 温敏. 2012. 南亚高压的南北偏移与我国夏季降水的关系[J]. 应用  
417 气象学报, 23(6): 650-659. Wei W, Zhang R H, Wen M. 2012. Meridional  
418 Variation of South Asian High and its relationship with the summer precipitation  
419 over China[J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23(6):  
420 650-659.
- 421 Wei W, Zhang R H, Wen M, et al. 2015. Interannual Variation of the South Asian High  
422 and Its Relation with Indian and East Asian Summer Monsoon Rainfall[J]. J.  
423 Climate, 28(7): 2623-2634.
- 424 Xiang B Q, Wang B. 2013. Mechanisms for the Advanced Asian Summer Monsoon  
425 Onset since the Mid-to-Late 1990s\*[J]. J. Climate, 26(6): 1993-2009.
- 426 晏红明, 肖子牛, 王灵. 2003. 孟加拉湾季风活动与云南5月降雨量[J]. 高原气象,  
427 22(6): 624-630. Yan H M, Xiao Z N, Wang L. 2003. Activities of Bay of Bengal  
428 Monsoon and Beginning Date of Rain Season in Yunnan[J]. Plateau Meteorology  
429 (in Chinese), 22(6): 624-630.
- 430 严华生, 吕俊梅, 瑚建华, 等. 2002. 冬季太平洋海温变化对中国5月降水的影响  
431 [J]. 气象科学, 22(4): 410-415. Yan H S, Lü J M, Jü J H, et al. 2002. The influence  
432 of winter Pacific SST upon may precipitation of China[J]. Journal of the  
433 Meteorological Sciences (in Chinese), 22(4): 410-415.
- 434 杨柳, 赵俊虎, 封国林. 2018. 中国东部季风区夏季四类雨型的水汽输送特征及  
435 差异[J]. 大气科学, 42(1): 81-95. Yang L, Zhao J H, Feng G L. 2018.  
436 Characteristics and differences of summertime moisture transport associated with  
437 four rainfall patterns over eastern China monsoon region[J]. Chinese Journal of  
438 Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 81-95.
- 439 杨亚力, 杜岩, 陈海山, 等. 2011. ENSO 事件对云南及临近地区春末初夏降水的  
440 影响[J]. 大气科学, 35(4): 729-738. Yang Y L, Du Y, Chen H S, et al. 2011.  
441 Influence of ENSO event on rainfall anomaly over Yunnan Province and its

- 442 neighboring regions during late spring early summer[J]. Chinese Journal of  
443 Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(4): 729-738.
- 444 Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from India Monsoon with that  
445 over East Asia and the summer rainfall in China[J]. Adv Atmos Sci, 18(5): 1005-  
446 1017.
- 447 张宇, 李耀辉, 魏林波, 等. 2013. 南亚高压与西太平洋副热带高压对我国西南地  
448 区夏季降水异常的影响[J]. 干旱气象, 31(3): 464-470. Zhang Y, Li Y H, Wei L  
449 B, et al. 2013. Effects of South Asia High and Western Pacific Subtropical High  
450 on the summer precipitation anomalies over Southwest China[J]. Journal of Arid  
451 Meteorology (in Chinese), 31(3): 464-470.
- 452 赵平, 陈隆勋. 2001. 35 年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系  
453 [J]. 中国科学 (D 辑) , 31(4): 327-332. Zhao P, Chen L X. 2001. Climatic  
454 characteristics of atmospheric heat sources over the Tibetan Plateau in the past 35  
455 years and its relationship with precipitation in China[J]. Science in China (Series  
456 D), 31(4): 327-332.
- 457 周浩, 唐红玉, 程炳岩. 2010. 青藏高原冬春季积雪异常与西南地区夏季降水的  
458 关系[J]. 冰川冻土, 32(6): 1144-1151. Zhou H, Tang H Y, Cheng B Y. 2010.  
459 Relation between the abnormal snow cover in winter and spring over the Tibetan  
460 Plateau and summer precipitation over the Southwest China[J]. Journal of  
461 Glaciology and Geocryology (in Chinese), 32(6): 1144-1151.
- 462 朱敏, 张铭. 2006. 南亚夏季风爆发前后降水量时空变化特征[J]. 热带气象学报,  
463 22(2): 155-160. Zhu M, Zhang M. 2006. EOF expansion of precipitation during  
464 Indian summer monsoon onset[J]. Journal of tropical meteorology (in Chinese),  
465 22(2): 155-160.
- 466 Zuo J Q, Li W J, Sun C H, et al. 2013. Impact of the North Atlantic sea surface  
467 temperature tripole on the East Asian summer monsoon[J]. Adv Atmos Sci, 20(4):  
468 1173-1186.