

陈艳,张万诚,陶云,等,2021.低频振荡对2015年春季云南东部降水异常的影响[J].气象,47(7):805-816. Chen Y, Zhang W C, Tao Y, et al, 2021. Influence of low-frequency oscillation on abnormal precipitation over eastern Yunnan Province in spring 2015[J]. Meteor Mon, 47(7):805-816(in Chinese).

低频振荡对 2015 年春季云南东部降水异常的影响^{*}

陈 艳^{1,2} 张万诚^{1,2} 陶 云^{1,2} 任菊章^{1,2} 段长春¹

1 云南省气象科学研究所,昆明 650034

2 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心,昆明 650034

提 要: 以往的研究显示,厄尔尼诺是导致云南春季干旱的重要原因。2015 年,在超强厄尔尼诺事件背景下,滇西大部春季降水偏少,雨季开始偏晚至特晚;然而,东部地区降水总体偏多,部分区域雨季开始偏早至特早,东西部形成了鲜明对比。利用云南省逐日观测降水、全球测站均一化逐日格点降水和 NCEP/NCAR 再分析资料,运用统计和动力诊断方法,研究了 2015 年春季 10~30 d 大气低频振荡特征及其对云南东部降水异常的影响。分析显示,3 月中旬至 4 月下旬,100°E 以东地区 10~30 d 大气低频振荡异常活跃,是造成云南东部地区降水偏多的重要原因。在低频振荡影响下,云南东部先后出现了 3 次明显的降水过程,每一次过程都与欧亚型低频波列上低频冷位相的南压密切相关。即当低频冷位相向南移动时,东亚副热带西风急流随之南压,当其入口区次级环流上升支移至云南上空,并与南下冷高压西南侧有利的回流水汽相互作用时即形成了降水。

关键词: 低频振荡,春季降水,雨季开始,云南

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.07.004

Influence of Low-Frequency Oscillation on Abnormal Precipitation over Eastern Yunnan Province in Spring 2015

CHEN Yan^{1,2} ZHANG Wancheng^{1,2} TAO Yun^{1,2} REN Juzhang^{1,2} DUAN Changchun¹

1 Yunnan Institute of Meteorological Sciences, Kunming 650034

2 Research Centre for Disastrous Weather in Hengduan Mountain and Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming 650034

Abstract: Previous literatures suggest that El Niño is a dominant factor causing spring drought in Yunnan Province. Under the background of super-strong El Niño event during 2015, the spring (March–May) precipitation in most parts of western Yunnan Province was below normal, and the rainy season started late or even very late. However, the precipitation in eastern part was more than normal generally, and the rainy seasons in some regions started early or even very early, presenting a sharp contrast between the east and west. By using daily rain gauge precipitation of Yunnan Province, the CPC (Climate Prediction Center, USA) global unified gauge-based analysis of daily precipitation and NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research) reanalysis data, the influence of 10–30 d atmospheric oscillation on the spring abnormal precipitation over eastern Yunnan was studied by statistical and dynamical diagnosis methods. The analysis shows that the 10–30 d oscillation was active in the areas to the east of 100°E from mid-March to late-April, which is a major reason for the abundant precipitation over eastern Yunnan. Three distinct precipitation processes in eastern Yunnan happened

^{*} 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100304)、国家自然科学基金项目(41790471、41965005、42075013)和中国气象局省级科研所科技创新发展项目(SSFZ201821)共同资助

2020 年 4 月 12 日收稿; 2020 年 12 月 11 日收修定稿

第一作者:陈艳,主要从事季风气候研究. E-mail:chenyan@cma.gov.cn

associated closely with the southward approaching of the low-frequency cold phase embedded in the Eurasian pattern (EU) wave train from the mid- and high-latitudes of East Asia. Namely, when the upward branch of the secondary circulation around the subtropical westerly jet entrance interacted with the reflux vapor on the southwestern fringe of the cold high, the rainfall process was formed.

Key words: low-frequency oscillation, precipitation in spring, rainy season onset, Yunnan Province

引 言

干湿季节分明是云南季风气候最显著的一个特征。云南雨季平均于 5 月第 5 候开始(陈艳等, 2017), 雨季开始前降水稀少, 常常出现季节性干旱(Zhang and Zhou, 2015; 金燕等, 2018), 其中春季(3—5 月)干旱最为常见(秦剑等, 2000)。因此, 很多学者从云南春旱成因或雨季开始早晚的角度, 研究了与春季降水异常有关的气候系统特征。

大气环流分析显示, 低纬地区环流和季风推进异常对云南春季降水多寡至关重要。与降水偏少有关的异常特征主要包括: 北印度洋地区对流层低层持续的东风异常和持续偏西偏强的西太平洋副热带高压(晏红明等, 2007)、热带对流活动弱(解明恩等, 2006)、东南亚地区夏季风爆发偏晚(刘瑜等, 2006)、孟加拉湾至云南上空水汽输送偏弱(陈艳等, 2006)以及云南上空受强下沉气流控制等(晏红明等, 2007; 黄荣辉等, 2012)。此外, 亚洲中高纬地区冷空气活动异常对云南春季降水也有重要影响。郑建萌等(2013)分析指出, 与春季降水偏少有关的中高纬环流特征主要表现为, 西伯利亚高压偏弱, 亚洲中高纬地区以纬向环流为主, 冷空气活动弱。而黄荣辉等(2012)的研究结果显示, 除了冷空气强度, 其活动路径的影响也不容忽视。比如, 与 2009 年秋季至 2010 年春季我国西南地区干旱有关的冷空气活动异常主要是冷空气南下路径偏东造成的, 即中高纬度准定常行星波传播的极地波导偏强并在 60°N 附近辐合, 这使得纬向平均西风减弱, 东亚冷空气活动强但路径偏东。还有一些研究显示, 同期或前期北极涛动异常可通过调节中高纬环流变化影响云南春季降水(邢冬等, 2016; Chen et al, 2017)。

此外, 学者们还探讨了大气低频振荡的影响。肖子牛和温敏(1999)较早利用 30~68 d 滤波的黑体辐射温度资料分析发现, 前冬赤道印度洋地区季节内振荡的强弱与云南 5 月降水量呈正相关关系, 其可作为预报云南 5 月雨量和雨季开始早晚的一个因子。后来, 一系列研究指出热带 MJO(Madden

and Julian Oscillation)活动持续偏弱会导致云南降水偏少(据建华等, 2011; Lü et al, 2012), 并且这种影响主要是通过激发热带印度洋地区异常下沉气流、抑制孟加拉湾地区对流活动和减弱孟加拉湾向云南的水汽输送完成的。除了热带地区 30~60 d 的低频振荡, 欧亚中高纬地区显著的 10~30 d 低频振荡(杨双艳等, 2014)与云南春季降水的关系也十分密切。陈艳等(2015)研究指出, 在由春季至夏季的季节转换期, 东亚副热带西风急流存在显著的 10~30 d 低频振荡特征, 这种低频振荡对云南降水具有显著影响。

在外强迫研究方面, 很多分析表明, 热带中东太平洋海温变化对云南春季降水影响显著(刘瑜, 2000; 据建华等, 2011; Barriopedro et al, 2012), 是预测春季降水和雨季开始早晚的最强信号。热带中东太平洋海温上升可减弱沃克环流(陈艳等, 2017), 抑制孟加拉湾地区对流活动, 进而影响从孟加拉湾来的水汽输送(黄荣辉等, 2012)。因此, 当热带中东太平洋海面温度处于正异常时, 云南春季降水一致偏少, 反之则一致偏多(邢冬等, 2016)。另外, Cao et al (2017)研究发现, 4—5 月孟加拉湾和青藏高原之间的热力差异也是影响云南 5 月降水的一个重要因子。

2014 年 5 月赤道中东太平洋海面温度开始出现大范围正异常, 2015 年春末发展为强厄尔尼诺事件(翟盘茂等, 2016)。根据云南省气候中心的统计结果(李蒙等, 2016), 2015 年 3—5 月滇西大部降水量较常年偏少近 5 成, 同时由于气温异常偏高, 出现了严重干旱; 相反, 云南东部降水量总体偏多, 局部地区偏多 5 成及以上(图 1a)。相应地, 该年滇西大部分县(市)雨季开始期为偏晚至特晚(图 1b), 有 75 个县(市)(占全省的 60%)进入雨季的日期是 6 月 12 日, 而云南东部地区却有 24 个县(市)雨季开始偏早至特早, 另有 25 个县(市)为正常, 是 1971—2015 年间典型的东部雨季早于西部的年份(陈艳等, 2017)。黄玮和刘瑜(2012)研究显示, 1—5 月南亚季风和南海季风的强弱对比对云南雨季开始期的分布有重要影响, 即当南亚季风弱(强)而南海季风

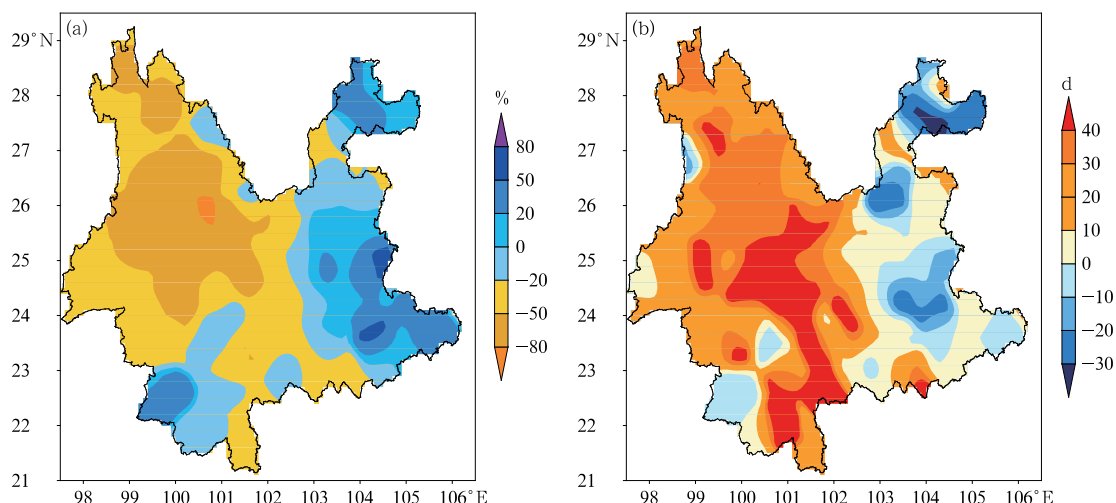


图1 2015年春季(a)云南125个站点的降水距平百分率和
(b)云南雨季开始期距平

Fig.1 Distribution of (a) percentage of precipitation anomalies at 125 weather stations and
(b) anomaly of onset dates of rainy season in Yunnan Province in the spring of 2015

强(弱)时,易出现滇西北和滇西南雨季开始偏晚(早)而滇中及以东地区偏早(晚)的分布型。然而,根据国家气候中心的统计结果,2015年春季南亚对流旺盛,暴雨频繁发生(邵懿等,2016),南海夏季风爆发时间与常年一致且强度偏弱(廖要明等,2016)。此外,查看MJO活动情况(图略)发现,4月10日之后MJO强度总体偏弱,而在之前强度较强的阶段,其活动位相并非位于有利于云南降水的“湿窗口”(4~6位相)(李汀等,2012)。这些情况表明,无论是从热带太平洋海温还是热带环流系统异常的角度,都不足以解释当年春季云南东部降水偏多和雨季开始偏早的情况。

那么,2015年春季,云南东部降水偏多的原因是什么?是否与中高纬度10~30d低频系统的异常活动有关?水汽输送状况如何?为探究上述问题,本文将从10~30d大气低频活动的角度,分析2015年春季云南东部降水及雨季开始异常的环流成因。

1 资料和方法

根据气象季节的定义,本文春季指3—5月。所用研究资料为1971—2015年美国国家环境预测中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的逐日再分析资料(包括三维风场、气温和比湿),1979—2015年美国海洋与大气管理局(NOAA)的逐日向外长波辐射(OLR),云南站点逐

日降水,2015年春季美国气候预测中心(CPC)分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的全球站均一化逐日格点降水资料(CPC global unified gauge-based analysis of daily precipitation, <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>),以下简称格点降水),以及云南省气候中心提供的2015年春季云南125个气象站的降水距平百分率和雨季开始期资料。

研究方法主要为Butterworth带通滤波和合成分析。在对各要素做滤波之前,先用最小二乘法剔除了各要素的季节线性变化趋势。对低频位相合成要素场的检验,采用基于两组样本平均值显著差异的 t 检验方法(Jia et al, 2011)。

低频动能是描述大气低频活动的一个重要物理量(龙振夏和李崇银,2001)。本文低频动能的计算方法是,先对逐日风场进行10~30d带通滤波,然后计算大气低频动能 $\bar{E}_k$:

$$\bar{E}_k = (\bar{u}^2 + \bar{v}^2)/2$$

式中: $\bar{u}$ 、 $\bar{v}$ 分别是10~30d滤波的纬向风 u 和经向风 v 。

2 2015年春季大气环流背景和云南降水过程

2.1 低纬地区大气环流异常状况

2015年春季是2015/2016年强厄尔尼诺事件

迅速发展的阶段,低纬地区大气环流对海温异常的响应十分明显。由风场距平沿 10°N 的垂直剖面(图 2a)可见,热带中太平洋低空出现大范围的异常西风,高层则出现异常东风,这使得东南亚至中东太

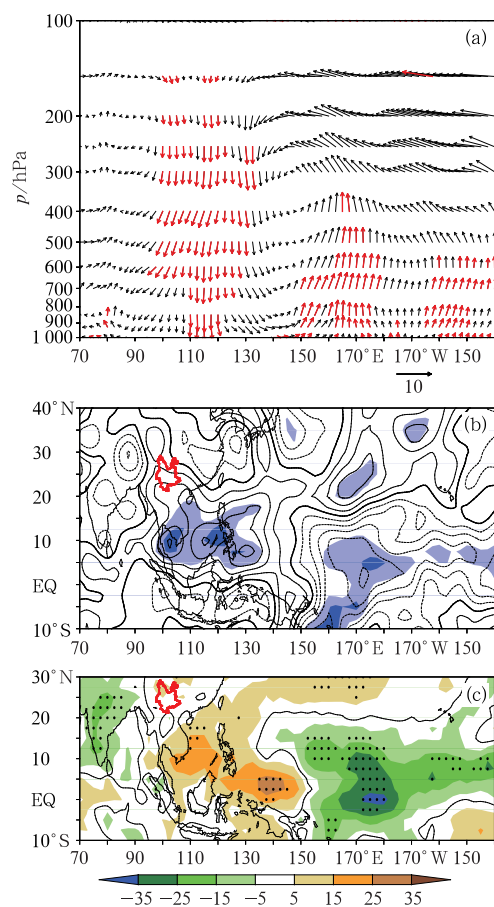


图 2 2015 年春季(a)风场距平沿 10°N 的垂直剖面(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 图中 ω 放大了 100 倍, 红色箭头通过了 0.05 显著性水平检验); (b)500 hPa 垂直速度距平分布(单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$, 等值线间隔 0.01, 浅色和深色阴影分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验); (c)OLR 距平分布(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 粗实线为零线, 黑色圆点示意通过 0.1 显著性水平检验)

Fig. 2 (a) Wind anomaly section along 10°N (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; The vertical velocity is multiplied by 100, red arrows having passed the significance test at 0.05 level), (b) distribution of the anomalies of vertical velocity at 500 hPa (unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$; The interval is 0.01, light and dark shadings having passed the significance tests at 0.05 and 0.01 levels, respectively), (c) distribution of the anomalies of OLR (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; The bold curves are zero, black dots having passed the significance test at 0.1 level) in the spring of 2015

平洋上空形成明显的异常沃克环流。进一步由 500 hPa 垂直速度距平(图 2b)可见,异常沃克环流的下沉支主要位于东南亚和热带西太平洋地区,上升支位于热带中东太平洋上空。异常沃克环流建立的结果是,东南亚和热带西太平洋地区对流活动受到抑制(图 2c),东南亚多地出现严重干旱,野火频发;而热带中东太平洋上空对流活动异常增强,拉美多地降水偏多,频现洪涝地质灾害(邵懿等,2016)。云南总体上位于异常沃克环流下沉支控制的北部区域,虽然其上空 500 hPa 的异常下沉运动未通过 0.05 显著性水平检验,但对流活动仍受到了一定程度的抑制,有利于干旱发展,这与过去的认识是一致的。

2.2 大气低频动能分布特征

在分析低频振荡对云南降水过程的影响之前,有必要先了解 2015 年春季大气低频振荡总体的强弱和分布情况。图 3 为气候平均春季低频动能、2015 年春季低频动能及其距平分布。从 850 hPa 气候平均低频动能的分布来看(图 3a),亚洲中低纬地区的低频动能总体上有东强西弱的特征, 105°E 附近等值线较密集,华南上空有一个大值中心。这说明,东亚地区 10~30 d 低频振荡较南亚地区活跃,而云南正是处于二者的交界带上,因此其东部更易受低频振荡的影响。对照春季气候平均低频动能沿 25°N 的垂直剖面(图 3d)可见,总体上对流层上层的低频振荡强而低层弱,500 hPa 以下大致以 105°E 为界,低频动能东强西弱的分布特征较为明显。2015 年春季,从滇东南、华南至我国东海一带,对流层低层的低频振荡十分活跃(图 3b),呈显著正异常(图 3c),其他区域的变化不显著。在垂直剖面图上亦可看出,在对流层低层云南中东部及其以东地区有异常活跃的低频振荡(图 3f),而滇西及其以西地区无变化。

为查看 2015 年春季云南东部降水的变化情况,图 4 给出了 102°E 以东云南 61 个气象站点的分布(图 4a)及其平均的逐日降水量变化。为便于对比,图 4b 还给出了全省 107 个站点平均和云南东部区域($21.75^{\circ}\sim 29.25^{\circ}\text{N}$, $102.25^{\circ}\sim 106.25^{\circ}\text{E}$)平均的逐日格点降水。由图可见,3 月中旬云南东部开始出现具有周期振荡特征的降水过程,并且格点降水

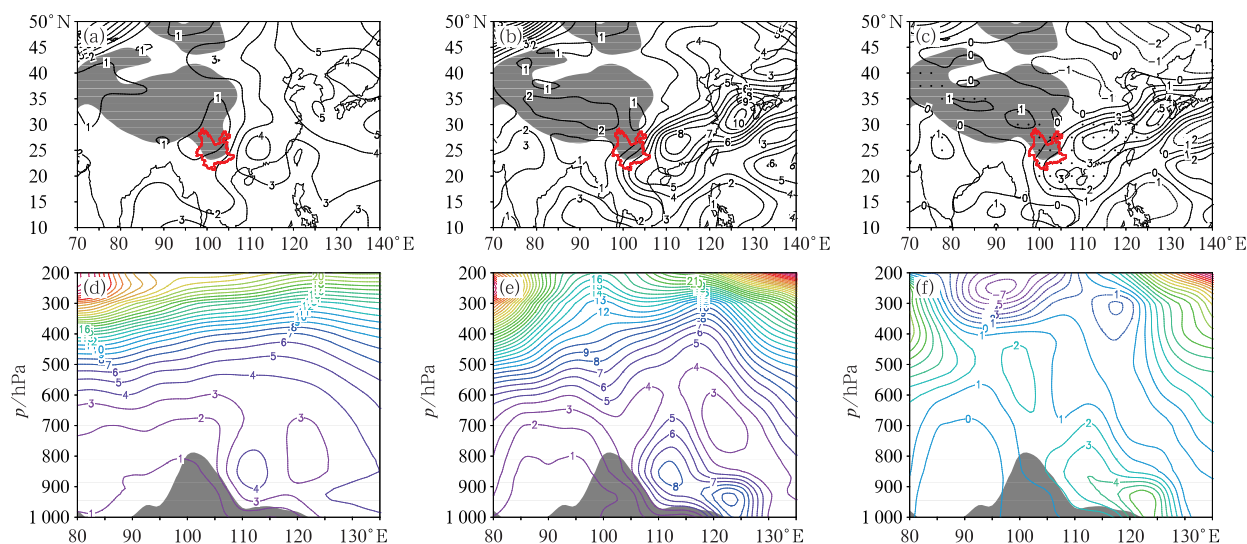


图3 1971—2015年春季(a)平均850 hPa低频动能分布(阴影示意1500 m以上地形,红线为研究区域,下同)及其(d)低频动能沿25°N的垂直剖面(阴影示意地形剖面,下同);2015年春季(b)850 hPa低频动能及其(c)距平分布(黑点表示通过0.05显著性水平检验);(e)低频动能沿25°N的垂直剖面及其(f)距平分布(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

Fig. 3 Distribution of spring low-frequency kinetic energy of climatological mean (a) at 850 hPa and (d) the vertical cross-section along 25°N for 1971—2015 (Black shaded area represents the terrain above 1500 m, and red curve shows study area, same hereafter); (b) spring low-frequency kinetic energy at 850 hPa in 2015 and (c) its anomaly (Black dot means having passed the significance test at 0.05 level); (e) vertical cross-section of the spring low-frequency kinetic energy in 2015 and (f) its anomaly (unit: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

与站点降水的变化基本一致。进一步从20°~30°N平均逐候格点降水率随时间的变化(图5)可见,3月中旬至5月中旬在云南所处经度范围内先后出现了4次明显的降水过程,其中前3次降水过程虽与我国东部地区的降水过程有一定的联系,但在云南中东部存在独立的降水中心,用美国环境预报中心CMAP逐候降水资料(分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$)绘制的图中亦有此特征(图略)。这说明,在此期间云南的降水具有区域性特征,其影响系统或有别于我国东部地区。此外不难看出,5月中旬出现的降水过程与前3次不同,是我国东部地区降水系统向西推进的结果。

3 2015年春季大气低频振荡对云南降水的影响

从前面的分析可知,2015年春季低纬地区大气对厄尔尼诺的响应明显,云南总体上受下沉气流影响,易形成干旱,然而云南东部及其以东地区10~30 d低频振荡异常活跃,有利于形成天气扰动。为弄清低频振荡与降水过程的具体关联,图6给出了

云南东部平均的逐日降水量(图6a)和10~30 d滤波的850 hPa气温、500 hPa垂直运动和200 hPa西风沿25°N(横穿云南中部)的经度-时间剖面(图6b)。可见,3月中旬至4月底,100°E以东地区风场和气温场的低频振荡十分明显,并且出现了3个清晰且完整的振荡周期。在该时段内,云南东部的3次降水过程分别发生于3个振荡周期的低频冷位相活跃阶段。与冷位相对应,在云南所处经度范围内,大致以102.5°E为中心有明显的低频上升运动,同时伴随着东亚200 hPa西风增强;而在暖位相阶段,云南所在区域受低频下沉气流控制,无明显降水。相比之下,云南以东地区气温的低频振荡特征虽然十分明显,但低频垂直运动的变化并不显著。上述特征与陈艳等(2015)揭示的由春季至夏季季节转换期,东亚副热带西风急流及其入口区环流变化对云南降水影响的概念模型一致,同时也能合理解释为什么该时段内云南的降水具有区域性特征。

此外,注意到5月东亚低频活动已明显减弱,对照图5可以看出,5月中下旬云南的降水主要是我国东部降水系统向西推进造成的,与3—4月低频振荡导致的降水有较大区别。由于业务上对云南雨季

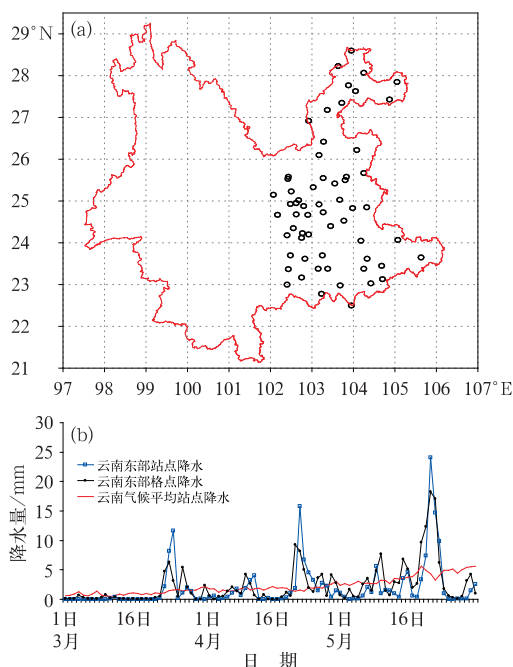


图 4 (a) 云南东部(102°E 以东)61 个气象站点分布, (b) 气候平均的站点 3—5 月逐日降水量(红色实线)和 2015 年云南东部平均逐日降水变化 (蓝线为 61 个站点平均的逐日降水, 黑线为格点降水的逐日区域平均值, 下同)

Fig. 4 (a) Distribution of 61 weather stations in eastern Yunnan Province (east of 102°E) and (b) daily precipitation of climatological mean (red curve) from March to May and daily precipitation of eastern Yunnan Province in the spring of 2015 (blue curve for the average precipitation of 61 stations and black curve for the area mean of the CPC gridded data, same hereafter)

开始期的监测是从 4 月 21 日开始(陈艳等, 2017), 因此不难推断, 4 月下旬在低频振荡影响下出现的降水是导致 2015 年云南东部部分站点雨季开始偏早至特早的一次重要降水过程。同时还可看出, 5 月中下旬出现的降水过程强度更强且位置偏东, 这对春季云南东部降水偏多具有重要影响, 但从时间上来看, 这次降水过程与云南东部部分站点雨季正常开始有关。由于 5 月中下旬的降水过程受低频振荡影响较小, 故本文不做深入分析。

为了得到低频振荡更清晰的结构和传播特征, 进一步选取 3 月中旬至 4 月底云南中东部(25°N、102.5°E)500 hPa 低频垂直运动的 3 个振荡周期, 并以图 7 所示的 8 个位相分别对大气低频环流进行合成。其中, 第 3 位相为下沉运动峰值, 对应低频暖位相; 第 7 位相为上升运动峰值, 对应低频冷位相; 第 1 位相和第 5 位相则分别为由冷转暖 and 由暖转冷的阶段。

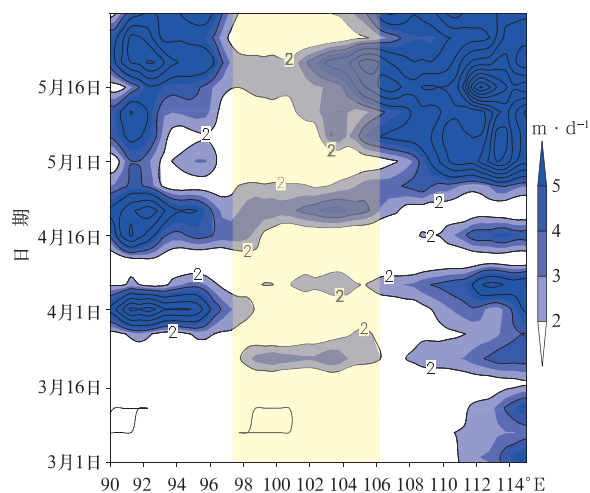


图 5 2015 年春季 20°~30°N 逐候平均降水率的经度-时间剖面 (黄色阴影示意云南所处经度范围)

Fig. 5 Longitude-time section of pentad mean precipitation rate within 20°–30°N in the spring of 2015 (Yellow shadow indicates the longitude range of Yunnan Province)

图 8 所示即为按云南中东部 500 hPa 垂直速度 8 个位相合成的 500 hPa 低频温度场和 200 hPa 低频风场。可见, 从第 1 位相至第 8 位相, 欧亚中高纬地区均存在结构清晰的欧亚型(Eurasian pattern, 简称 EU 型)低频波列, 波列上低频暖位相对应低频反气旋, 低频冷位相对应低频气旋。随着位相的变化, 波列沿大圆路径由西向东移动。第 2~4 位相时, 东亚地区为暖位相控制, 东亚副热带西风急流较弱或在低频反气旋的南北两侧分裂为两个急流中心, 云南受下沉气流控制, 无明显降水。从第 5 位相开始, 波列上的冷位相在东亚上空逐渐向东南方向移动, 其南侧的副热带西风急流也随之不断南压, 强度较暖位相控制期间明显增强, 并由西南—东北向逐渐旋转为东西向。至第 7 位相时, 东亚大部地区被低频气旋覆盖, 东亚副热带西风急流轴呈东西向位于 30°N 附近, 云南处于急流入口区南侧, 上升运动达到最强。联系图 6 可知, 冷位相控制期间 25°N 处西风的增强主要是副热带西风急流南压的结果。为能清晰地查看急流入口区低频垂直运动的变化, 图 9 给出了 10~30 d 滤波的 500 hPa 气温和垂直运动沿 102.5°E 的纬度-时间剖面。由图可见, 随着每一次低频冷位相向南传播, 急流入口区次级环流

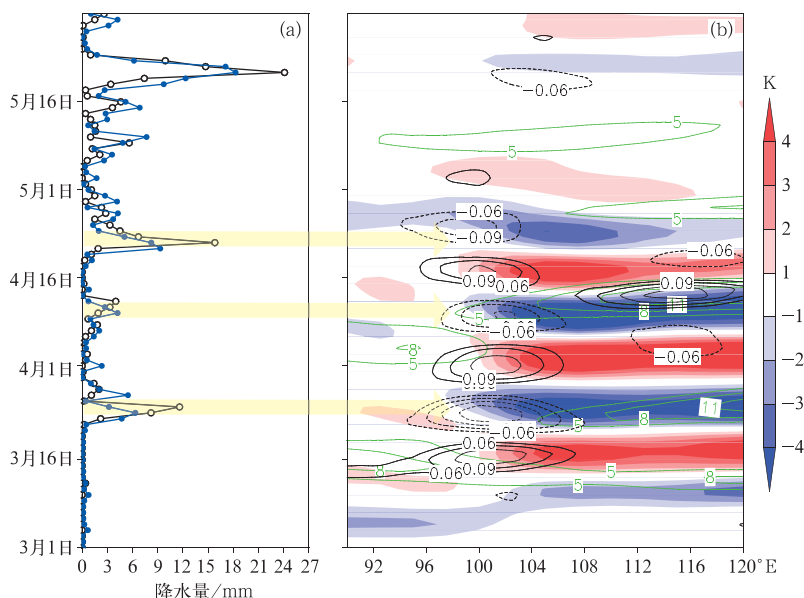


图 6 2015 年春季(a)云南东部平均逐日降水和(b)10~30 d 滤波的 850 hPa 气温(填色)、500 hPa 垂直运动(黑色等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)和 200 hPa 西风(绿色等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)沿 25°N 的经度-时间剖面(黄色粗箭头示意降水过程,下同)

Fig. 6 (a) Regional average precipitation of eastern Yunnan; (b) longitude-time section of 10–30 d filtered 850 hPa temperature (colored), 500 hPa vertical velocity (black line, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) and the westerlies (green line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) along 25°N (Yellow arrows indicate the spans of precipitation process, same hereafter)

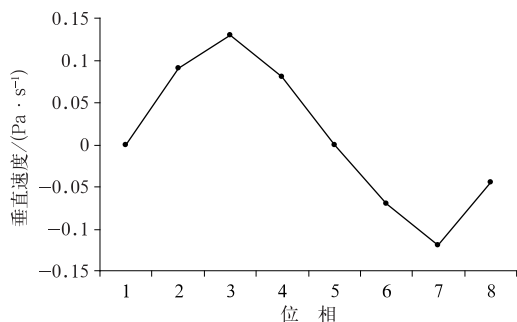


图 7 位相合成的 10~30 d 滤波云南中东部(25°N 、 102.5°E)500 hPa 垂直速度的变化
Fig. 7 Evolution of composite phases of 10–30 d filtered 500 hPa vertical velocity at eastern Yunnan (25°N , 102.5°E)

上升支亦向南移动,其影响范围主要在 $20^\circ \sim 35^\circ\text{N}$ 。当上升支在云南上空活动时即成为有利于云南降水的动力条件;相反,与低频暖位相相伴南下的是低频下沉气流,在下沉气流控制期间不利于形成降水。

4 低频振荡与水汽输送

有利的上升运动和水汽输送是形成降水的必要

条件,因此有必要进一步分析 2015 年春季低频振荡对水汽输送的影响。图 10 给出了 850 hPa 比湿、风场和高度场沿 102.5°E 的纬度-时间剖面(图 10a)以及相应时段内云南东部降水(图 10c)和南支槽指数(图 10b)的逐日变化。可见,3 月中旬至 4 月下旬,云南东部 3 次明显的降水过程都出现在低频振荡活跃的湿位相阶段(绿色阴影区)。云南所在纬度范围内,湿位相对应低频偏东风,干位相(黄色阴影区)则对应着低频偏西风。同时,低频风场的变化与从中高纬地区南下的冷高压密切相关。进一步查看按云南中东部垂直速度 1~8 位相合成的 700 hPa 低频风场和温度场(图 11),可以清楚地看到,对云南水汽输送有重要影响的低频偏东风是南下入海冷高压西南侧的回流形成的。由此可见,3 月中旬至 4 月下旬,造成云南东部 3 次降水过程的动力和水汽条件都与东亚低频振荡密切相关。而当东亚地区为暖位相控制时,暖位相内大部区域盛行偏西风,云南及周边地区的偏西风为干暖大陆性西北风,不利于形成降水。此外,由图 11 还可以看到 700 hPa 低频温度场上有与 500 hPa 低频温度场接近的波列结构,且波列随高度升高略向北倾斜,具有相当正压的结

构特征。

考虑到冬春季节南支槽是影响西南地区降水和水汽输送的重要环流系统(索渺清和丁一汇,2009;Li et al,2017),因此图 10b 给出了相应时段内逐日南支槽指数的变化。南支槽指数参考 Li et al(2017)的研

究,定义为 700 hPa 标准化的孟加拉湾北部区域($15^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)相对涡度平均值。可见,3 月中旬至 4 月下旬,在云南 3 次降水过程中南支槽指数无明显异常,均为弱负值。结合风场的变化特征,可知该时段内南支槽活动对云南降水没有明显

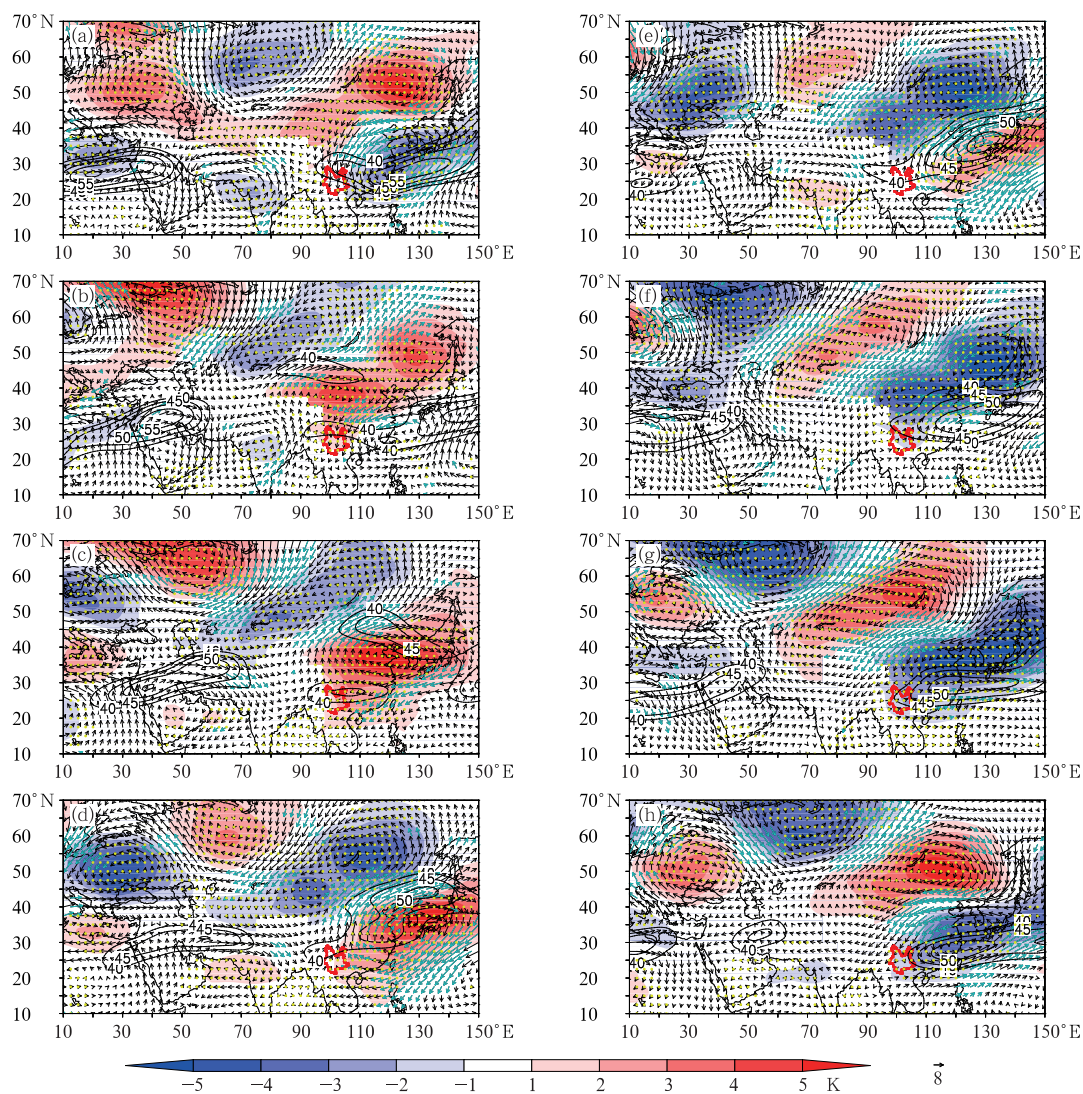


图 8 2015 年春季按云南中东部(25°N 、 102.5°E)10~30 d 垂直速度位相合成的 500 hPa 低频温度场(填色,黄色圆点表示通过了 0.05 显著性水平检验), 200 hPa 低频风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,青绿色矢量表示通过了 0.05 显著性水平检验)和 $\geq 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的纬向风分布(等值线) (a~h)第一位相至第八位相的合成图

Fig. 8 ω -phase-based composites of 10–30 d filtered temperature field at 500 hPa (colored, yellow dot having passed the significance test at 0.05 level), wind field at 200 hPa (vector, unit: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, cyan arrow having passed the significance test at 0.05 level) and the zonal wind $\geq 40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (contour) in the spring of 2015 (a–h) the composites from phase 1 to phase 8

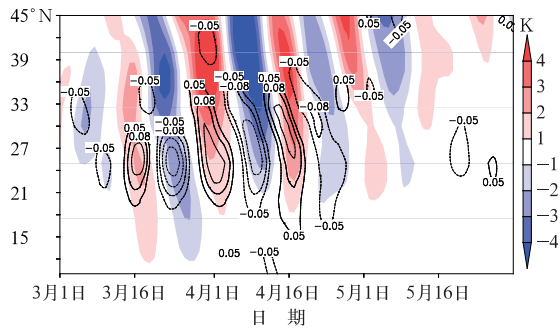


图 9 2015 年春季 10~30 d 滤波的 500 hPa 气温 (填色)、500 hPa 垂直运动 (等值线, 单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) 沿 102.5°E 的纬度-时间剖面

Fig. 9 Latitude-time section along 102.5°E of 10–30 d filtered temperature (colored) and 500 hPa vertical velocity (contour, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) in the spring of 2015

影响。相比之下, 5 月中旬的强降水过程与南支槽增强有很好的对应关系, 这进一步反映了该次降水过程的环流成因与前 3 次不同。

5 结论与讨论

2015 年出现了本世纪以来强度最强、持续时间最长的厄尔尼诺事件。按以往的研究结论, 当年春季云南极可能出现全省性雨量偏少、雨季开始偏晚的情况。然而, 2015 年春季云南东部雨量总体偏多、部分站点雨季开始偏早, 云南东西部形成了鲜明对比。为探寻 2015 年春季云南东部降水偏多雨季开始偏早的环流成因, 本文主要利用云南站点逐日

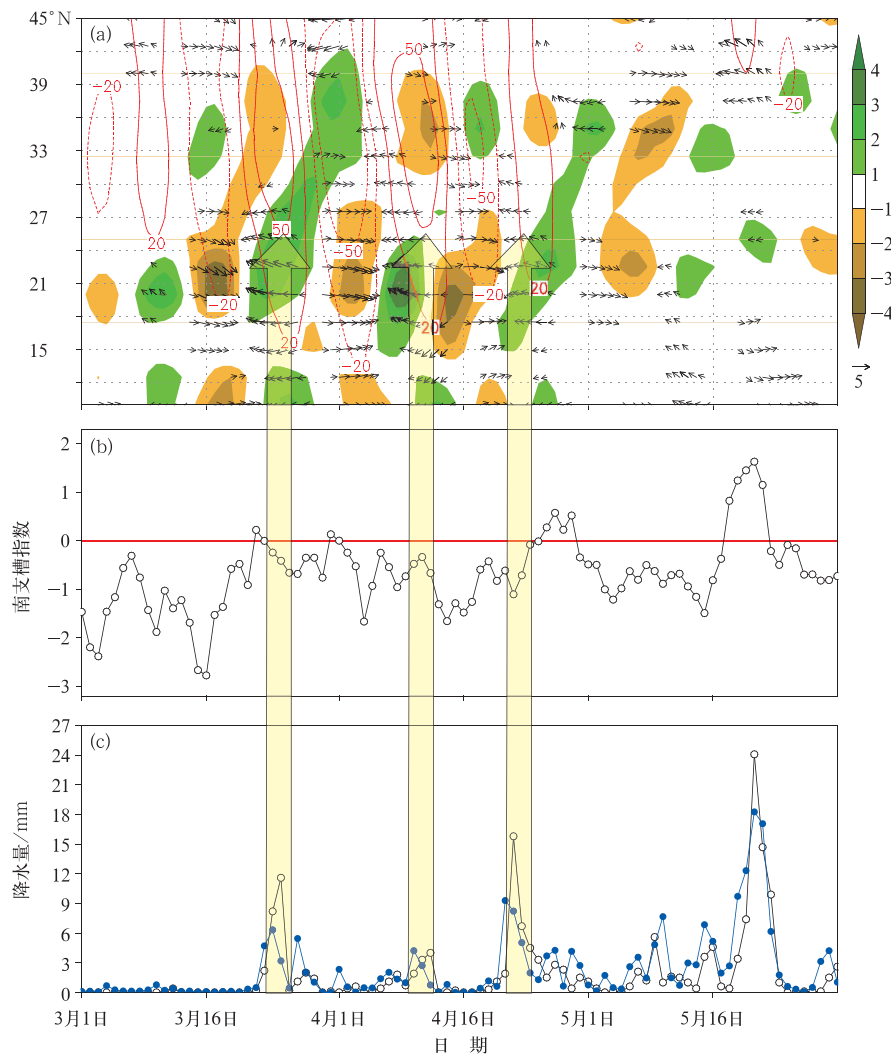


图 10 2015 年春季 (a) 10~30 d 滤波的 850 hPa 比湿 (填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、高度场 (等值线, 单位: gpm) 和风场 (矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) 沿 102.5°E 的纬度-时间剖面, (b) 逐日南支槽指数和 (c) 云南东部平均逐日降水

Fig. 10 (a) Latitude-time section along 102.5°E of 10–30 d filtered 850 hPa specific humidity (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), geopotential height (contour, unit: gpm) and wind field (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) daily southern branch trough index and (c) daily precipitation in eastern Yunnan in the spring of 2015

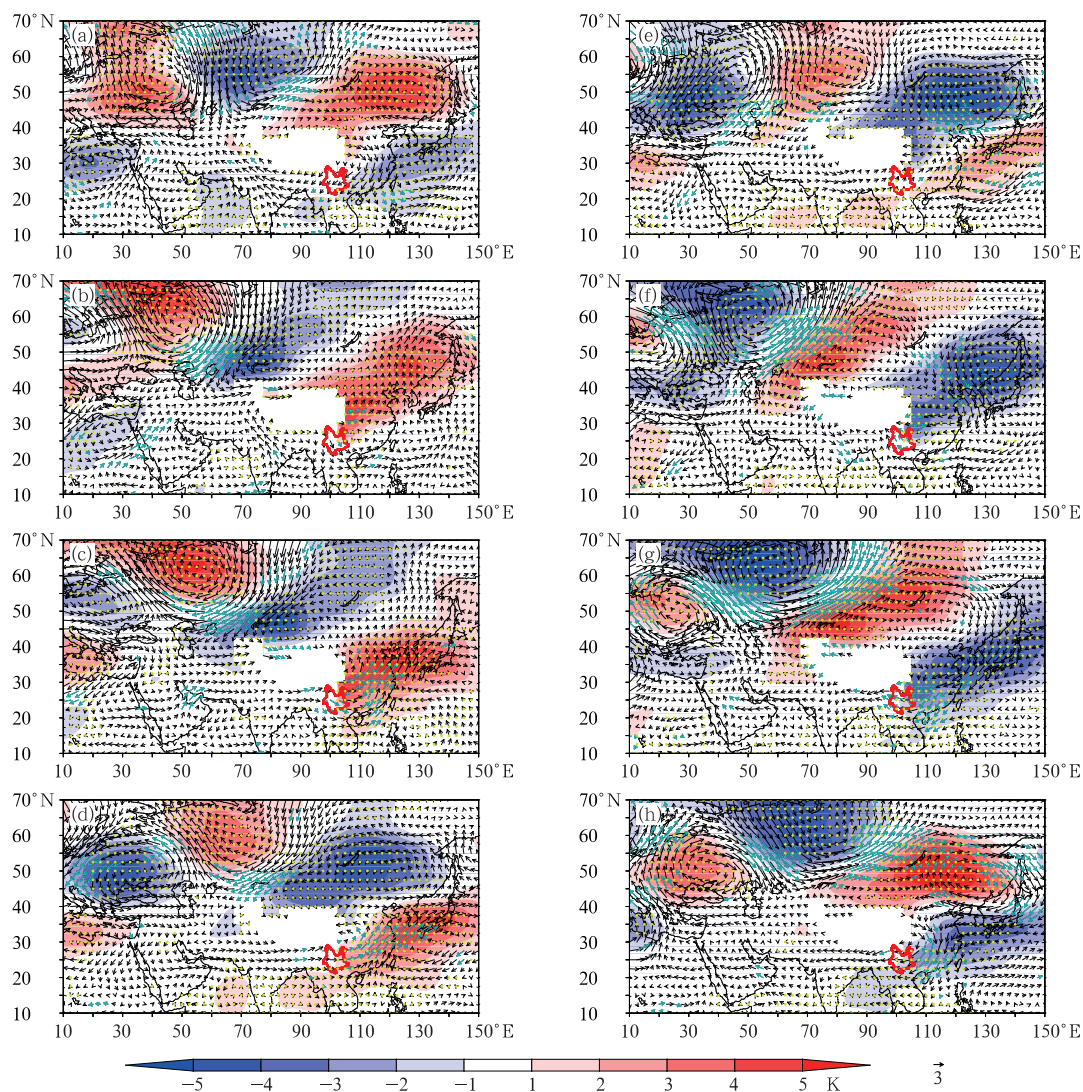


图 11 同图 8, 但为 700 hPa

(空白区域示意 3000 m 以上地形)

Fig. 11 Same as Fig. 8, but for 700 hPa

(White areas indicate the terrain above 3000 m)

降水、NCEP/NCAR 再分析资料和 CPC 全球测站均一化逐日格点降水资料, 分析了低频振荡在该年春季的活动特征及其对云南东部降水的影响。主要结论如下:

(1) 2015 年春季, 云南东部出现了 3 次明显受东亚 10~30 d 低频振荡影响的降水过程, 这 3 次降水过程的降水中心主要位于云南境内, 具有较明显的区域性特征, 是导致云南东部春季降水总体偏多和部分站点雨季开始偏早的重要原因。

(2) 2015 年 3 月中旬至 4 月下旬, 100°E 以东与 EU 型波列活动密切相关的 10~30 d 低频振荡异常偏强, 并出现了 3 个明显的振荡周期。当低频

冷位相向南推进时, 东亚副热带西风急流及其入口区次级环流亦随之南压, 当次级环流上升支移至云南上空时即成为形成降水的有利的动力条件。

(3) 2015 年 3 月中旬至 4 月下旬, 云南 3 次降水过程的水汽输送亦与 10~30 d 低频振荡密切相关, 即主要来源于东亚低频冷高压南下入海后其西南侧的东南风回流水汽。

本文的研究揭示了 2015 年春季 10~30 d 低频振荡与云南东部区域性降水的关系, 强调了东亚副热带急流及其入口区次级环流变化的重要作用。同时, 云南特殊的地形可能对其上空的大气垂直运动也起到了一定的增强作用。根据 WRF 中尺度模式

的地形敏感性数值试验结果(许彦艳等,2015),当冷空气南下时,云南的山脉地形可通过强迫抬升机制增强其周边的垂直上升运动,进而增强山脉迎风坡的降水。

综合全文分析可知,2015年春季,在强厄尔尼诺背景下,云南受异常下沉气流控制,滇西大部降水偏少,雨季开始偏晚;而云南东部受10~30 d低频振荡影响明显,大部地区降水偏多,雨季开始正常或偏早。

参考文献

- 陈艳,丁一汇,陶云,等,2015. 云南雨季开始期东亚副热带西风急流变化和冷空气活动[J]. 热带气象学报,31(5):577-587. Chen Y, Ding Y H, Tao Y, et al, 2015. The variation of East Asian subtropical westerly jet and cold air activities during Yunnan rainy season onset[J]. J Trop Meteor, 31(5): 577-587(in Chinese).
- 陈艳,丁一汇,肖子牛,等,2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响[J]. 大气科学,30(1):25-37. Chen Y, Ding Y H, Xiao Z N, et al, 2006. The impact of water vapor transport on the summer monsoon onset and abnormal rainfall over Yunnan Province in May[J]. Chin J AtmosSci, 30(1): 25-37(in Chinese).
- 陈艳,郭世昌,刘瑜,等,2017. 云南雨季开始期时空变化特征及其与ENSO的关系[J]. 干旱气象,35(4):545-551. Chen Y, Guo S C, Liu Y, et al, 2017. Spatial and temporal characteristics of the onset date of rainy season in Yunnan and its relationship with ENSO[J]. J Arid Meteor, 35(4): 545-551(in Chinese).
- 黄荣辉,刘永,王林,等,2012. 2009年秋至2010年春我国西南地区严重干旱的成因[J]. 大气科学,36(3):443-457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al, 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010[J]. Chin J AtmosSci, 36(3): 443-457(in Chinese).
- 黄玮,刘瑜,2012. 云南雨季开始期的时空变化特征及其与季风的关系[J]. 中国农业气象,33(3):348-354. Huang W, Liu Y, 2012. Temporal and spatial feature of the beginning date of rainy season in Yunnan Province and its relationship with monsoon[J]. Chin J Agrometeor, 33(3): 348-354(in Chinese).
- 金燕,况雪源,晏红明,等,2018. 近55年来云南区域性干旱事件的分布特征和变化趋势研究[J]. 气象,44(9):1169-1178. Jin Y, Kuang X Y, Yan H M, et al, 2018. Studies on distribution characteristics and variation trend of the regional drought events over Yunnan in recent 55 years[J]. Meteor Mon, 44(9): 1169-1178(in Chinese).
- 琚建华,吕俊梅,谢国清,等,2011. MJO和AO持续异常对云南干旱的影响研究[J]. 干旱气象,29(4):401-406. Ju J H, Lü J M, Xie G Q, et al, 2011. Studies on the influences of persistent anomalies of MJO and AO on drought appeared in Yunnan[J]. J Arid Meteor, 29(4): 401-406(in Chinese).
- 李蒙,刘瑜,张明达,等,2016. 2015年云南省气候公报[Z]. 昆明:云南省气候中心. Li M, Liu Y, Zhang M D, et al, 2016. Yunnan Climate Bulletin 2015[Z]. Kunming: Yunnan Climate Center(in Chinese).
- 李汀,严欣,琚建华,2012. MJO活动对云南5月降水的影响[J]. 大气科学,36(6):1101-1111. Li T, Yan X, Ju J H, 2012. Impact of MJO activities on precipitation in May over Yunnan[J]. Chin J AtmosSci, 36(6): 1101-1111(in Chinese).
- 廖要明,王凌,王遵娅,等,2016. 2015年中国气候主要特征及主要天气气候事件[J]. 气象,42(4):472-480. Liao Y M, Wang L, Wang Z Y, et al, 2016. Climatic characteristics and major meteorological events over China in 2015 [J]. Meteor Mon, 42(4): 472-480(in Chinese).
- 刘瑜,2000. 云南雨季早迟的气候特征分析[J]. 气象,26(7):45-49. Liu Y, 2000. The climatic feature analysis of Yunnan rainy season early or late onset[J]. Meteor Mon, 26(7): 45-49(in Chinese).
- 刘瑜,赵尔旭,孙丹,等,2006. 东南亚地区夏季风异常对云南2005年初夏干旱的影响[J]. 气象,32(6):91-96. Liu Y, Zhao E X, Sun D, et al, 2006. Impacts of anomaly of summer monsoon over the Southeast Asia on the early summer drought of Yunnan in 2005 [J]. Meteor Mon, 32(6): 91-96(in Chinese).
- 龙振夏,李崇银,2001. 热带低层大气30~60天低频动能的年际变化与ENSO循环[J]. 大气科学,25(6):798-808. Long Z X, Li C Y, 2001. Interannual variability of 30~60 day low-frequency kinetic energy in the lower tropical atmosphere[J]. Chin J Atmos Sci, 25(6): 798-808(in Chinese).
- 索剑,解明恩,刘瑜,等,2000. 云南气象灾害总论[M]. 北京:气象出版社. Qin J, Xie M E, Liu Y, et al, 2000. On Meteorological Disasters in Yunnan Province [M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 邵颢,廖要明,柳艳菊,等,2016. 2015年全球重大天气气候事件及其成因[J]. 气象,42(4):489-495. Shao X, Liao Y M, Liu Y J, et al, 2016. Global major weather and climate events in 2015 and the possible cause[J]. Meteor Mon, 42(4): 489-495(in Chinese).
- 索渺清,丁一汇,2009. 冬半年副热带南支西风槽结构和演变特征研究[J]. 大气科学,33(3):425-442. Suo M Q, Ding Y H, 2009. The structures and evolutions of the wintertime southern branch trough in the subtropical westerlies[J]. Chin J Atmos Sci, 33(3): 425-442(in Chinese).
- 肖子牛,温敏,1999. 云南5月降雨量与前期季节内振荡活动相互关系的分析研究[J]. 大气科学,23(2):177-183. Xiao Z N, Wen M, 1999. Relation between the precipitation of Yunnan in May and intraseasonal oscillation before May[J]. Chin J Atmos Sci, 23(2): 177-183(in Chinese).
- 解明恩,鲁亚斌,程建刚,等,2006. 云南雨季开始期与5月雨量的

- TBB 特征[J]. 高原气象, 25(2): 319-324. Xie M E, Lu Y B, Cheng J G, et al, 2006. TBB features of Yunnan rainy season onset and May rainfall[J]. Plateau Meteor, 25(2): 319-324 (in Chinese).
- 邢冬, 陶云, 何华, 2016. AO 与 ENSO 对云南冬春季降水分布的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 38(2): 267-276. Xing D, Tao Y, He H, 2016. The influence of AO and ENSO on distribution of Yunnan winter and spring precipitation[J]. J Yunnan Univ (Nat Sci Ed), 38(2): 267-276 (in Chinese).
- 许彦艳, 王曼, 马志敏, 等, 2015. 山脉地形对云南冷锋切变型强降水的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版), 37(5): 717-727. Xu Y Y, Wang M, Ma Z M, et al, 2015. The influence of mountain terrain on the cold front shear heavy rain in Yunnan[J]. J Yunnan Univ, 37(5): 717-727 (in Chinese).
- 晏红明, 段旭, 程建刚, 2007. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析[J]. 气象, 23(3): 300-306. Yan H M, Duan X, Cheng J G, 2007. Study on a severe drought event over Yunnan in spring 2005[J]. J Trop Meteor, 23(3): 300-306 (in Chinese).
- 杨双艳, 武炳义, 张人禾, 等, 2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与欧亚遥相关型的关系[J]. 大气科学, 38(1): 121-132. Yang S Y, Wu B Y, Zhang R H, et al, 2014. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern[J]. Chin J Atmos Sci, 38(1): 121-132 (in Chinese).
- 翟盘茂, 余荣, 郭艳君, 等, 2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 74(3): 309-321. Zhai P M, Yu R, Guo Y J, et al, 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate[J]. Acta Meteor Sin, 74(3): 309-321 (in Chinese).
- 郑建萌, 张万诚, 万云霞, 等, 2013. 云南北端干旱年春季异常环流形势的对比分析[J]. 高原气象, 32(6): 1665-1672. Zheng J M, Zhang W C, Wan Y X, et al, 2013. Comparative analysis on abnormal circulation in spring in extreme drought year of Yunnan[J]. Plateau Meteor, 32(6): 1665-1672 (in Chinese).
- Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al, 2012. The 2009/10 drought in China: possible causes and impacts on vegetation[J]. J Hydrometeor, 13(4): 1251-1267.
- Cao J, Zhang W K, Tao Y, 2017. Thermal configuration of the Bay of Bengal-Tibetan Plateau region and the May precipitation anomaly in Yunnan[J]. J Climate, 30(22): 9303-9319.
- Chen Y, Guo S C, Liu Y, et al, 2017. Interannual variation of the onset of Yunnan's rainy season and its relationships with the Arctic oscillation of the preceding winter[J]. Atmos Climate Sci, 7(2): 210-222.
- Jia X L, Chen L J, Ren F M, et al, 2011. Impacts of the MJO on winter rainfall and circulation in China[J]. Adv Atmos Sci, 28(3): 521-533.
- Li X Z, Chen Y D, Zhou W, 2017. Response of winter moisture circulation to the India-Burma trough and its modulation by the South Asian waveguide[J]. J Climate, 30(4): 1197-1200.
- Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al, 2012. The influence of the Madden-Julian oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009-2010[J]. Sci China Earth Sci, 55(1): 98-112.
- Zhang L X, Zhou T J, 2015. Drought over East Asia: a review[J]. J Climate, 28(8): 3375-3399.