

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12118. 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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1111–1128.

中国西南区域雨季开始和结束日期 划分标准的研究

晏红明¹ 李清泉² 孙丞虎² 袁媛² 李多²

¹ 云南省气候中心, 昆明 650034

² 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 为了更好地开展区域关键期气候监测业务, 满足国家级气象服务的需求, 本文从区域角度出发, 利用 1961~2011 年西南地区 92 个气象观测站的逐日雨量资料和 1981~2010 年美国国家环境预报中心和国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 逐日的高低层大气环流再分析资料, 研究了西南区域雨季开始和结束日期定义的标准问题。结果表明西南区域多年平均雨季开始日期在 5 月 3 候 (27 候), 结束日期在 10 月 3 候 (57 候), 季节转换期间高低层环流的突变特征进一步表明了该结论的合理性。并通过对多种雨季开始和结束日期判断标准的对比分析, 最终提出了西南雨季开始和结束日期的划分标准。同时, 对影响西南地区雨季开始和结束日期变化的机理也进行了初步的讨论。

关键词 西南雨季 划分标准 候雨量 大气环流季节转换

文章编号 1006-9895(2013)05-1111-18

中图分类号 P46

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12118

Criterion for Determining the Onset and End of the Rainy Season in Southwest China

YAN Hongming¹, LI Qingquan², SUN Chenghu², YUAN Yuan², and LI Duo²

¹ Yunnan Climate Center, Kunming 650034

² National Climate Center, Beijing 100081

Abstract In order to improve climate monitoring during key periods and meet the needs of meteorological services, a criterion for determination of the onset and end of the rainy season in Southwest China is investigated based on daily rainfall data from 92 stations in Southwest China during 1961–2011 and daily atmospheric circulation reanalysis data from NCEP/NCAR for 1981–2010. The results indicate that, for the mean climate, the rainy season in Southwest China begins in the third pentad in May (pentad 27) and ends in the fourth pentad in October (pentad 57). Variations in atmospheric circulation confirm the above result. Moreover, a criterion for determination of the annual onset and end of the rainy season in Southwest China is proposed based on the results of comparative analysis of different definitions and the seasonally changing characteristics of atmospheric circulation. Simultaneously, possible mechanisms influencing the onset and end of the rainy season are also discussed preliminarily.

Keywords Rainy season in Southwest China, Determination criterion, Pentad rainfall, Seasonal change of atmospheric circulation

收稿日期 2012-08-16, 2013-02-03 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金地区科学基金项目 41065004, 国家自然科学基金委—云南联合基金项目 U0833602

作者简介 晏红明, 女, 1966 年出生, 博士, 研究员, 主要从事季风气候研究。E-mail: y-hm@netease.com

1 引言

雨季开始和结束日期的监测是气象服务的重要内容,对于农作物栽种安排和政府决策等均有十分重要的实际意义。但由于东亚区域地形及大气环流系统影响的复杂性,不同区域的降水在空间分布和时间变化上的差异都十分明显(王遵娅等, 2004; 王英等, 2006; Li et al., 2002),例如西南雨季、江南春雨、华南前汛期、梅雨、华北雨季、华西秋雨等天气气候现象都表明了中国不同区域降水变化的独特性和复杂性。因此,怎样来确定不同地区特殊的天气气候现象起讫日期一直是气象服务和气象研究关注的重点。目前比较多的工作主要集中在华南前汛期及梅雨的开始和结束日期标准的讨论(郑彬等, 2006; 丁一汇等, 2007; 强学民和杨修群, 2008; 梁萍等, 2010),而对其他区域雨季起讫日期定义标准的研究还比较少。

降水量变化是表征干湿季节最直接和最重要的指标,目前有关汛期划分标准的大部分工作也主要根据降水量的变化来确定。林之光(1985)以旬降水量超过全年降水量的 3%来定义雨季开始日期;张家诚(1991)以旬雨量与年平均雨量相比的百分率在 4% 以上为进入雨季的标准;郭其蕴和王继琴(1981)以候雨量大于 25 mm 作为华南雨季开始标准。另外,覃武等(1994)从区域角度定义了华南前汛期标准,规定从 4 月 1 日起华南地区 10 个站中有 7 站以上候雨量 ≥ 25 mm 或 10 站候总雨量 ≥ 350 mm,且同时有 5 站以上候雨量 ≥ 25 mm,则取该候为待定的雨季开始候,然后考察紧接该候之后连续 4 候平均降水的情况,当后面 4 候的平均候总雨量 ≥ 30 mm 时,即把待定雨季开始候作为当年华南前汛期雨季开始候。另外,由于华南前汛期、梅雨和华北雨季的起讫日期与西太平洋副热带高压的季节性进退密切联系,一些研究在确定雨季起讫日期时还参考了西太平洋副热带高压脊线位置的变化。梁萍等(2010)通过连续滑动候雨日覆盖率与西太平洋副热带高压的位置来确定梅雨开始日期。以上标准主要针对华南前汛期和梅雨,在目前的有关业务中起到了很好的作用。

中国西南地区位于青藏高原向东延伸的部分,具有纬度偏低、地形复杂、季风气候显著等特点,是西南夏季风输送水汽进入我国影响夏季降水的门户区域。因此,西南区域雨季开始和结束日期的确

定不仅对西南地区的气象服务工作,对我国大范围汛期降水的短期气候预测和监测业务都具有十分重要的意义。而有关西南地区的雨季开始和结束日期的确定,目前还没有规范统一的标准,相关的研究也比较少,西南区域内各个省的标准不尽相同。另外,西南地区的雨季与华南前汛期降水、梅雨和华北雨季等不同,华南前汛期开始于南海季风爆发之前,并非完全属于季风降水(池艳珍等, 2005; 郑彬等, 2006),而梅雨及华北雨季与西太平洋副热带高压的向北推进和撤退密切联系,与东亚副热带季风的变化有关,属于季风降水(吴志伟等, 2006)。西南地区受季风影响显著,有明显的干湿季节之分,一般 5~10 月为湿季,该时段内降水集中,大部分地区的雨量占年降水总量的 85%以上,汛期降水主要受西南季风和东亚季风的交替影响,大部分地区的降水属于季风降水(程建刚等, 2009)。但由于西南地区的雨季与西太平洋副热带高压等大尺度系统的季节性变化关系不密切,且西南大部地区一年四季基本受西南风控制,风向的季节性变化特征不明显。如果类似于梅雨和华北雨季,参考西太平洋副热带高压等大尺度环流系统的季节演变特征来确定雨季开始和结束日期就显得比较困难。另外,由于西南地区的地形比较复杂,降水变化的区域差异明显,西南季风的建立并不一定会同时带来西南区域大范围的强降水,导致西南地区雨季开始。根据目前云南省气象局业务监测标准,一些研究表明云南雨季开始日期最早可出现于 4 月下旬,最晚可到 6 月底,早晚相差可达两个月(刘瑜, 2000)。因此,怎样合理地确定西南区域雨季开始和结束的划分标准是值得进一步探讨的问题。

雨季开始和结束与大气环流的季节转换相联系,因此用候作为划定标准的时间单位最为合适(强学民等, 2008)。本文利用 1961~2011 年西南地区 92 个站逐日降水观测资料,1961~2010 年 NCEP/NCAR 逐日高低层大气环流资料。在分析不同时间尺度西南地区降水变化特征和季节转换期高低层大气环流变化特征的基础上,从区域角度出发,以候作为时间单位提出西南区域雨季开始和结束日期划分标准的思路、方法和指标,然后通过对多年雨季开始和结束日期的对比试验分析进一步考察所确定标准的合理性。

希望本文所提出的西南区域雨季起讫日期指

标能对西南区域汛期的气候预测和监测业务，以及气象服务工作起到一定的参考作用，同时也有助于西南区域内不同省、市各自雨季标准的进一步完善和统一。本文所提到的多年平均均指 1981~2010 年的 30 年气候平均，候雨量是指一个候的累积降水量。

2 西南区域站点的选择

西南是指中国南部偏西的地区，本文根据行政区划选取的西南区域包括四川、贵州、云南和重庆三省一市，其范围大致介于 $21^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 和 $97^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 之间。西南区域境内地形复杂，地势起伏较大，北回归线穿过云南南部，气候类型多种多样。根据目前所具有资料的完整性和连续性，本文在中国 743 站观测资料中选取西南区域 92 个观测站点，所选取的站点分布如图 1 所示。站点的地理分布比较均匀，基本可以代表西南不同区域的降水变化。图中实线框包围的区域为选取的西南区域，即区域 1 ($25^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 和区域 2 ($21^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 106^{\circ}\text{E}$)。

3 西南地区降水的分布和演变特征

在确定西南雨季开始和结束日期之前，有必要首先分析季节转换期间西南地区降水的变化和分布特征。以下主要分析 1981~2010 年多年气候平均的季节、月、候等不同时间尺度降水的分布和变化特征。

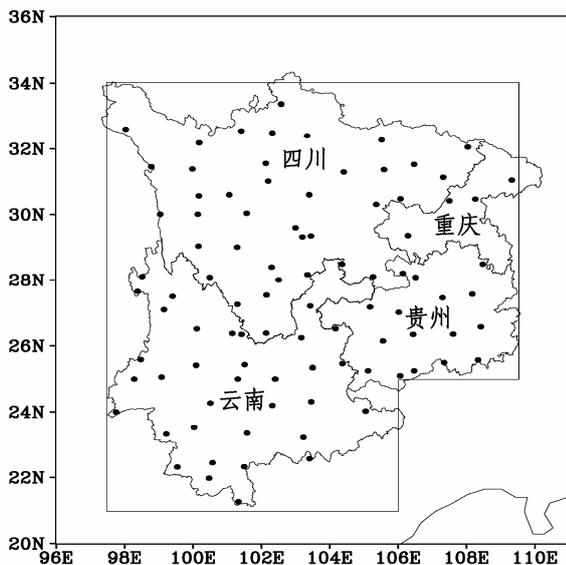


图 1 中国西南区域的站点分布

Fig. 1 Location of stations in Southwest China

3.1 降水分布特征

图 2 分别为冬季风向夏季风转换期间 4~6 月西南地区逐月降水的气候分布，可以看到西南地区降水变化的区域差异比较明显。4 月云南西北边缘地区和贵州东部月降水偏多比较突出，超过 100 mm，而西南其他大部分地区的降水比较小，特别是川滇之间仅有不足 20 mm 的降水；5 月月降水超过 100 mm 的范围扩大，主要集中在贵州、重庆、四川东部、云南南部和西部边缘地区，而四川西部和南部、云南北部的降水仍然较小；6 月西南区域降水明显加强，除云南西北少部分地区外，其他地区的月降水量均超过 100 mm，其中贵州东部和南部、云南南部的降水超过 200 mm。4~6 月总降水量最大值区位于贵州南部和云南南部，超过 500 mm。

从 4~6 月西南地区月降水量的变化来看，降水量的增加首先出现在贵州东部，然后逐渐向西扩展，这一特征在一定程度上可能反映了西南地区雨季开始逐渐向西推进的过程，表明西南地区的雨季有可能首先从东部开始，然后逐渐向西部地区推进。但我们也看到，降水量首先增加的区域除了贵州东部外，云南西北边缘地区的降水在 4 月份也出现了明显增加，而这一区域降水变化的局地性比较明显，从 4 月至 6 月，云南西北部地区降水较大的区域仅局限在同一范围，降水受地形的影响比较明显。

9~11 月是夏季风向冬季风转换的关键期，从整体来看西南地区降水首先明显减少（低于 100 mm）的区域出现在贵州中东部和云南东南部（图 3a），然后逐渐向西扩展，10 月除重庆东部、贵州东北部和云南西南部的月降水量仍然超过 100 mm 外，其余地区的降水已明显减弱（图 3b），11 月西南全区域降水明显减少至低于 100 mm，其中四川西部和云南西北部的降水不足 20 mm（图 3c）。值得注意的是，尽管贵州东部是降水最早开始减弱的地区，而之后的 10~11 月该区域的降水与其他地区相比并不少，9~11 月总降水量分布也反映了贵州东部是 9~11 月降水相对较多的区域，总降水量超过 200 mm（图 3d）。

尽管西南地区不同区域降水变化的季节差异比较大，但季节转换期间全区域降水变化的一致性特征却比较明显。图 4 分别为 1961~2011 年 4~6 月和 9~11 月候降水的经验正交函数（EOF）展开第一模态（EOF1），可以看到占方差贡献在 25%以

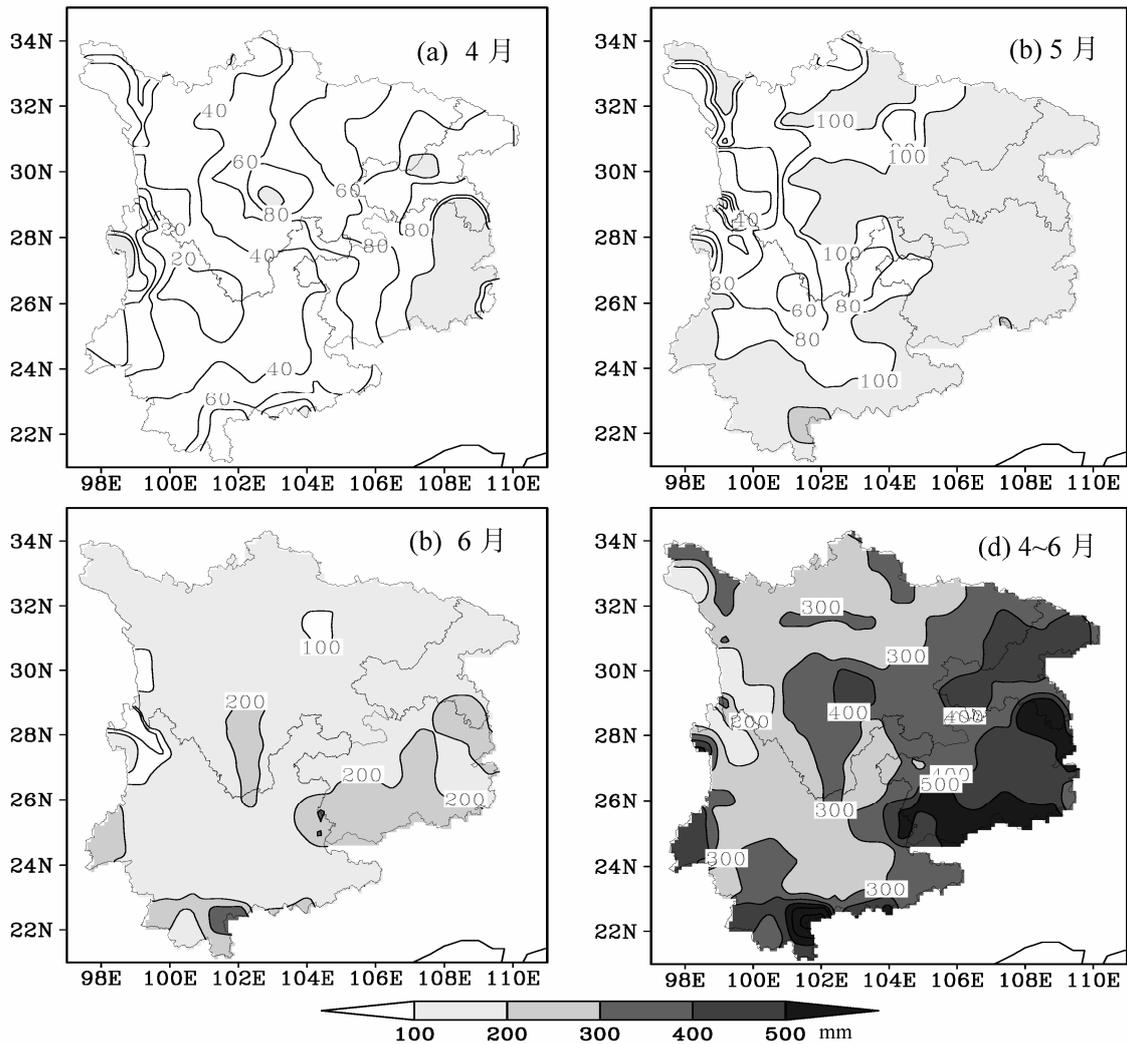


图2 (a) 4月、(b) 5月、(c) 6月和 (d) 4~6月多年气候平均降水分布 (单位: mm)

Fig. 2 Distributions of climate mean precipitations in (a) April, (b) May, (c) June, and (d) April-June respectively (unit: mm)

上的第一模态均反映了西南全区域降水一致的变化特征, 其中第一模态方差贡献的大值区主要位于四川南部至云南区域。EOF1 表明了从区域角度来研究西南地区雨季开始和结束日期的划分标准在一定程度上是合理的。

3.2 候雨量演变特征

划分雨季起止日期时, 首先需要对雨季开始或结束的雨量标准进行分析和界定。在目前有关雨季开始期标准中多用日雨量和候雨量的变化来定义 (强学民和杨修群, 2008; 梁萍等, 2010)。根据强学民等 (2008) 的分析, 候雨量在很大程度上可以反映降水变化的季节特征, 用候作为划定标准的时间单位最为合适。而由于西南区域明显的干湿季节特征, 在确定划分标准之前, 我们有必要首先对全年 72 候平均候雨量和湿季 5~10 月 36 候平均候

雨量的变化进行比较, 来确定能够较好地衡量雨季开始和结束的雨量划分标准。图 5a 给出西南区域 92 个站平均之后的多年平均逐候降水量变化。可以看到 1~3 月上旬和 12 月候雨量变化的波动较小, 稳定低于 5 mm; 3 月中旬之后候雨量逐渐增加, 于 5 月 2 候 (26 候, 指在全年 72 候中按顺序所在的候数, 下同) 稳定超过 72 候平均候雨量 (14.9 mm, 以下简称 \bar{R}_{72}), 并在 5 月 4 候 (28 候) 出现了近 8 mm 的跃升, 候雨量突然从 5 月 3 候 (27 候) 的 17 mm 跃升至 5 月 4 候 (28 候) 的 25 mm, 然后稳定维持超过 \bar{R}_{72} ; 10 月 3 候 (57 候) 之后的候雨量下降至稳定低于 \bar{R}_{72} 。相对于 5~10 月 36 候平均候雨量 (23.9 毫米, 以下简称 \bar{R}_{36}) 而言, 季节转换期间候雨量变化的波动较大, 5 月 4 候~6 月 1 候 (28~31 候), 候雨量围绕 \bar{R}_{36} 上下波动, 直

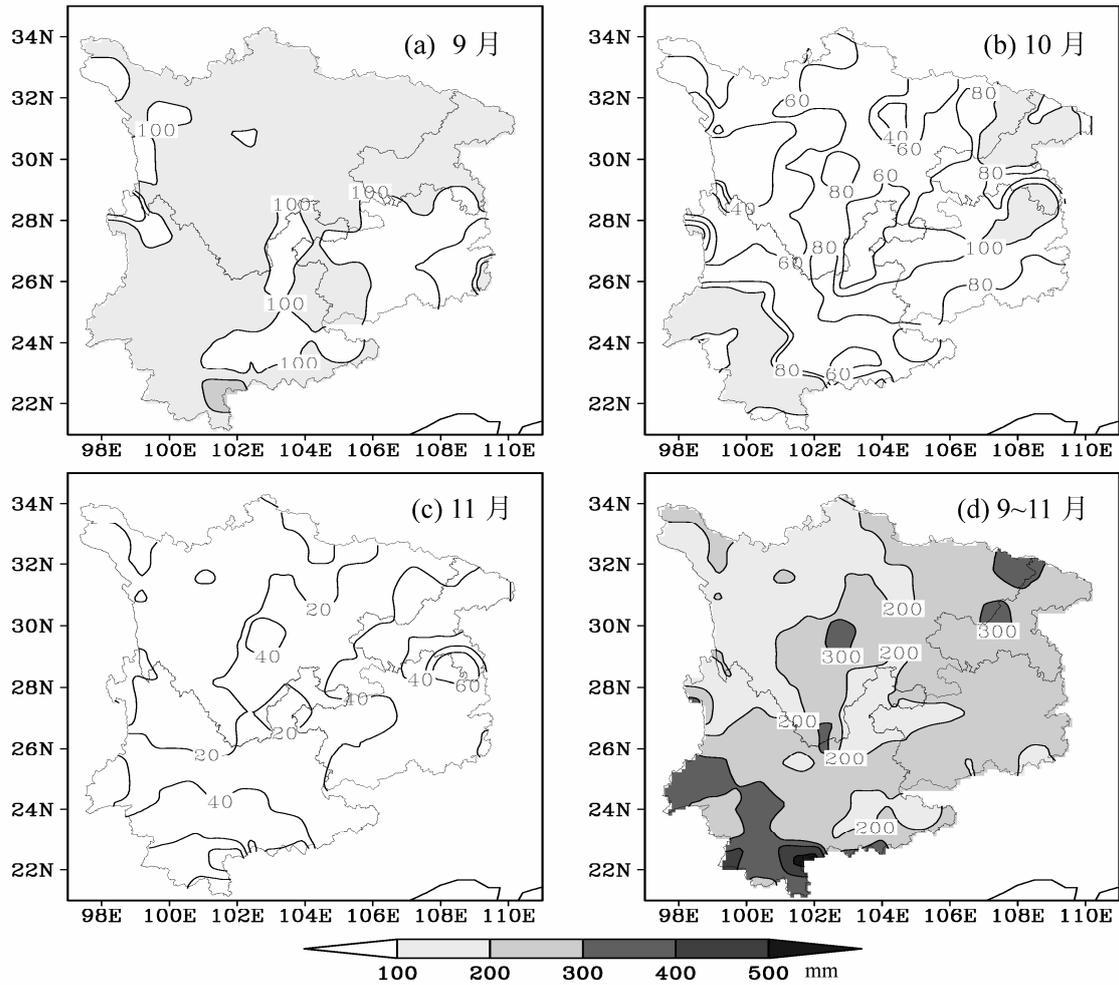


图3 (a) 9月、(b) 10月、(c) 11月和 (d) 9~11月多年气候平均降水分布 (单位: mm)

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for (a) September, (b) October, (c) November, and (d) September–November

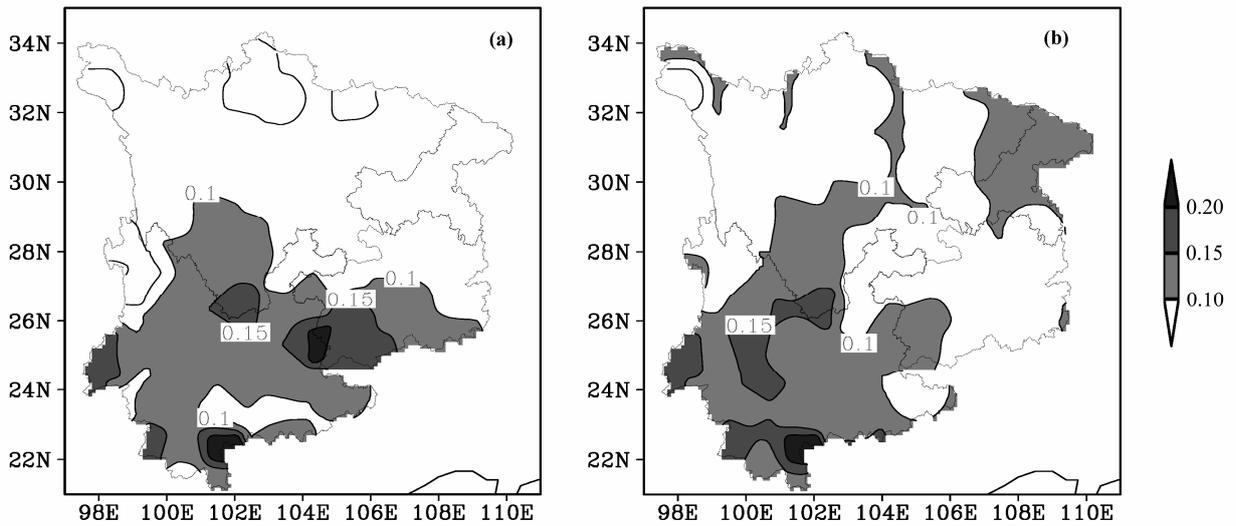


图4 1961~2011年 (a) 4~6月和 (b) 9~11月候雨量 EOF 第一模态分布

Fig. 4 The first EOF modes of pentad precipitations during (a) April–June and (b) September–November in Southwest China for 1961–2011

到6月2候(32候)之后才稳定超过 \bar{R}_{36} ; 同样, 9月2~5候(50~53候)候雨量围绕 \bar{R}_{36} 的波动也比

较明显, 直到9月5候(53候)之后才稳定低于 \bar{R}_{36} 。定义一个区域的雨季开始和结束日期, 除了考

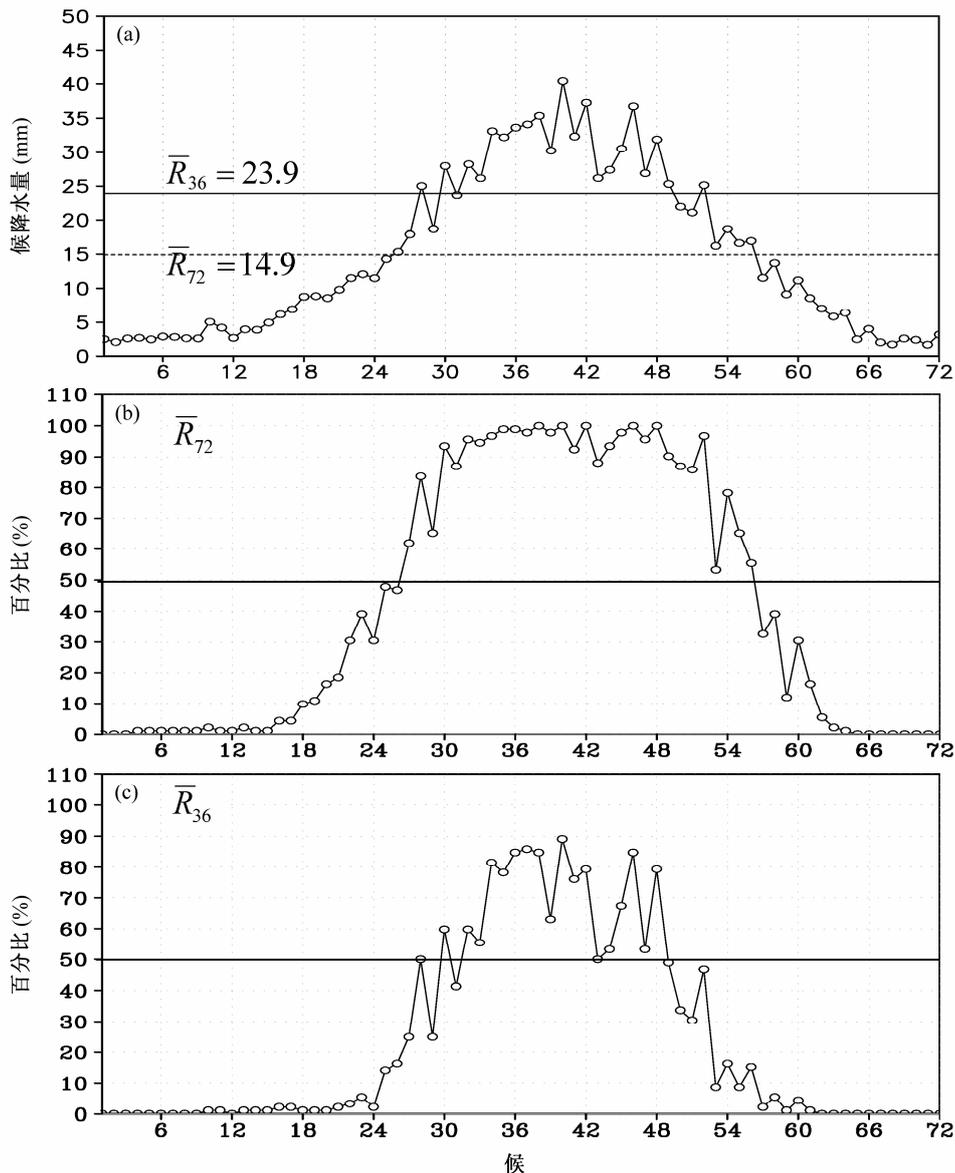


图5 西南区域多年平均 (a) 候雨量及西南地区单站候雨量分别超过 (b) \bar{R}_{72} 和 (c) \bar{R}_{36} 的站点数占总站数的百分比
 Fig. 5 (a) Variation of climatology pentad rainfall in Southwest China; percentages of stations of pentad rainfall exceeding (b) \bar{R}_{72} and (c) \bar{R}_{36} to total stations in Southwest China

考虑降水强度的变化,在很大程度上还要考虑降水范围的大小。图 5b、c 分别给出西南区域 92 个站单站降水分别超过 \bar{R}_{72} 和 \bar{R}_{36} 的站点数占西南区域总站数的百分比。由图 5b 可见,以 \bar{R}_{72} 为标准,百分比稳定超过(低于)50%的时间出现在 5 月 3 候(10 月 3 候),即 27 候(57 候),其时间变化与图 5a 中候雨量稳定超过或低于 \bar{R}_{72} 的日期比较一致。而就 \bar{R}_{36} 标准而言,百分比稳定超过(低于)50%的时间出现在 6 月 2 候(9 月 1 候),即 32 候(49 候)。与图 5a 中候雨量稳定超过或低于 \bar{R}_{36} 的时间相比,开始时间比较一致,而结束时间却提前了 4

个候。

综合以上分析,无论从降水变化的强度还是范围来看,初步以 \bar{R}_{72} 为标准来界定西南雨季开始和结束日期的雨量标准是比较合理的。

由于以上分析的候雨量经过了区域平均之后再做了 30 年平均,多次平均之后的结果实际上平滑了降水变化的区域差异和年际波动的很多信息。从图 5a 中候雨量的变化就可以看出,候雨量在 5 月 2 候(26 候)超过 \bar{R}_{72} 之后的整个汛期期间一直稳定地大于 \bar{R}_{72} ,至 10 月 3 候(57 候)下降至低于 \bar{R}_{72} 之后也比较稳定,季节转换期间候雨量围绕 \bar{R}_{72} 的波

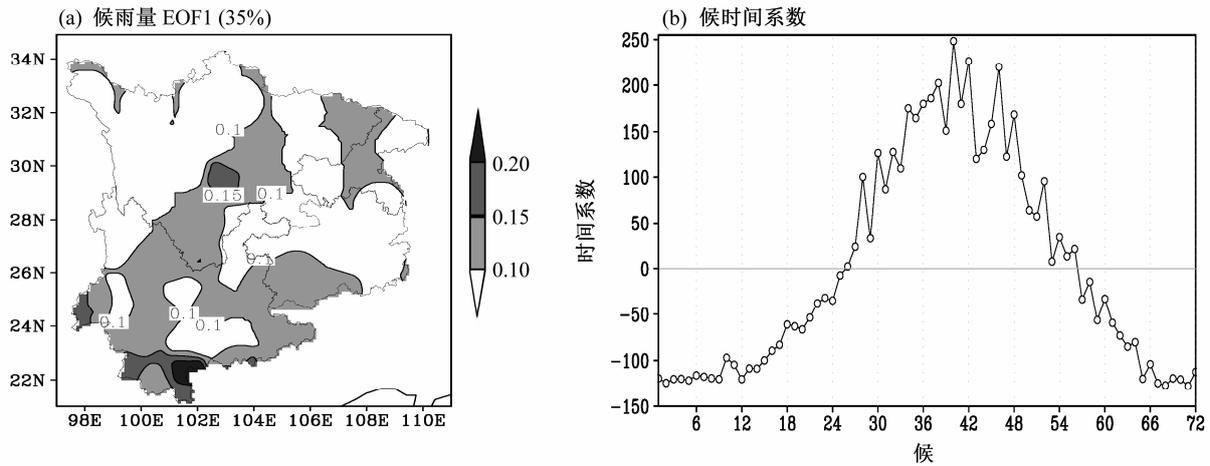


图6 1981~2010年候雨量 EOF 分析 (a) 第一模态及 (b) 相应的多年平均候时间系数的变化

Fig. 6 (a) The first EOF mode of pentad rainfall for 1981–2010 and (b) the corresponding pentad time series

动是比较小的。而实际业务中我们发现，某一年西南区域候雨量围绕 \bar{R}_{72} 的上下波动是相当明显的。因此，在确定逐年雨季开始和结束时间的划分标准时，候雨量超过 \bar{R}_{72} 和低于 \bar{R}_{72} 的持续时间是必须考虑的重要方面。

另外，根据章基嘉等（1982）的方法，EOF 分析的多年平均候时间系数变化可以在很大程度上反映季节变化特征。图 6 进一步给出 1981~2010 年逐年 1~12 月逐候（共 2160 候）的西南区域雨量 EOF 第一模态分布及相应多年平均候时间系数的变化。可以看到占总方差贡献 35% 的 EOF1 同样反映了全区一致的变化特征，相应 1981~2010 年多年平均候时间系数的变化与图 5a 给出的西南区域多年平均候雨量的变化几乎是一致的。候时间系数于 5 月 2 候（26 候）之后稳定大于 0，并于 10 月 3 候（57 候）之后稳定小于 0，候时间系数所表现的季节转换时间与候雨量稳定超过和低于 \bar{R}_{72} 的时间非常一致。因此，年候雨量 EOF 第一模态分布及相应多年平均候时间系数的变化进一步表明了西南区域降水变化的一致性特征及季节转换特征，同时也进一步表明了以 \bar{R}_{72} 作为界定西南雨季开始和结束日期雨量标准的合理性。

通过以上对多年平均降水的空间分布及时间变化特征的分析，我们可以将 \bar{R}_{72} 作为雨量标准，以西南区域候雨量稳定大于或小于 \bar{R}_{72} 的时间，并结合降水范围的大小，来初步定义西南区域多年平均雨季的起止日期。综合以上分析，我们可以初步将西南区域多年平均雨季开始日期定义为 5 月 3 候（27 候），结束日期定义为 10 月 3 候（57 候）。

4 季节转换期间高低层大气环流及低层水汽的演变特征

西南地处亚洲季风区，汛期降水的变化与大范围大气环流的季节性调整密切联系（杨辉等，2012）。本节我们通过分析 1981~2010 年多年平均高低层大气环流在季节转换期间变化的特征来进一步考察以上初步确定的西南区域雨季开始和结束时间的合理性。

4.1 亚洲季风活动特征

低层 850 hPa 风系的季节性变化在很大程度上反映了冬夏季风的转换特征。分析冬季风向夏季风季节转换期 4~6 月逐候 850 hPa 风场的变化（图略），发现 4 月 1~4 候（19~22 候）， $0^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 之间维持一条明显的东风带，西南中西部地区为西风带沿青藏高原南侧绕流的西风气流控制，东部为西太平洋副热带高压西北侧的西南气流控制；4 月 5 候（23 候），东风带首先在 95°E 附近断裂，出现较弱的来自南半球的西南越赤道气流；4 月 6 候（24 候）通过此通道的越赤道气流逐渐加强，气流经中南半岛，并与西太平洋西北侧的西南气流合并，影响我国西南的东南部和华南大部，而此时索马里地区由南向北的越赤道气流还没建立。5 月 1 候（25 候）， $90^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 附近的越赤道气流明显加强，索马里自南向北的越赤道气流建立。图 7 中区域（ $5^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{N}$ ， $90^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ）多年气候平均逐候 850 hPa 纬向风的变化显著表明了该季节转换期间 95°E 赤道附近西南气流建立的突变特征，4 月 4 候（22 候）至 5 候（23 候）， 95°E 赤道附近纬向东风

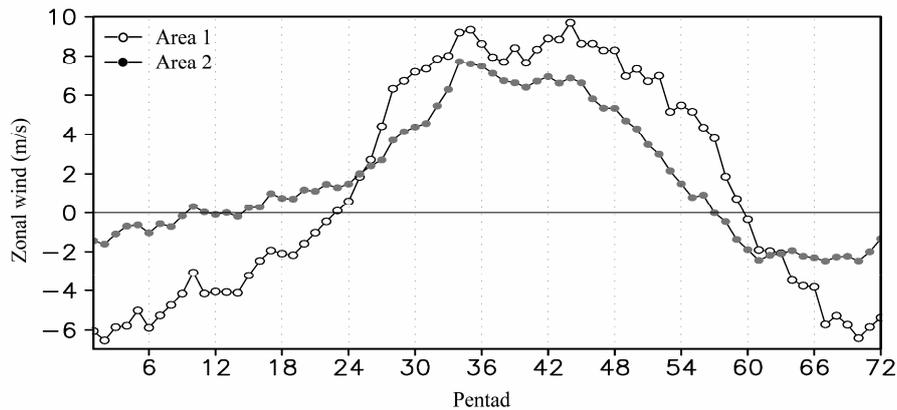


图7 区域1 (5°N~10°N, 90°E~100°E, 空心圆圈) 和区域2 (10°N~25°N, 85°E~95°E, 实心圆圈) 多年气候平均逐候 850 hPa 纬向风变化
Fig. 7 Variations of climatology pentad zonal wind at 850 hPa in area 1 (5°N-10°N, 90°E-100°E) and area 2 (10°N-25°N, 85°E-95°E)

转变为纬向西风, 之后纬向西风稳定维持并加强至 6 月底达到次高值, 8 月初达到最高值。另外, 从逐候 850 hPa 风场 (图略) 的变化来看, 5 月中下旬, 印度洋至南亚地区的低层风场仍处于调整阶段, 伴随索马里越赤道气流的逐渐加强, 青藏高原南侧的西风带气流逐渐向北移动, 索马里越赤道气流在北印度洋转向为西南气流后逐渐取代青藏高原南侧绕流的西风带气流, 此时, 阿拉伯海—印度半岛—孟加拉湾—中南半岛, 以及西南和华南的大部分地区均为来自南半球在阿拉伯海转向的西南季风控制。6 月, 亚洲地区的低层风系已表现为明显的夏季环流特征。

图 8a 和图 8b 分别为以 27 候为界组合的雨季开始前后 850 hPa 多年气候平均风场, 表明了西南雨季开始前后低层风场明显不同的变化特征, 雨季开始前印度洋低纬度 10°N 附近主要为东风气流, 西南地区为来自高原南侧的西风气流控制, 华南为西太平洋副热带高压西北侧的西南气流 (图 8a), 而雨季开始后北印度洋至中国西南和华南地区均为来自南半球在索马里附近转向后的西南气流控制 (图 8b)。

对比 4~6 月西南地区的降水变化, 发现热带地区的季风演变与降水的季节性变化有很好的一致性。来自南半球的西南越赤道气流首先于 4 月下旬出现在 95°E 附近, 气流越过赤道后与西太平洋副热带高压西北侧的西南气流合并, 导致贵州东部的降水于 4 月首先增加, 随着西南气流的向西推进以及索马里越赤道气流的出现 (5 月 1 候, 25 候), 西南雨季于 5 月 3 候 (27 候) 开始。过去有关季风季节进程的研究表明, 亚洲夏季风首先于 5 月 4 候

(28 候) 在南海北部地区爆发, 然后逐渐向北伸展到中国大陆及日本以南的太平洋地区, 向西北伸展至孟加拉湾和印度, 印度季风于 6 月上旬爆发 (Tao and Chen, 1987)。而随着观测资料逐渐增多, 近几年的很多研究发现亚洲夏季风最早于 5 月初在孟加拉湾东岸建立 (Lau and Yang, 1997; 梁建茵和吴尚森, 2000)。对比有关季风季节进程的研究结果与本文得到的西南雨季爆发平均日期在 5 月 3 候 (27 候) 的结论, 孟加拉湾夏季风爆发于西南雨季开始之前, 而南海季风爆发于西南雨季开始之后, 因此, 西南雨季的变化有可能更主要地受到孟加拉湾季风的影响。

从 9~11 月夏季风向冬季风转换期间 850 hPa 逐候风场 (图略) 的变化, 可以看到夏季风的结束主要是以东亚东部地区的偏东气流逐渐向西推进取代东南亚地区的西风气流而告结束。9 月初, 在西南地区以 100°E 为分界, 以东为偏东气流, 以西为西南气流, 之后偏东气流逐渐向西推进越过 100°E。相应此时, 在阿拉伯海和印度半岛北部地区的偏西气流也逐渐转向为东北气流, 导致东南亚地区西南气流的通道越来越狭窄。10 月 2 候 (56 候) 仅在孟加拉湾有范围较小的西南气流, 10 月 3 候 (57 候) 随着偏东气流的逐渐向西扩展, 东风气流完全取代了孟加拉湾地区的西南气流, 10°N~25°N 范围内的东风带重新建立。东风带的建立标志着西南季风水汽输送的结束。图 7 中区域 (10°N~25°N, 85°E~95°E) 多年气候平均逐候 850 hPa 纬向风变化表明了 9~11 月季节转换期间 10°N~25°N 东风气流完全取代西风气流的突变特征, 10 月 3 候 (57 候), 孟加拉湾附近的西风转为东风, 之后在 11~12 月该

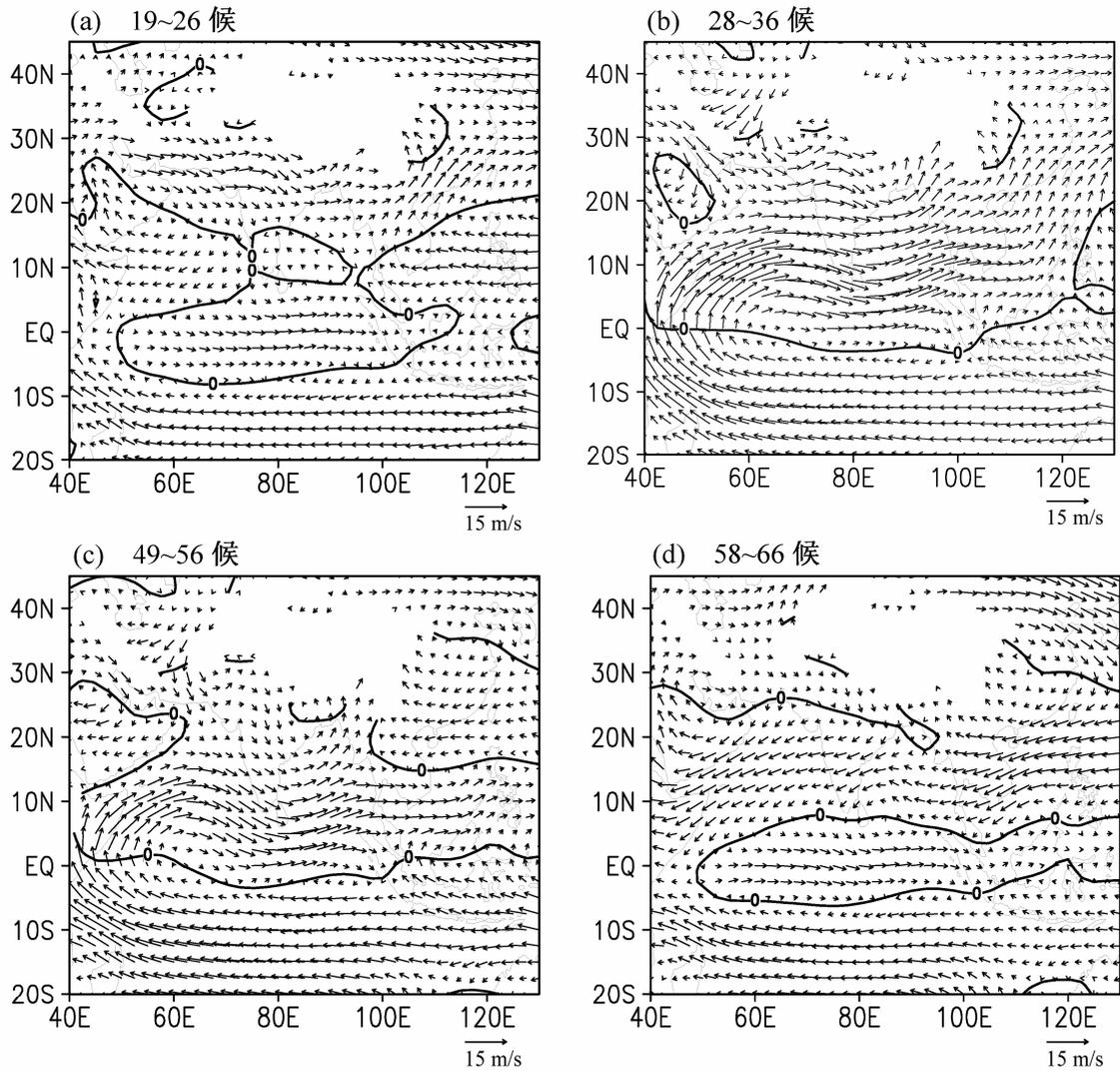


图 8 分别为 (a) 19~26 候、(b) 28~36 候、(c) 49~56 候和 (d) 58~66 候的 850 hPa 多年气候平均风场 (单位: m/s)
Fig. 8 Climatology wind fields at 850 hPa during pentads (a) 19~26, (b) 28~36, (c) 48~56, and (d) 58~66 (unit: m/s)

区域的东风气流最明显。另外, 进一步的分析发现东亚地区东风气流的向西推进是一个比较缓慢的过程, 并且与西太平洋副热带高压南侧的偏东气流及亚洲大陆高压前部偏东气流的变化相联系, 8 月初在气候平均场上东亚东部 110°E 附近即已经出现东风气流, 并逐渐向西推进, 9 月初向西推进至 100°E 附近 (图略)。

对比图 3, 发现 9~11 月西南地区的降水分布与该转换季节期间东亚地区偏东气流的向西推进有密切联系。随着东亚东部东风气流的向西推进, 西南气流给西南地区带来的水汽输送由东至西逐渐减弱, 相应降水分布场上表现为贵州东部的降水首先减弱, 然后降水偏少的区域逐渐向西扩展, 西南中西部地区的降水也随之逐渐减弱。分析

逐候风场的变化 (图略) 发现 10 月 3 候 (57 候) 10°N~25°N 的东风气流完全取代了西风气流, 该范围内完整的东风带建立, 西南地区完全转为东风气流控制。东风带强度逐渐加强, 并逐渐向南扩展, 11 月底热带印度洋至西太平洋地区的东风带向南移动至 5°N~20°N, 冬季型环流形势完全建立。图 8c 和图 8d 分别为以 57 候为界组合的雨季结束前后 850 hPa 多年气候平均风场, 雨季结束之前的一段时间, 影响孟加拉湾-西南西部的西南气流比较明显, 但也可以看到西南地区东部已转为由东向西逐渐推进的东风气流控制 (图 8c), 该区域的流场变化与雨季开始之后的一段时间的风场 (图 8b) 是明显不同的, 雨季结束之后阿拉伯海-孟加拉湾 10°N~25°N 范围, 以及中国的西南、华南地区均

为明显的东风气流控制 (图 8d)。

4.2 南亚高压的季节变化

南亚高压是亚洲季风系统的重要成员,其季节变化与亚洲季风活动密切相关。分析冬季风向夏季风转换期间 4~6 月多年气候平均逐候 100 hPa 流场的变化 (图略),同样发现 4 月 4~5 候 (22~23 候),南亚高压的突变特征比较明显,突然从赤道西太平洋 160°E 西移至中南半岛 100°E 附近,突变时间与低层 850 hPa 风在 95°E 附近越赤道气流出现的时间比较一致。5 月南亚高压逐渐向西北方向移动,6 月上旬南亚高压向西北移动到青藏高原上空,其中心大致位于 (30°N, 90°E) 附近,夏季环流形势完全建立。分析夏季风向冬季风转换期间 9~11 月多年平均逐候 100 hPa 流场的变化 (图略),9 月 1 候 (49 候) 之后南亚高压逐渐东移,10 月 3 候 (57 候) 南亚高压中心位置发生明显突变,中心位置突然从 (20°N, 90°E) 附近东移至 (20°N, 115°E),并于紧接的 10 月 4 候 (58 候) 快速东移至 (23°N, 150°E) 附近,之后南亚高压中心位置在同经度上逐渐南移,11 月底南亚高压中心南移至 (15°N,

150°E) 附近。

图 9 为以雨季开始期 5 月 3 候 (27 候) 和结束期 10 月 3 候 (57 候) 分别组合的雨季开始前后和结束前后 100 hPa 流场,可以明显看到雨季开始前、雨季期间、雨季结束后南亚高压位置的明显差异,雨季开始前南亚高压偏南偏东,中心位于中南半岛南部 (图 9a),雨季期间南亚高压向西北移动控制了青藏高原 (图 9b 和图 9c),雨季结束后南亚高压再次东移至西太平洋 150°E 附近地区 (图 9d)。

南亚高压建立时青藏高原南侧为纬向东风,因此对流层高层纬向风的变化可以反映南压高压的活动特征。图 10 为 200 hPa 纬向风沿经向和纬向的剖面图,可以看到在冬季风向夏季风转换期间,90°E 附近纬向东风的向北扩展有一个突然变化的过程,1~4 月上旬纬向东风一直维持在 10°N 以南,4 月中旬以后突然向北扩展,5 月底即向北扩展至 20°N 附近,7 月底向北扩展至 30°N 附近,然后又逐渐向南收缩,11 月底向南收缩至 15°N 以南 (图 10a)。纬向东风沿 15°N~20°N 的时间一经向

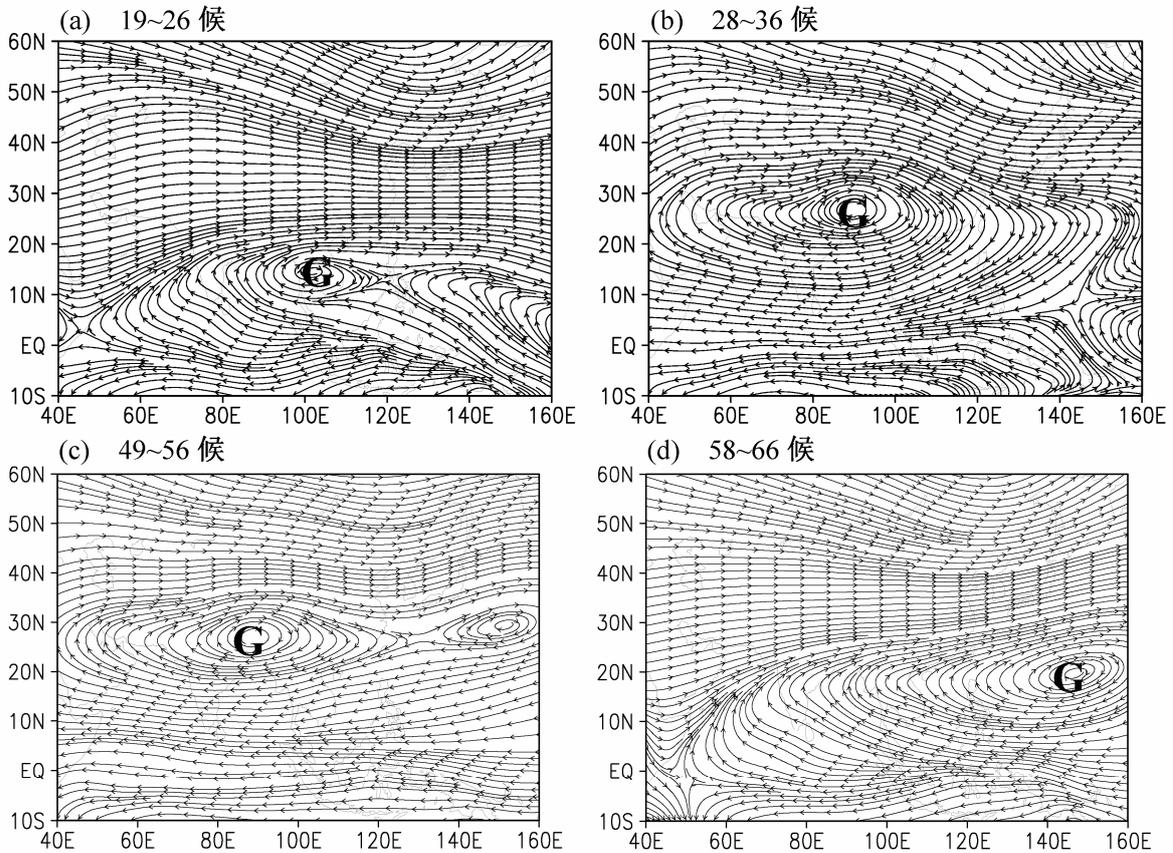


图 9 (a) 19~26 候、(b) 28~36 候、(c) 49~56 候和 (d) 58~66 候的 100 hPa 多年气候平均流场

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for 100-hPa stream fields

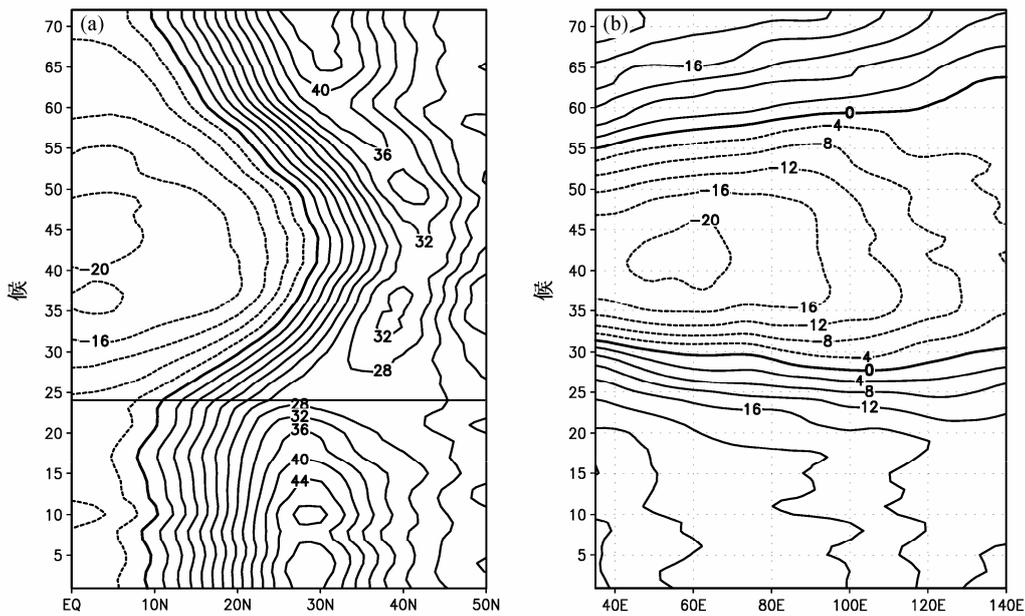


图 10 多年气候平均 200 hPa 纬向风沿 (a) 90°E 和沿 (b) 15°N~20°N 的剖面 (单位: m/s)。虚线表示东风, 实线表示西风
Fig. 10 Time-latitude and time-longitude cross sections of pentad 200-hPa zonal winds of climate means along (a) 90°E and (b) 15°N~20°N. Dashed lines denote easterlies and solid lines denote westerlies (unit: m/s)

剖面 (图 10b) 也可看到, 5 月中旬以后青藏高原南侧附近的纬向东风建立, 维持至 10 月中旬以后又逐渐减弱消失, 被纬向西风所取代。

4.3 水汽演变特征

充足的水汽输送是大范围降水产生的重要条件, 西南区域雨季的开始和结束同样与水汽变化密切联系。由于假相当位温 θ_{se} 在干湿绝热过程中具有很好的保守性, 能够代表高温高湿空气 (王安宇等, 1999)。有的学者主张采用 850 hPa $\theta_{se}=340\text{ K}$ 或 $\theta_{se}=335\text{ K}$ 表示东亚夏季风前缘 (Yanai et al., 1973; 黄荣辉等, 1998), 以及采用 850 hPa $\theta_{se}=335\text{ K}$ 作为临界值来确定南海夏季风的爆发日期 (Zhang et al., 2002); 李贵福等 (1983) 的分析指出云南区域季风的撤退与大气低层 θ_{se} 的变化有关, 并以 700 hPa 和 850 hPa 上 $\theta_{se}\leq 67^\circ\text{C}$ 作为季风从云南撤退的标准。这里我们用 θ_{se} 来分析西南区域水汽的变化特征, 图 11 为图 1 矩形框所包括的西南区域范围 (25°N~34°N, 97°E~110°E) 和 (21°N~25°N, 97°E~106°E) θ_{se} 区域平均的高度—时间剖面, 以及 850 hPa 和 700 hPa 区域平均逐候 θ_{se} 的时间变化。可以看到大气对流层中低层的水汽主要集中在对流层低层, 并随高度逐渐减弱 (图 11a)。因此, 我们分别以 340 K 和 335 K 作为 850 hPa 和 700 hPa 西南区域 θ_{se} 干湿季节转换的判定标准。由图 11b 可见 5 月 2 候 (26 候) 850 hPa 西南区域 θ_{se} 超过 340 K,

并稳定维持至 10 月 4 候 (58 候) 减弱至低于 340 K; 700 hPa 西南区域 θ_{se} 于 5 月 3 候 (27 候) 超过 335 K, 并稳定维持至 10 月 3 候 (57 候) 减弱至低于 335 K; 700 hPa 和 850 hPa 的 θ_{se} 峰值出现在 7~8 月。850 hPa 和 700 hPa 的 θ_{se} 变化分别稳定超过 (低于) 340 K 和 335 K 的时间与第 3 节中候雨量稳定超过 (低于) \bar{R}_2 的时间非常一致。

综合以上高低层大气环流和水汽的变化, 在冬季风向夏季风转换期间的 4 月 4~5 候 (22~23 候) 高低层大气环流的突变特征比较明显: 低层热带印度洋—西太平洋地区的东风带断裂, 在 95°E 附近开始出现西南越赤道气流; 高层南亚高压位置明显西移, 其中心位置突然从菲律宾以东洋面西移至中南半岛。以上这些大范围环流变化比较明显的时间均发生在 4 月下旬, 是西南雨季开始的前兆信号。在夏季风向冬季风转换期间的 10 月 3 候 (57 候) 左右, 低层热带印度洋和西太平洋附近的东风带建立, 西南地区为自东向西推进的东风气流控制; 高层南亚高压中心突然从青藏高原南侧向东移动至 150°E 附近的海洋。对比第 3 节初步确定的西南雨季开始和结束日期的时间与大气环流突变的时间, 发现在超前西南雨季开始日期 4~5 候, 冬季型大气环流形势已经发生了明显的变化, 夏季型环流形势开始建立; 而夏季型环流向冬季型环流转换的时间与西南雨季结束的时间却比较一致, 在 10

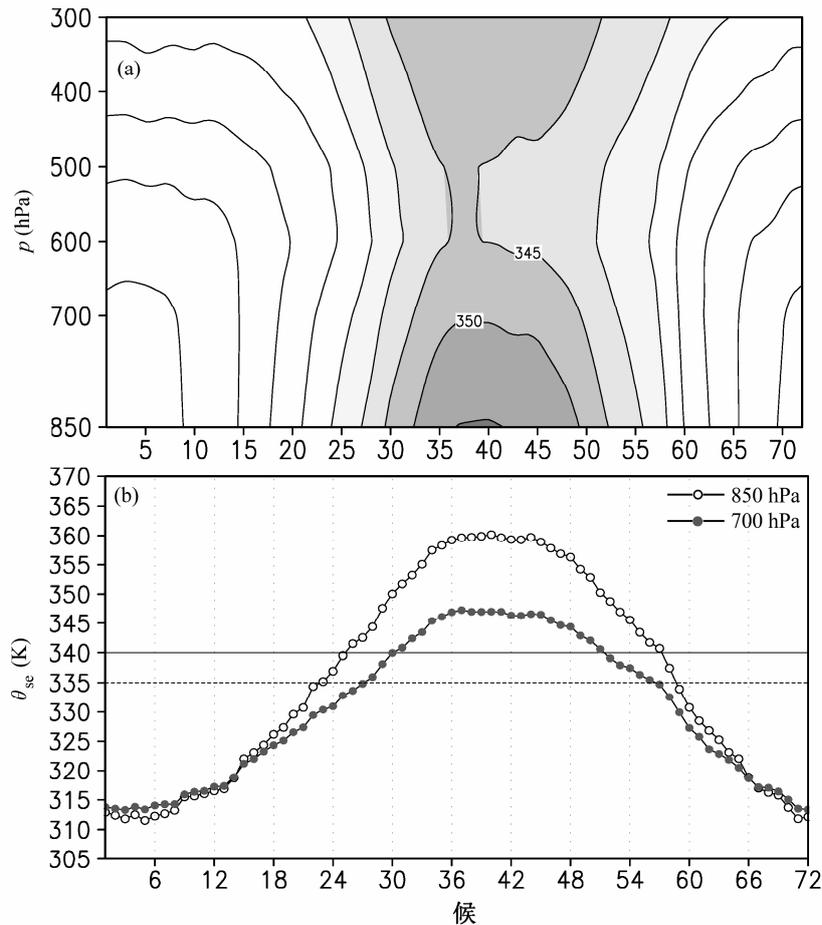


图 11 西南区域 ($25^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$ 和 $21^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 106^{\circ}\text{E}$) 多年平均 θ_{se} 的 (a) 时间—高度剖面 (阴影区为 θ_{se} 大于 340 K 的区域) 和 (b) 逐候变化 (单位: K)

Fig. 11 (a) Time–height cross section and (b) pentad variation of climatologically mean θ_{se} (unit: K) averaged over Southwest China ($25^{\circ}\text{N}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) and ($21^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $97^{\circ}\text{E}\sim 106^{\circ}\text{E}$), areas with θ_{se} exceeding 340 K in (a) are shaded

月 3 候 (57 候)。另外, 西南区域 θ_{se} 干湿季节转换时间恰好与以上初步定义的西南区域雨季开始和结束的时间一致, 进一步验证了多年平均西南雨季开始 (5 月 3 候, 27 候) 和结束日期 (10 月 3 候, 57 候) 的合理性。

5 西南雨季开始和结束日期的划分标准

5.1 不同标准的对比试验分析

以上分析表明, 以 72 候平均候雨量作为确定西南区域雨季开始和结束日期的雨量标准是比较合理的, 得到的西南区域多年平均雨季开始和结束的日期分别为 5 月 3 候 (27 候) 和 10 月 3 候 (57 候), 这一时间与大气环流突然变化和水汽演变的时间有很好的 consistency。但是, 前面我们也提到, 由于分析西南区域多年平均雨季开始和结束日期时,

对候雨量的变化我们作了区域平均之后又进行多年平均, 在时间和空间上均作了平滑处理, 所得到的候雨量变化的趋势相对比较稳定 (图 5a)。而针对某一年的候雨量, 由于仅在空间上进行了平滑处理, 季节转换期间候雨量围绕 \bar{R}_{72} 的上下波动是比较明显的, 因此确定雨季开始和结束日期标准时还必须考虑候雨量变化稳定超过 \bar{R}_{72} 的持续性和稳定性。那么究竟持续多少候比较合适? 定义标准的阈值太高或太低所得到的结果都会有很大的差异。这里我们根据候雨量连续超过多年平均候雨量 \bar{R}_{72} 的候数定义了不同的标准, 通过比较分析来进一步研究合适于西南区域雨季开始和结束日期的判定标准。在以下对比分析中, 我们规定四种标准:

(1) 从 4 月 1 候开始, 当某一个候的西南区域平均候雨量 (以下简称 \bar{R}_p) 超过区域多年平均候雨量 \bar{R}_{72} , 即 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$, 且西南区域内有 50% 站点的

候雨量 (R_{Sp}) 超过相应站点的多年平均候雨量 (以下简称 R_{S72})，即 $R_{Sp} > R_{S72}$ ，确定该候为雨季开始候；从 8 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 站点的 $R_{Sp} < R_{S72}$ ，确定该候为雨季结束候。

(2) 从 4 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} > R_{S72}$ ，则将该候作为雨季开始待定候，如果之后连续两候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$ ，则将该候确定为雨季开始候；从 8 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} < R_{S72}$ ，则将该候作为雨季结束待定候，如果之后连续两候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，则将该候确定为雨季结束候。

(3) 从 4 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} > R_{S72}$ ，则将该候作为雨季开始待定候，如果之后连续三候的 $R_{Sp} > R_{S72}$ ，则将该候确定为雨季开始候；从 8 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} < R_{S72}$ ，则将该候作为雨季结束待定候，如果之后连续三候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，则将该候确定为雨季结束候。

(4) 从 4 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} > R_{S72}$ ，则将该候作为雨季开始待定候，如果之后连续四候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$ ，则将该候确定为雨季开始候；从 8 月 1 候开始，当某一个候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，且西南区域内有 50% 的站点 $R_{Sp} < R_{S72}$ ，则将该候作为雨季结束待定候，如果之后连续四候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$ ，则将该候确定为雨季结束候。

在以上定义中，我们根据环流季节变化的时间来确定雨季开始期监测的时间为 4 月 1 候，结束期监测的时间为 8 月 1 候。同时为了避免遇到一些极端的情况，我们根据夏季型环流和冬季型环流完全建立的时间，对以上定义作了进一步的规定：凡是至 6 月 30 日还没有达到以上雨季开始期监测标准的，就将 6 月 6 候 (36 候) 确定为雨季开始候；凡是至 11 月 30 日还没有达到以上雨季结束期监测标准的，就将 11 月 6 候 (66 候) 确定为雨季结束候。

表 1 分别为根据以上不同的四种标准得到的 1971~2011 年逐年西南雨季开始和结束时间。对比分析我们看到对于不同的雨季开始期标准，最后确定的多年平均雨季开始候均在 5 月。标准 1 确定的雨季开始时间为 5 月 1 候 (25 候)，其中 1977、

1982、2000、2009 年雨季开始日期比较早，在 4 月 1 候 (19 候)，其次是 1985 和 2004 年，在 4 月 3 候 (21 候) 开始。对比环流的变化来看，雨季开始日期明显超前环流突变的时间，这样的结果似乎有些不合情理，其可能原因是只考虑了一个候的雨量变化，而候雨量的波动很明显，具有很大的随机性。标准 2 确定的日期，除了 1985 和 2004 年雨季在 4 月 3 候 (21 候) 开始外，大部分年份的雨季于 5 月相继开始，多年平均结果与前述分析的结果也比较接近，在 5 月 4 候 (28 候) 左右。标准 3 和标准 4 确定的多年平均雨季开始时间分别为 5 月 5 候 (29 候) 和 5 月 6 候 (30 候)，与标准 2 确定的时间仅相差 1~2 个候。分析逐年的雨季开始日期也发现，标准 2 与标准 3 雨季开始时间除了在 1975、1979、1991、1995、2004、2007 年有一些差异之外，其他年份的结果基本上是一致的，标准 3 和标准 4 所确定的雨季开始时间的差异就更小。这些特征表明虽然标准的阈值在不断提高，但确定的日期已经不会再发生太大的改变，逐渐趋于稳定。因此，选取第二个标准作为判断西南区雨季开始的标准是比较合适的。

对于雨季结束日期的判断，在以上四个标准中，标准 1 和标准 2 确定的多年平均雨季结束时间分别在 9 月 2 候 (50 候) 和 9 月 6 候 (54 候)，标准 3 和标准 4 确定的时间在 10 月，其中标准 3 确定的多年平均雨季结束时间与前述分析结果比较接近，在 10 月 3 候 (57 候)，且标准 4 确定的时间与标准 3 确定的日期也比较接近，在 10 月 4 候 (58 候)。分析逐年的结果发现标准 1 确定的雨季结束时间明显偏早，在 1971~2011 年之间就有 16 年的雨季结束日期出现在 8 月，16 年出现在 9 月。标准 2 确定的时间虽然有所改进，但偏早的年份仍然较多。标准 3 和标准 4 的结果比较接近，表明虽然标准的阈值在不断提高，但确定的日期已逐渐趋于稳定。因此，选取标准 3 作为判断西南雨季结束期标准比较合适。

5.2 特殊年份的比较分析

很多研究表明，雨季结束日期的早晚与季节转换期间的雨量变化有一定的关系 (晏红明等，2012)。因此我们进一步对比分析表 1 中确定的雨季开始和结束日期的变化与西南地区 4~5 月和 9~10 月的雨量变化 (图 12) 来验证以上标准的可靠性和合理性。

表 1 不同标准对 1971~2011 年西南雨季开始和结束时间的判断结果

Table 1 Time of annual onset and end of rainy season according to different criterions for 1971–2011 in Southwest China

年	雨季开始时间 (候)				雨季结束时间 (候)			
	标准 1	标准 2	标准 3	标准 4	标准 1	标准 2	标准 3	标准 4
1971	28	28	28	28	57	57	57	61
1972	24	28	28	28	45	57	57	57
1973	26	26	26	26	53	55	55	55
1974	26	26	26	26	45	56	56	56
1975	27	27	30	30	46	58	62*	62
1976	25	29	29	29	55	60	60	60
1977	19	30	30	34	53	57	61**	61
1978	26	26	26	26	47	57	63**	63
1979	25	31**	34	34	57	57	57	57
1980	23	30	30	30	51	60	60	60
1981	28	28	28	28	53	53	53*	53
1982	19	30	30	30	48	56	56	63
1983	31	31**	31	31	53	57	57	57
1984	27	27	27	27	49	59	59	59
1985	21	21*	21	28	55	55	55	61
1986	22	31**	31	31	44	57	57	57
1987	32	32**	32	32	55	58	58	58
1988	27	27	27	27	53	59	59	59
1989	29	29	29	29	47	50	59	59
1990	27	27	27	27	57	57	57	57
1991	25	25	31	31	54	56	56	56
1992	28	28	28	28	44	49	60	60
1993	25	30	30	30	53	61	61**	61
1994	30	30	30	30	57	57	57	57
1995	25	27	30	30	57	59	59	59
1996	26	26	26	30	47	49	53*	57
1997	23	32**	32	32	47	57	57	57
1998	29	29	29	29	50	50	53*	59
1999	24	28	28	32	50	54	54*	54
2000	19	30	30	30	53	58	61**	61
2001	26	26	26	26	51	56	62**	62
2002	26	26	26	26	48	48	48*	59
2003	28	28	28	28	51	53	56	56
2004	21	21*	30	30	56	56	56	56
2005	30	30	30	30	49	49	49*	61
2006	27	29	29	29	44	44	58	58
2007	23	23*	27	27	46	55	59	59
2008	24	24*	24	32	47	52	55	55
2009	19	30	30	34	49	49	55	55
2010	23	30	30	30	44	59	59	59
2011	27	29	29	29	44	44	58	58
1981~2010 年平均	25.4	27.8	28.6	29.5	50.4	54.4	56.6	58.1

注: 雨季开始日期从 4 月第 1 候开始监测, 结束日期从 8 月第 1 候开始监测。*标注为雨季开始或结束偏早, **标注为雨季开始或结束偏晚。

根据标准 2 雨季开始期判定标准, 1985、2004、2007、2008 年的雨季在 4 月份开始, 相应这些年份 4~5 月的降水也偏多, 特别是 2004 年, 降水偏多接近 60 mm, 是自 1971 年以来 4~5 月降水偏多最明显的年份。相反, 雨季开始比较晚的 1979、1983、1986、1987、1997 年, 相应 4~5 月的雨量均比多年平均偏少, 其中 1979 年是自 1971 年以来区域平均雨量偏少最明显的年份, 降水偏少接近 60 mm(图 12a)。

根据标准 3 雨季结束判定标准, 1981、1996、1998、1999、2002、2005 为雨季结束偏早明显的年份, 相应 9~10 月的雨量除 1999 年偏多外, 其余年份均明显偏少, 特别是 1996、1998、2002 年的降水偏少比较明显。相反, 在雨季结束偏晚比较明显的 1975、1977、1978、1993、2000、2001 年, 9~10 月的降水均超过多年气候平均雨量。逐年季节转换期间雨量的变化进一步表明了本文定义的西南雨季开始和结束日期判断标准是比较合理的。

6 结论和讨论

通过对西南区域候雨量变化和季节转换期间大气环流变化特征的分析, 以及对多种标准的对比试验, 得到了一些有意义的结论, 并定义了西南区域雨季开始和结束日期的判断标准如下:

(1) 由于季节转换期间 4~6 月和 9~10 月云南、四川、贵州、重庆的降水变化具有全区一致性特征, 从区域角度出发考虑西南雨季开始和结束日期的变化是合理的。

(2) 对比分析表明用 72 候平均候雨量的变化作为判定雨季开始和结束日期的雨量标准比较合理, 得到的西南区域多年平均雨季开始日期为 5 月 3 候 (27 候), 结束日期为 10 月 3 候 (57 候)。

(3) 多年平均高低层大气环流在 4 月 4~5 候 (22~23 候) 和 10 月 3 候 (57 候) 的突变特征比较明显, 4 月 5 候 (23 候) 低层 850 hPa 热带印度洋和西太平洋的东风带断裂, 95°E 附近首先出现西南越赤道气流; 高层南亚高压中心从菲律宾以东洋面西移至中南半岛。10 月 3 候 (57 候) 低层 850 hPa 热带印度洋和西太平洋的东风带重新建立, 西南区域为自东向西逐步推进的东风气流控制; 高层南亚高压中心从青藏高原南侧东移到 (30°N, 150°E) 附近洋面。多年平均大气环流由冬季型向夏季型突变的日期比西南雨季开始日期偏早 4~5

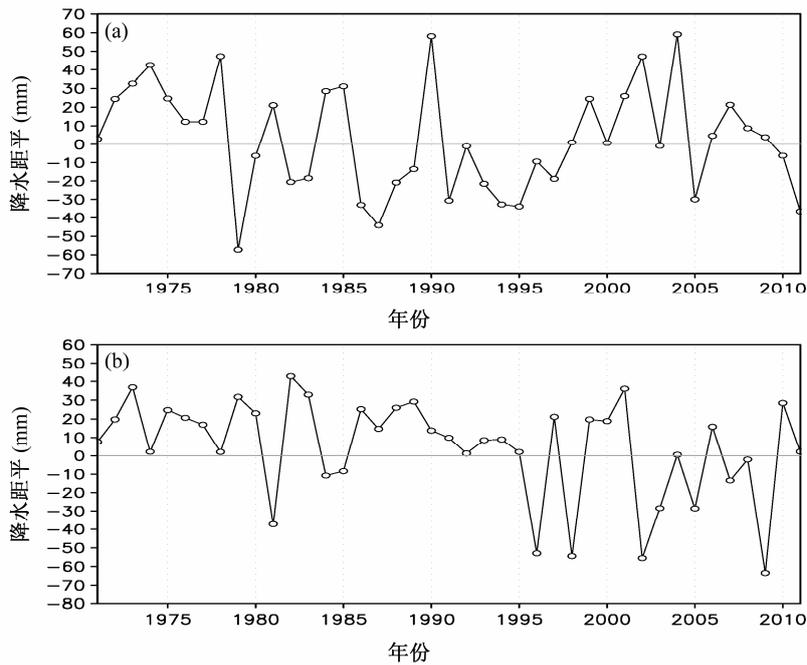


图 12 1971~2011 年 (a) 4~5 月和 (b) 9~10 月西南区域降水距平 (单位: mm)
Fig. 12 Precipitation anomalies in Southwest China during (a) April–May and (b) September–October from 1971 to 2011 (unit: mm)

个候, 而由夏季型向冬季型突变的日期与西南雨季结束日期比较一致。

(4) 西南雨季开始日期标准为: 从 4 月 1 候 (19 候) 开始, 当某一个候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$, 且西南区域内有 50% 的站点 $R_{sp} > R_{S72}$, 则将该候作为雨季开始待定候, 如果之后连续两候的 $\bar{R}_p > \bar{R}_{72}$, 则将待定候确定为雨季开始候。凡是至 6 月 30 日还没有达到雨季开始期监测标准的, 就将 6 月 6 候 (36 候) 确定为雨季开始候;

(5) 西南雨季结束日期标准为: 从 8 月 1 候 (43 候) 开始, 当某一个候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$, 且西南区域内有 50% 的站点 $R_{sp} < R_{S72}$, 则将该候作为雨季结束待定候, 如果之后连续三候的 $\bar{R}_p < \bar{R}_{72}$, 则将待定候确定为雨季结束候。凡是至 11 月 30 日还没有达到以上雨季结束期监测标准的, 就将 11 月 6 候 (66 候) 确定为雨季结束候。

作为西南夏季风输送水汽进入我国的门户区域, 西南季风异常对我国西南地区乃至内陆区域的夏季降水有十分重要的影响。本文在对季节转换期间大气环流变化的分析中, 对比讨论了热带地区季风环流演变与西南地区降水变化的关系, 表明季节转换期间西南区域的降水变化与热带季风演变密切联系。但除了季风对西南雨季降水变化的影响外, 中高纬度地区的冷空气活动造成的冷暖空气交

汇对西南地区大范围降水的发生也起着十分重要的影响。晏红明等 (2003) 在早期的研究就发现, 云南 5 月雨量变化不仅与南亚季风的有关, 与 5 月中低纬度地区的冷空气活动也有很大的关系, 仅当季风水汽输送与冷空气相互配合时才会导致西南区域大范围降水的产生。地面气压场变化可以很好地反映冷空气活动, 但由于冷空气活动具有非常明显短周期特征, 多年平均逐候地面气压场的变化并没有出现类似于低层 850 hPa 风和高层南亚高压的突变特征 (图略)。从表 1 我们看到 1979 年和 2004 年分别是西南雨季开始偏晚 (6 月 1 候, 31 候) 和偏早 (4 月 3 候, 21 候) 比较明显的两个年份, 分析相应西南区域 (25°N~34°N, 97°E~110°E) 和 (21°N~25°N, 97°E~106°E) 高低层气温的变化 (图 13), 发现在雨季开始较晚的 1979 年, 4~5 月高低层气温负距平不明显, 直到 6 月上中旬才出现一次明显的降温过程, 6 月 11 日对流层中低层气温比同期气候平均值偏低 6°C (图 13a), 相应该年西南雨季于 6 月 1 候 (31 候) 爆发)。相反在西南雨季开始较早的 2004 年, 冷空气对西南地区的影响比较频繁, 4 月上中旬西南地区高低层气温比同期气候平均值偏低 4°C 以上 (图 13b), 相应该年西南雨季于 4 月 3 候 (21 候) 开始。以上分析进一步表明了西南雨季开始时间与冷空气活动的

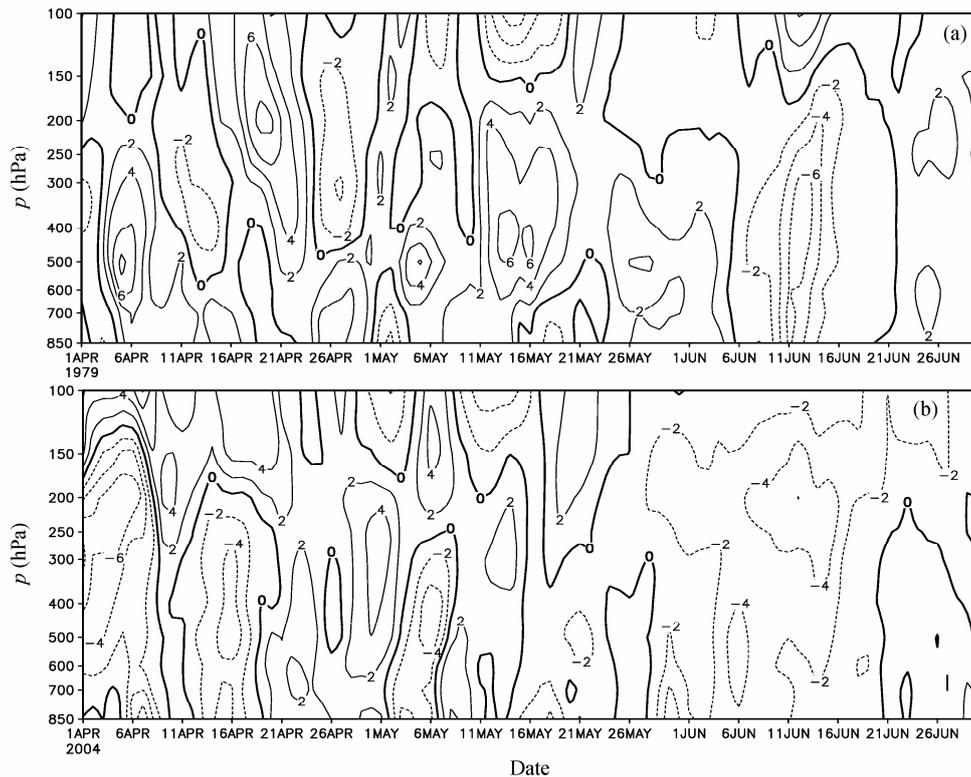


图 13 (a) 1979 年和 (b) 2004 年 4~6 月逐日西南区域气温的高度—时间剖面图 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 13 Height-time cross sections of daily temperature in Southwest China (25°N – 34°N , 97°E – 110°E) and (21°N – 34°N , 97°E – 106°E) from April to June in (a) 1979 and (b) 2004 (unit: $^{\circ}\text{C}$)

密切联系。而我们在分析冷空气活动与西南区域雨季结束日期变化的关系时,发现冷空气活动与西南雨季结束时间变化的关系并不密切(图略)。从 9~11 月环流演变的特征(图 8c 和图 8d)来看,西南夏季风的结束主要与东亚东部偏东气流的向西推进有关,而该东风气流在开始出现初期主要与西太平洋副热带高压南侧的偏东气流有关,后期则与东亚大陆高压前部的偏东气流有关,但为什么该期间的冷空气活动对西南雨季结束日期的变化影响不明显?是否该期间的水汽变化对西南区域大范围降水的影响更为重要?有关这些问题还有待于进一步的研究。另外,从前面的分析我们看到,季节转换期间 4~6 月多年气候平均环流突变的时间(4 月 5 候)比西南雨季开始的时间(5 月 3 候)偏早 4 候左右,而 9~11 月环流突变的时间(10 月 3 候)却与雨季结束的时间(10 月 3 候)基本一致,这些特征可能恰好分别表明了冷空气活动对西南雨季开始期和水汽条件对西南雨季结束期影响的重要性。

另外,由于降水变化的区域性特征比较明显,再加上复杂地形的影响,西南区域降水变化的

区域性特征就显得更加突出(罗宁等, 2006; 周国莲和晏红明, 2007; 蒋兴文和李跃清, 2010; 符传博等, 2011; 晏红明等, 2012)。从本文分析我们看到,贵州东部、重庆东部以及云南西北部边缘地区的降水与西南其他区域的降水变化有十分不同的特征,这些区域 4 月的降水就超过 100 mm,与华南前汛期降水比较类似。因此,尽管 EOF 分析表明了季节转换期间西南区域降水变化的一致性特征,但这些区域的降水变化差异却是不可忽视的。我们在有关雨季开始和结束日期定义的时候,怎样来统筹考虑一个区域雨季开始和结束日期标准的合理性还值得进一步研究。针对这一问题,我们再进行进一步通过更详细的分析定义单个站点雨季开始和结束日期的确定标准,这样我们可以通过这一标准,并结合环流的变化特征来进一步研究西南区域雨季开始或结束日期的演变进程等问题。由于篇幅有限,关于西南区域单站雨季开始和结束日期的分析和定义标准问题的研究,我们将另文撰写。

致谢 本项工作与国家气候中心的赵振国、任福民、周兵、李跃凤、龚志强、王东阡、柳艳菊、司东等同志进行了多次有益的讨论,得到了

贵州省气候中心周涛、四川省气候中心杨淑群和杨小波、重庆市气候中心李耿四位同志提供的站点资料信息, 并就各省目前的情况和他们进行了交流。在此对以上同志表示衷心的感谢。同时, 也非常感谢审稿专家及编辑提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 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 [J]. 南京气象学院学报, 28 (2): 163–171. Chi Yanzhen, He Jinhai, Wu Zhiwei. 2005. Features analysis of the different precipitation periods in the pre-flood season in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (2): 163–171.
- 程建刚, 晏红明, 严华生, 等. 2009. 云南重大气候灾害特征和成因分析 [M]. 北京: 气象出版社. Chen Jian'gang, Yan Hongming, Yan Huasheng, et al. 2009. Analysis on Heavy Climate Damage and Its Cause in Yunnan (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究 [J]. 大气科学, 31 (6): 1082–1101. Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1082–1101.
- 符传博, 吴洞, 丹利, 等. 2011. 近 50 年云南省雨日及降水量的气候变化 [J]. 高原气象, 30 (4): 1027–1033. Fu Chuanbo, Wu Jian, Dan Li, et al. 2011. Climatic changes of rainfall and rain days in Yunnan Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (4): 1027–1033.
- 郭其蕴, 王继琴. 1981. 近三十年我国夏季季风盛行期降水的分析 [J]. 地理学报, 36 (2): 187–195. Guo Qiyun, Wang Jiqin. 1981. Analysis on the prevailing period precipitation of China summer monsoon in recent 30 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 36 (2): 187–195.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. 大气科学, 22 (4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 460–469.
- 蒋兴文, 李跃清. 2010. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子 [J]. 地理学报, 65 (11): 1325–1335. Jiang Xinwen, Li Yueqing. 2010. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (11): 1325–1335.
- Lau K M, Yang S. 1987. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 14 (2): 141–162.
- 李贵福, 雷云, 孙永贵. 1983. 云南雨季结束和季风撤退的关系 [J]. 云南气象, 1: 22–25. Li Guifu, Lei Yun, Sun Yonggui. 1983. Relationship between onset of rainy season in Yunnan and monsoon retreat [J]. Yunnan Meteorology (in Chinese), 1: 22–25.
- Li X D, Zhu Y F, Qian W H, et al. 2002. Spatio-temporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880–1999 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 19 (6): 1055–1068.
- 林之光. 1985. 中国气候 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 76–80. Lin Zhiguang. 1985. China Climate (in Chinese) [M]. Shanghai: Scientific Press of Shanghai, 76–80.
- 刘瑜. 2000. 云南雨季早迟的气候特征分析 [J]. 气象, 26 (7): 44–49. Liu Yi. 2000. The climatic feature analysis of Yunnan rainy season early or late onset [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 26 (7): 44–49.
- 梁建茵, 吴尚森. 2000. 1998 年南海西南季风活动的初步分析 [J]. 热带气象学报, 16 (1): 28–37. Liang Jianyin, Wu Shangsen. 2000. The preliminary analyses on the activities of South China Sea summer monsoon in 1998 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 16 (1): 28–37.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究 [J]. 大气科学, 34 (2): 418–428. Liang Pin, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2010. A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze–Huaihe basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 418–428.
- 罗宁, 许炳南, 文继芬, 等. 2006. 贵州大气降水的时空分布规律研究 [J]. 贵州气象, 30 (4): 3–7. Luo Ning, Xu Bingnan, Wen Jifen, et al. 2006. Study on spatio-temporal distribution of precipitation in Guizhou [J]. Journal of Guizhou Meteorology (in Chinese), 2006, 30 (4): 3–7.
- 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 Xuemin, Yang Xiuqun. 2008. Onset and end of the first rainy season in South China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (5): 1333–1345.
- 强学民, 杨修群, 孙成艺. 2008. 华南前汛期降水开始和结束日期确定方法综述 [J]. 气象, 34 (3): 10–15. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun, Sun Chengyi. 2008. A review on recent researches on the first rainy season's onset and end dates in South China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (3): 10–15.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N, et al. Review of Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- 覃武, 孙照渤, 丁宝善, 等. 1994. 华南前汛期雨季开始期的降水及环流特征 [J]. 南京气象学院学报, 17 (4): 455–461. Qin Wu, Sun Zhaobo, Ding Baoshan, et al. 1994. Precipitation and circulation features during late-spring to early-summer flood rain in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 17 (4): 455–461.
- 王安宇, 吴池胜, 林文实, 等. 1999. 关于我国东部夏季季风进退的定义 [J]. 高原气象, 18 (3): 400–408. Wang Anyu, Wu Chisheng, Lin Wenshi, et al. 1999. The definition of the advance and retreat of the summer monsoon in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 400–408.
- 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征 [J]. 地理研究, 25 (6): 1031–1040. Wang Ying, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. 2006. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change [J]. Geographical Research (in Chinese), 2006, 25 (6): 1031–1040.
- 王遵亲, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 62 (2): 228–236. Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (2): 228–236.

- 吴志伟, 江志红, 何金海. 2006. 近 50 年华南前汛期降水、江淮梅雨和华北雨季旱涝特征对比分析 [J]. 大气科学, 30 (3): 391–401. Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, He Jinhai. 2006. The comparison analysis of flood and drought features among the first flood period in South China, Meiyu period in the Yangtze River and the Huaihe River valleys and rainy season in North China in the last 50 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 391–401.
- 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, 22 (6): 624–630. Yan Hongming, Xiao Ziniu, Wang Ling. 2003. Activities of Bay of Bengal monsoon and beginning date of rain season in Yunnan [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 624–630.
- 晏红明, 程建刚, 郑建盟, 等. 2012. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析 [J]. 大气科学学报, 35(2): 229–239. Yan Hongming, Cheng Jian'gang, Zheng Jianmeng, et al. 2012. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 229–239.
- Yanai M, Esbensen S, Chu J H. 1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large scale heat and moisture budgets [J]. J. Atmos. Sci., 30: 611–627.
- 杨辉, 宋杰, 晏红明, 等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 315–326. Yang Hui, Song Jie, Yan Hongming, et al. 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 315–326.
- 张家诚. 1991. 中国气候总论 [M]. 北京: 气象出版社, 140–141. Zhang Jiacheng. 1991. Pandect on China Climate (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 140–141.
- 章基嘉, 孙照渤, 陈松军. 1982. 用自然正交函数分解划分自然天气季节的研究 [J]. 南京气象学院学报, (2): 189–195. Zhang Jijia, Sun Zhaobo, Chen Songjun. 1982. Division of natural synoptic seasons by Empirical Orthogonal Function (EOF) [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), (2): 189–195.
- Zhang Y S, Li T, Wang B, et al. 2002. Onset of the summer monsoon over the Indochina Peninsula: Climatology and interannual variations [J]. J. Climate, 15 (11): 3206–3221.
- 周国莲, 晏红明. 2007. 云南近 40 年降水量的时空分布特征 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 28 (4): 55–61. Zhou Guolian, Yan Hongming. 2007. The spatial and temporal distribution feature of precipitation field over Yunnan [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 28 (4): 55–61.
- 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, 30 (6): 1207–1216. Zheng Bin, Liang Jianyin, Lin Ailan, et al. 2006. Frontal rain and summer monsoon rain during pre-rainy season in South China. Part I: Determination of the division dates [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1207–1216.