

夏季副高次季节尺度东西变动特征及其与中国西南降水的关系*

晏红明¹ 字侯丞²

1 云南省气候中心, 昆明, 650034

2 云南大学资源环境与地球科学学院, 昆明, 650504

摘 要 副高是影响中国气候的大尺度环流系统, 研究次季节尺度副高东西变动对西南地区降水的影响具有十分重要的意义。本文首先根据副高东西变动的关键区位置分别定义了前夏和后夏副高东西变动指数, 指数具有显著的 10-30 天次季节周期, 能够很好表征副高次季节东西变动的特征。根据指数的标准化值, 共选取前夏和后夏东西事件 195 次 (1374 天)。进一步对东西事件的分析表明次季节尺度上副高东西变动与西南地区降水有十分密切的联系, 在副高偏西 (东) 事件中, 副高经历了由东→西→东 (西→东→西) 逐渐变化的过程, 相应西南大部分地区的降水经历了逐渐由少→多→少 (多→少→多) 的演变, 次季节尺度上西南地区降水对副高变化的响应与副高东西变动过程中副高北侧及副高主体区域的水汽和气流的垂直变化有很大的关系。另外, 分析发现对于西南地区而言, 受副高次季节东西变动的影响, 贵州和重庆地区降水变化的一致性比较好, 而云南和四川地区降水变化的区域差异较大, 尤其是云南。前夏, 在副高东西变动过程中云南大部分地区的降水呈现出与西南大部分地区, 尤其与贵州和重庆地区的降水变化完全相反的特征, 即副高偏西 (东) 事件中, 云南大部分地区的降水偏少 (多), 西南其它大部地区降水偏多 (少); 后夏, 除云南中北部地区, 西南大部分地区的降水变化基本一致。

关键词 次季节尺度 西太平洋副热带高压东西变动 前夏和后夏 中国西南地区 夏季降水

Characteristics of subseasonal scale zonal movement of subtropical high in summer and its relationship with precipitation in southwest China

Yan Hongming¹ Zi Yucheng²

1 Yunnan climate center, Kunming, 650034, China

2 Department of Resources, Environment and Geosciences, Yunnan University

Abstract The subtropical high over the Western Pacific (abbreviated as WPSH) is a large-scale

*收稿日期: 2019-8-21. 网络出版日期: 2020-

作者简介 晏红明 (1966-), 女, 博士, 研究员, 主要从事季风气候研究和短期气候预测。y-hm@netease.com

资助课题 国家自然科学基金 (41575097, U1902209, 41775073); 云南省自然科学基金重点项目 (2016FA041); 西南区域重点课题 (2014-4) 共同资助。

circulation system that affects on the climate change in China. It is of great significance to study the influence of the sub-seasonal WPSH east-west movement on the precipitation anomalies in the southwest China. In this paper, the WPSH east-west displacement index is firstly defined according to the main activity region of WPSH respectively in early summer and late summer. The index has a significant period of 10-30 days and can indicates well the WPSH zonal movement. A total of 195 east and west WPSH events (1374 days) are chosen based on the standardization index. The results show that the sub-seasonal WPSH zonal movement is a closed relation to the precipitation in the southwest China. During the west(east) events, the WPSH move gradually from east→west→east(west→east→west), and the rainfall in the most southwest China changed from less→more →less(more→less→more). The precipitation variation in the southwest China is closed related to the anomalous water vapor and atmospheric vertical movement in the north side and the main WPSH area. Further, the results show that the precipitation anomalies in Guizhou and Chongqing is well coincident, but it demonstrate the significant characteristic of regional difference in Yunnan and Sichuan during the sub-seasonal WPSH movement, especially in Yunnan. In early summer, the precipitation anomalies in Yunnan are even contrary to that in most southwest China, especially in Guizhou and Chongqing. Namely, when WPSH move westward(westward), the precipitation is less(more) in most Yunnan, on the contrary, the precipitation in most else southwest China is more(less). In the late summer, except the central and northern Yunnan, the precipitation anomalies in most southwest China are basically accordant.

Keywords: Sub-seasonal scale, east-west movement of subtropical high over the western Pacific, early summer and late summer, southwest China, summer rainfall

1 引言

西北太平洋副热带高压（以下简称副高）是中低纬度地区大尺度反气旋性环流系统，在东亚季风系统中占有十分重要的地位。副高北侧盛行的中纬度西风气流以及南侧盛行的热带东风气流是链接中高纬度和赤道地区天气和气候系统的关键环节。副高变化极其复杂，其面积、强度、南北位置和东西进退等变化通过与周围环流系统的不同配置决定着东亚季风季节进程、梅雨过程、中国雨带位置，甚至会影响高温天气的产生。近年来长江流域、淮河流域、华北区域、西南区域的极端旱涝和高温天气等灾害性天气的频繁出现均与副高活动密切联系（王黎娟等，2009；Liu et al., 2019；Zhou et al., 2014；Li et al., 2015；Wang et al., 2018）。

因此进一步研究副高变化及其影响,对于深入系统地认识我国天气气候异常变化的原因具有非常重要的科学意义。

由于副高西北侧的暖湿气流水汽输送是影响我国夏季降水的主要通道,副高的北跳、南撤以及持续停留就直接决定着我国华南、长江流域以及华北地区雨季的长短或旱涝,对我国主雨带位置的年际变化有显著影响,因此,过去的大多数研究主要关注副高在南北方向的偏移及其影响(张庆云和陶诗言, 1999; 李建平和朱建磊, 2008; 祁莉等, 2008; 韦道明等, 2011; 李崇银等, 2008; 苏同华等, 2017)。而事实上,东亚大部分地区处于副高西侧,副高在夏季南北移动过程中,西部的脊不仅可伸入我国大陆,也可退至西太平洋区域,副高的东西进退会影响中高纬度长波槽脊的位置和强度、水汽输送路径等的异常变化,更重要的是副高东西进退所产生的扰动还会以波列的形式向高纬度地区传播,影响更大范围西风带环流的变化,对我国大范围旱涝和区域性天气的异常变化也有非常重要的影响,如1998年副高的持续偏西偏南导致长江流域梅雨期偏长,降水明显偏多,是长江流域洪涝最显著的年份(赵思雄等, 1998); 2002年副高的异常偏东使得西风带东亚槽偏东,大陆副高加强东进,东亚大陆水汽输送减弱,大陆高压中极强的下沉气流导致中国北方出现了持续高温天气(卫捷等, 2004)。另外, Lu (2001)发现副高的东西进退与暖池地区的对流活动密切联系,副高偏东有利于暖池对流活动加强,偏西则有利于暖池对流活动减弱; Lu and Dong (2001)进一步用数值模拟实验证实了副高的东西进退对暖池地区对流活动的影响; Yang and Sun (2003)的研究也指出副高的东西进退与长江流域有很好的关系,副高偏东有利于长江流域降水偏少,偏西则有利于降水偏多; 作为东亚夏季风系统成员, Yu et al. (2007)的研究表明副高的东西进退与东亚季风系统其它成员相互作用、互为反馈。中国西南位于青藏高原向东延伸部位,副高的东西进退对西南地区气候也有十分重要的影响,2009年西南地区出现的大范围严重干旱就与副高的持续偏西变化密切联系(晏红明等, 2012)。最近晏红明等(2019)分析发现初夏副高的东西变动与中国南部地区降水东西差异的分布密切联系,并进一步分析了副高东西差异对中国南部降水东西差异的影响。这些研究进一步表明了副高东西进退对我国天气气候的重要影响。

副高变化呈现出多时间尺度特征,在年际和年代际尺度上变化明显, Sui et al. (2007)指出副高变化有明显准两年周期和3-5年低频周期,并指出这些变化与海洋性大陆的异常下沉和赤道中东太平洋地区的海温增暖密切联系;很多研究也表明了副高年代际尺度上显著的西伸特征(Sui et al., 2007; Zhou et al., 2009; Wu and Wang, 2015)。针对副高年际和年代际尺度上的变化,目前的很多工作从季节平均状态研究了副高的变化及其影响,年际尺度变

化的影响已在上述表明。最近, Liu et al. (2019) 的研究表明在年代际尺度上中国东部的夏季高温与副高密切联系, 表明1959-2016年副高强度变化与中国654站高温日数的相关高达0.65, 通过99%的显著性检验。但观测事实表明, 副高的次季节变化更加显著, 是副高变化的最主要特征之一, 副高甚至不会持续某一状态超过一个月以上 (Yeo et al., 2012)。早在上世纪90年代, 很多研究就表明副高变化具有显著的准双周振荡 (钱贞成和喻世华, 1991; 张韧和喻世华, 1992)。最近, Ren et al. (2018) 研究了副高东西变动的次季节特征及其东西变化的动力过程, 发现次季节尺度上副高对长江中下游地区降水影响的信号更加明显。本文作者在最近的分析中也发现, 研究某一季节平均状态下的副高变化及其影响, 很难深入认识和了解副高变化及其影响的关键过程, 这可能与副高显著的次季节变化有关, 平均状态会平滑掉副高季节内变化的重要信息。因此, 研究副高次季节变化特征及其影响对于进一步认识我国气候异常的原因具有更加重要的意义。本文针对西南地区气候, 从次季节尺度研究了夏季副高变化对西南地区降水的影响, 由于夏季副高脊线位置季节性南北移动显著, 同时也根据中国夏季风和中国雨带季节性推进过程的变化, 将夏季分为前夏 (5-6月) 和后夏 (7-8月) 两个时段进行研究。

2 资料和方法

本文利用中国气象局国家气象信息中心提供的1979-2018年中国西南区域有完整记录的305站逐日降水资料, 其中四川91站、云南121站、贵州63站、重庆30站, 站点分布如图1所示, 四川西部地区资料缺损严重, 该区域基本没有站点入选; 来自ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 的1979-2018年ERA-Interim再分析高低层大气环流资料, 包括高度、相对湿度、经向风和纬向风、垂直速度等逐日资料, 分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$ (Simmons et al., 2004; Dee et al., 2011)。

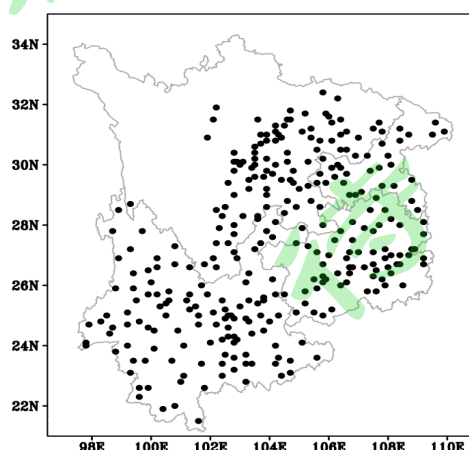


图 1 选取的中国西南 305 个观测站点分布

Fig.1 The location of 305 observation stations in southwest China

分析方法采用回归分析、合成分析、功率谱分析、流函数和波通量分析等数理统计诊断方法。为了得到资料的次季节异常变化信息，根据 Krishnamurthy and Shukla (2000) 和 Ren et al. (2015) 的滤波方法，对所有资料进行滤波处理。首先对资料进行五天滑动平均，去除资料中的高频波动，然后去除日气候平均，最后再去除季节异常滤除年际尺度信号，即可得到变量的次季节尺度异常值。例如对于某一个季节（季节内总日数为 S_{num} ）第 m 年 第 n 天的降水资料 $R(m,n)$ ，该天的气候平均为：

$$R_C(n) = \frac{\sum_{m=1979}^{m=2018} R(m,n)}{2018-1979}$$

去除该日的日气候平均：

$$R'(m,n) = R(m,n) - R_C(n)$$

再去除季节异常滤除年际尺度信号：

$$R'_S(m) = \frac{\sum_{n=1}^{S_{num}} R'(m,n)}{S_{num}}$$

最后得到变量的次季节尺度异常值为：

$$R''(m,n) = R'(m,n) - R'_S(m)$$

3 夏季高低层大气环流变化特征及副高东西变化指数定义

图 2 分别为前夏和后夏 500 百帕、700 百帕和 850 百帕高低层多年气候平均场。可以看到在西北太平洋地区高低层均存在一个东西向的异常反气旋环流，中心位于西北太平洋地区，分别选取 5880gpm、3150gpm 和 1510gpm 来表征高低层副高主体位置，可以看到在副高主体区域内反气旋环流和负涡度明显。但我们也注意到，在副高主体以西的附近区域仍然为反气旋环流并配合有负涡度，表明特征线表征的副高主体并不能完全反映副高反气旋环流以及相应的负涡度变化。前夏和后夏副高脊线的形状和位置有明显的季节变化，前夏高低层脊线主要以西南-东北走向为主，后夏却以东西走向为主。因此，前夏至后夏 110° - 130° E 范围内脊线西段的季节性北抬更加显著，前夏一般位于 15° - 20° N 之间，后夏北抬到 28° N 附近，但脊线东段的季节差异不明显，特别在 700 百帕和 850 百帕，前夏至后夏由南向北仅移动了

大约 5 个纬距左右。

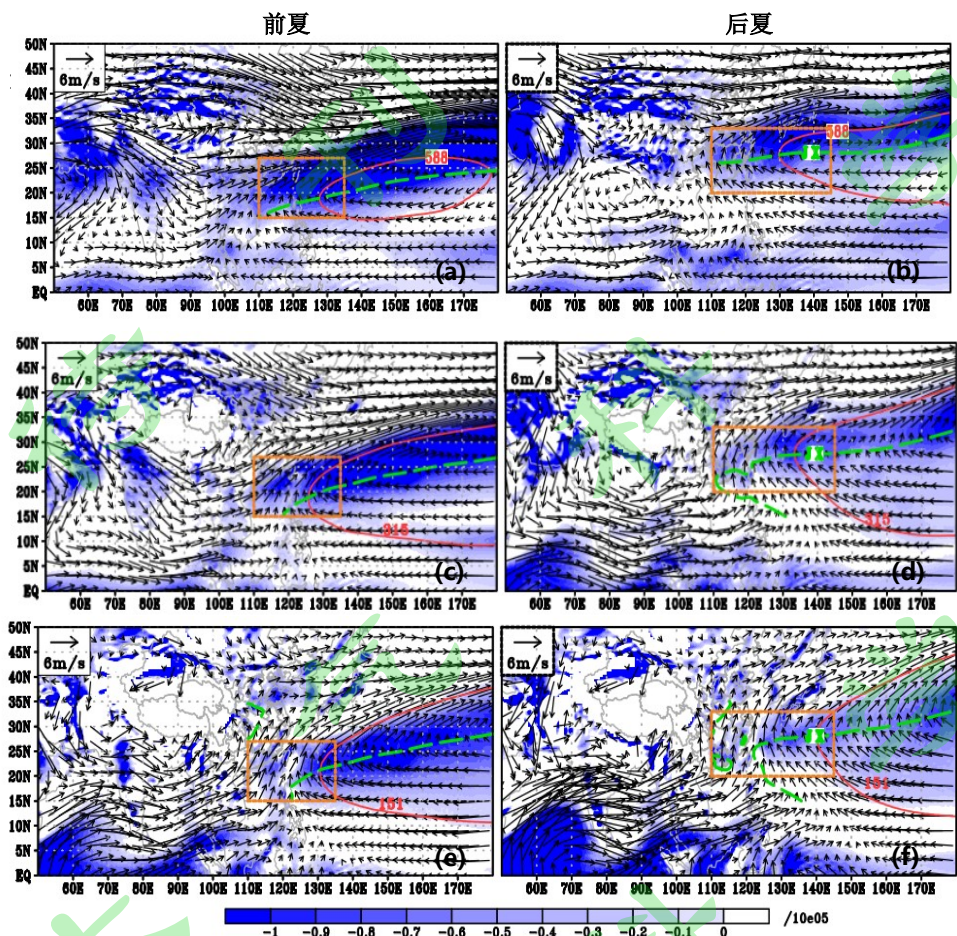


图 2 1979-2018 年前夏和后夏气候平均风场（矢量， m s^{-1} ）、特征线和相对涡度（阴影， 10^{-5} s^{-1} ），矩形方框表示关键区域位置。（a）前夏 500 百帕；（b）后夏 500 百帕；（c）前夏 700 百帕；（d）后夏 700 百帕；（e）前夏 850 百帕；（f）后夏 850 百帕

Fig.2 Climatology wind field(vector, m s^{-1}), feature line and relative vorticity (shaded, 10^{-5} s^{-1}) of early-summer and late-summer of 1979-2018. Rectangular boxes represent the regions of key areas. (a) 500-hPa field in the early summer; (b) 500-hPa field in the late summer; (c) 700-hPa field in the early summer; (d) 700-hPa field in the late summer; (e) 850-hPa field in the early summer; (f) 850-hPa field in the late summer

判断副高东西变化的指标比较多，目前最常用的是 500 百帕 5880gpm 特征线西脊点位置（刘芸芸等，2012），但由于高度场的年代际升高明显，该指标定义的副高东西变化表现出明显的年代际西伸。另外，关键区域相对涡度也是人们在大量研究中最常使用来衡量副高东西变化的指标之一（王黎娟等，2005；陆日宇等，2007）。最近也有研究根据梯度风近似理论，将副高西脊点定义在副高西边界脊线上最大经向风所在的位置（Yang et al., 2017）。作者最近比较了以上三个指标对夏季中国降水的反映能力，发现以上三个指标均能很好地反映副高对中国东部降水的影响，而对于西南地区降水而言，除了相对涡度指标可以反映西南

地区降水的变化，其他两个指标都很难反映副高变动对西南地区降水的影响（晏红明等，2019）。从图 2 也可以看到，5880gpm 特征线表明的副高主体变化不能很好反映反气旋环流和相应负涡度的活动。因此，本文分析依然选取副高反气旋环流西部及其与负相对涡度大值区相重叠的范围作为关键区，用关键区的区域平均涡度来表征副高东西位置的变动，前夏和后夏关键区域的位置如图 2 矩形方框所示。可以看到在所选取的关键区域内既包含了反气旋环流的西部，同时也包含了不同层次特征线表征西脊点位置，关键区内的负涡度变化也比较明显。由于低层副高变化更加稳定和强大，并与水汽输送密切联系，对我国夏季降水有十分重要的影响（陆日宇等，2007），同时，考虑到西南低纬高原地区海拔高度影响，本文选取 700hPa 关键区区域平均涡度来定义副高东西变动指标，分别简称为前夏 VORT-early 和后夏 VORT-late 指数，定义如下

$$\text{VORT-early} = \overline{\text{VORT}} (15^{\circ}\text{--}27^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{--}140^{\circ}\text{E})$$

$$\text{VORT-late} = \overline{\text{VORT}} (20^{\circ}\text{--}30^{\circ}\text{N}, 110^{\circ}\text{--}145^{\circ}\text{E})$$

为了进一步考察所选取的关键区是否能够很好地反映副高的东西变化，选取前夏和后夏 700 百帕副高 3150gpm 特征线西脊点位置比气候平均特征线西脊点位置偏东或偏西 10 个经距的年份，表示副高异常偏东年和偏西年，图 3 分别为前夏和后夏副高异常偏东和偏西年的矢量风和相对涡度的差值场，差值场上异常反气旋环流区和相对涡度大值区一定程度上反映了副高东西变动的敏感区。可以看到，所选取的关键区基本涵盖了异常反气旋环流的主体区域和负相对涡度的大值区，进一步表明选取的关键区能够很好地反映副高的东西变动。

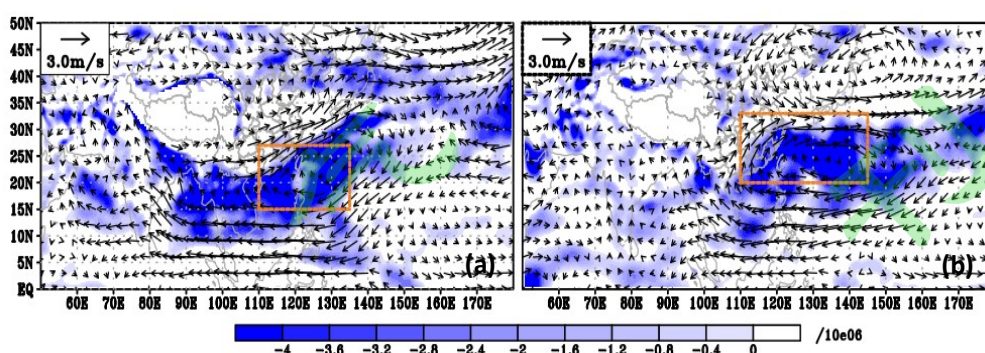


图 3 前夏 (a) 和后夏 (b) 700 百帕副高偏西和偏东年风场 (矢量) 和相对涡度 (阴影) 的差值
Fig.3 The difference fields of wind (vector) and relative vorticity (shaded) at 700hPa between WPSH westward and westward years in early summer (a) and late summer (b)

4 次季节尺度副高东西变动事件及其副高变化的特征

4.1 次季节尺度副高东西变动事件的选取

根据以上定义，利用滤波处理后的资料分别得到前夏和后夏次季节尺度异常的副高东西变动指数序列，图 4 分别为前夏（图 4a）和后夏（图 4b）副高指数的功率谱分析，表明副高变动有显著的 10-30 天次季节特征。例如图 4c 为 2018 年夏季副高指数标准化，进一步表明副高东西变动的次季节特征。为了使分析能够更加突出副高东西变动特征及其对西南地区降水的影响，选取异常偏东和偏西事件进行分析。选取标准为：VORT-early 和 VORT-late 标准化值连续 4 天大于 1.0 和小于 -1.0 分别表示一次异常偏东和偏西事件，并要求每次事件的峰值日间隔至少大于 10 天，以保证一个次季节尺度周期内仅有一次偏东或偏西事件，如果峰值日间隔小于 10 天，则定义为同一次事件（Ren et al., 2015）。

根据以上标准分别选取前夏次季节尺度副高异常偏东和偏西事件 49 次和 42 次，后夏副高异常偏东和偏西事件 55 次和 49 次，各种事件的累计天数均分别超过 300 天，具体如表 1 所示。

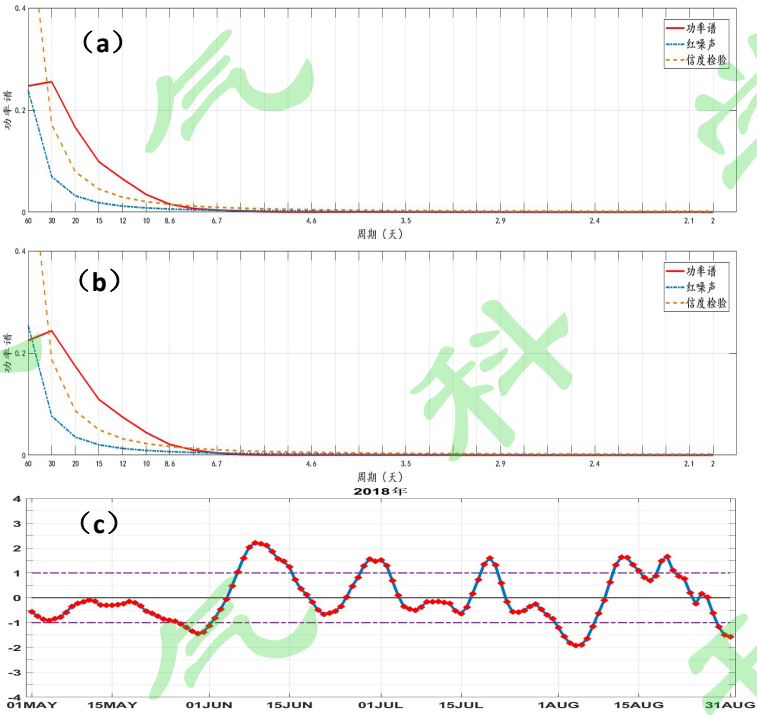


图 4 前夏 (a) 和后夏 (b) 次季节异常副高东西指数的功率谱分析，2018 年 5-8 月副高东西指数的逐日标准化时间系列 (c)

Fig.4 The power spectrum analysis of the sub-seasonal WPSH index in early-summer (a) and late-summer (b). The standardized time series of daily WPSH index from May to August in 2018 (c)

4.2 次季节尺度副高东西变动的特征

图 5 为前夏副高异常偏东和偏西事件期间以及超前和滞后 12 天时 500 百帕 5880gpm 特征线合成的位置，可以清楚看到副高异常东西移动过程中副高西脊点逐渐向东或向西变化的

过程。偏西事件超前第 12 天，5880gpm 特征线西脊点位于 131°E ，之后逐渐由东向西推进，超前第 6 天时向西推进到 122°E 附近，超前第 3 天时推进至 120°E 以西，在偏西事件期间副高西脊点到达最西端位置，约位于 113°E （图 5a）。而在偏西事件滞后的时段，特征线西脊点又逐渐由西向东撤退，滞后第 3 天西脊点东退到 118°E 附近，第 6 天东退明显，退至 130°E ，之后再逐渐东退，滞后第 12 天时，东退至 132°E 附近（图 5c）。在偏东事件时，副高西脊点的变化刚好相反，超前时西脊点逐渐由西向东退，从 119°E 东退至 140°E ，即达到副高最东端位置（图 5b），之后又逐渐由东向西推进，从 140°E 向西推进至 125°E 附近（图 5d）。

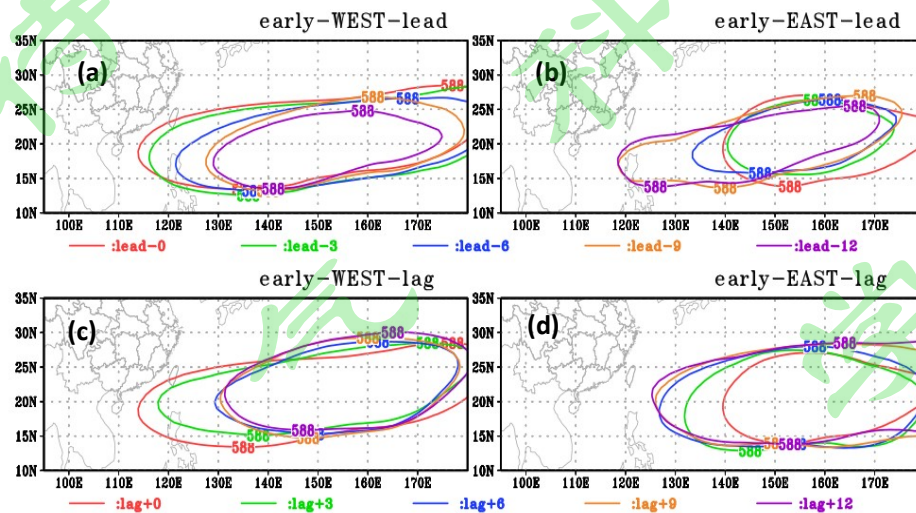


图 5 前夏副高东、西事件时 5880gpm 特征线超前和滞后的合成

(a) 偏西超前；(b) 偏东超前；(c) 偏西滞后；(d) 偏东滞后

Fig.5 Leading and lagging composites of 5880gpm characteristic lines during WPSH westward and eastward events in early summer. (a) leading westward events; (b) leading eastward events; (c) lagging westward events; (d) lagging eastward events

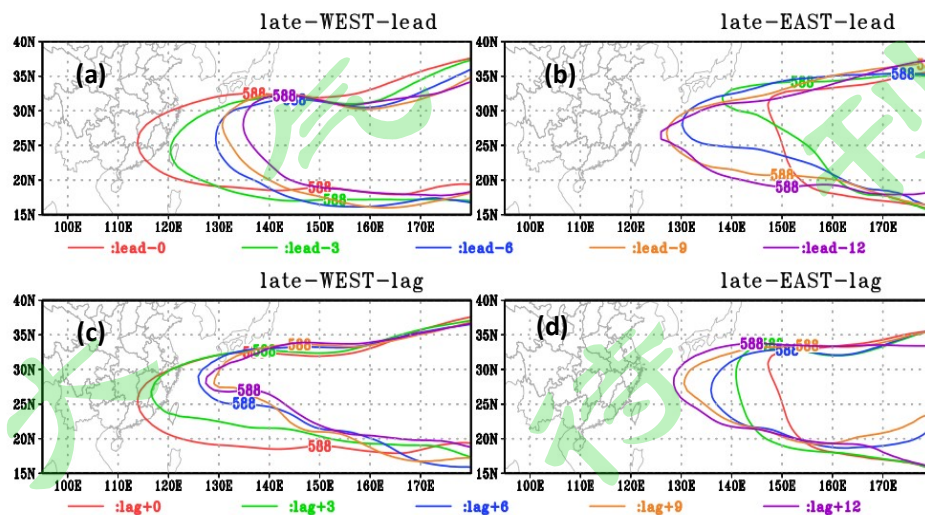


图 6 后夏副高东、西事件时 5880gpm 特征线超前和滞后的合成。

偏西超前；(b) 偏东超前；(c) 偏西滞后；(d) 偏东滞后

Fig.6 The same as Fig.5, but in late summer

同样地，后夏副高异常偏东和偏西事件过程期间，5880gpm 特征线西脊点的变化也表现出同样的特征（图 6）。副高偏西时，5880gpm 特征线西脊点逐渐由东向西推进，从 135°E 推进到 114°E（图 6a），到达最西点后又逐渐由西向东退，从 114°E 东退至 130°E 附近（图 6c）。偏东事件时，副高逐渐由西向东退，从 125°E 东退至 149°E 附近（图 6b），到达最东位置后，又逐渐由东向西推进，从 149°E 西推进至 129°E 附近（图 6d）。

表 1: 前夏和后夏次季节尺度副高偏西和偏东事件
Table 1 The westward events and eastward events of sub-seasonal subtropical high zonal movement

	前夏（次数/天数）		后夏（次数/天数）	
偏西	42	325	49 次	329 天
偏东	49	359	55 次	365 天

在副高异常偏东和偏西事件期间，高低层次季节环流异常也可以清楚看到副高东西变动相应的大气环流差异特征。前夏副高偏西事件中，高层 200 百帕欧亚中纬度至东亚低纬度地区呈现出反气旋（A）-气旋（C）-反气旋（A）-气旋（C）异常波列，东亚大陆东部-西北太平洋 20°-40°N 地区异常反气旋显著，其南侧的异常偏东气流与 110°-140°E 由南向北的异常越赤道气流在 10°-20°N 西太平洋附近形成明显的气旋性辐合；12500gpm 特征线表征的南亚高压主体位于孟加拉湾北部至青藏高原南部（图 7a1）。500 百帕在欧洲东部和西北太平洋地区存在西北-东南向的 C-A 异常波列，西北太平洋地区的异常反气旋位置比 200 百帕偏南，主体位于 10°-30°N 之间，其西北部为气流上升区和东南大部为气流下沉区；在西北太平洋异常反气旋东北侧的鄂霍茨克海附近还有一个异常气旋，其南侧在中南半岛-赤道西太平洋为异常偏东气流；5880gpm 特征线西脊点向西伸展至 112°E 附近，特征线区域气流下沉显著（图 7a2）。700 百帕主要表现为西北太平洋异常反气旋环流显著，位置与 500 百帕基本一致，其北部边缘地区为正涡度，中部和南部的大部分区域为负涡度，主体区域的负涡度明显，并向西扩展至 90°E 附近，正负涡度的变化与 500 百帕垂直气流的变化相对应；3150gpm 特征线位置偏西，西脊点位于 115°E 附近（图 7a3）。副高偏东事件中，高低层环流变化刚好相反。值得注意的是，偏东事件中 200 百帕欧亚中低纬度地区 C-A-C-A 异常纬向波列以及 500

百帕从欧洲东部中纬度至西北太平洋地区的 A-C 波列更加明显。500 百帕垂直速度和 700 百帕涡度的变化与偏西事件相比刚好相反（图 7b1-b3）。

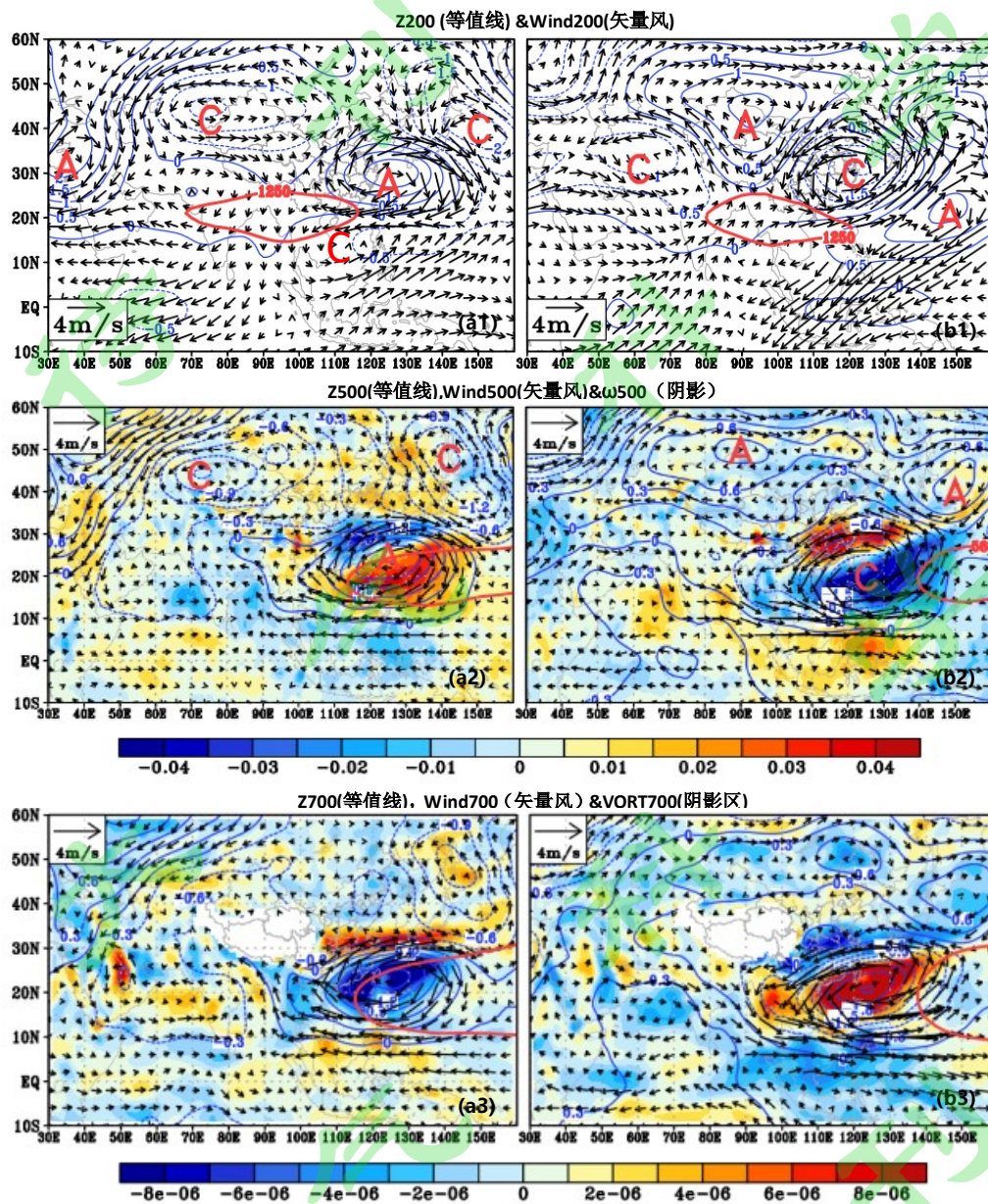


图 7 前夏副高偏东和偏西事件期间 200 百帕、500 百帕、700 百帕次季节环流异常。

(a1-a3) 左列为偏西事件；(b1-b3) 右列为偏东事件

Fig.7 Sub-seasonal circulation anomalies respectively at 200hPa, 500hPa and 700hPa during WPSH in early summer. Left column (a1-a3) denote eastward event and right column (b1-b3) denote westward events..

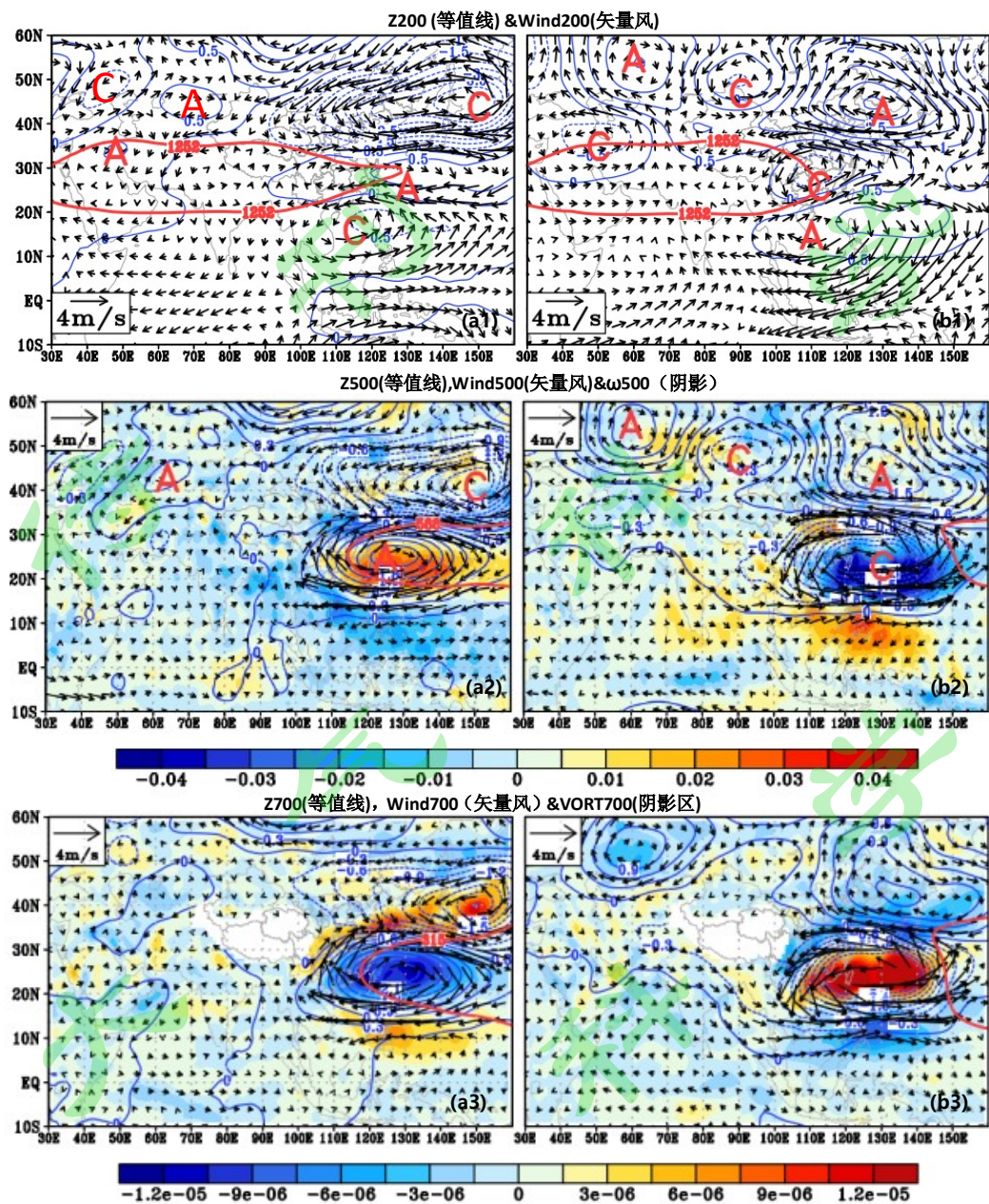


图 8 后夏副高偏东和偏西事件期间 200 百帕、500 百帕、700 百帕次季节环流异常。

(a1-a3) 左列为偏西事件; (b1-b3) 右列为偏东事件

Fig.8 The same as Fig.7, but in late summer

后夏, 高低层异常环流与前夏既有相似之处, 也存在一定的差异。500 百帕和 700 百帕东亚东部的次季节环流异常与前夏基本一致, 东亚东部从中高纬度至低纬度, 副高偏西事件时为 C-A 异常经向波列, 偏东时为 A-C 异常经向波列, 特征线位置也表现出明显的偏东和偏西变化 (图 8a2-a3, 图 8b2-b3)。差异最大主要表现在 200 百帕中高纬度和东亚东部的异常波列变化, 后夏东亚东部的经向波列特征更加明显, 副高偏西时东亚东部从高纬度至低纬度为 C-A-C 异常经向波列 (图 8a1), 偏东时欧亚中高纬度至东亚东部 C-A-C-A-C-A 的异常波列,

其中东亚高纬度至低纬度的 A-C-A 的经向波列也非常显著（图 8b1）。另外，后夏 200 百帕南亚高压在副高偏西时其东部脊点向东伸展的特征也非常明显，东脊点向东伸展至 130°E 附近，而副高偏东时东脊点仅向东伸展至 110°E 附近，副高与南亚高压“相向而行，相背而离”的特征在后夏表现得更加清晰。

前夏和后夏高层 200 百帕的环流差异在一定程度上表明，前夏和后夏中高纬度波列变化对副高东西异常的影响路径是不同的，前夏的波列主要以纬向传播的影响为主，而后夏纬向波列以纬向路径东传至鄂霍次克海附近之后，再以经向波列向南传播，进而影响副高的东西异常。为了进一步分析中高纬度波列变化对副高的影响，图 9 给出前夏和后夏副高东西变动指数回归的 200 百帕流函数和波通量，可以清楚看到，对于前夏而言，中低纬度异常波列的变化伴随着从北大西洋中部-欧洲东部-巴尔喀什湖-东亚和西北太平洋地区的能量传输；后夏副高的变化则更多地与东亚中高纬度地区波能量的传输有关。

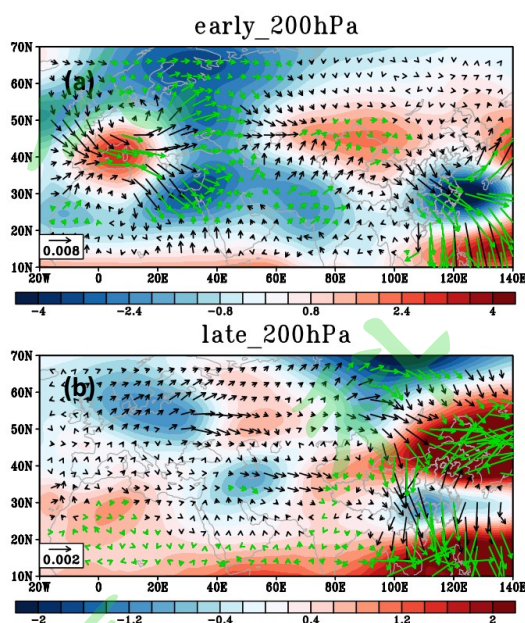


图9 前夏 VORT-early (a)和后夏 VORT-late(b)指数回归的副高异常偏西和偏东事件期间 200 百帕流函数(a, 阴影区, $10^6\text{m}^2\text{s}^{-1}$) 和波通量场 (b, 矢量, m^2s^{-2})。绿色矢量箭头标注表示波通量通过 90%的显著性检验。

Fig.9 Regression patterns of streamfunction (shaded areas, $10^6\text{m}^2\text{s}^{-1}$) and wave activity flux (vector, m^2s^{-2}) at 200hPa during WPSH westward and eastward events on VORT-early (a) and VORT-late (b) index. The green arrows represent the moisture flux that exceeding 90% significant test

另外，副高作为链接高纬度和低纬度环流的重要纽带，其东西变动与高低纬度环流的变化密切联系。从图 7 和图 8 可以看到，不管是前夏还是后夏，副高偏西时副高北侧的异常气旋性环流发展，环流西部的异常偏北气流有利于引导中高纬度地区的冷空气南下影响中国气候；而在副高异常偏东时，副高北侧异常反气旋的发展却不利于引导冷空气南下影响。同时，

从热带地区的流场变化可以看到，副高偏西时，西北太平洋地区加强的异常反气旋南侧为异常东风，并向西扩展至孟加拉湾地区，不利于孟加拉湾南支低压槽的发展，相反，在副高偏东时，西北太平洋地区异常气旋发展，其南侧的西太平洋至孟加拉湾为异常西风，有利于孟加拉湾地区南支低压槽的发展。

5 次季节尺度副高变化与西南地区降水的关系及其影响的物理过程

副高是一个大尺度的环流系统，其东西变动会通过中高纬度长波槽脊，以及中低纬度环流系统的不同配置，对其附近甚至对全球气候产生影响。图 10 分别为相应副高异常东西变动过程中西南地区次季节降水异常超前和滞后的合成，可以看到前夏和后夏副高西伸和东退过程中西南地区降水的演变过程。首先来看副高偏西和偏东事件期间次季节降水的异常分布，可以看到初夏副高偏西时，重庆、贵州、四川中部和南部、云南西部边缘地区的降水偏多，而云南大部，尤其是中部、北部和东部，以及四川中东部降水显著偏少（图 10a5）；副高偏东时，四川大部、贵州、重庆降水主要以偏少为主，而云南除了西部边缘地区和东部部分地区降水偏少外，大部分地区降水主要以偏多为主（图 10b5）。后夏副高偏东和偏西事件期间西南地区的降水差异更加明显，副高偏西时西南地区除云南西北部、贵州北部、四川东部降水偏少外，其余大部分地区降水偏多，而偏东时除云南中部、贵州北部、四川东北部的部分地区降水偏多，其余大部分地区降水偏少。总体来看，副高异常东西事件中，前夏西南地区降水变化的区域差异特征明显，即副高偏西（东）时，贵州和重庆降水偏多（偏少），云南降水偏少（偏多）；后夏西南大部分地区降水变化的一致性较好，副高偏西时主要以偏多为主，偏东时以偏少为主。

进一步分析副高异常东西事件超前和滞后时西南地区异常降水合成，可以清楚看到副高逐渐向西推进和向东撤退的过程中西南地区降水的演变特征。对于前夏副高偏西事件而言，超前第 12 天西南大部分地区降水偏少，四川和贵州之间有范围较小的降水偏多区（图 10a1）；超前第 9 天四川至贵州的降水偏多区范围扩展，而西南东部和云南西部的降水偏少强度逐渐减弱（图 10a2）；超前第 6 天降水偏多的范围进一步扩展覆盖西南北部，中心区域逐渐东移（图 10a3）；超前第 3 天强降水偏多中心东移至重庆和贵州，而云南大部地区主要以降水偏少为主，但强度较弱（图 10a4）；偏西事件期间，西南东部降水偏多和云南大部降水偏少的特征显著（图 10a5）；滞后第 3 天和第 6 天，最明显的特征是西南东部重庆、贵州的降水偏多和云南降水偏少的强度逐渐减弱，四川东部降水偏少的范围逐渐向东扩展（图 10a6-a7）；

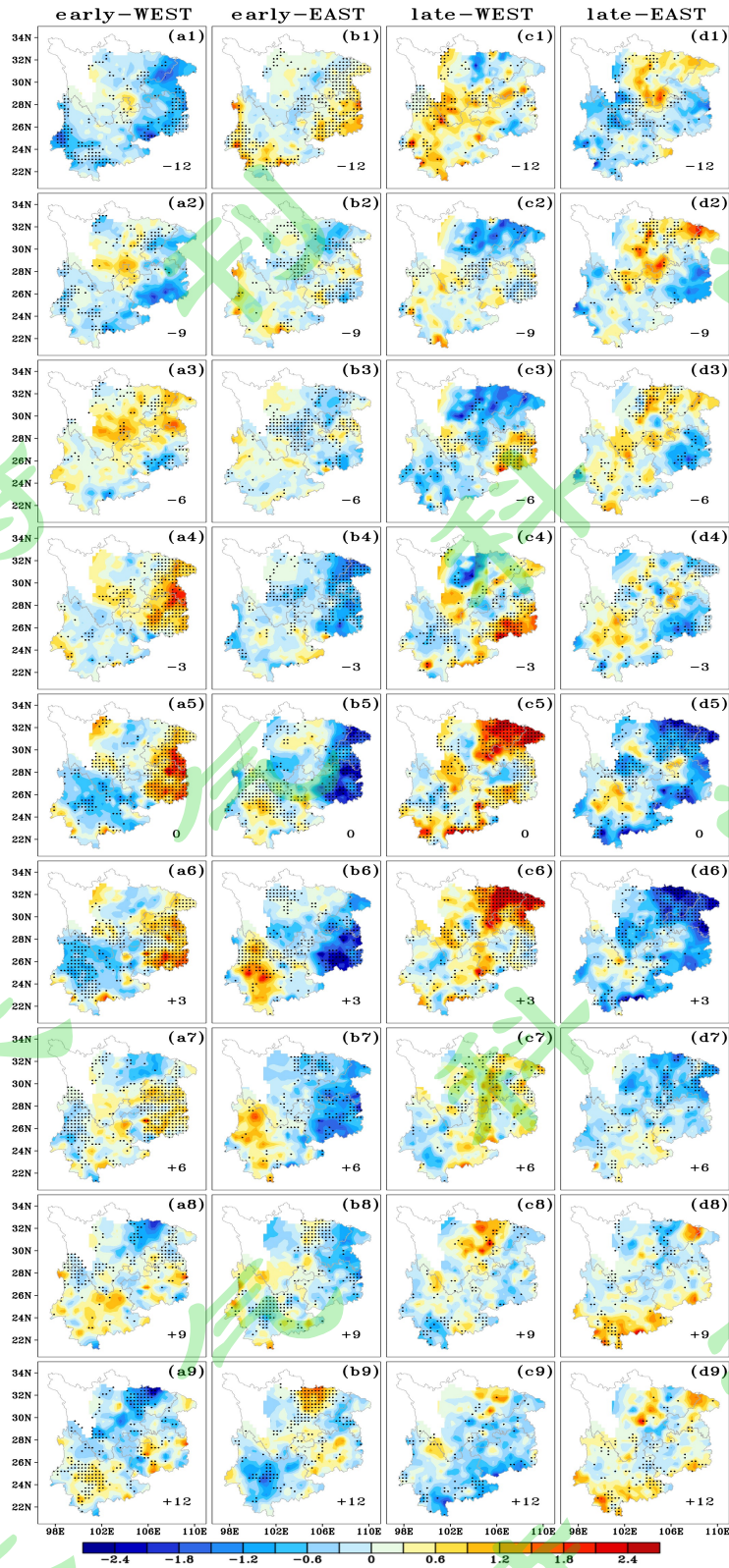


图 10 前夏和后夏副高异常东西事件西南地区次季节降水异常超前和滞后的合成 (单位: mm day^{-1})。 (a1-a9) 第一列为前夏偏西事件; (b1-b9) 第二列为前夏偏东事件; (c1-c9) 第三列为后夏偏西事件; (d1-d9) 第四列为后夏偏东事件。实心圆点标注表示通过 95% 信度检验的区域

Fig.10 The leading and lagging composites of sub-seasonal precipitation anomalies(unit: mm day^{-1}) in southwest China during WPSH eastward and westward events. (a1-a9) the first column denote westward events in

early-summer; (b1-b9) the second column denote eastward events in early-summer; (c1-c9) the third column denote westward events in late-summer; (d1-d2) the fourth column denote eastward events in late- summer. The solid dots denote the areas passing the 95% significant test.

滞后第 9-12 天时，云南大部地区的降水逐渐转为加强，而四川、重庆、贵州大部降水逐渐减弱（图 10a8-a9）。在前夏副高偏东事件的演变过程中，降水变化的演变也比较明显，其变化过程和偏西事件的变化过程基本相反（图 10b1-b9）。从以上降水变化过程发现，前夏副高异常偏东和偏西事件演变过程中西南东部的贵州和重庆地区的降水变化最明显，该区域的降水在副高由东→西→东（西→东→西）的演变过程中呈现出逐渐由少→多→少（多→少→多）的变化特征。副高东西变动过程中四川地区降水的区域差异较明显，云南地区降水虽然在副高东西事件期间的一致性特征比较好，既偏西（东）事件期间降水偏少（多），但从副高东西变动的整个过程来看，其连续变化的特征并不是很好。例如在前夏偏西事件超前的过程中，云南降水在逐渐减少的过程中，超前第 6 天时降水却突然出现了偏多变化。偏东事件超前期间也出现了类似变化不连续的现象。这种变化可能在很大程度上表明了副高对云南降水影响的复杂性。

从后夏副高偏西事件西南降水的演变过程来看，随着副高逐渐由东→西→东的变化，相应西南大部分地区的降水也逐渐呈现出由少→多→少的变化特征（图 10c1-c9）；而偏东时随着副高逐渐由西→东→西的演变，西南大部分地区的降水又逐渐呈现出由多→少→多变化特征（图 10d1-d9）。

水汽输送和气流的上升下沉分别是影响降水变化的两个最重要因子，图 11 分别为前夏 VORT-early 副高东西指数超前滞后回归的整层水汽通量和通量散度，以及 700 百帕垂直速度次季节异常分布。可以看到副高异常东退过程中长江中下游地区在偏东气流的影响下，水汽含量逐渐减少，而云南-华南南部、中南半岛北部、南海-菲律宾海域的水汽含量逐渐增加（图 11a-c）；并在副高东退至最东位置时，该区域的水汽积聚达到最大，此时在西南地区，云南大部分地区水汽辐合明显，而重庆和贵州大部的水汽辐散显著（图 11d）；之后在副高逐渐西伸过程中长江中下游水汽含量逐渐增加，云南-华南南部、中南半岛北部、南海-菲律宾海域的水汽含量逐渐减少，并转为水汽辐散（图 11e-f）。相应地在低层 700 百帕可以看到副高东退过程中，超前第 6 天至第 3 天西南东部-长江中下游地区的气流下沉和云南、中南半岛北部、南海-菲律宾海域的气流上升均逐渐加强（图 11f-g）；至副高最东位置时达到最强，并通过 95% 的信度检验（图 11j）；之后在滞后的第 3 天至第 6 天，随着副高的逐渐西伸，以上区域的气流上升和下沉又逐渐减弱（图 11k-l）。综合以上水汽和气流垂直运动的异常变化，

可以看到对于西南区域而言，在副高偏东事件中，超前时副高由西向东撤退过程中，云南区域气流上升加上水汽辐合使得降水逐渐增加，而贵州和重庆气流下沉和水汽辐散使得降水逐渐减少，而滞后期间副高逐渐由东向西推进的过程中，云南降水逐渐减少，而贵州和重庆的降水又逐渐增加。副高偏西事件时副高经历了逐渐由东向西伸展，再逐渐由西向东撤退的变化，该过程中上述区域水汽和气流的垂直变化刚好相反，由此导致云南地区的降水经历了逐渐由多→少→多的变化，而贵州和重庆地区的降水则逐渐由少→多→少的变化过程（图 10a1-a9）。

图 12 分别为后夏 VORT-late 副高东西指数超前滞后回归的整层水汽通量和通量散度，以及 700 百帕垂直速度次季节异常分布。西南地区位于中国西南部，位置偏西偏南，刚好位于副高西部边缘地带，对副高东西变动的影响比较敏感。由于副高的季节性北抬，后夏副高主体位置较前夏偏北且稍偏东，使得后夏副高东西变动影响时西南地区降水变化的一致性关系比较好。与前夏副高偏东事件相类似，后夏副高偏东事件经历了逐渐由西→东→西的变化过程。首先来看相应的水汽变化，副高由西至东变化超前的第 6 天至第 3 天，在偏东水汽输送的影响下，长江中下游地区的水汽含量偏少的区域逐渐向西南地区扩展，西南地区水汽含量逐渐减少，而广西、广东、菲律宾海域水汽含量逐渐增加（图 12a-c）；副高达到最东位置时，四川、贵州、重庆区域的水汽辐散强度最大，水汽含量减少显著，云南区域水汽变化的区域差异较大，大致呈北部辐合南部辐散的差异变化（图 12d）；在滞后的第 3 天至第 6 天，西南地区的水汽辐散强度逐渐减弱，重庆、云南、贵州大部地区也逐渐转为水汽辐合，水汽含量逐渐增加（图 12e-f）。相应低层 700 百帕气流的垂直运动可以看到，在西南地区水汽逐渐减少的同时，气流下沉的强度也逐渐加强（图 12g-j），导致西南大部分区域的降水逐渐减少；之后随着副高逐渐由东向西推进，西南地区的水汽含量逐渐增加及气流上升运动也逐渐加强（图 12k-l），使得西南大部分地区的降水逐渐增加。副高异常偏西事件中，副高的变化经历了由东→西→东变化的过程，与偏东事件刚好相反，在这一过程中由于水汽和气流垂直变化的共同作用，导致西南大部分地区降水经历了少→多→少的变化过程（图 10c1-c9）。

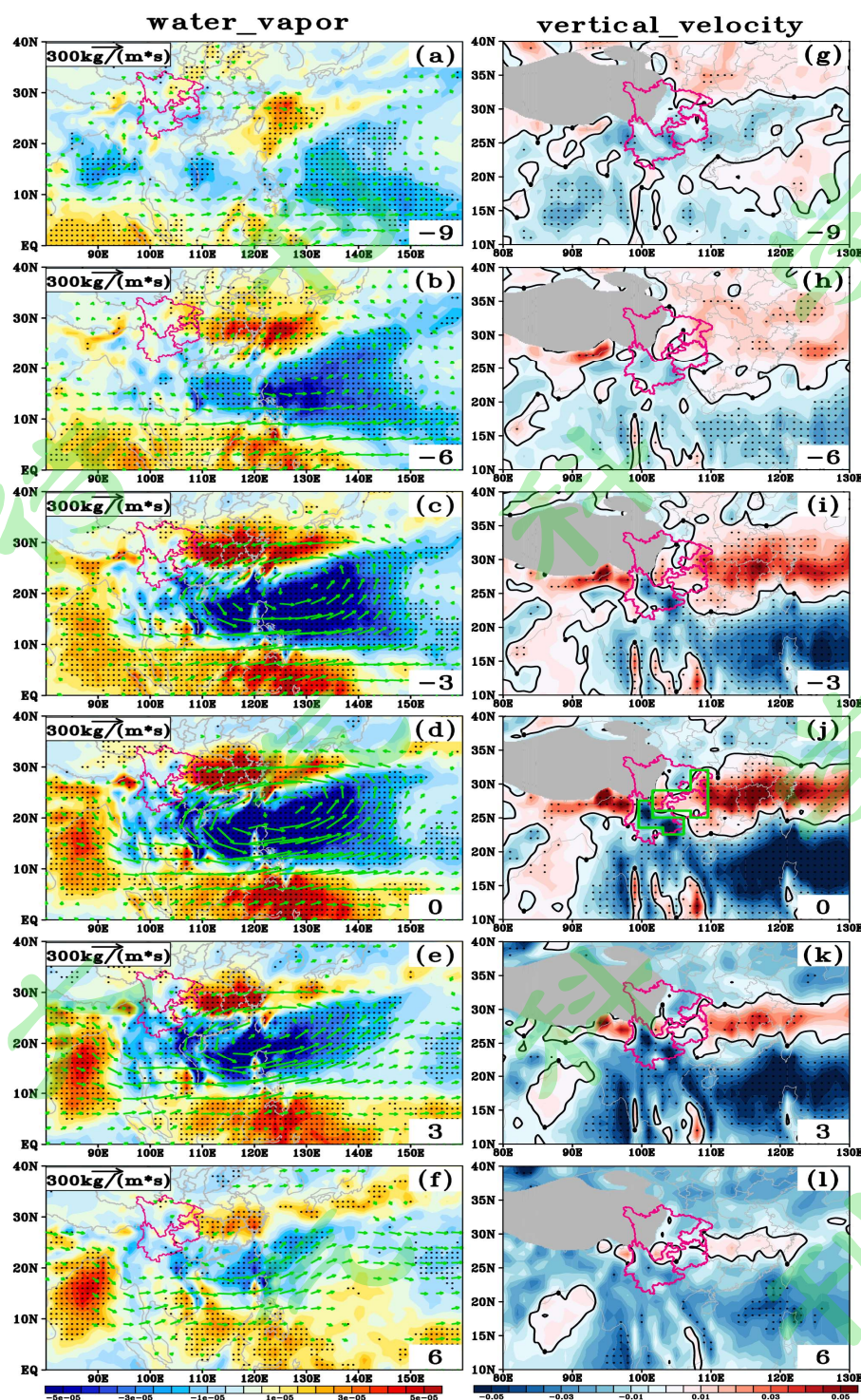


图 11 根据前夏副高东西指数 VORT-early 超前滞后回归的水汽通量 (a-f, 矢量, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (阴影, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 以及 700 百帕垂直速度次季节尺度异常 (g-l, pas^{-1})。绿色箭头为通过 95% 信度检验的水汽通量, 黑色或红色圆点标注的区域为水汽通量散度和垂直速度通过 95% 信度检验。图 j 中绿色矩形框标注为选取垂直速度显著的关键区域

Fig.11 Leading and lagging regression of subseasonal scale water vapor flux (a-e, vector, unit: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) and divergence of water vapor flux (shaded, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), and 700-hPa vertical velocity (g-j, ms^{-1}) on the WPSH index VORT in early summer. The green arrows represent the moisture flux that exceeding 95% significant test. The black or red dotted represent the divergence of moisture flux and the vertical velocity that exceeding 0.05

significant test. The green rectangle in Fig.j is marked as the key area with significant vertical velocity.

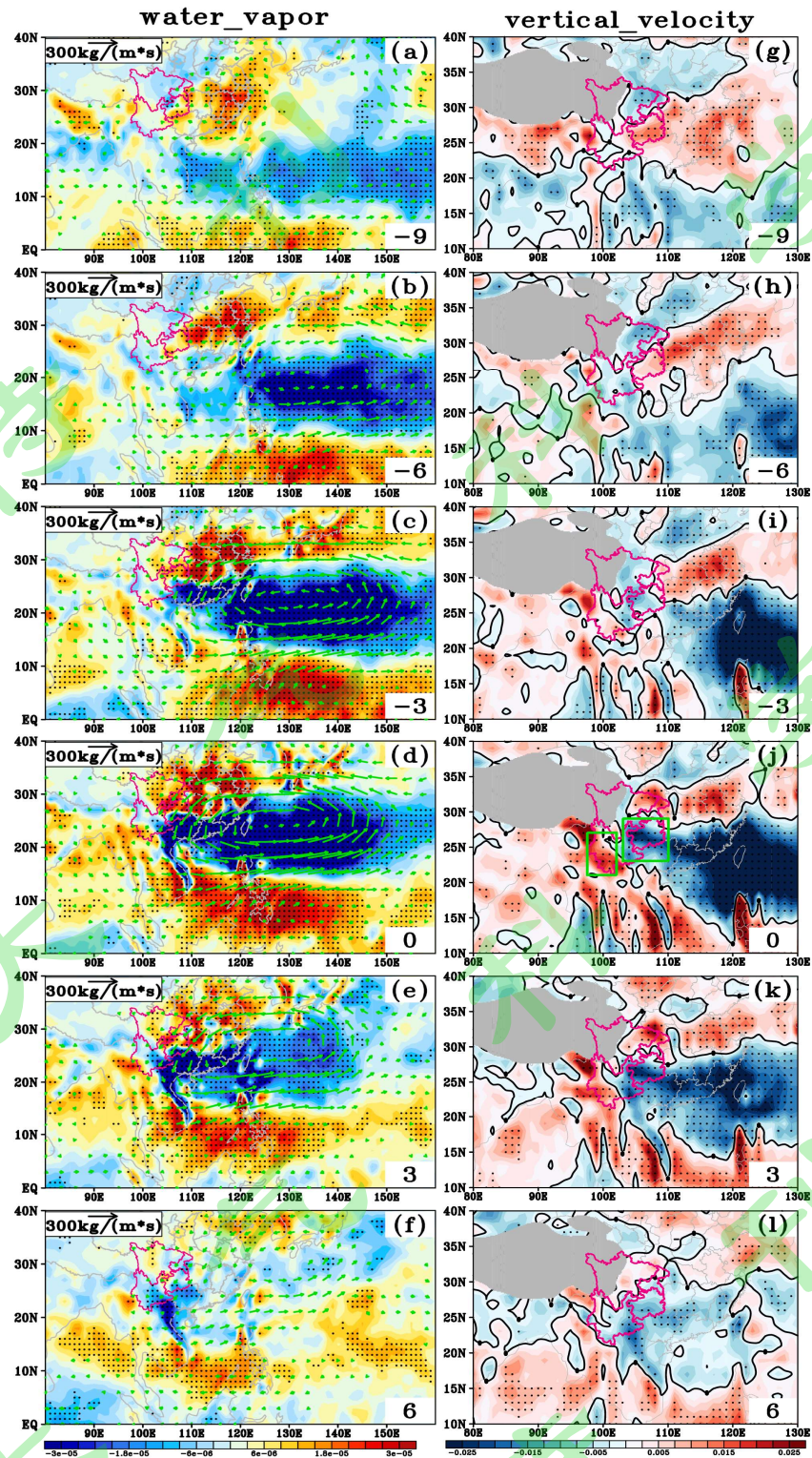


图 12 后夏副高东西指数 VORT-late 超前滞后回归的水汽通量 (a-f, 矢量, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 和水汽通量散度 (阴影, 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), 以及 700 百帕垂直速度次季节尺度异常 (g-l) (pas^{-1})。绿色箭头为通过 95% 信度检验的水汽通量, 黑色或红色圆点标注的区域为水汽通量散度和垂直速度通过 95%信度检验

Fig.12 The same as Fig.11, but in late summer

根据图 11j 和图 12j 中前夏和后夏 700 百帕垂直气流变化的区域差异，选取不同的关键区域，进一步分析这些区域垂直速度大小的逐日演变，可以清楚看到副高东西变化过程中西南不同区域 700 百帕垂直气流的演变特征（图 13）。前夏，随着副高逐渐西伸，云南区域的气流逐渐由上升转为下沉，当副高达到最西端位置时，云南区域的下沉气流达到最强，之后随着副高逐渐东退，下沉气流逐渐减弱，并在滞后第 5 天时转为上升气流；副高偏东时云南区域垂直速度的变化则刚好相反（图 13a）。对于四川、贵州、重庆的大部分地区而言，垂直速度的变化与云南区域刚好相反，随副高逐渐西伸，上升气流逐渐加强，副高达到最西端位置时，上升气流最强，之后随着副高的逐渐东退上升气流逐渐减弱，滞后第 10 天时转为下沉气流。副高偏东事件中，垂直速度的变化则刚好相反（图 13b）。后夏，云南区域垂直速度的变化与前夏刚好相反，偏西事件过程中，云南区域上升气流经历了逐渐加强→强→减弱，然后再转为气流下沉的过程；偏东事件过程中，垂直气流的变化刚好相反，逐渐由上升气流转为下沉气流并加强，然后下沉气流逐渐减弱（图 13c）。贵州地区垂直气流变化与云南刚好相反，偏西（东）事件过程中，气流变化逐渐由上升（下沉）到下沉（上升），再逐渐转为上升（下沉）（图 13d）。以上不同区域垂直气流的上升或下沉随着副高的东西变动呈现出明显不同的特征。

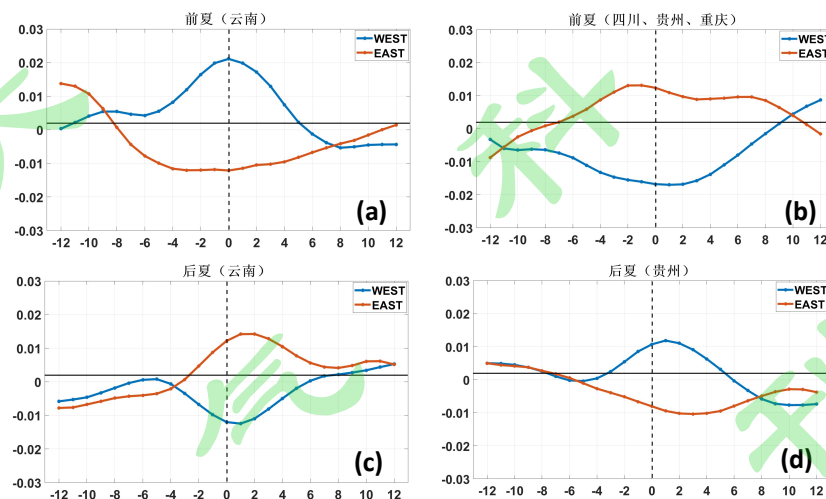


图 13 前夏和后夏 700 百帕不同区域垂直速度 (pas^{-1}) 逐日变化

Fig.13 Daily variation of vertical velocity (unit: pas^{-1}) at 700hPa over different regions in early summer and late summer

综上所述，次季节尺度上副高的东西变化与夏季西南地区的降水密切联系，但不同区域的降水与副高变化的关系有所不同。对于贵州、重庆和四川大部分地区而言，前夏和后夏副高影响下的降水变化比较一致，即副高偏西事件（东）时，降水主要以偏多（偏少）为主。而对于云南大部分地区而言，在前夏和后夏副高影响背景下的降水变化刚好相反：前夏，副

高偏西（偏东）事件对应云南大部分地区的降水偏少（偏多）；而与之相反，后夏副高偏西（偏东）事件对应云南大部分地区的降水偏多（偏少）为主。降水的变化与副高东西变动过程中副高外围气流的水汽输送和垂直气流的变化有关。我们知道，孟加拉湾南支槽的活动与西南地区的水汽输送密切联系，图 7 和图 8 表明副高偏西（东）时环流的变化不利于（有利于）孟加拉湾南支低压槽发展，本节分析进一步表明了南支槽活动对云南大部-华南水汽活动的影响，即副高偏东（西）时，云南大部-华南水汽增加（减少）。另外，冷空气的活动也是影响降水异常的一个方面，副高偏西（东）时贵州、重庆以及四川部分地区的降水增加（减少）可能也与副高西（东）变化时影响东亚的冷空气加强（减弱）活动有关。

从以上分析也看到，在西南三省一市中，受副高东西变动的影响，重庆和贵州降水变化一致偏多或一致偏少的特征是比较明显的，而四川和云南降水变化的区域差异较大。例如：在前夏，四川中部和东部地区的降水变化，以及云南西南和东南边缘地区的降水变化均呈现明显的区域差异；后夏，云南中北部和南部地区的降水变化，四川中部和东部地区的降水变化也同样存在显著区域差异。其原因之一可能与地理位置有关，云南和四川比重庆和贵州更偏西，受副高东西变动影响就更加敏感；其次，由于副高变化与周围环流系统的不同配置，对于处于副高西部边缘地带的云南和四川，在副高东西变动时，受副高边缘的其他系统，例如高原低涡、南支西风带波动等系统的影响显著。更细致的分析还有待于进一步的详细工作。

6 结论和讨论

本文根据副高的季节变化和影响差异，分别选取前夏（ 15° - 27° N， 110° - 140° E）和后夏（ 20° - 30° N， 110° - 145° E）两个关键区域的平均相对涡度定义了副高的东西变动指数，该指数具有显著的 10-30 天次季节周期，能够很好表征副高次季节尺度东西变动特征，指数为正表示副高偏东，为负表示副高偏西。从次季节尺度对前夏和后夏副高东西变动特征进行了深入的分析，并进一步讨论了副高次季节尺度东西变动与西南地区降水异常的关系及其影响过程，得到以下几点结论：

（1）根据前夏和后夏次季节副高东西变动指数的标准化值，前夏和后夏共选取偏西事件 91 次（654 天）和偏东事件 104 次（724 天）。对不同事件的合成分析表明，在副高异常偏西事件中，副高 5880gpm 特征线经历了逐渐由东向西，再逐渐由西向东的变化过程，在这一变动过程中，副高西脊点东西移动接近 20 个经距；与之相反，在副高偏东事件中，5880gpm 特征线经历了逐渐由西向东，再逐渐由东向西的变动过程，西脊点东西移动同样高达 20 个经距。

(2) 不论在前夏还是后夏, 当副高达到最西位置时, 中国东南部至西北太平洋地区从高层至低层有一个次季节异常反气旋环流, 在该异常反气旋环流主体区域气流上升和反气旋负涡度显著, 而其南北两侧为气流下沉和正涡度, 其中, 北侧的气流下沉和正涡度活动比南侧明显。当副高达到最东位置时, 以上区域的环流变化刚好相反。副高东西变化与中高纬度环流密切联系, 值得注意的是前夏和后夏 200 百帕中高纬度波列对副高东西变动的影响路径是不同的, 前夏主要以纬向波列传播影响为主, 而后夏纬向波列以纬向路径东传至鄂霍次克海附近之后, 再以经向波列向南传播, 影响副高的东西变动。

(3) 夏季次季节尺度副高东西变动与中国西南地区的降水变化密切联系, 总体而言, 副高偏西变化时, 西南大部分地区的降水增加, 偏东变化时大部分地区的降水减少。但不同区域的降水对副高东西变动的响应有所不同。对于贵州、重庆、四川的大部地区而言, 前夏和后夏副高影响背景下的降水变化比较一致, 在副高偏西事件(东)时, 副高逐渐由东→西→东(西→东→西)变化的过程中, 降水相应呈现出少→多→少(多→少→多)的变化。而对于云南大部分地区而言, 降水与副高东西变动的关系在前夏和后夏刚好相反: 前夏, 副高偏西(东)事件副高由东→西→东(西→东→西)逐渐变化的过程中, 云南大部分地区相应由多→少→多(少→多→少)的变化; 后夏, 这种变化却刚好相反。

(4) 次季节尺度上西南地区降水对副高东西变动的响应与副高东西变动时副高北侧和主体区域的水汽和气流的垂直运动有很大关系。副高在逐渐西移过程中, 副高西北侧水汽含量逐渐增加, 而副高主体区域及其西部地区的水汽含量逐渐减弱, 在副高北侧气流上升运动以及副高主体及其西部气流下沉运动逐渐加强的影响下, 西南大部分地区的降水逐渐加强; 而在副高由西向东相反的变化过程中, 由于水汽含量和气流垂直运动不同变化的影响, 西南大部分地区的降水逐渐减少。

副高是一个大尺度的环流系统, 对我国大部分地区的天气气候有十分重要的制约作用, 过去的大部分工作主要从月平均和季节平均的角度来研究副高变化的影响, 发现副高异常与我国东部汛期雨带的位置、夏季降水的季节进程, 甚至降水的年际变化等均有十分重要的影响。但作为一个大尺度环流系统, 副高变化的次季节特征也比较明显, 早期的研究发现副高变化显著的准双周振荡特征(钱贞成和喻世华, 1991; 张韧和喻世华, 1992; Ren et al., 2018), 本文正是针对副高次季节变化, 研究了次季节尺度内副高东西变动对西南地区降水的影响, 发现了次季节尺度上西南地区降水与副高的东西变动有十分密切的联系。但在分析中我们也注意到, 副高变化影响时重庆和贵州降水的一致性特征比较好, 而四川和云南降水变化的区域差异较大, 并存在很大的季节差异, 这不仅与副高的季节变化有关, 有可能还与副高变化

和周围环流系统的不同配置有关。西南地区位于副高西部,受副高东西变动幅度大小的影响比较敏感,由于四川和云南地处西南地区更偏西的位置,受副高东西变动的影响就更加显著。同时,由于副高西部存在的西风带高原波动、孟加拉湾印缅槽等中小尺度环流系统的影响,西南地区的天气就更为复杂。因此,在次季节尺度,副高与周围环流系统不同配置对西南地区的影响是值得我们进一步研究的重要问题。

另外,很多研究指出副高与降水区之间的彼此相互相互作用和制约的关系,认为副高西伸首先促使大陆降水加强和向西发展,但随着副高的西伸,切断了西南气流水汽输送,大陆降水随之减弱,副高也逐渐退出大陆,强调了降水区的热力强迫与东亚季风环流对副高活动的制约影响(喻世华和王绍龙, 1989; 钱贞成和喻世华, 1991)。从本文的分析我们也看到在副高次季节尺度上,副高东西变动呈现出显著的周期特征,副高由东向西逐渐变动过程中,西南大部分地区的降水是逐渐增加的,尤其是西南偏东的贵州和重庆地区降水增加现象比较明显,这与之前很多工作中所强调的副高西伸时大陆降水逐渐加强的结论是一致的,但这副高由西至东变化过程中,西南大部分地区的降水又逐渐减少。因此,有关西南地区的降水所释放的潜热加热与副高东西变动的关系还有待于进一步的研究。

参考文献 (References)

- Dee D P, Uppala S M, Simmons A J. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656), 553–597. doi: 10.1002/qj.828.
- 李建平, 朱建磊. 2008. 晚春初夏西太平洋副热带高压南撤过程的气候学特征 [J]. 气象学报, 66(6): 926-939.
- Li Jianpin, Zhu Jianlei. 2008. Climatological Features of the Western Pacific Subtropical High Southward Retreat Process in Late Spring and Early Summer[J]. Acta meteorologica sinica (in Chinese), 66(6): 926-939. doi: 10.1029/2009JD012838.
- Li J, Ding T, Jia X L. 2015. Analysis on the extreme heat wave over China around Yangtze River Region in the summer of 2013 and its main contributing factors [J]. Adv Meteorol, 1-15, doi: 10.1155/2015/706713.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. 气候与环境研究, 13(2): 113-122. Li Chongyin, Yang Hui, Guwei. 2008. Cause of Severe Weather with Cold Air, Freezing Rain and Snow over South China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13(2): 113-122. doi: 10.3724/SP. J. 1047.2008.00014.
- Liu Q, Zhao T, Mao H. 2019. Decadal Variations in the Relationship between the Western Pacific Subtropical High and Summer Heatwaves in East China [J]. J Climate, doi:10.1175/JCLI-D-18-0093.1, in press.
- 刘芸芸, 李维京, 艾子兑秀. 2012. 月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用 [J]. 应用气象学报, 23(4): 414-423. Liu Yunyun, Li Weijin, Ai Wanxiu. 2012. Reconstruction and Application of the Monthly Western Pacific Subtropical High Indices [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 23(4): 414-423. doi: 10.3969/j. issn. 1001-7313.2012.04.004.
- Lu R. 2001. Interannual variability of the summertime North Pacific Subtropical High and its relation to atmospheric convection over warm pool [J]. J Meteor Soc Jpn, 79: 771– 783.

- Lu R Y, Dong B W. 2001. Westward extension of North Pacific Subtropical high in summer [J]. *J Meteor Soc Jpn*, 79: 1229–1241.
- 陆日宇, 李颖, Chan-Su. 2007. 夏季西太平洋副热带高压的东西偏移和对流层低层环流变化的主要模态的关系 [J]. *自然科学进展*, 17(4): 546-550. Lu Riyu, Li Yin, Chan-Su. 2007. The relationship between the East-West migration of the western Pacific subtropical high and the main modes of the lower tropospheric circulation in summer [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 17(4): 546-550. doi: 10.3321/j.issn:1002-008X.2007.04.019.
- Krishnamurthy V, Shukla J. 2000. Intraseasonal and interannual variability of rainfall over India [J]. *J Climate*, 13: 4366-4377.
- 祁莉, 张祖强, 何金海. 2008. 气候平均场上西太平洋副热带高压双脊线过程可能成因的动力诊断分析[J]. *大气科学*, 32(2): 395-404. Qi Li, Zhang Zuqiang, He Jinhai. 2008. Dynamical Diagnosis on Possible Formation Cause of Climatological Western Pacific Subtropical High Double Ridges Process[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(2): 395-404. doi: 0.3724/SP. J. 1148.2008.00288.
- 钱贞成, 喻世华. 1991. 东亚地区凝结加热的中期变化与西太平洋副高准双周振荡的关系 [J]. *热带气象*, 70(1): 57-63. Qian Zhencheng, Yu Shihua. 1991. The relationship between medium-range fluctuation of condensation heating in east asia and quasi-2 weeks oscillation of the west pacific subtropical high [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 70(1): 57-63. doi: 10.1016/0016-2361(91)90095-R.
- Ren X J, Yang D J, Yang X Q. 2015. Characteristics and mechanisms of the subseasonal eastward extension of the south Asian high [J]. *J Climate*, 28:6799-6822. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00682.1.
- Ren X J, Guan W N, Shang W, et al. 2018. Subseasonal zonal oscillation of the western Pacific subtropical high during early summer [J]. *J Climate*, 32:768-780. doi: 10.1007/s13351-018-8061-2.
- Simmons A J, Jones P D, Bechtold V D. 2004. Comparison of trends and lowfrequency variability in CRU, ERA - 40, and NCEP/NCAR analyses of surface air temperature [J]. *Journal of Geophysical Research*, 109, D24115. doi: 10.1029/2004JD005306
- Sui C H, Chung P H, Li T. 2007. Interannual and interdecadal variability of the summertime western North Pacific subtropical high [J]. *Geophys Res Lett*, 34, L11701, doi: 10.1029/2006GL029204.
- 苏同华, 薛锋, 陈敏艳, 等. 2017. 季节内振荡影响西太平洋副热带高压两次北跳的机制[J]. *大气科学*, 41 (3): 437–460. Su Tonghua, Xue Feng, Chen Minyan, et al. 2017. A mechanism study for the intraseasonal oscillation impact on the two northward jumps of the western Pacific subtropical high [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (3): 437-460, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1609.16125.
- Wang P, Tang J, Wang S, et al. 2018. Regional heatwaves in China: a cluster analysis [J]. *Climate Dynam*, 50: 1901-1917. doi: 10.1007/s00382-017-3728-4.
- 王黎娟, 罗玲, 张兴强. 2005. 西太平洋副热带高压东西位置变动特征分析. *南京气象学院学报* [J]. 28(5): 577-585. Wang Lijuan, Luo Ling, Zhang Xinqiang. 2005. Variation Features of the Longitudinal Position of the Western Pacific Subtropical High [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 28(5): 577-585. doi: 10.1007/s10409-004-0010-x.
- 王黎娟, 陈璇, 管兆勇, 等. 2009. 我国南方洪涝暴雨期西太平洋副高短期位置变异的特点及成因 [J]. *大气科学*, 33 (5) : 1047-1057. Wang Lijuan, Chen Xuan, Guan Zhaoyong, et al. 2009. Features of the short-team position variation of the western Pacific subtropical high during the torrential rain causing severe floods in southern China and it s possible cause [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (5): 1047-1057.
- 韦道明, 李崇银, 谭言科. 2011. 夏季西太平洋副热带高压南北位置变动特征及其影 [J]. *气候与环境研究*, 16(3): 255-272. Wei Daoming, Li Chongyin, Tan Yanke. 2011. Variation Features and the Impact of the Latitudinal Position of the Western Pacific Subtropical High in Summer [J]. *Climatic & Environmental*

- Research, 16(3): 255-272. doi: 10.3724/SP.J.1146.2006.01085.
- 卫捷, 杨辉, 孙淑清. 2004. 西太平洋副热带高压东西位置异常与华北夏季酷暑 [J]. 气象学报, 62(3): 308-316.
- Wei Jie, Yang Hui, Sun Shuqing. 2004. Relationship between the anomaly longitudinal position of subtropical high in the western Pacific and severe hot weather in north China in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62(3): 308-316. doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2004.03.005.
- Wu L G, Wang C. 2015. Has the Western Pacific subtropical high extended westward since the late 1970s? [J]. J Climate, 28: 5406-5413. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00618.1.
- 晏红明, 程建刚, 郑建萌. 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 Jiangang C, Zheng Jianmeng. 2012. The climate cause of heavy drought in Yunnan in autumn 2009 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(2): 229-239. doi: 10.1007/s11783-011-0280-z
- 晏红明, 王灵. 2019. 西太平洋副高东西变动与西南地区降水的关系 [J]. 应用气象学报, 30(3): 360-375.
- Yan Hongming, Wang Ling. 2019. The Relationship Between East-west Movement of subtropical high over Northwestern Pacific and Precipitation in Southwestern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 30(3): 360-375.
- Yang H, Sun S Q. 2003. Study on the characteristics of longitudinal movement of subtropical high in the western Pacific in summer and its influence [J]. Adv in Atmos Sci, 20(6): 921~933
- Yang R W, Xie Z A, Cao J. 2017. A dynamic index for the westward ridge point variability of the western Pacific subtropical high during summer [J]. J Climate, 30: 3325-3341. doi: 10.1175/JCLI-D-16-0434.1.
- Yeo S R, Jhun J G, Kim W M. 2012. Intraseasonal variability of western north Pacific subtropical high based on the El Nino influence and its relationship with East Asian summer monsoon [J]. Asia-Pacific J Atmos Sci, 48(1): 43-53. doi: 10.1007/s13143-012-0005-7.
- Yu D D, Zhang R, Hong M. 2007. A characteristic correlation analysis between the Asia summer monsoon memberships and the west Pacific subtropical high [J]. Journal of Tropical Meteorology, 13(1): 102-104.
- 喻世华, 王绍龙. 1989. 西太平洋副热带高压中期进退的环流机制 [J]. 海洋学报, 11(3): 370~377.
- Yu Shihua, Wang Shaolong. 1989. The circulation mechanism of the mid-term advance and retreat of the western Pacific subtropical high [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 11(3): 370~377. doi: 10.1007/BF02005959.
- 张庆云, 陶诗言. 1999. 夏季西太平洋副热带高压北跳及其异常的研究 [J]. 气象学报, 57(5): 539-548.
- Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1999. The study of the sudden northward jump of the subtropical high over the western Pacific [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 57(5): 539-548. doi: 10.1007/s00376-999-0032-1.
- 张韧, 喻世华. 1992. 夏季西太平洋副热带高压准双周振荡的动力学机制 [J]. 热带气象学报, 8(4): 306-314.
- Zhang Ren, Yu Shihua. 1992. On the dynamic mechanism of biweekly oscillation of subtropical high for the western Pacific in summer [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 8(4): 306-314.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 3(4): 368~381.
- Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong. 1998. Study of Heavy Rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3(4): 368~381. doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.1998.04.09.
- Zhou T, Ma S, Zou L. 2014. Understanding a hot summer in central eastern China: Summer 2013 in context of multi-model trend analysis [J]. Bull Am Meteor Soc, 95: S54-S57.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. Journal of Climate, 22: 2199-2215. doi: 10.1175/2008jcli2527.1.