

白慧, 高辉. 2017. 索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚的影响 [J]. 大气科学, 41 (4): 702–712. Bai Hui, Gao Hui. 2017. Influences of the Somalia cross-equatorial flow on the beginning date of rainy season in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 702–712, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16122.

索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚的影响

白慧¹ 高辉²

¹ 贵州省气候中心, 贵阳 550002

² 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 基于中国气象局西南雨季监测标准和高空间分辨率的台站日降水资料及 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了西南雨季开始日期的气候特征及和索马里、孟加拉湾越赤道气流的关系, 发现西南雨季的气候平均开始时间约为 5 月第 4 候, 且在 2000 年前后有从偏晚向偏早转变的趋势。统计诊断分析表明, 在东半球低层的几支越赤道气流中, 只有索马里和孟加拉湾越赤道气流的强弱会影响到雨季开始早晚和雨量大小, 且都对应于急流强雨季早、急流弱雨季晚的特征, 但在月尺度上前者的作用更强。急流通中心经向风和赤道印度洋纬向风对雨季的超前相关及逐日变率合成分析表明, 索马里地区经向风速在雨季爆发前十日开始为正的日较差, 即十日前经向风持续增强, 并在约七日至五日前作用最为显著, 从而对西南雨季起到触发作用。在这一触发过程中, 索马里急流的超前影响要早于孟加拉湾越赤道气流。受上游越赤道气流影响, 赤道印度洋西风 and 孟加拉湾西南气流也会增强, 为西南地区提供充沛的水汽。

关键词 索马里越赤道气流 孟加拉湾越赤道气流 西南雨季 夏季风

文章编号 1006-9895(2017)04-0702-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16122

Influences of the Somalia Cross-Equatorial Flow on the Beginning Date of Rainy Season in Southwest China

BAI Hui¹ and GAO Hui²

¹ Guizhou Climate Center, Guiyang 550002

² National Climate Center, Beijing 100081

Abstract Based on the national monitoring standard of rainy season in Southwest China (SWC) issued by the China Meteorological Administration (CMA), and daily precipitation amount at 2513 meteorological stations in China and the NCEP/NCAR reanalysis project, climate features of the beginning date of the rainy season and its relationship with general circulations are analyzed in this paper. Results indicate that the mean beginning date is the fourth pentad in May. During the research period (1981–2014), the beginning date showed an advancing trend since 2000. Compared to the cross-equatorial flows (CEFs) over the South China Sea, the western Pacific and the Papua New Guinea, statistical results reveal a more significant relationship between the beginning date and the CEFs over Somalia (SCEF) and over the Bay of

收稿日期 2016-01-09; 网络预出版日期 2016-12-15

作者简介 白慧, 女, 1984 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事短期气候预测方面研究。E-mail: baihui926@aliyun.com

通讯作者 高辉, E-mail: gaohui@cma.gov.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430203, 贵州省气象局气象科技开放研究基金项目黔气科合 KF[2016]06 号, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306033

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2013CB430203), Meteorological Science and Technology Research Fund of Guizhou Meteorological Bureau (Grant KF[2016]06), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201306033)

Bengal, especially the former. Stronger (weaker) SCEF is related to earlier (later) rainy season and more (less) precipitation in SWC. Both lagged correlation and composition analysis reveal a 10-day leading influence from the meridional wind along the SCEF channel. Since ten days before the beginning of the rainy season, the SCEF starts to strengthen continuously. Affected by the SCEF, both the westerly winds over the tropical Indian Ocean and the southwest monsoon transport enhance and bring more moisture to Southwest China, triggering the onset of rainy season in the region.

Keyword Somalia cross-equatorial flow, Bay of Bengal cross-equatorial flow, Rainy season in Southwest China, Summer monsoon

1 引言

我国西南地区(后文简称为西南地区)位于青藏高原东南侧,区内地势高亢、地形复杂,拥有多种气候带(徐裕华, 1991; 丁一汇, 2013),且在夏季风盛行期间同时受西南季风和东南季风的共同作用,降水年循环有明显的干、湿季之分。每年的湿季(5~10月)雨量可占年降水总量的85%以上(晏红明等, 2013)。和同纬度的江南、华南相比,西南雨季开始时间晚,平均雨季日期在5月中旬前后。由于冬春季通常为西南地区的干季,因此若某年雨季来临晚易使春末夏初雨量少,导致该地区发生春旱甚至是冬春或春夏连旱。例如1982年西南雨季开始日期较常年明显偏晚,云南发生严重春旱,昆明5月降水量仅8毫米,是之前八十多年来的最低值(丁一汇, 2008)。1983年雨季开始时间继续偏晚,西南春末夏初再次经历严重旱情,给当地的农业生产造成了重大的经济损失。对西南地区而言,雨季开始不仅对应于该地区主汛期的开始,其早晚也会对区域旱涝发生发展及社会经济有直接影响。

和华南前汛期、梅雨等我国东部地区雨季相比,西南地区范围广,影响因子复杂。早期对西南雨季开始日期的判断大多基于各省资料。赵恕(1965)将入春后五日滑动总雨量达到或超出当地多年平均旬雨量时,五日的最后一日定义为雨季开始日期。王恒康和王明(1982)用云南平均日雨量超过多年日平均雨量3倍作为开始日期,并同时参考之后连续5日、10日和30日降水相对强度。近年来,随着台站降水观测资料的丰富,西南雨季监测范围开始针对整个西南地区。晏红明等(2013)利用西南地区气象观测站的逐日雨量和全年逐候平均降水作比较,确定出平均雨季开始日期在5月第3候。中国气象局关于西南雨季的监测标准则首先确定区域内单站的雨季开始日期,若西南区域内

监测站点有60%达到雨季开始日期,即为西南雨季开始日期(详见中国气象局《西南雨季监测业务规定》)。

考虑到西南雨季早晚对该地区生产生活有较大影响,因此自上世纪七十年代末,我国气象工作者就开始探索雨季开始前后大气环流的变化特征及其早晚的前兆信号。沈如桂和李家垣(1979)认为印度西南季风环流建立后西南及长江流域雨季才开始。尤丽钰等(1981)指出,当印度南端季风低空急流建立、孟加拉湾西南季风爆发,随后季风经缅甸影响云南,云南雨季开始,雨季开始期的水汽来自西南季风的输送。徐国钧(1982)发现后季风期孟加拉湾气旋的活动状况与次年昆明雨季开始日期有密切关系。但王恒康和王明(1982)认为大多数年份早在印度西南季风爆发之前云南雨季已经开始。云南雨季早晚主要受副热带季风或来自澳大利亚的越赤道偏南季风影响。后者推进到云南早,云南雨季就开始早,反之亦然。此外,刘瑜(2000)发现在对流层高层南亚高压及中层中亚位势高度变化也和云南雨季有密切关系。晏红明等(2013)研究表明,西南雨季爆发日介于孟加拉湾夏季风爆发和南海夏季风爆发之间,雨季的变化可能更主要受孟加拉湾季风影响。

从上述研究可以看出,热带西南季风系统对西南雨季有重要影响,但作为西南季风系统最主要成员之一的索马里越赤道气流,其对雨季的影响之前却较少提及。研究表明,在北半球夏季,索马里急流附近的扰动能量可沿大圆路径向东北方向传播,将扰动能量频散到东亚地区,进而影响我国降水尤其是我国南方降水的分布(王会军和薛峰, 2003; 汪卫平和杨修群, 2008; 邱金晶和孙照渤, 2013)。除降水本身外,索马里越赤道气流也是南半球影响亚洲夏季风和东亚天气气候的纽带(李崇银和吴静波, 2002; Xue et al., 2003; 薛峰, 2005; 薛峰和何卷雄, 2005; 范可, 2006; 范可和王会军, 2006a,

2006b, 2006c, 2007; 孙建奇等, 2008; 明静等, 2015), 且索马里急流建立时间早, 中心强度也强于其它几支越赤道气流(高辉, 2004)。赤道印度洋西风和印缅季风槽前西南气流可追溯到索马里越赤道气流进入北半球后转向所致的西风分量。那么索马里越赤道气流是否会对西南雨季开始早晚产生超前影响。这一影响若存在, 可否为该地区雨季的气候监测预测业务提供可用信息? 这是本文工作的出发点。

2 资料简介

文中所用逐日降水资料时段为 1981~2014 年, 取自中国气象局国家气象信息中心发布的《中国国家地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》(任芝花等, 2012)。该数据集集中解决基础气象资料质量和国家级、省级存档资料不一致的问题, 数据质量和空间分辨率(测站数)比之前观测降水资料均有明显提高, 已在业务和科研中得到广泛应用。同时段逐年西南雨季开始日期监测序列由国家气候中心提供。大气环流资料为 NCEP/NCAR 逐日再分析资料集中的 500 hPa 位势高度场和 850 hPa 水平风场。该资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)。为滤去高频天气尺度扰动, 文中将逐日资料处理成逐候资料。

图 1 红色点表示中国气象局西南雨季监测业务标准中所用站点分布, 蓝色虚框包围站点为晏红明等(2013)研究所使用监测区域。二者重合站点主要位于云南、四川和贵州西部等地。统计表明, 两个监测区域在 5 月 1 日至 6 月 30 日间逐日平均降水的三十年线性相关系数值基本稳定在 0.8 左右, 最低值也超过 0.53, 通过 99.9% 信度检验, 表明二者具有非常一致的变化特征。考虑到业务应用实际, 本文采用中国气象局发布的西南雨季监测指标。

在中国气象局西南雨季监测业务标准中, 计算某站自 4 月 21 日起任意 5 日滑动累计雨量与 5~10 月候雨量气候平均的比值, 在该比值大于等于 1 的 5 日之中雨量最大的一日确定为雨季开始待定日, 在之后的 15 日内又出现该比值大于等于 1 的情况, 即将雨季开始待定日确定为雨季开始日, 雨季开始日所在的候为雨季开始候; 但若在之后的 15 日之内再未出现该比值大于等于 1 的情况, 则重复前一步骤, 重新确定雨季开始待定日和雨季开始日。

3 西南雨季开始日期的气候特征

就气候平均而言, 西南雨季一般于 5 月中下旬开始。王恒康和王明(1982)基于云南省 1954~1979 年降水资料得出该省雨季平均开始日期为 5 月 22 日。刘瑜(2000)得出相同结论。晏红明等(2013)基于最新资料确定西南雨季平均开始日期为 5 月第 3 候。这种差异主要和各自研究区域的不同有关。例如, 贵州雨季来临时间要早于云南(赵恕, 1965)。从国家气候中心监测的 1981~2014 年逐年西南雨季开始日期(图 2)看, 平均时间为 5 月 19 日(5 月第 4 候), 略晚于晏红明等(2013)给出的日期。从图 2 还可以发现, 西南雨季开始日期在 2000 年前后有从偏晚向偏早转变的趋势。在 1981~2000 年的 20 年中, 偏晚年份有 12 年, 占全部年份的 60%, 其中有 6 年(30%)明显偏晚(雨季开始日期标准化值超过 1)。但在 2001~2014 年间, 偏晚年份只有 4 年(29%), 其中仅 2 年异常偏晚(14%)。下文中以雨季开始日期大于(小于)平均日期 1 个标准差作为异常的判断标准, 则雨季开始日期偏早的年份共有 8 年, 分别为 1985、1988、1989、1993、1999、2003、2010 和 2011 年; 偏晚的年份也有 8 年, 分别为 1982、1983、1987、1991、1994、1997、2005 和 2014 年。

4 索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚的影响

4.1 月尺度越赤道气流强度与雨季早晚和雨量关系

西南雨季开始前, 中低层大气环流有非常明显的季节性演变特征。图 3 给出了气候平均的 5 月 1~4 候 850 hPa 风场和 500 hPa 位势高度。在 5 月第 1 候和第 2 候(图 3a、b), 索马里越赤道气流已经建立, 但由于非洲高压东段位于阿拉伯半岛上空, 其东南侧的热带印度洋 5°N 以北地区上空仍为东风所控制, 源自索马里越赤道气流的西南水汽输送通道没有建立。索马里以东的其它几支越道气流处南风风量很弱。5 月第 3 候(图 3c)开始, 环流有了明显的变化。阿拉伯半岛上空的非洲高压北跳, 索马里越赤道气流同时加强, 整个热带印度洋上空均为西风风量, 进入东亚和南亚的西南水汽输送明显增强。水汽追踪可以看出, 进入我国西南地区的水汽主要为索马里越赤道气流进入北半球转向后经印度洋和孟加拉湾输送所致。5 月第 4 候(图 3d),

无论是索马里越赤道气流还是其它几支越赤道气流强度均增强，使热带印度洋和孟加拉湾上空西南水汽输送通道完全建立并输送至西南地区。因此，就气候平均而言，索马里越赤道气流对西南雨季的

开始有重要触发作用。

图 4a 给出了西南雨季开始日期与 5 月大气环流的相关场。可以看出，在对流层低层风场上，最显著的相关区位于源自索马里越赤道气流沿赤道

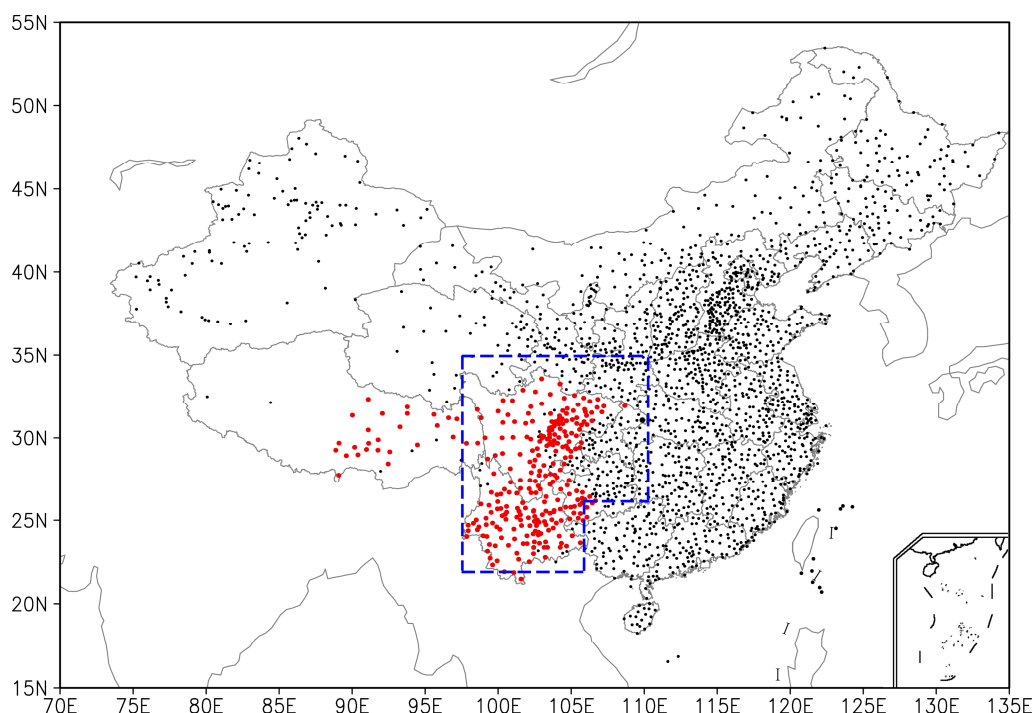


图 1 我国两千多气象台站位置分布图。红色点为中国气象局西南雨季监测业务标准规定所用站点分布，蓝色虚框为晏红明等（2013）研究所使用监测区域

Fig. 1 Geographic location of meteorological stations in China. The red dots indicate the stations that follow the Monitoring Standard of Rainy Season in Southwest China by CMA (China Meteorological Administration), and stations enclosed in the blue dashed box indicate those used by Yan et al. (2013)

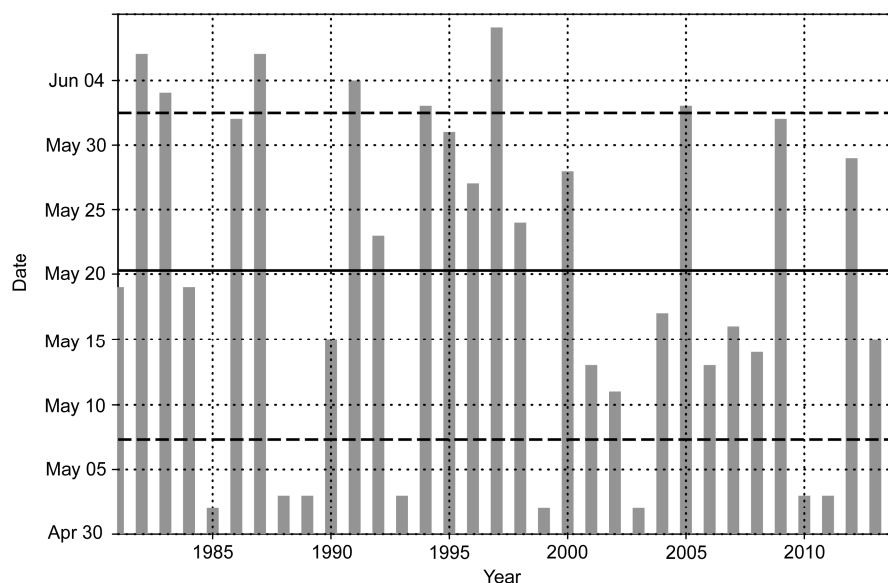


图 2 1981~2014 年西南雨季开始日期（直方图）及平均日期（实线）和距离平均日期的一个标准差（两条水平虚线）

Fig. 2 Onset dates of rainy season in Southwest China from 1981 to 2014 (histogram) and the climatological mean (the thick solid line). The two thick dashed lines indicate one-standard deviation of the beginning date

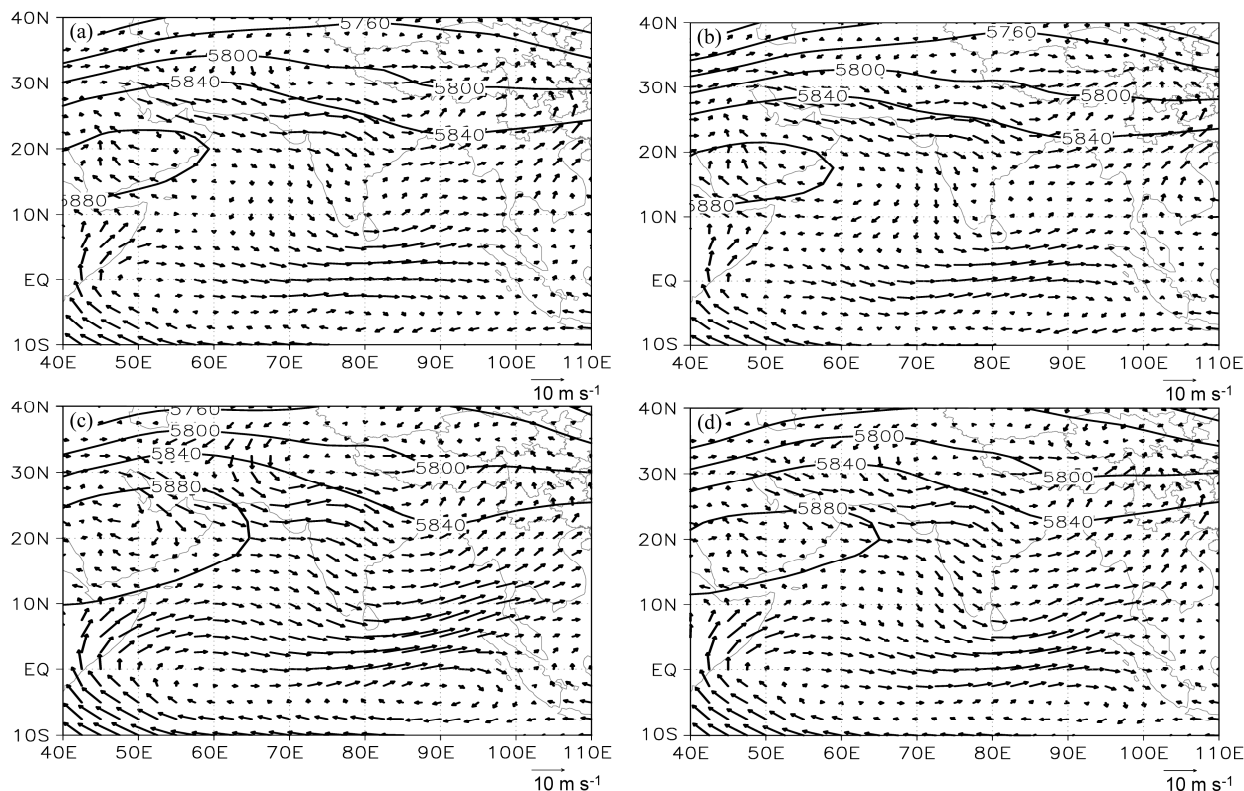


图3 气候平均的5月1~4候(分别对应a~d)850 hPa 风场(箭头, 单位: m s^{-1})和500 hPa 位势高度(等值线, 单位: gpm)

Fig. 3 Climatological 850-hPa horizontal winds (arrows, units: m s^{-1}) and 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm) (a~d) from the 1st to 4th pentad of May

印度洋北侧并经孟加拉湾直至我国西南地区的水汽输送通道, 具体表现为沿赤道 $40^{\circ}\text{E}\sim 60^{\circ}\text{E}$ 区域为显著负相关。由于5月索马里越赤道气流已经建立, 且中心强度可达 8 m s^{-1} , 这一负相关表明索马里急流强对应于西南雨季开始早, 反之偏晚。和索马里急流区负相关相对应, 在北半球赤道印度洋上空即 ($5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{E}$) 区域亦为显著负相关, 而这一区域在5月主要盛行西风, 即索马里急流穿越赤道后受柯氏力作用在赤道以北转向所致。由于赤道印度洋西风在 $90^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 附近即孟加拉湾转为西南气流, 通过缅甸直达我国西南地区, 因此在图 4a 的相关场上该地区也为显著相关区。从该图还可以看出, 在孟加拉湾越赤道气流通道偏西处 (80°E 附近) 也为负相关, 这和之前研究工作认为孟加拉湾越赤道气流对西南雨季有影响的结论一致, 但相关强度要明显弱于雨季日期和索马里越赤道气流的相关。此外, 索马里和孟加拉湾北侧各有一显著正相关区, 中心位置分别与850 hPa上索马里越赤道气流由偏南风转为偏西风的最大

变率处及孟加拉湾西风转为西南风的最大变率处相对应。这表明两支越赤道气流会导致印度—孟加拉湾地区的季风槽活跃, 触发了雨季的开始。

与图 4a 相关型相反, 在西南5月降水量与同期风场和高度场相关图上(图 4b), 可以清楚看出索马里越赤道气流偏强后导致赤道印度洋和孟加拉湾西南水汽输送偏强并输送至我国西南上空。由于多年平均的南海夏季风爆发日期为5月中下旬, 就气候平均而言, 我国北方尤其是长江以北地区的偏北风依然维持(图略), 在西南北部仍为北风分量相关场。因此, 强的索马里越赤道气流易使冷暖气流在西南地区交汇, 促使西南降水增多, 雨季提早。

前面分析指出, 西南雨季的开始日期在21世纪有明显偏早的趋势, 为分析这一年代际变化是否也和索马里越赤道气流有关, 我们合成了1981~1999年和2000~2014年两个时段的850 hPa经向风差值(图略), 考虑到西南雨季的开始时间主要集中在5月, 因此经向风合成时间也是5月。从合

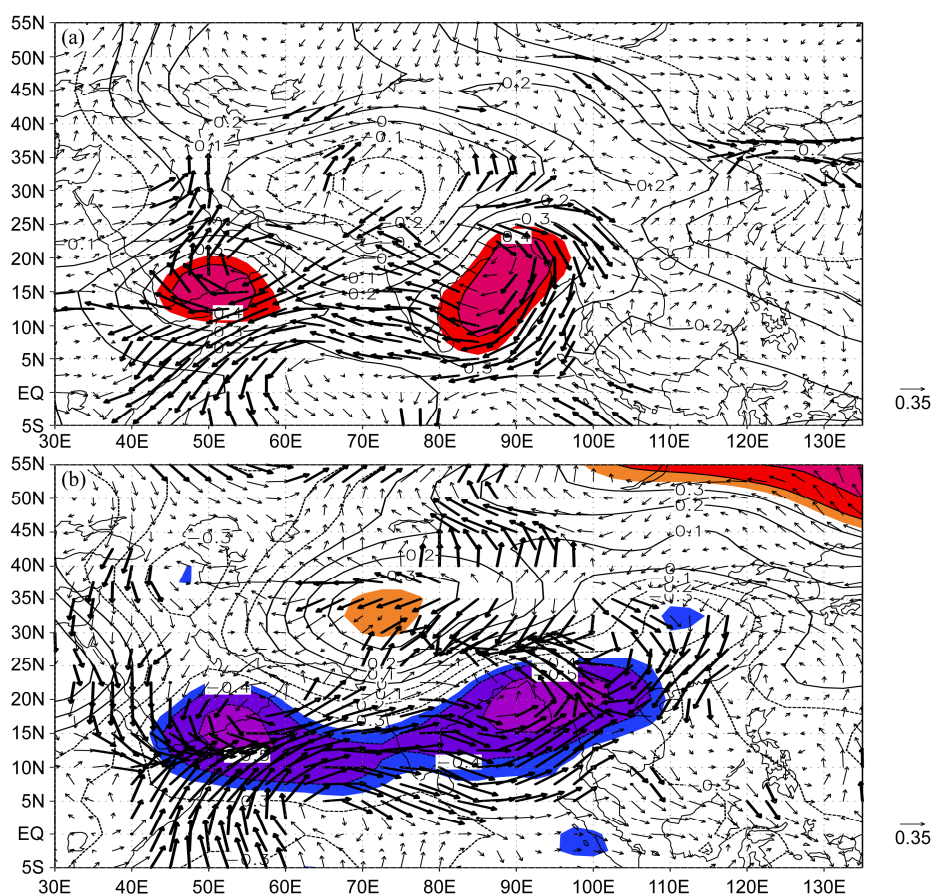


图 4 (a) 西南雨季开始日期和 (b) 西南 301 站 5 月降水量分别与 5 月 850 hPa 风场 (箭头, 其中粗箭头通过 95% 置信度) 和 500 hPa 位势高度 (等值线和阴影, 其中阴影区通过 95% 信度检验) 相关系数的空间分布

Fig. 4 Correlation coefficients between (a) the onset date of rainy season and (b) precipitation in May in Southwest China with 850-hPa horizontal winds (arrows, thick arrows are for values that pass the 95% confidence level) and the 500-hPa geopotential height (contours, shaded areas indicate the values pass the 95% confidence level) in May

成结果可以看出在这两个时段索马里越赤道气流的强度确实存在年代际变化, 且在后一个时段增强明显, 差值中心强度超过 2 m s^{-1} , 是东半球几支越赤道气流年代际变化最明显的一支, 而在其它几支越赤道气流通道处, 经向风速年代际变化很小。因此, 从年代际时间尺度而言, 索马里越赤道气流对西南雨季开始早晚亦有明显影响。

4.2 索马里越赤道气流对西南雨季的超前影响

为分析索马里越赤道气流对西南雨季开始的触发影响, 此处用越赤道气流中心点经向风速对西南逐日降水作超前相关 (图 5a)。可见索马里急流对西南降水有明显的超前影响, 且在约 8 日前二者相关达到 95% 信度标准, 此后相关不断增强, 并在 5~6 日达到最大值。同样计算其它几支东半球低层越赤道气流通道中心经向风速和降水的关系 (图

略), 均明显弱于图 5a 中所揭示的关系, 这和图 4a 的结果一致。受索马里急流作用, 赤道印度洋西风与降水的关系在约 7 日前转为正相关 (图 5b), 并不断增强西传, 并在超前 4 日时达到 95% 信度标准。这一方面表明在西南雨季开始过程中, 孟加拉湾上空西风起着至关重要的作用, 另一方面其强度异常也受到索马里越赤道气流的影响。

进一步给出同期及分别超前 2、4、6 日的沿赤道经向风和 ($10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$) 平均 850 hPa 纬向风对西南 5 月逐日降水的超前相关以验证图 5 的结果。前已指出, 夏季东半球低层主要有五支自南向北的越赤道气流, 分别在索马里、孟加拉湾 (中心约在 85°E)、南海 (中心约在 105°E)、西太平洋 (中心位于 125°E) 及巴布亚新几内亚 (中心约在 150°E 处) 附近。但在图 6 中 (左列) 可以看到, 显著影

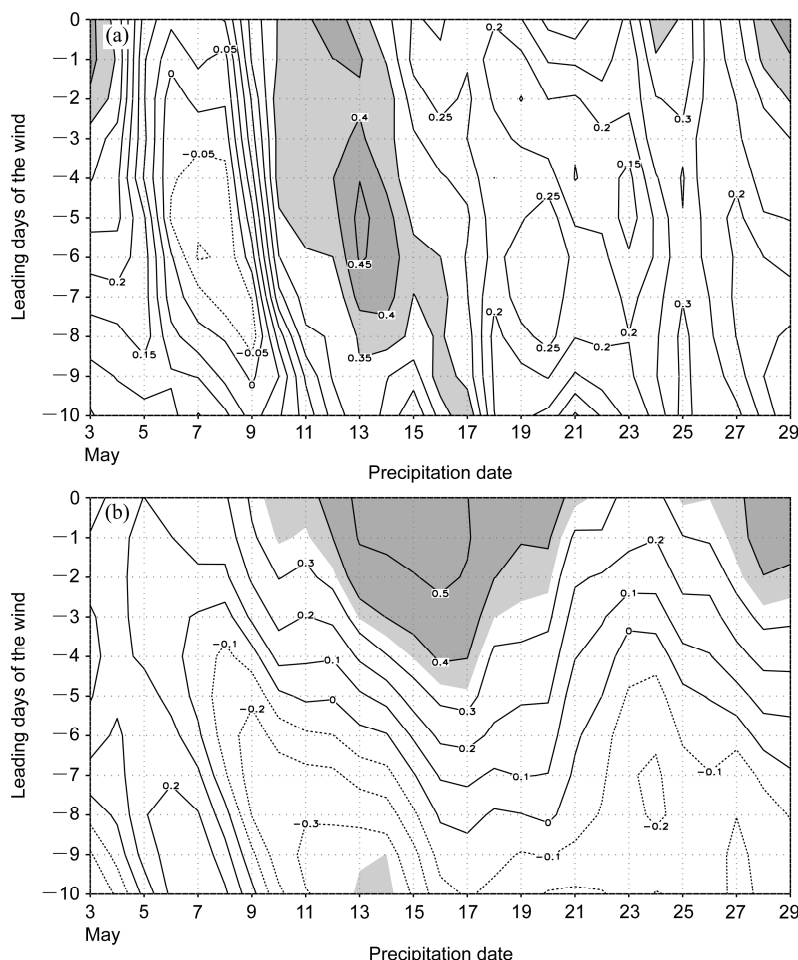


图5 索马里越赤道气流中心点(a) 850 hPa 经向风速和(b) (10°N~15°N, 80°E~90°E) 850 hPa 纬向风速对西南301站降水的超前相关。降水和风速资料均作5天平滑处理。横坐标为降水时间, 纵坐标为越赤道气流或赤道印度洋纬向风超前时段, 其中0为同期, -10至-1分别表示超前10至1日。阴影区通过95%信度检验

Fig. 5 Correlation coefficients of precipitation in Southwest China with (a) the 850-hPa horizontal wind speed at the center of Somalia cross-equator flow and (b) 850-hPa zonal wind speed averaged over (10°N~15°N, 80°E~90°E) respectively. All the data are smoothed by a 5-day running average. The dates in the abscissa are the precipitation time, and the numbers in the ordinate are the leading days of the wind. Here “0” means the same period, “-10” means the leading time is 10 days, and so on. The shaded areas indicate the correlation passes the test at 95% confidence level

响西南降水量的水汽通道仅有两支, 分别是索马里和孟加拉湾越赤道气流。相比于后者, 索马里越赤道气流对西南降水的影响更强、超前时间更早, 其影响可以追溯至5月初, 并在5月中旬开始影响最为显著, 而位于80°E~90°E的孟加拉湾越赤道气流影响时段在5月中旬, 但无论是和降水量的相关强度还是影响时间都弱于索马里急流。而在其它三支越赤道气流处, 看不到显著的相关区。同图5b类似, 低层纬向风与降水和雨季时间的显著超前相关也基本发生于5月中下旬, 且集中于50°E~100°E区域。和经向风相比, 纬向风的超前影响有数日的滞后。

这也确实表明影响雨季开始的印度洋—孟加拉湾西风受到上游索马里和孟加拉湾越赤道气流的影响。

为更清楚看出西南雨季开始前低层越赤道气流和北半球低纬纬向风的日变化, 合成了雨季开始前十日逐日沿赤道经向风速(2.5°S~2.5°N平均)和10°N~15°N平均纬向风速的日较差(即后一日与前一日差值)如图7所示。这里设第*i*年西南雨季开始日期为 day(*i*)日, 其前一日为 day(*i*)-1日, *i* 为 1981~2014 年, 则经向风日变化定义为

$$\Delta v = \sum_{i=1981}^{2014} (v_{\text{day}(i)} - v_{\text{day}(i)-1}) / 34, \text{ 纬向风定义类似。可}$$

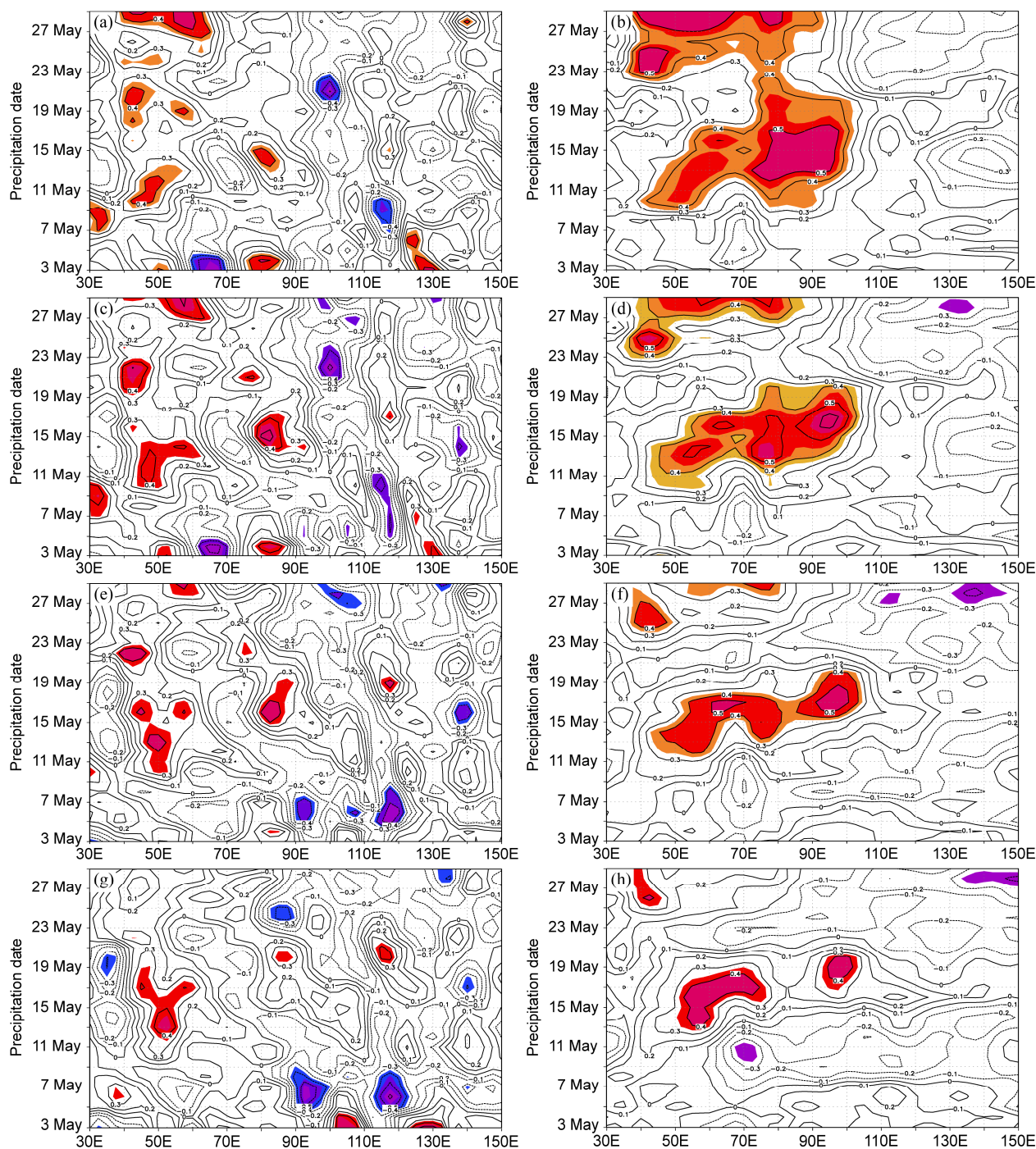


图6 850 hPa 沿赤道经向风速(左列)和(10°N~15°N)平均850 hPa 纬向风速(右列)对西南5月逐日降水的超前相关:(a、b)同期相关;(c、d)超前2日;(e、f)超前4日;(g、h)超前6日。阴影区通过95%信度检验

Fig. 6 Leading correlations of precipitation in May in Southwest China with 850-hPa meridional wind speed along the equator (left column) and with 850-hPa zonal wind speed averaged over 10°N–15°N (right column). (a, b) The same time; (c, d) the leading time of the wind is 2 days; (e, f) the leading time is 4 days; (g, h) the leading time is 6 days. Shaded areas indicate the correlation pass the test at 95% confidence level.

见在索马里和孟加拉湾地区的经向风在雨季爆发前10日均为正的日较差(图7a),即经向风持续增强,且均在雨季平均开始8日前日增强幅度超过 0.5 m s^{-1} 。但索马里急流超过 1 m s^{-1} 的增强要早于孟加

拉湾。相比于这两支越赤道气流,其它三支(105°E、125°E及150°E附近)无论是季内增强时间还是强度都明显偏弱,这也进一步表明索马里和孟加拉湾越赤道气流对西南雨季的触发作用。这两支气流季

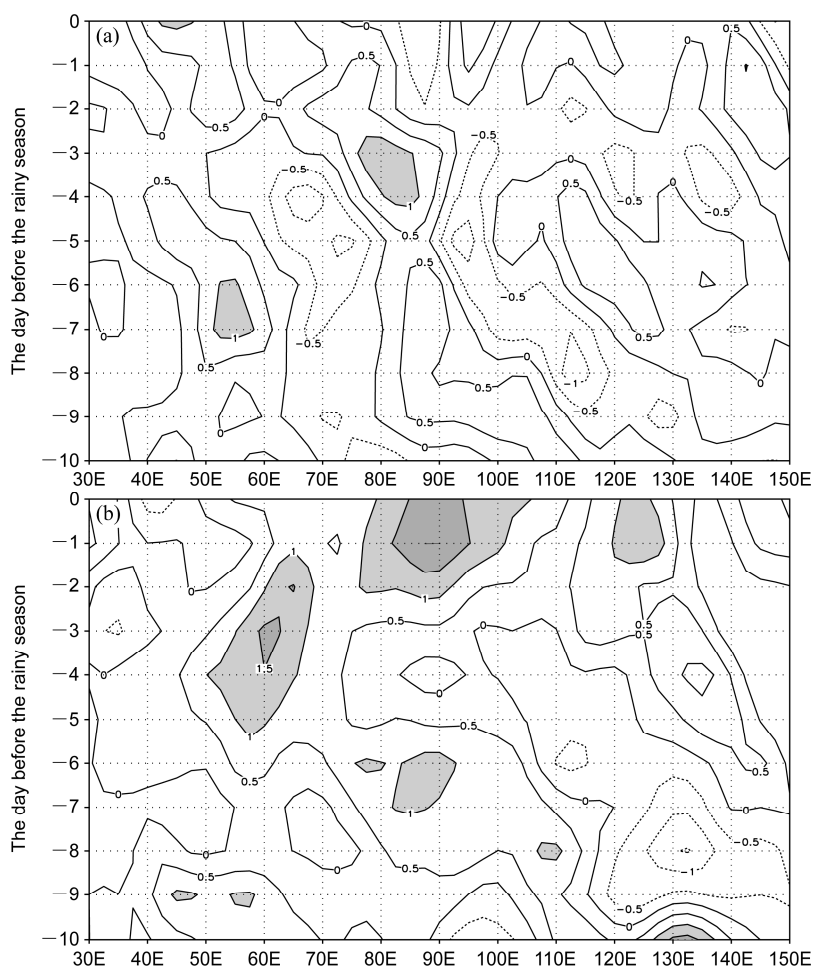


图7 西南雨季开始前 850 hPa 风速日变化 (后一日与前一日差值, 单位: m s^{-1}): (a) 沿赤道经向风速 ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$ 平均); (b) ($10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$) 平均纬向风速。纵坐标上数值-10 至-1 分别表示雨季开始前 10 至 1 日, 0 为同期, 阴影区风速超过 1 m s^{-1}

Fig. 7 Daily differences in 850-hPa wind speed before the onset of the rainy season in Southwest China: (a) Meridional wind speed along the equator ($2.5^{\circ}\text{S}\sim 2.5^{\circ}\text{N}$ mean); (b) zonal wind speed averaged over $10^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{N}$. The numbers in the ordinate indicate the days before the rainy season. Speeds greater than 1 m s^{-1} are shaded

内增强后的 5 日左右, 赤道印度洋西风出现季内增强, 风速的日增量也可达 1 m s^{-1} 以上 (图 7b), 并向东扩展与孟加拉湾越西南风合并, 形成稳定的水汽通道, 从而为西南雨季的爆发提供稳定充沛的水汽条件。

5 结论和讨论

本文首先基于中国气象局最新的西南雨季监测标准和高空间分辨率的台站日降水资料, 揭示出西南雨季的气候平均开始时间为 5 月第 4 候且在 2000 年前后有从偏晚向偏早转变的趋势, 这和他研究西南降水的年代际变化特征一致。统计分析结果表明, 在东半球低层的几支越赤道气流中, 只有索马里和孟加拉湾越赤道气流的强弱会影响到雨

季开始早晚和雨量大小, 且都对应于急流强降雨季早、急流弱雨季晚的特征, 但索马里越赤道气流影响更强。急流通中心经向风和热带印度洋纬向风对雨季的超前相关及逐日变率合成分析表明, 索马里经向风速在雨季爆发前 10 日开始为正的日较差, 即两候前经向风持续增强, 并在约 7 日至 5 日前作用最为显著, 从而对西南雨季起到触发作用。在这一触发过程中, 索马里急流的超前影响要早于孟加拉湾越赤道气流。受上游越赤道气流影响, 热带印度洋西风和孟加拉湾西南气流也会增强, 为西南地区提供充沛的水汽。

本文所得结论可在一定程度上为西南雨季开始日期的中期时段预报提供参考信息。例如, 根据中国气象局国家气候中心的监测, 2016 年西南雨季

于 5 月 24 日开始, 而索马里越赤道气流在 5 月中旬后期有一次明显的增强, 这和文中所得结论相符。但本文研究范围仅限于北半球中低纬度地区, 且在更长的预报时效上仍需要延长。作为对流层低层最强的越赤道气流, 索马里急流是南北半球间大气质量、水汽等的输送纽带。在冬夏季节转换过程中, 其强度深受南半球中高纬度大气环流影响, 如马斯克林高压和南极涛动。近年来, 大量的研究揭示了南半球对东亚气候异常明显的前兆作用, 并作为东亚降水和夏季风季节预测中的指示信号。来自于南半球中高纬度的大气环流是否会对西南雨季的爆发起到更早的触发作用仍需要今后进一步分析。另外, 已有的研究表明, 印度洋海温异常也会影响越赤道气流和印度洋西风, 尤其是索马里急流的强弱, 并进而对我国南方地区降水有重要作用 (杨明珠等, 2007; 曾刚等, 2011)。因此, 印度洋洋异常对西南雨季早晚和大范围旱涝的影响同样需要深入研究。

参考文献 (References)

- 丁一汇. 2008. 中国气象灾害大典 (综合卷) [M]. 北京: 气象出版社, 948pp. Ding Yihui. 2008. China's Meteorological Disasters Collection (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 948pp.
- 丁一汇. 2013. 中国气候 [M]. 北京: 科学出版社, 557pp. Ding Yihui. 2013. China's Climate (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 557pp.
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley (in Chinese) [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3): 672–679, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2006.03.009.
- 范可, 王会军. 2006a. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006a. Studies of the relationship between southern hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30 (3): 402–412, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.04.
- 范可, 王会军. 2006b. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 36 (4): 385–391. Fan Ke, Wang Huijun. 2006b. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. Sci. China Ser. D, 49 (5): 554–560, doi:10.1007/s11430-006-0554-7.
- 范可, 王会军. 2006c. 南极涛动异常与 2006 年我国东部夏季降水形势预测 [J]. 应用气象学报, 17 (3): 383–384. Fan Ke, Wang Huijun. 2006c. The AAO anomaly and prediction of summer rainfall in East China in 2006 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17 (3): 383–384, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2006.03.017.
- 范可, 王会军. 2007. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值模拟试验 [J]. 地球物理学报, 50 (2): 397–403. Fan Ke, Wang Huijun. 2007. Simulation of the AAO anomaly and its influence on the northern hemispheric circulation in boreal winter and spring [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (2): 397–403, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.02.009.
- 高辉. 2004. 南半球大气环流的季节和年际变化及其对东亚夏季风的影响 [D]. 南京气象学院博士学位论文, 1–162. Gao H. 2004. Seasonal and interannual variations of the circulations in Southern Hemisphere circulation and their influences on East Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 1–162.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (2): 247–268, doi:10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.
- 李崇银, 吴静波. 2002. 索马里跨赤道气流对南海夏季风爆发的重要作用 [J]. 大气科学, 26 (2): 185–192. Li Chongyin, Wu Jingbo. 2002. Important role of the Somalian cross-equator flow in the onset of the South China Sea summer monsoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 26 (2): 185–192, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.02.04.
- 刘瑜. 2000. 云南雨季早迟的气候特征分析 [J]. 气象, 26 (7): 45–49. Liu Yu. 2000. The climatic feature analysis of Yunnan rainy season early or late onset [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 26 (7): 45–49, doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2000.07.011.
- 明静, 孙建奇, 李国平, 等. 2015. 南半球中纬度偶极模态与亚洲—非洲夏季降水 [J]. 大气科学, 39 (2): 413–421. Ming Jing, Sun Jianqi, Li Guoping, et al. 2015. Dipole pattern in southern hemispheric mid-latitude and Asian–African summer precipitation [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 39 (2): 413–421, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14193.
- 邱金晶, 孙照渤. 2013. 夏季索马里越赤道气流垂直结构的变化特征及其与东亚夏季风活动的关系 [J]. 大气科学, 37 (5): 1129–1142. Qiu Jinjing, Sun Zhaobo. 2013. Variation characteristics of the vertical structure of the summer Somali cross-equatorial flow and its relationship with East Asia summer monsoon activity [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (5): 1129–1142, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12174.
- 任芝花, 余予, 邹凤玲, 等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测 [J]. 应用气象学报, 23 (6): 739–747. Ren Zhihua, Yu Yu, Zou Fengling, et al. 2012. Quality detection of surface historical basic meteorological data [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 23 (6): 739–747, doi:10.11898/1001-7313.20120611.
- 沈如桂, 李家垣. 1979. 印度季风环流系统对我国暴雨的贡献 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), (2): 102–129. Shen Rugui, Li Jiayuan. 1979. The contribution of Indian monsoon circulation system to the rainstorm in China [J]. J. Yunnan Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese), (2): 102–129.
- 孙建奇, 袁薇, 高玉中. 2008. 阿拉伯半岛—北太平洋型遥相关及其与亚洲夏季风的关系 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 38 (6): 750–762. Sun Jianqi, Yuan Wei, Gao Yuzhong. 2008. Arabian Peninsula–North Pacific oscillation and its association with the Asian summer monsoon [J]. Sci. China Ser. D Earth Sci., 51 (7): 1001–1012, doi:10.1007/s11430-008-0058-8.
- 王恒康, 王明. 1982. 云南雨季的开始及其季风环流特征 [J]. 云南大学

- 学报, (3): 11–24. Wang Hengkang, Wang Ming. 1982. The start of the rainy season and its monsoon circulation character in Yunnan [J]. J. Yunnan Univ. (in Chinese), (3): 11–24.
- 王会军, 薛峰. 2003. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 46 (1): 18–25, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2003.01.003.
- 汪卫平, 杨修群. 2008. 索马里急流变异及其与东亚夏季风和中国降水异常的关系 [J]. 气象科学, 28 (2): 139–146. Wang Weiping, Yang Xiuqun. 2008. Variation of Somali jet and its impact on East Asian summer monsoon and associated China rainfall anomalies [J]. Sci. Meteor. Sinica (in Chinese), 28 (2): 139–146, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.02.004.
- 徐国钧. 1982. 后季风期孟加拉气旋活动状况与次年昆明雨季开始日期的关系——西南地区雨季开始日期的一种长期预报方法 [J]. 云南大学学报, (3): 25–32. Xu Guojun. 1982. Relationship between the activity of cyclones in the Bay of Bengal in the later stage of monsoon period and the start of rainy season in next year—A long term forecast method of the start of rainy season in Southwest China [J]. J. Yunnan Univ. (in Chinese), (3): 25–32.
- 徐裕华. 1991. 西南气候 [M]. 北京: 气象出版社, 298pp. Xu Yuhua. 1991. Climate of Southwest China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 298pp.
- Xue Feng, Guo Pinwen, Yu Zhihao. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic sea-ice on summer rainfall in eastern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (1): 97–102, doi:10.1007/BF03342053.
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. Climatic Environ. Res. (in Chinese), 10 (3): 401–408, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2005.03.013.
- 薛峰, 何卷雄. 2005. 南半球环流变化对西太平洋副高东西振荡的影响 [J]. 科学通报, 50 (15): 1660–1662. Xue Feng, He Juanxiong. 2005. Influence of the southern hemispheric circulation on East–West oscillation of the western Pacific subtropical high [J]. Chinese Sci. Bull., 50 (14): 1532–1536, doi:10.1360/982005-536.
- 晏红明, 李清泉, 孙丞虎, 等. 2013. 中国西南区域雨季开始和结束日期划分标准的研究 [J]. 大气科学, 37 (5): 1111–1128. Yan Hongming, Li Qingquan, Sun Chenghu, et al. 2013. Criterion for determining the onset and end of the rainy season in Southwest China [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (5): 1111–1128, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12118.
- 杨明珠, 丁一汇, 李维京, 等. 2007. 印度洋海面温度主模态及其与亚洲夏季季风的关系 [J]. 气象学报, 65 (4): 527–536. Yang Mingzhu, Ding Yihui, Li Weijing, et al. 2007. Leading mode of Indian ocean SST and its impacts on Asian summer monsoon [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (4): 527–536, doi:10.11676/qxxb2007.049.
- 尤丽钰, 霍义强, 陈隆勋. 1981. 云南雨季开始和大气环流季节变化的关系 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), (1): 94–110. You Liyu, Huo Yiqiang, Chen Longxun. 1981. Relationship between the start of rainy season in Yunnan and the seasonal changes of atmospheric circulation [J]. J. Yunnan Univ. (Nat. Sci.) (in Chinese), (1): 94–110.
- 曾刚, 孙照渤, 邓伟涛, 等. 2011. 不同海域 SSTA 对东半球越赤道气流年代际变化影响的数值模拟研究 [J]. 热带气象学报, 27 (5): 609–618. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Deng Weitao, et al. 2011. Numerical simulation of SSTA impacts upon the interdecadal variation of the cross-equator flows in Eastern Hemisphere [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 27 (5): 609–618, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.05.001.
- 赵恕. 1965. 季风与贵州的雨季 [J]. 气象学报, 35 (1): 96–106. Zhao Shu. 1965. Monsoons and rainy season in Kweichow [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 35 (1): 96–106, doi:10.11676/qxxb1965.010.