大气科学
CHINESE JOURNAL OF ATMOSPHERIC SCIENCES

2016年梅雨持续性强降水期间大气环流稳定分量研究

孙树鹏 封国林 郑志海 谢均 赵俊虎

Study on the Stable Components of Atmospheric Circulation during the Continuous Heavy Rainfall of Meiyu in 2016

SUN Shupeng FENG Guolin ZHENG Zhihai XIE Jun ZHAO Junhu

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19167

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于火箭探空资料的冰雹云内部结构个例分析

Case Study of Hail Cloud Internal Structure Based on Rocket Sounding Data

大气科学. 2020, 44(4): 748 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1907.19118

2016年我国梅雨异常特征及成因分析

Characteristics and Causes Analysis of Abnormal Meiyu in China in 2016

大气科学. 2018, 42(5): 1055 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170

浙江省梅雨锋强降水的锋生及环流特征分析

Analysis of Frontogenesis and Circulation Characteristics of the Meiyu Front with Heavy Precipitation in Zhejiang Province

大气科学. 2019, 43(6): 1219 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18187

年“”京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析

--

大气科学. 2019, 43(4): 930 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18231

江淮流域持续性强降水过程的多尺度物理模型

The Multi-scale Physical Model for Persistent Heavy Rainfall Events in the Yangtze-Huaihe River Valley

大气科学. 2018, 42(4): 741 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17246

一次飑线过程对流稳定度演变的诊断分析

Diagnostic Analysis of Convective Stability Evolution during a Squall Line Process

大气科学. 2018, 42(2): 339 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17126

关注微信公众号，获得更多资讯信息

孙树鹏, 封国林, 郑志海, 等. 2021. 2016 年梅雨持续性强降水期间大气环流稳定分量研究 [J]. 大气科学, 45(2): 245−256. SUN Shupeng, FENG Guolin, ZHENG Zhihai, et al. 2021. Study on the Stable Components of Atmospheric Circulation during the Continuous Heavy Rainfall of Meiyu in 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(2): 245−256. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19167

2016 年梅雨持续性强降水期间大气环流稳定分量研究

孙树鹏[1] 封国林[2,4] 郑志海[2] 谢均[3] 赵俊虎[2]

1 天津市津南区气象局，天津 300350
2 国家气候中心气候研究开放实验室，北京 100081
3 天津市气候中心，天津 300074
4 南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海），珠海 519000

摘 要 梅雨降水具有显著的阶段变化特征，研究持续强降水期间的关键环流稳定分量，对于分析和预测梅雨降水具有重要意义。利用 NCEP-DOE1979～2016 年逐日再分析资料，对 2016 年梅雨持续强降水期间位势高度场、风场和相对湿度场进行分析，提取环流系统的关键稳定分量，并对其空间结构、演变特征及更长时间尺度的背景形势进行分析，为梅雨区阶段性强降水的延伸期预报提供依据和参考。研究发现：（1）在位势高度场稳定分量中存在的“三极”分布形势，是维持 2016 年梅雨持续强降水的关键系统。“三极”分别对应着乌拉尔山阻塞高压、鄂霍茨克海阻塞高压以及偏东偏强的南亚高压和偏西偏强的西太平洋副热带高压（副高）。这种配置结构有利于冷暖空气在梅雨区交汇形成持续性强降水。（2）在中高纬度两个正距平区之间，是相对深厚的负距平区，有利于建立冷空气的向南输送通道，同时相对湿度场稳定分量表明北支气流对水汽的输送和汇聚作用对于梅雨区持续降水起到重要作用。（3）中低纬度的正距平区域呈纬向带状分布，且主要存在于对流层中高层，在梅雨区东西两侧各有一个正距平下沉支，它们共同加强了梅雨区南侧暖湿气流的汇聚输送作用。（4）通过对稳定分量的演变分析发现，“三极”系统的建立和演化与梅雨区降水强弱的阶段变化密切相关。（5）更长时间尺度（60 d）环流稳定分量为持续强降水时段的“三极”关键稳定分量提供了重要的环流背景。

关键词 梅雨 稳定分量 空间结构 演变特征

文章编号 1006-9895(2021)02-0245-12 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.19167

Study on the Stable Components of Atmospheric Circulation during the Continuous Heavy Rainfall of Meiyu in 2016

SUN Shupeng[1], FENG Guolin[2,4], ZHENG Zhihai[2], XIE Jun[3], and ZHAO Junhu[2]

1 *Tianjin Jinnan District Meteorological Bureau*, *Tianjin* 300350
2 *Laboratory for Climate Studies*, *National Climate Center*, *Beijing* 100081
3 *Tianjin Climate Center*, *Tianjin* 300074
4 *Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory*, *Zhuhai* 519000

收稿日期 2019-05-29；**网络预出版日期** 2020-07-09
作者简介 孙树鹏，男，1983 年出生，高级工程师，主要从事短期气候预测研究。E-mail: sun_sp2008@163.com
通讯作者 郑志海，E-mail: zhengzh@cma.gov.cn
资助项目 国家重点研发计划项目 2017YFC1502303，国家自然科学基金项目 41805061、42075017
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1502303), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41805061, 42075017)

Abstract There are significant precipitation stages that bring changes during the rainy period known as Meiyu. It is important to study the key stable circulation components that lead to the continuous heavy rainfall of this period to enable the analysis and prediction of Meiyu precipitation. Using NCEP/DOE Reanalysis II data from 1979 to 2016, the key stable components of the circulation system during the 2016 Meiyu period were extracted from the geopotential height field, wind field, and relative humidity field. The spatial structure, evolutionary characteristics, and longer-term background factors were analyzed to provide a basis for extended period forecasts of the periodic heavy rainfall in the Meiyu area. The results suggest that (1) the "tri-pole" pattern is the key system that maintained the continuous heavy rainfall in the Meiyu area in 2016. This "tri-pole" pattern in the stable components of the geopotential height field corresponds to the Ural Mountains blocking high, the Okhotsk Sea blocking high, the Southeast Asia high, and the West Pacific subtropical high. The structure of this configuration is conducive to the convergence of warm and cold air in the Meiyu area to generate persistent heavy rainfall. (2) In the middle and high latitudes, there is a relatively deep negative anomaly between two deep positive-anomaly areas. On one hand, this is conducive to the southward transport of cold air. On the other hand, the stability of the relative humidity field indicates that the water vapor transport and convergence of the northern branch of the air flow play an important role in the continuous precipitation of the Meiyu area. (3) The positive-anomaly area in the middle and low latitudes mainly occurs in the middle and high troposphere with zonal distribution features. However, there are two positive areas on both the eastern and western sides of the Meiyu area, which continue down to the lower level and may strengthen the convergence and transport of warm and humid air in the south of the Meiyu area. (4) The analysis of the evolution of the stable component revealed that the establishment and evolution of the "tri-pole" pattern led to different precipitation-stage characteristics in the Meiyu area. (5) The stable circulation components on a longer time scale (60 d) provide important background circulation for the key stable components of the "tri-pole" pattern during the period of continuous heavy rainfall.

Keywords Meiyu, Stable components, Spatial structure, Evolution characteristics

1 引言

中国梅雨（以下简称梅雨）是东亚夏季风活动的典型降水阶段，梅雨期的持续性强降水往往给当地带来严重的洪涝灾害。2016 年 6 月中下旬至 7 月上旬，长江中下游地区及周边多地连续遭受强暴雨袭击，江苏、湖北等 10 余省市均受到严重损失。2016 年梅雨期持续性强降水背后的主要机制是什么，大气环流中哪些关键系统的配置导致了这次强降水的异常持续维持？研究梅雨期异常持续强降水期间的异常环流形势，从而准确预测梅雨趋势，对于当地工农业生产具有十分重要的指导意义。

梅雨期降水及环流系统存在显著的阶段性变化特征。Ninomiya et al.（2002）研究指出，1991 年"梅雨相"（7 月 20～27 日）和"非梅雨相"（7 月 1～13 日）期间的大气环流特征明显不同。李维京（1999）、Li et al.（2001）、周兵和文继芬（2007）研究了 1998 年夏季大尺度环流系统对长江流域"二度梅"的影响。封国林等（2012）研究了 2011 年梅雨期长江中下游地区旱涝急转的成因。梁萍和丁一汇（2011）对 2009 年梅雨异常情况进行了研究，指出在通常的梅雨期（6 月中旬～7 月上旬）降水过程持续时间短，降水量以偏少为主，但在通常的寡雨时段该年 7 月下旬～8 月初又出现了所谓"二度梅"或"晚梅雨"的现象。梅雨降水的阶段变化受什么机制影响和控制值得深入研究。

低频振荡是影响梅雨阶段性变化的重要因素。大气低频振荡通常是指时间尺度在 10～100 d 的大气变化，主要包括周期为 10～20 d 的准双周振荡和周期为 30～60 d 的季节内振荡（杨双艳等, 2013）。低频振荡最早在热带地区发现（Madden and Julian, 1971），之后更多的研究表明，低频振荡不仅存在于低纬（Teng and Wang, 2003; Jiang and Waliser, 2009），而且也存在于中高纬度地区，具有全球变化的特征（Krishnamurti and Gadgil, 1985; 李崇银, 1991; 何金海和杨松, 1992; 杨秋明, 2009）。杨双艳等（2013）利用功率谱分析和小波分析方法证明了夏季欧亚中高纬地区存在 10～30 d 周期的大气低频振荡，通过进一步对位势高度场 10～30 d 低频分量的不同模态进行超前滞后相关分析，得到循环周期约为 20 d，并利用该方法分析了夏季欧亚中高纬大气低频振荡的纬向传播特征。梅雨作为东亚夏季风向北推进过程中的重要天气气候现象，其本身也体现出较强的低频振荡特征。杨秋

明（2009）研究发现 5～8 月长江下游逐日降水主要有 10～20、20～30 和 60～70 d 的周期振荡。梁萍和丁一汇（2012）研究了东亚梅雨季节内振荡的气候特征，指出低频振荡对东亚梅雨的阶段性、持续性降水事件的发生具有重要作用。东亚梅雨受 10～20 及 30～60 d 的低频振荡影响，梅雨区峰值降水与热带环流及北方高位涡冷空气输送的低频演变密切关联。庞玥等（2013）研究发现，梅雨偏多年降水具有明显的 10～30 d 的周期变化，低频振荡经向上的北传和纬向上的西传与江淮流域梅雨期降水的活跃及中断关系密切。陈官军和魏凤英（2012）发现，江淮地区夏季降水具有明显的 20～50 d 周期的低频振荡特征。降水的 20～50 d 低频振荡，尤其是峰谷值位相的变化与实际降水集中期和中断期的交替有较好地关系。

不少学者的研究也指出，梅雨降水还与更长时间尺度（如季节变化、冬夏半年转换、年循环）的低频变化有关（梁萍和丁一汇, 2012; 杨双艳等, 2013）。对于特定的研究时段而言，基于经验正交函数分解（EOF）的稳定分量分析更具优势。李志锦和纪立人（1996）和郑志海等（2010, 2013）研究表明，EOF 分量往往同低频的大气环流型相联系。对于延伸期尺度而言，稳定分量既包括了 10～30 d 的主要低频振荡信息，又能最大限度的保留更长时间尺度的变化信息。曾宇星（2016）指出稳定分量对大气的整体变化趋势存在较好的记忆性。即稳定分量能够很好地表征 10～30 d 尺度内天气系统的主体信息，并且这部分信息在之后的时间段内有着非常好的稳定性，能够表征大气系统运动的整体趋势特征。

本文拟从 2016 年持续近 20 d 的梅雨期强降水出发，结合其主要影响系统的低频振荡特征，提取大气环流系统的延伸期尺度稳定分量，进而对其分布和演变特征进行研究。试图探寻影响此次持续强降水的关键稳定分量，分析其主要影响机制，以提高对梅雨期持续强降水的科学认识和预测水平。

2　资料和方法

2.1　资料

（1）本文所用资料主要包括：NCEP-DOE Reanalysis 2（Kanamitsu et al., 2002）全球位势高度场、温度场、风场和相对湿度场 1979～2016 年逐日再分析资料，水平空间分辨率为 2.5°×2.5°，垂直方向从 1000～10 hPa 共 17 层等压面。降水数据来源于国家气象信息中心整编的中国地面日值资料。依据中国气象局预报与网络司 2014 年发布的《梅雨监测业务规定》①，选取 1979～2016 年梅雨区 277 个测站的逐日降水量。梅雨区经纬度范围为（28°～34°N，110°～123°E），包含的站点分布在上海、江苏、安徽、浙江、江西、湖北、湖南等 6 省 1 市（图 1）。

2.2　稳定分量的提取方法

研究方法主要采用 Pearson（1901）提出的经验正交函数（EOF）分解及其逆运算，具体方法见施能（2009）编著的《气象统计预报》。

影响梅雨的主要影响系统存在明显的准双周振荡特征，2016 年梅雨期持续强降水持续时间近 20 天，大致包含了一个完整的准双周振荡周期的变化信息。因此，选取 6 月 18 日至 7 月 7 日持续发生强降水的 20 天作为研究时段。

李志锦和纪立人（1996）和郑志海等（2010, 2013）研究表明，利用 EOF 方法可以压缩自由度，从历史资料中找出支撑气候变化吸引子的独立变量，其中解释方差较大的 EOF 分量能够反映原变量场变化的大部分信息，并主要表示实际大气的慢变部分，往往具有较高的可预报性。本文基于 EOF 方法提取稳定分量，各变量各层次分别进行，下面

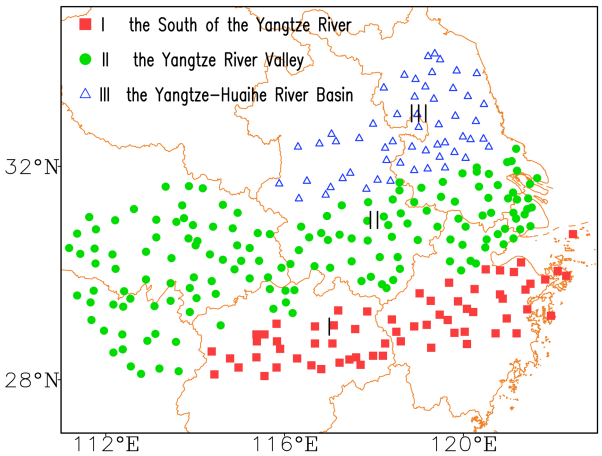

图 1　梅雨监测区域划分及监测站点空间分布示意图。

Fig. 1　Schematic of the divisions in the monitoring area and the spatial distribution of the monitoring stations

① 中国气象局预报与网络司. 2014. 关于印发《梅雨监测业务规定》的通知, 气预函（2014）28 号 [R].

以 500 hPa 位势高度场为例，具体步骤如下：

（1）对 1981～2010 年研究时段历史同期位势高度距平场进行 EOF 分解：

$$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{V}\boldsymbol{T}, \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{F}$ 是由位势高度距平场构建的资料阵，$\boldsymbol{V}$ 为空间函数阵，$\boldsymbol{T}$ 为时间函数阵。由于 $\boldsymbol{V}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 是根据资料阵 $\boldsymbol{F}$ 进行正交分解而得到的，常把空间函数阵 $\boldsymbol{V}$ 看作一组正交基向量，时间函数 $\boldsymbol{T}$ 看作各个正交向量的权重系数，则不同时间的要素场是若干个典型场按不同权重线性叠加的结果。

（2）通过计算进一步可以得到 $\boldsymbol{V}$ 的逆矩阵 $\boldsymbol{V}'$，$\boldsymbol{V}'$也为一组正交基向量，

$$\boldsymbol{V}\boldsymbol{V}' = \boldsymbol{E}. \tag{2}$$

（3）将同期历史资料分别在正交基 V'投影展开：

$$\boldsymbol{T}_2 = \boldsymbol{V}'\boldsymbol{F}_2. \tag{3}$$

由于 $\boldsymbol{V}'$是一组正交基向量组成的空间函数阵，因此可以分别计算各个正交基分量所占解释方差比重，并据此进行排序，取解释方差较大且明显高于多年气候平均的少数 EOF 分量进行合成，即可得到该层次的稳定分量。

3 梅雨盛期天气形势分析

3.1 降水量演变情况

根据《梅雨监测业务规定》判断，2016 年 5 月 25 日江南区率先入梅，7 月 21 日长江区最后出梅，整个梅雨期持续时间较长，降水量较常年偏多一倍以上（赵俊虎等, 2018）。由图 2 可知，在 2016 年梅雨期中梅雨区平均降水量呈现明显的阶段性变化，在梅雨期开始阶段 5 月 25 日至 6 月 3 日为多雨期，出现 2 次较强的降水过程，而 6 月 4～17 日为间歇少雨期，仅有 3 天降水量超过气候平均值。6 月 18 日至 7 月 7 日则为降水强盛的多雨期，期间有 15 d 降水量超过气候平均值，有 8 d 超过气候平均值两倍以上。7 月 8～21 日又转入降水相对较平稳阶段。6 月 18 日至 7 月 7 日整个梅雨区均处于梅雨盛期，在此期间梅雨区有 77 个监测站累计降水量超过 500 mm，最大超过 1000 mm，梅雨区 277 个监测站平均累计降水量达 388.2 mm，比历史同期平均（1981～2010 年平均降水量 172.1 mm）偏多一倍以上，为 1981 年以来历史同期最高，这一阶段出现的持续强降水值得重点研究，本文选取 2016 年 6 月 18 日至 7 月 7 日作为研究时段，重点研究影响该阶段的关键稳定分量。

3.2 天气形势分析

根据梅雨区（277 站平均）平均要素场的时间—高度剖面图（图 3）可知，研究时段（2016 年 6 月 18 日至 7 月 7 日）主要包含了 3 次连续较强的降水天气过程，期间梅雨区中低层相对湿度较大，水汽垂直分布也较为深厚，反映了充足的水汽条件，结合图 4 可以看出西南暖湿气流提供了重要的水汽

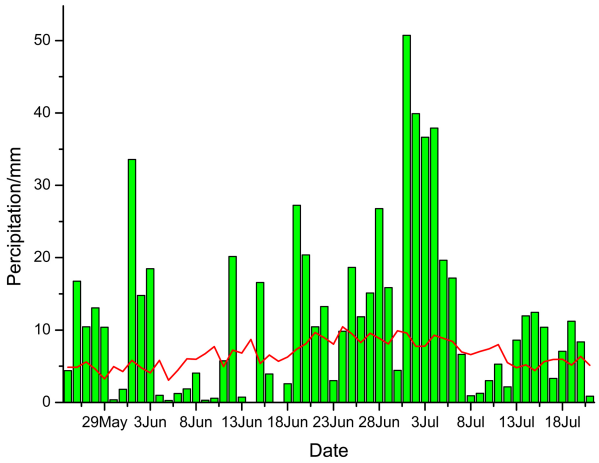

图 2 2016 年 5 月 25 日至 7 月 21 日梅雨区（277 站平均）逐日降水量演变图（曲线为气候平均，单位：mm）

Fig. 2 Regional (277 stations in the Meiyu region) average daily precipitation from 25 May to 21 July 2016. The curve indicates climate average (units: mm)

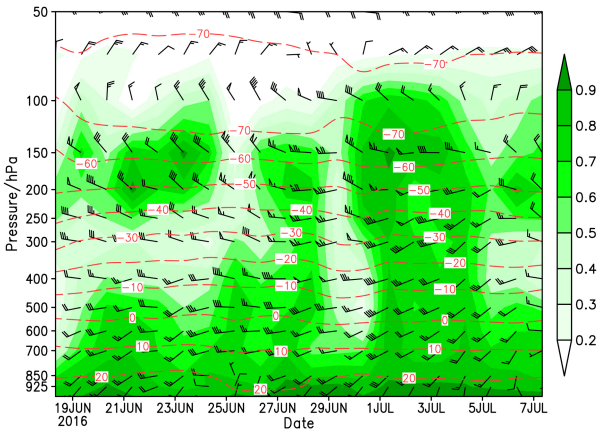

图 3 2016 年 6 月 18 日至 7 月 7 日（研究时段，下同）梅雨区（277 站平均）气温（等值线，单位：°C）、风和相对湿度（阴影区）时间—高度剖面

Fig. 3 Time–height cross sections of the average air temperature (contours, units: °C),wind and relative humidity (shadings) in the Meiyu region (277-station average) from 18 Jun to 7 Jul 2016 (the research period, the same below)

来源。另外，风场的切变也有利降水的维持。

从研究时段的平均位势高度场和相对湿度场分布情况来看（图 4），在对流层高层 100 hPa（图 4a），中高纬地区呈西高东低的分布形势，有利于引导冷空气南下影响梅雨区。在中低纬南亚高压势力更为强盛，16720 gpm 闭合曲线覆盖范围更广，比气候平均态向东延伸多出 50 个经距以上，表明南亚高压整体覆盖范围面积更大，控制范围更偏东。与之相对应，在对流层中层 500 hPa（图 4b），西太平洋副热带高压（副高）偏西偏强，这非常有利于副高西侧暖湿气流输送至梅雨区，高压系统的强盛也有利于阻挡北部冷空气，在梅雨区形成冷暖对峙，利于诱发和维持准静止锋等天气系统。中高纬度槽脊波动特征更为明显，在乌拉尔山附近地区和鄂霍次克海附近地区各有一个明显的高压脊，对应阻塞高压的形成和发展。而中间的槽区则有利于冷空气南下影响梅雨区。从低层 700 hPa 流场和 850 hPa 流场（图 4c–d）来看，在中高纬地区与 500 hPa 乌拉尔山和鄂霍次克海附近高压脊相对应的区域多表现为较强的反气旋式环流，在两个高压脊的中间则是较强的北风气流，大量的冷空气由此南下。在中低纬度地区，副高控制区域反气旋式环流较为强盛，同时在孟加拉湾一带表现为较强盛的西南暖湿气流，相对湿度大值区由此区域一直向东向北延伸至梅雨区。由图 4c 可知，梅雨区处于南侧暖湿气流的北端和北侧西风带气旋式弯曲的交汇区域，冷暖空气和水汽辐合在梅雨区配合非常好，因而造成了梅雨区的持续强降水。

4　稳定分量分析

4.1　稳定分量的空间分布特征

提取研究时段各高度层次的位势高度场、风场和相对湿度场的稳定分量（图 5）。图 5a，b 中位势高度场稳定分量正负距平中心位置和强度与图 4

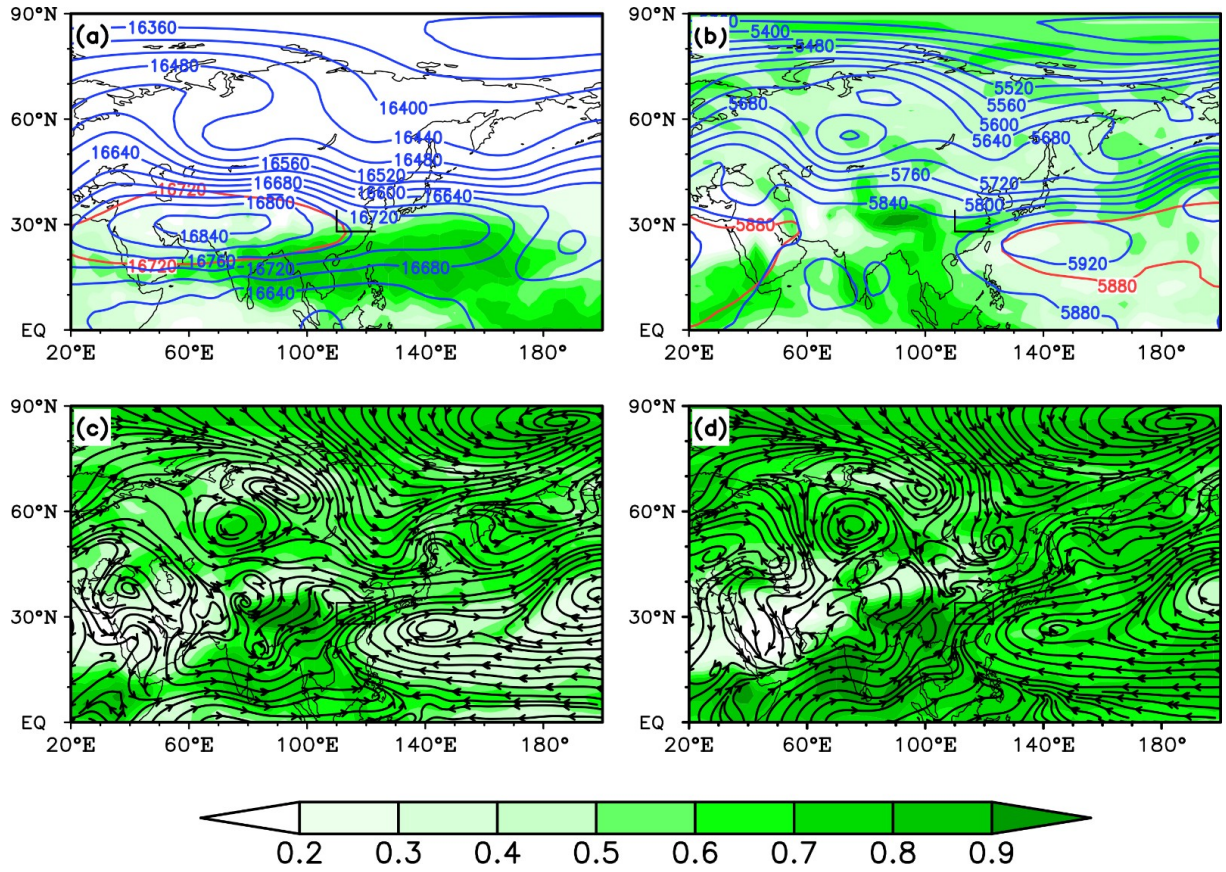

图 4　研究时段平均位势高度场、相对湿度场和流场分布：（a） 100 hPa；（b） 500 hPa；（c） 700 hPa；（d） 850 hPa。图（a，b）中蓝色等值线为位势高度，红色等值线为气候平均，单位：gpm；图（a–d）阴影区为相对湿度

Fig. 4　Distribution of the average geopotential height field, relative humidity field, and stream field during the research period at (a) 100 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa. The shaded areas in (a–d) indicate relative humidity, the contours in (a, b) indicate geopotential height, the red isolines indicate climate average (units: gpm)

位势高度场的槽脊分布有较好的对应关系：在对流层高层 100 hPa（图 5a），在南亚高压区域均为一致的正距平区，尤其在梅雨区上空为一闭合的正距平中心，反映了南亚高压对梅雨区的影响异常增强；在中高纬度，从欧亚大陆到北太平洋上空为两高一低的“＋－＋”分布形势，有利于加强中低层对应系统的发展；在对流层中层 500 hPa（图 5b），与图 4b 中乌拉尔山阻塞高压和鄂霍次克海阻塞高压相对应的区域分别表现为较强的正距平区，在梅雨区东侧有一个较强的闭合正距平中心，与图 4b 中偏西偏强的副高也有较好的对应关系。在图 5b 中也可以看出从青藏高原向东北方向有一个波列存在，这与王丽娟（2008）等的发现较为一致，该波列的存在加强了梅雨区北侧的槽脊分布形势，利于槽区在梅雨区北侧的维持和加强。在对流层低层 700 hPa 和 850 hPa（图 5c，d），中高纬度的两个阻塞高压区域各对应有一个反气旋式环流形势，在双阻之间则为较强的北风环流，表示在此区域有更强的冷空气向南输送，在梅雨区东侧也表现为一个较明显的反气旋式环流，与偏强的副高对应较好，梅雨区处于东侧反气旋式环流和北侧气旋式环流的辐合区，从而在梅雨区形成自西南向东北辐合的环流形势，有利于降水的产生。从相对湿度稳定分量场分布来看，梅雨区南侧的水汽输送与气候平均相比并没有明显增强，但梅雨区北侧槽区的相对湿度却有明显的增加，这表明北支气流的水汽输送和汇聚作用对于此次梅雨持续降水的发生和维持起到了非常重要的作用。综上，稳定分量的分布不仅能够体现原始场的主要特征，突出反映关键环流系统，而且还能够揭示内在的波动变化特征。

从位势高度场稳定分量的空间立体分布形势分析，可以发现：（1）在中高纬地区，在乌拉尔山附近上空存在一个较强的正距平中心（图 6a，d），从纬向分布来看低层位置偏西，随高度增加逐渐向

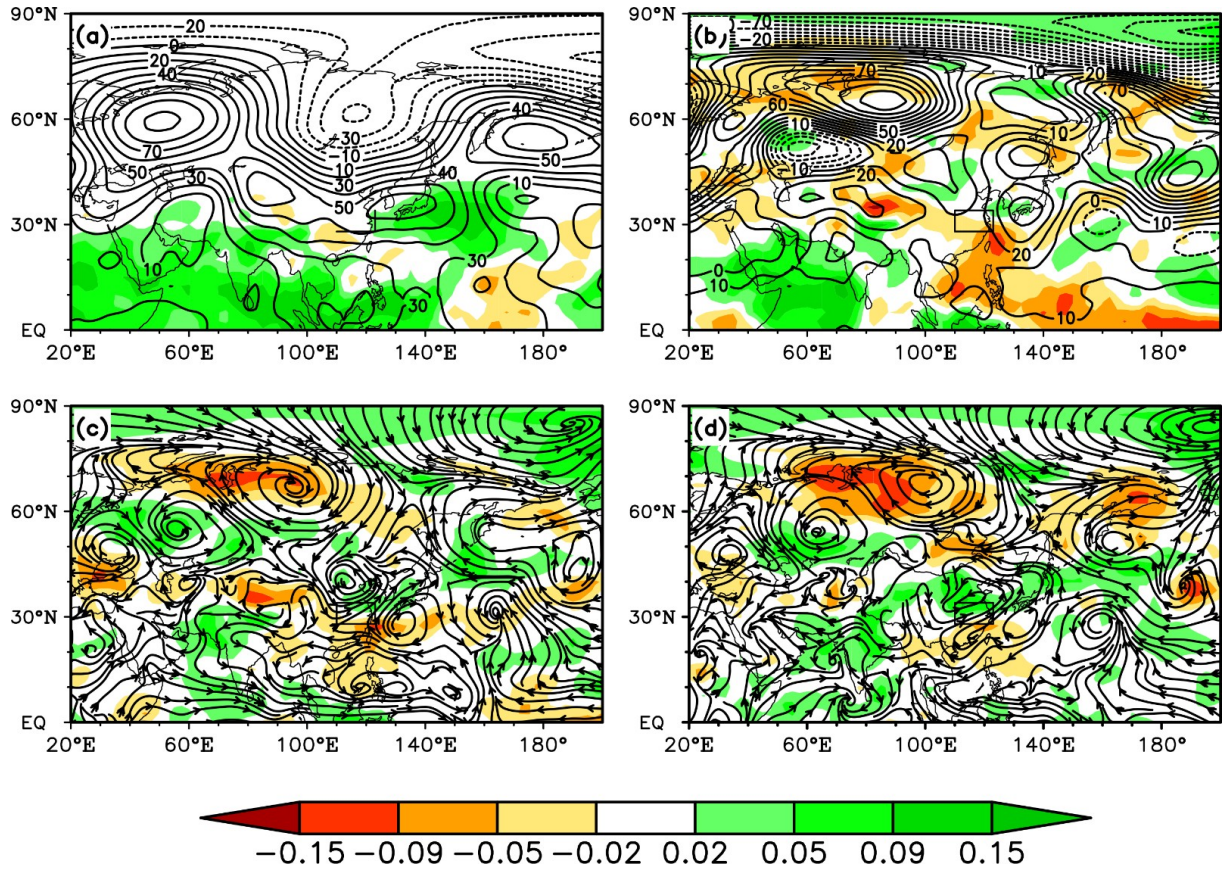

图 5 研究时段位势高度场、相对湿度场和流场稳定分量分布：（a） 100 hPa；（b） 500 hPa；（c） 700 hPa；（d）850 hPa。图（a，b）等值线为位势高度（单位：gpm），图（a–d）阴影区为相对湿度

Fig. 5 Distribution of the stable components of the geopotential height field, relative humidity field, and stream field during the research period at (a) 100 hPa, (b) 500 hPa, (c) 700 hPa, and (d) 850 hPa. The shaded areas in (a–d) indicate relative humidity, the contours in (a, b) indicate geopotential height (units: gpm)

东扩展（图 6d），从经向分布来看低层中心位置偏北，低层从 60°N 向北直至北极地区，而到了高层则向南延伸至 30°N 附近（图 6a），与图 5a 相对应，其向南伸展区域与南亚高压向北伸展的高压脊相连，共同形成一个较强的正中心（图 7b）。其作用是促使乌拉尔山阻塞高压的形成和维持，并在该地区东侧维持了一个较强的北风气流带，非常有利于极地和高纬冷空气南下。（2）在东部的鄂霍次克海及周边地区上空也存在一个较强的正距平中心（图 6d），中心位置主要在 40°～60°N 之间，其作用是促使鄂霍茨克海阻塞高压的形成和维持（图 6c）。（3）在上述两个正距平中心之间则为对应低槽区域的负距平区，由图 6d 可知，两个正距平区都是较为深厚的系统，在它们之间从地面向上延伸至近对流层顶则维持了相对深厚的负距平区，有利于加强低槽的发展。同时由图 6b 可见，在 90°～110°E 之间从极地向南存在着明显的“＋－＋”耦合分布形势，利于中间负距平区域的稳定维持，利于冷空气的向南输送。（4）亚洲东北部至极地为较强的负距平区（图 6c 和图 7b），与中高纬的正距平区配合，有利于维持和增强 AO 正位相结构。（5）在中低纬度，由图 6e 可知，大范围的正距平区域反映了异常偏强的南亚高压，在对流层中上层，南亚高压向东伸展到 140°E 附近，加强了副高的偏西偏强的发展形势（图 6f）。（6）除了上述较大空间尺度的环流形势外，位势高度场稳定分量也在一定程度上体现了梅雨区周边的环流特点，由图 6b，e 可知，在梅雨区北侧为负距平区域，利于低槽的维持和发展，从而使得冷空气直接输送到梅雨区。另外在梅雨区东侧和西侧的两个正距平区，客观上起到输送和汇聚暖湿空气的作用，有利于降水的持续维持。

对于持续近 20 天的梅雨区暴雨而言，空间尺度较大的阻塞高压、南亚高压和副高的稳定维持起

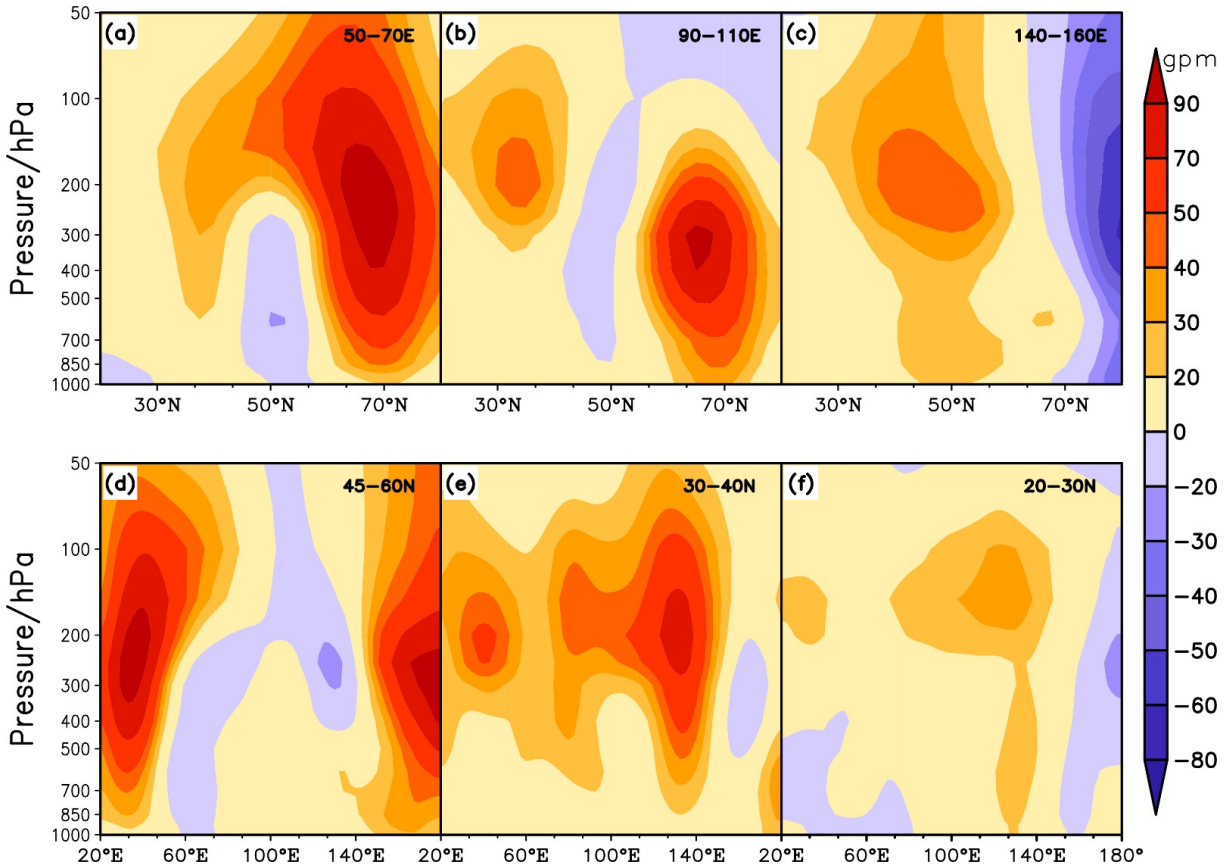

图 6　研究时段位势高度场稳定分量垂直剖面分布（单位：gpm）：（a）沿 50°～70°E 经度带平均；（b）沿 90°～110°E 经度带平均；（c）沿 140°～160°E 经度带平均；（d）沿 45°～60°N 纬度带平均；（e）沿 30°～40°N 纬度带平均；（f）沿 20°～30°N 纬度带平均

Fig. 6　Vertical profile distribution of stable components of the geopotential height field during the research period(units: gpm): (a) Regional average along 50°–70°E; (b) regional average along 90°–110°E; (c) regional average along 140°–160°E; (d) regional average along 45°–60°N; (e) regional average along 30°–40°N; (f) regional average along 20°–30°N

到关键的支撑作用。如图 7b 所示，中高纬两个较强的正距平中心和中低纬伸展范围较大的正距平带，三个较强的正距平中心相互配合，共同构成影响研究时段持续性强降水的“三极”关键系统。

4.2 稳定分量的演变特征

为进一步考察稳定分量随时间的演变情况，从研究时段向前向后扩展各取一个时段（前一时段为 2016 年 5 月 29 日至 6 月 17 日；后一时段为 2016 年 7 月 8～27 日），分别计算位势高度场稳定分量进行对比研究。为方便对比，三个时段取同一组正交基进行投影展开。由图 7 可知：（1）整体而言，在前一时段在对流层中上层（500 hPa、400 hPa、300 hPa、250 hPa 和 200 hPa）平均位势高度场稳定分量以负距平为主（图 7a），上述“三极”系统尚未建立，在研究时段（图 7b）中纬度地区转变为正距平，“三极”关键系统开始建立并逐步加强，但在极地地区变化不大仍以负距平为主，低纬度地区变化也相对较小。在后一时段（图 7c），正距平形势进一步增强，“三极”形势发生变化，原有的正距平中心不仅范围有所扩大和偏移，中心强度也有明显增强，并且中低纬地区有新的正距平中心形成，“三极”形势演化成“多极”形势。（2）在前一时段，60°N 以北的中高纬和极地地区均为一致的负距平区域（图 8a–c 红色折线），这种南高北低的形势不利于大范围冷空气南下，而且副高也相对较弱，位置偏南偏东，对梅雨区的影响相对较小，因而该时段降水总体较弱。（3）在后一时段，中高纬地区几乎全部呈正距平形势（图 8a–c 绿色折线），乌拉尔山阻塞高压对应的正距平区域范围向东扩展至 100°E 以东地区，使得原有的冷空气输送通道变浅变窄且位置向东偏移，使得影响梅雨区的冷空气减弱东移。在中低纬地区南亚高压区域的正距平中心强度增大范围东扩，副高对应区域正值中心强度增大垂直范围更加深厚但位置略有东移，使得副高外围的西南暖湿气流影响区域偏东，对梅雨区影响减弱，故这一阶段降水有所减弱。

4.3 与其他年份稳定分量对比分析

在 2016 年梅雨期位势高度场稳定分量的“三极”结构对持续强降水起到非常重要的影响作用，那么这种“三极”结构在其他年份是否存在？2009 年 6 月 18 日至 7 月 7 日也出现了相对稳定持续的降水时段，但总体降水量远小于 2016 年。为方便对比，同样提取该时段位势高度场稳定分量，并分六个区域进行平均，考察其随高度的分布情况（图 9）。从 2009 年位势高度场稳定分量空间分布结构来看（图略），“三极”结构并不存在，2016 年中高纬地区到极地的正负距平分布形势，有利于增强 AO 正位相分布形势，而在 2009 年则呈 AO 负位相分布形势，极地和高纬度地区呈较强的正距平分布，中高纬度则呈现负距平分布形势（图 9a–c）。在中低纬度地区除三个较弱的正距平区域外其余地区均为负距平（图 9d–f）。2016 年南亚高压整体东伸位置明显比 2009 年偏东，强度明显偏强。2009 年副高偏弱偏东，对梅雨区降水作用影响相对较弱，加之中纬度环流较为平直，不利于引导冷空气南下，冷暖空气配合不好，因而 2009 年梅雨区降水也相对较弱。这也证明了

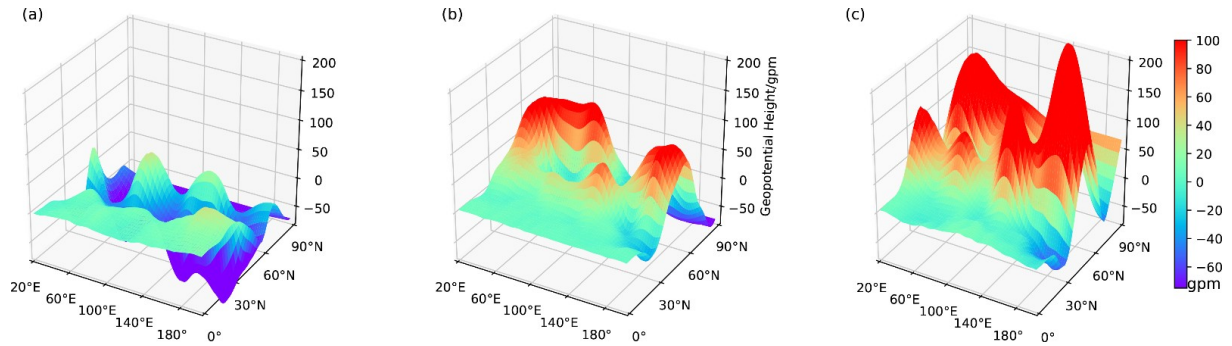

图 7 研究时段及前、后时段位势高度场稳定分量（单位：gpm）对流层中上层（500～200 hPa）平均分布：（a）前一时段（2016 年 5 月 29 日～6 月 17 日，下同）；（b）研究时段（2016 年 6 月 18 日～7 月 7 日）；（c）后一时段（2016 年 7 月 8 日～7 月 27 日，下同）

Fig. 7 Average distribution of stable components of the geopotential height field in the middle and upper troposphere (500–200 hPa) during, before, and after the research period (units: gpm): (a) The previous period (between 29 May and 17 Jun 2016, the same below); (b) research period (between 18 Jun and 7 Jul 2016, the same below); (c) later period (between 8 Jul and 27 Jul 2016, the same below)

“三极”结构对于梅雨区持续强降水的重要支撑作用。

4.4　更长时间尺度稳定分量分析

通过上述分析发现，不论 AO 正负位相变化还是南亚高压和副高的强度变化与位置分布，除了与准双周的低频变化有关外，还受更长时间尺度的低频变化影响。因此，要搞清楚影响 2016 年梅雨期持续强降水的关键系统，还需要进一步研究“三极”关键系统与更长时间尺度稳定分量的关系。

不少学者研究表明（杨秋明, 2009; 梁萍和丁一汇, 2012; 陈官军和魏凤英, 2012），梅雨及其影响系统也存在较为明显的 60 d 左右周期的低频振荡。将研究时段向前后扩展，取 2016 年 5 月 29 日至 7 月 27 日 60 d 按照 2.2 节的方法计算位势高度场稳定分量。由图 10 可知，影响梅雨区降水的“三极”系统基本是存在的。在中高纬存在两个较强的正距平中心，控制范围比持续强降水时段略小，在两个正距平中心存在一个明显的负距平区域，为冷空气南下提供有利的输送通道。在中低纬存在两个较弱的正距平区域，对应南亚高压和副高的正距平取明显比持续强降水时段要弱，这是南亚高压和副高的准双周振荡变化所导致。整体而言，“三极”系统基本存在，这也导致了 2016 年梅雨期降水总体偏强。在 60 d 尺度的位势高度场稳定分量提供的环流背景下，在梅雨期各阶段，稳定分量呈现出不同特征，在梅雨初期持续强降水开始之前的时段，位势高度场稳定分量以负距平为主，“三极”系统还没有建立，此时降水也相对较弱，随“三极”系统稳固建立，梅雨区进入持续强降水阶段，而到了后

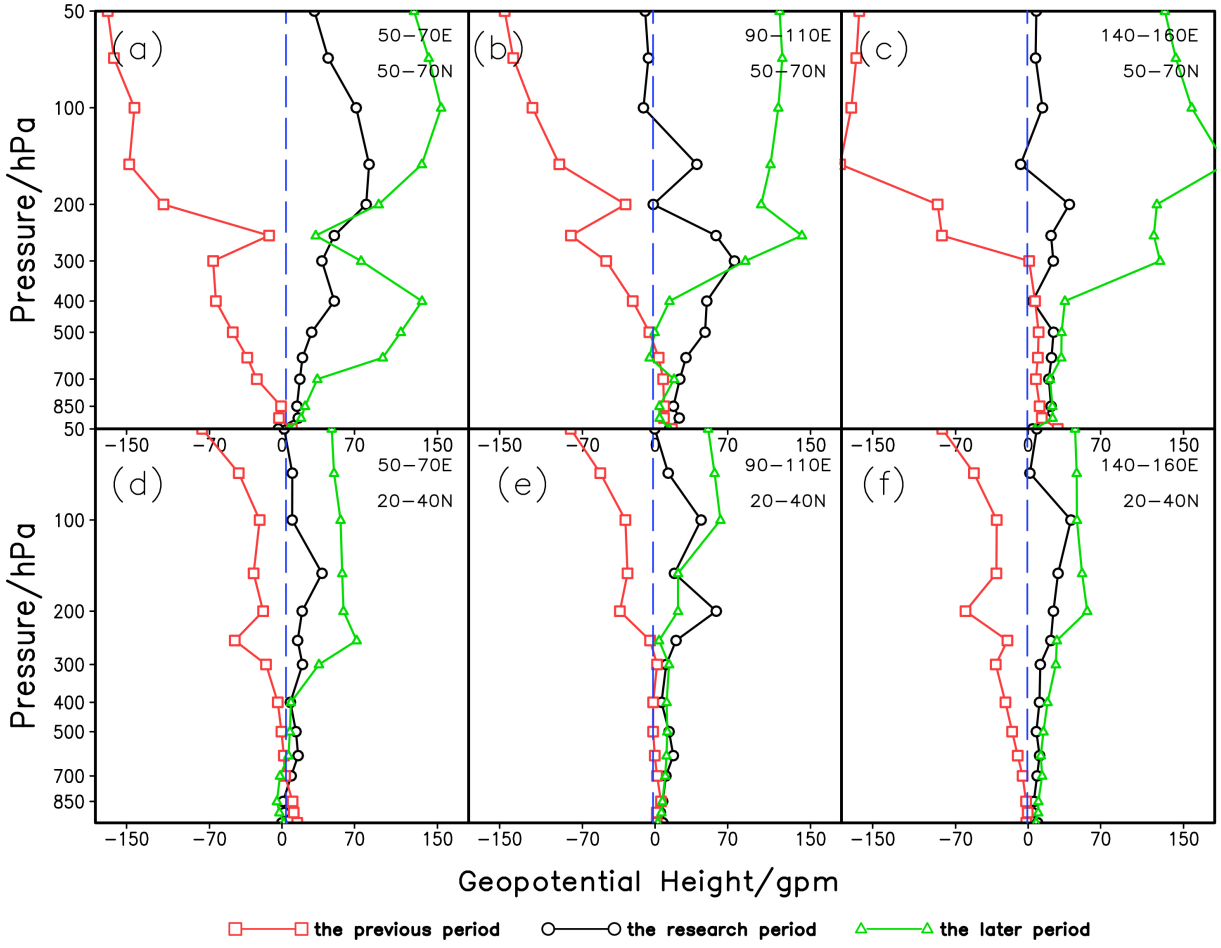

图 8　研究时段及前后时段位势高度场稳定分量垂直分布（单位：gpm）：（a）（50°～70°N，50°～70°E）区域平均；（b）（50°～70°N，90°～110°E）区域平均；（c）（50°～70°N，140°～160°E）区域平均；（d）（20°～40°N，50°～70°E）区域平均；（e）（20°～40°N，90°～110°E）区域平均；（f）（20°～40°N，140°～160°E）区域平均

Fig. 8　Vertical distribution of the stable components of the geopotential height field during, before, and after the research period (units: gpm): (a) Regional average in (50°–70°N, 50°–70°E); (b) regional average in (50°–70°N, 90°–110°E); (c) regional averagein (50°–70°N, 140°–160°E); (d) regional average in (20°–40°N, 50°–70°E); (e) regional average in (20°–40°N, 90°–110°E); (f) regional average in (20°–40°N, 140°–160°E)

一时段“三极”的正距平中心不仅范围有所扩大和偏移，中心强度也有了明显增强，并且中低纬地区有新的正距平中心形成，“三极”形势演化成“多极”形势，在此阶段降水转为平稳，降水强度也减弱不少。

总之，60 d 尺度的位势高度场稳定分量为 20 d 持续强降水研究时段的稳定分量提供重要的环流背景，在此基础上，由于南亚高压进一步东扩加强、副高的进一步增强和西伸以及中高纬阻塞高压的重建和增强，使得“三极”关键系统配置更为有利，从而形成梅雨区异常强盛的持续强降水事件。

5 结论和讨论

通过上述研究得出如下结论：

（1）在位势高度场稳定分量中存在的“三极”分布形势，是维持梅雨区持续强降水的关键系统。“三极”系统即：在中高纬地区（50°～80°N，20°～80°E）附近区域的上空 500 ～150 hPa 之间的正距平中心（乌拉尔山阻塞高压）、（40°～70°N，140°～160°W）上空 500～200 hPa 之间较强的正距平中心（鄂霍茨克海阻塞高压）以及中低纬（20°～40°N，20°～140°E）附近区域的上空 500～100 hPa 之间的正距平中心（南亚高压和副高）。

（2）在中高纬度两个深厚正距平区之间，是一片相对深厚的负距平区，有利于冷空气的向南输送。从相对湿度场稳定分量分布来看，梅雨区北侧槽区的相对湿度却有明显的增加，这表明北支气流的水汽输送和汇聚作用对于此次梅雨持续降水的发生和维持起到了非常重要的作用。

（3）中低纬度的正距平区域（南亚高压和副

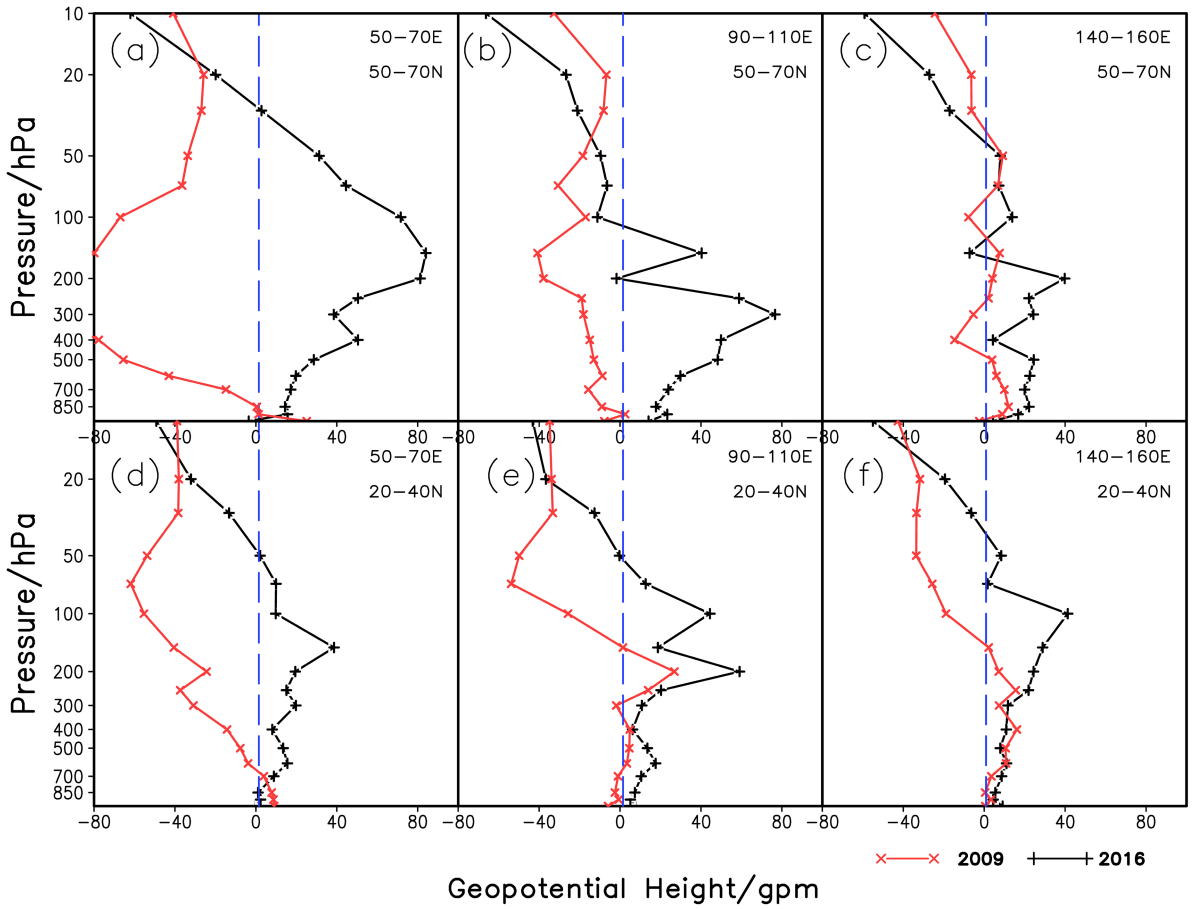

图 9 2016 年研究时段及 2009 年同期位势高度场稳定分量垂直分布（单位：gpm）：（a）（50°～70°N，50°～70°E）区域平均；（b）（50°～70°N，90°～110°E）区域平均；（c）（50°～70°N，140°～160°E）区域平均；（d）（20°～40°N，50°～70°E）区域平均；（e）（20°～40°N，90°～110°E）区域平均；（f）（20°～40°N，140°～160°E）区域平均

Fig. 9 Vertical distribution of stable components of the geopotential height field during the research period in 2016 and 2009 (units: gpm): (a) Regional average in (50°–70°N,50°–70°E); (b) regional average in (50°–70°N, 90°–110°E); (c) regional average in (50°–70°N, 140°–160°E); (d) regional average in (20°–40°N, 50°–70°E); (e) regional average in (20°–40°N, 90°–110°E); (f) regional average in (20°–40°N, 140°–160°E)

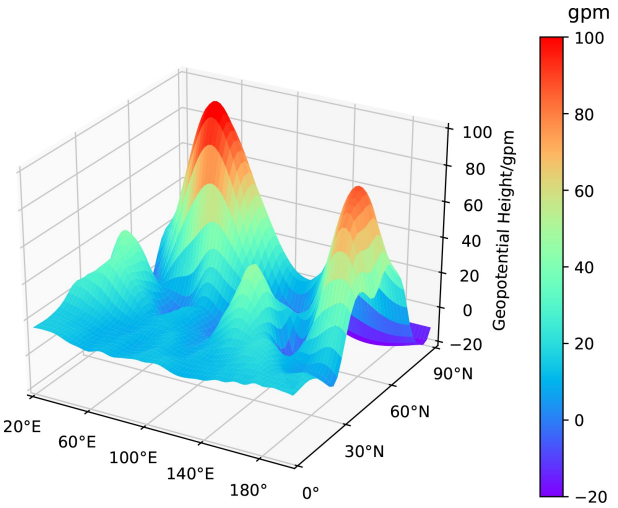

图 10　2016 年梅雨期 60 天（2016 年 5 月 29 日至 7 月 27 日）平均位势高度场稳定分量对流层中上层（500～200 hPa）平均分布（单位：gpm）

Fig. 10　Average distribution of stable components of the geopotential height field in the middle and upper troposphere (500–200 hPa) during the Meiyu period (60-d average between 29 May and 27 July 2016) (units: gpm)

高）呈东西向带状分布，且主要存在于对流层中高层，在东侧 130°～140°E（偏西偏强的副高）和 100°E 以西附近（主要对应青藏高原及周边区域），有两个正值区域向下持续到对流层低层，它们共同加强了梅雨区南侧暖湿气流的汇聚输送作用。

（4）从稳定分量随时间演变及与其他年份的对比研究发现，“三极”系统的建立和演化导致梅雨区降水呈现出强弱不同的阶段特点，“三极”结构弱化或不存在的阶段，梅雨区持续性降水也较弱。

（5）60 d 尺度的位势高度场稳定分量为 20 d 持续强降水期间的稳定分量提供重要的环流背景，为“三极”关键系统的建立提供重要的基础条件，从而有利于进一步形成梅雨区异常强盛的持续强降水事件。

同时，通过对稳定分量的研究，进一步明确稳定分量的定义和提取方法。分析稳定分量应着眼于整个大气环流系统，考察其在整个空间的立体分布结构，提取时空尺度相匹配、尤其在关键区域具有异常突出特征的关键稳定分量。稳定分量具有如下特征：时空尺度相匹配，在空间范围具有与研究时段相匹配的水平尺度和垂直分布范围；异常特征突出，对气候平均态有足够的补充意义，能够较好地代表原始变量场的分布情况；对下级更小时空尺度的系统有较强的持续影响作用；具有较好的可预报性。

另外，影响持续强降水前后阶段稳定分量调整变化的原因机制也有待进一步研究。

参考文献（References）

陈官军, 魏凤英. 2012. 基于低频振荡特征的夏季江淮持续性降水延伸期预报方法 [J]. 大气科学, 36(3): 633−644.　Chen Guanjun, Wei Fengying. 2012. An extended-range forecast method for the persistent heavy rainfall over the Yangtze–Huaihe River valley in summer based on the low-frequency oscillation characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(3): 633−644. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11111

封国林, 杨涵洧, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. 大气科学, 36(5): 1009−1026.　Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(5): 1009−1026. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220

何金海, 杨松. 1992. 东亚地区低频振荡的经向传播及中纬度的低频波动 [J]. 气象学报, 50(2): 190−198.　He Jinhai, Yang Song. 1992. Meridional propagation of East Asian low-frequency mode and midlatitude low-frequency waves [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 50(2): 190−198. doi:10.11676/qxxb1992.021

Jiang X N, Waliser D E. 2009. Two dominant subseasonal variability modes of the eastern Pacific ITCZ [J]. Geophys. Res. Lett., 36(4): L04704. doi:10.1029/2008GL036820

Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83(11): 1631−1644. doi:10.1175/BAMS-83-11-1631

Krishnamurti T N, Gadgil S. 1985. On the structure of the 30 to 50 day mode over the globe during FGGE [J]. Tellus A, 37(4): 336−360. doi:10.3402/tellusa.v37i4.11677

李崇银. 1991. 30~60 天大气振荡的全球特征 [J]. 大气科学, 15(3): 66−76.　Li Chongyin. 1991. Global characteristics of 30-60 day atmospheric oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 15(3): 66−76. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1991.03.10

Li S L, Ji L R, Lin W T, et al. 2001. The maintenance of the blocking over the Ural mountains during the second Meiyu period in the summer of 1998 [J]. Adv. Atmos. Sci., 18(1): 87−105. doi:10.1007/s00376-001-0006-4

李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25(4): 20−25.　Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25(4): 20−25. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.1999.04.004

李志锦, 纪立人. 1996. 实际预报可预报性的时空依赖性分析 [J]. 大气科学, 20(3): 290−297.　Li Zhijin, Ji Liren. 1996. Analysis of the

dependence of predictability on spatial and temporal scales from operational forecasts [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmos. Sinica) (in Chinese), 20(3): 290−297. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.03.04

梁萍, 丁一汇. 2011. 2009 年是空梅吗? [J]. 高原气象, 30(1): 53−64. Liang Ping, Ding Yihui. 2011. Does non-occurrence of Meiyu take place in Yangtze–Huaihe basins during summer of 2009? [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(1): 53−64.

梁萍, 丁一汇. 2012. 东亚梅雨季节内振荡的气候特征 [J]. 气象学报, 70(3): 418−435. Liang Ping, Ding Yihui. 2012. Climatologic characteristics of the intraseasonal oscillation of East Asian Meiyu [J]. Acta Meteor. Sinica (inChinese), 70(3): 418−435. doi:10.11676/qxxb2012.036

Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific [J]. J. Atmos. Sci., 28(5): 702−708. doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0702:DOADOI>2.0.CO;2

Ninomiya K, Nishimura T, Ohfuchi W, et al. 2002. Features of the Baiu front simulated in an AGCM(T42L52) [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 80(4): 697−716. doi:10.2151/jmsj.80.697

庞玥, 王黎娟, 于波. 2013. 江淮流域梅雨期降水与 10～30d 低频振荡的联系 [J]. 大气科学学报, 36(6): 742−750. Pang Yue, Wang Lijuan, Yu Bo. 2013. The relationship between 10-30 d low-frequency oscillation and the rainfall over Changjiang–Huaihe River valley during Meiyu period [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36(6): 742−750. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.06.011

Pearson K. 1901. LIII. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 2(11): 559−572. doi:10.1080/14786440109462720

施能. 2009. 气象统计预报 [M]. 北京: 气象出版社, 128–142. Shi Neng. 2009. Meteorological Statistical Forecast (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 128–142.

Teng H Y, Wang B. 2003. Interannual variations of the boreal summer intraseasonal oscillation in the Asian–Pacific region [J]. J. Climate, 16(22): 3572−3584. doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3572:IVOTBS>2.0.CO;2

王丽娟. 2008. 东北冷涡过程对江淮梅雨期降水影响机制的分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 82pp. Wang Lijuan. 2008. Analysis to the Impacts of the Northeast Cold Vortex (NECV) process on the rainfall during Meiyu period over the Yangtze–Huaihe River [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science &Technology, 82pp.

杨秋明. 2009. 全球环流 20～30 d 振荡与长江下游强降水 [J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 52(10): 1485−1501. Yang Qiuming. 2009. The 20-30-day oscillation of the global circulation and heavy precipitation over the lower reaches of the Yangtze River valley [J]. Science in China (Series D): Earth Sciences, 52(10): 1485−1501. doi:10.1007/s11430-009-0156-2

杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等. 2013. 夏季欧亚中高纬大气低频振荡的纬向传播特征 [J]. 中国科学: 地球科学, 56(9): 1566−1575. Yang Shuangyan, Wu Bingyi, Zhang Renhe, et al. 2013. The zonal propagating characteristics of low-frequency oscillation over the Eurasian mid-high latitude in boreal summer [J]. Science ChinaEarth Sciences, 56(9): 1566−1575. doi:10.1007/s11430-012-4576-z

曾宇星. 2016. 基于历史资料提取稳定分量方法的改进研究及在模式中的应用 [D]. 兰州大学博士学位论文, 110pp. Zeng Yuxing. 2016. Improvement research of stable component extraction based on historical data and its application on numerical model [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Lanzhou University, 110pp.

赵俊虎, 陈丽娟, 王东阡. 2018. 2016 年我国梅雨异常特征及成因分析 [J]. 大气科学, 42(5): 1055−1066. Zhao Junhu, Chen Lijuan, Wang Dongqian. 2018. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(5): 1055−1066. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1708.17170

郑志海, 封国林, 丑纪范, 等. 2010. 数值预报中自由度的压缩及误差相似性规律 [J]. 应用气象学报, 21(2): 139−148. Zheng Zhihai, Feng Guolin, Chou Jifan, et al. 2010. Compression for freedom degree in numerical weather prediction and the error analogy [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21(2): 139−148. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2010.02.002

郑志海, 黄建平, 封国林, 等. 2013. 延伸期可预报分量的预报方案和策略 [J]. 中国科学: 地球科学, 56(5): 878−889. Zheng Zhihai, Huang Jianping, Feng Guolin, et al. 2013. Forecast scheme and strategy for extended-range predictable components [J]. Science China Earth Sciences, 56(5): 878−889. doi:10.1007/s11430-012-4513-1

周兵, 文继芬. 2007. 1998 年夏季我国东部降水与大气环流异常及其低频特征 [J]. 应用气象学报, 18(2): 129−136. Zhou Bing, Wen Jifen. 2007. Abnormality of summertime precipitation of eastern China and general circulation with LFO in 1998 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 18(2): 129−136. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2007.02.001