

中国西南地区春季降水的时空变化及其异常的环流特征^{* 1}

夏 阳^{1,2} 万雪丽³ 严小冬⁴ 吴 磊³ 龙 园¹
XIA Yang^{1,2} WAN Xueli³ YAN Xiaodong⁴ WU Lei³ LONG Yuan¹

1. 六盘水市气象局,六盘水,553000
2. 贵州省山地气候与资源重点实验室,贵阳,550002
3. 贵州省气象台,贵阳,550002
4. 贵州省气候中心,贵阳,550002

1. *Meteorological Bureau of Liupanshui, Liupanshui 553000, China*
2. *Guizhou Key Lab of Mountainous Climate and Resources, Guiyang 550002, China*
3. *Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China*
4. *Guizhou Climate Center, Guiyang 550002, China*

2015-12-08 收稿,2016-04-11 改回.

夏阳,万雪丽,严小冬,吴磊,龙园. 2016. 中国西南地区春季降水的时空变化及其异常的环流特征. 气象学报, 74(4):510-524
Xia Yang, Wan Xueli, Yan Xiaodong, Wu Lei, Long Yuan. 2016. Variations of spring precipitation over southwest China and characteristic circulations for precipitation anomalies. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(4):510-524

Abstract Based on station precipitation data from China National Meteorological Center (NMC) and monthly mean reanalysis data from the National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), the spatial-temporal variations of spring precipitation over Southwest China and characteristic circulations associated with precipitation anomalies during 1951–2013 have been investigated. Results show that the most significant mode of spring precipitation is consistent over Southwest China with periodic cycles of 2.5–3.5 a and quasi-5 a. Atmospheric water vapor is transported from oceans to inland areas of Southwest China by anomalous cyclonic circulation wave trains in the middle and lower troposphere of the subtropical region. The warm moist airmass intersect with cold airmass from the north in Southwest China. Meanwhile, the pumping effect caused by low level convergence and upper level divergence results in strong ascending motion in the complex terrain area. The above circulation features are favorable for rainfall over Southwest China, and vice versa. Circulation anomalies in Southwest China are partly attributed to potential vorticity energy perturbations caused by anomalous convergence and divergence in Southwest China and the tropics, and partly attributed to dissipation and convergence of wave turbulence from the middle and high latitude to downstream region in Eurasia. In addition, surface heating in January on the Tibetan Plateau would be an early signal for the prediction of spring precipitation anomaly over Southwest China.

Key words Southwest China, Spring rainfall, Circulation anomaly, Wave activity flux

摘 要 利用中国气象局国家气象信息中心整编的中国西南地区 97 站逐日观测资料及美国国家环境预报中心/大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析资料,对中国西南地区 1961—2013 年春季降水的时空分布特征进行了分析,并研究了造成西南地区春季降水异常的环流成因。结果表明,中国西南地区春季降水的主模态呈现为全区一致型,该模态具有明显的 2.5—3.5 a

* 资助课题:国家自然科学基金面上项目(41365008)、中国清洁发展机制基金赠款项目(2013031)、黔科合院士站(20144010)、黔气科合 QN[2016]13 号。

作者简介:夏阳,主要从事中短期天气预报及气候动力学研究。E-mail:sun_shine_xia@126.com

通讯作者:严小冬,主要从事统计-动力诊断分析和短期气候预测理论的研究。E-mail:Yxd_climate@163.com

及准 5 a 的活动周期。对流层中低层副热带地区的异常气旋式环流波列形成的异常气流将洋面上空的水汽向中国西南内陆地区输送,暖湿气流与异常活跃的北方冷空气活动相配合,加上西南地区大气低层辐合、高层辐散而产生抽吸作用,使得当地对流层中低层出现较强的沿地形抬升的上升气流,从而有利于西南地区降水的形成,反之亦然。造成环流异常的原因除了与西南地区、热带地区的异常辐合/辐散运动造成的位涡扰动能量有关,亦与中高纬度波扰动能量下欧亚大陆下游地区的频散及辐合有关。此外,冬季 1 月的青藏高原地面加热场特征可作为预测后期西南地区春季降水异常变化的一个前期信号。

关键词 中国西南地区, 春季降水, 环流异常, 波作用量通量

中图法分类号 P462. 4

1 引言

中国西南地区地处青藏高原东南部,区域内地形地貌复杂,具有独特的天气、气候特征。其旱季(11月—次年4月)时间长,降水量小,干旱事件极易发生,季节性干旱,特别是春旱十分严重。自2009年以来,西南地区已经连续5 a 发生冬春旱,其中以2009—2010年的秋冬春连旱最为严重,这次干旱耕地受旱面积、受灾人口和农村饮水困难情况都达到了近10年来该地区的最高水平,受灾率和成灾率均为1943年以来的最大值,干旱范围之广、时间之长、程度之深、损失之大均为历史少见。

李永华等(2010b)研究指出,川渝地区的夏季降水除了具有全区一致分布型外,还具有南北相反型和东西相反型。中南半岛的经向水汽输送异常和西北太平洋副热带高压(副高)的持续异常则与川渝地区持续伏旱和高温灾害关系密切(刘晓冉等,2009)。利用区域性极端事件客观识别法(OITREE)共识别出1960—2010年中国西南地区有87次区域性气象干旱事件,大致可分为东部型、南部型、西部型、北部型和全境型等5种分布类型(李韵婕等,2014)。云南地区的春季干旱发生频率明显高于洪涝,大气环流的距平波列以及纬向、经向异常低频气流型对当地春季旱涝的形成有重要影响(苗春生等,2014;孙国武等,2014)。北大西洋涛动(NAO)可以通过在亚-非副热带急流中传播的准定常波列以及波的反射分别影响南支槽波列和贝加尔湖高压脊系统,从而对云南冬季降水产生影响(宋洁等,2011)。太平洋海温及北极涛动(AO)异常与云南冬季降水存在密切关系,如2009/2010年的西南地区秋冬春持续干旱是发生在中等强度的中部型厄尔尼诺背景下(王晓敏等,2012;陶云等,2014)。针对近年西南地区频发的干旱事件的研究表明,当地干旱的发生与副高强度偏强、位置偏西、南支系统偏

弱及冷空气活动路径偏北偏东等异常环流形势的存在有关(池再香等,2012;黄荣辉等,2012;Barriopedro, et al, 2012;郑建萌等,2014),而青藏高原热源偏弱,菲律宾附近地区对流异常活跃,又是引起副高偏强偏北偏西的重要原因(李永华等,2009)。

李崇银(2000)研究表明,大范围异常天气的形成往往同异常的大气环流形势有关,而大气环流的持续性异常与行星波活动有必然的联系。钱维宏等(2012)指出,与西南地区冬春干旱相联系的大气环流中存在3种时间尺度的扰动:与ENSO冷暖事件有关的年际行星尺度扰动,与赤道地区的30—50 d振荡有关的季节内行星尺度扰动,还包括天气尺度的扰动;异常的温度平流以及热带太平洋与北大西洋激发的遥相关对西南地区降水的异常偏少具有重要作用(Feng, et al, 2014);静止罗斯贝波在向下游传播的过程中对阻塞高压及东亚大槽异常的形成具有重要作用(Nakamura, 1994; Nakamura, et al, 1997; Naoe, et al, 2002; 黄小梅等,2013);反过来,阻塞形势对罗斯贝波的传播同样有影响(de Lima Nascimento, et al, 2002; Enomoto, et al, 2003)。而青藏高原的热力作用异常同样在影响周边西南地区乃至亚洲的气候异常分布方面具有重要作用(季国良等,1986;刘晓冉,2008;刘银峰等,2009;齐冬梅等,2010)。

中国西南地区处于南亚季风与东亚季风的过渡地带(Wang, et al, 2002),而春季作为北半球冬、夏季风的过渡时期及早季的最后阶段,其当季降水在承接西南地区前期冬季旱涝异常分布中起到重要作用。近年来,中国西南地区冬春干旱频发,其发生强度大,影响范围广,持续时间长,给国民经济和人民生命财产带来无法估量的损失。但针对西南地区春季异常降水及其可能成因方面的研究仍然较少,其中涉及到波扰动能量传播在欧亚地区大气环流形势异常分布中的作用仍不明确,且目前关于西南地区

春季异常降水前期信号方面的研究还较为匮乏。因此,本研究将在对中国西南地区春季降水时空分布特征进行分析的基础上,对西南地区春季降水异常的环流成因及波扰动能量在其中所具有的作用进行分析,并试图探讨其与青藏高原热力作用存在的可能关系。以期加强对西南地区春季降水分布特征及旱涝成因的认识,从而为当地旱涝灾害的预测提供线索。

2 资料与方法

采用的资料包括:(1)中国气象局国家气象信息中心提供的中国 756 站逐日观测资料,选取其中的 1961—2013 年共 53 a 无缺测的西南地区 97 站春季日降水资料;(2)美国 NCEP/NCAR 月平均再分析资料集(Kalnay, et al, 1996),垂直方向 17 层,要素包括风、位势高度、海平面气压、垂直速度、比湿等,水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$;(3)青藏高原热力作用的表征采用李栋梁(2006)计算的青藏高原地面加热场距平指数,时间跨度为 1961—2013 年。

由于旱涝灾害对于人口密集、经济较为发达的地区带来的影响更甚,因此仅将近年来春季干旱事件发生频率较高的四川、重庆、云南、贵州及广西等 5 省(市、自治区)所在的西南地区作为研究区域,而并未包含西藏,研究范围为(21° — 35° N, 97° — 112° E)。采

用的方法主要有经验正交函数(EOF)分解、相关分析、合成差值以及统计检验等。研究时段为 1961—2013 年的春季(3—5 月)。除特别说明外,文中的气候态均指 1981—2010 年春季 3 个月平均的多年平均。

青藏高原地面加热场强度距平指数的计算式(李栋梁,2006)为

$$\Delta(B-H)_p = a + b(T_s - T_a)_{\text{RKZ}} + c(T_s - T_a)_{\text{YS}} - M \quad (1)$$

式中, $b(T_s - T_a)_{\text{RKZ}}$ 和 $c(T_s - T_a)_{\text{YS}}$ 分别为青藏高原上日喀则站和玉树站的月平均地面(0 cm)温度与百叶箱温度之差,单位为 $^{\circ}\text{C}$; $\Delta(B-H)_p$ 即为青藏高原地面加热场强度距平指数,单位为 W/m^2 ,其中 B 为地面净辐射, H 为进入土中的土壤热通量,而 $B-H$ 称为地面加热场强度; a 、 b 、 c 为系数, M 为两站地面加热场强度气候平均值。

3 中国西南地区降水的时空分布特征

3.1 气候态分布

受两支季风的共同影响,中国西南地区冬干夏湿的水资源分布特征十分显著,如贵州夏、秋两季(6—11 月)的降水便占到全年降水的 68.6%(伍红雨等,2003)。图 1a 显示,作为东亚冬季风与夏季风的过渡阶段,中国西南地区的春季降水呈西北向

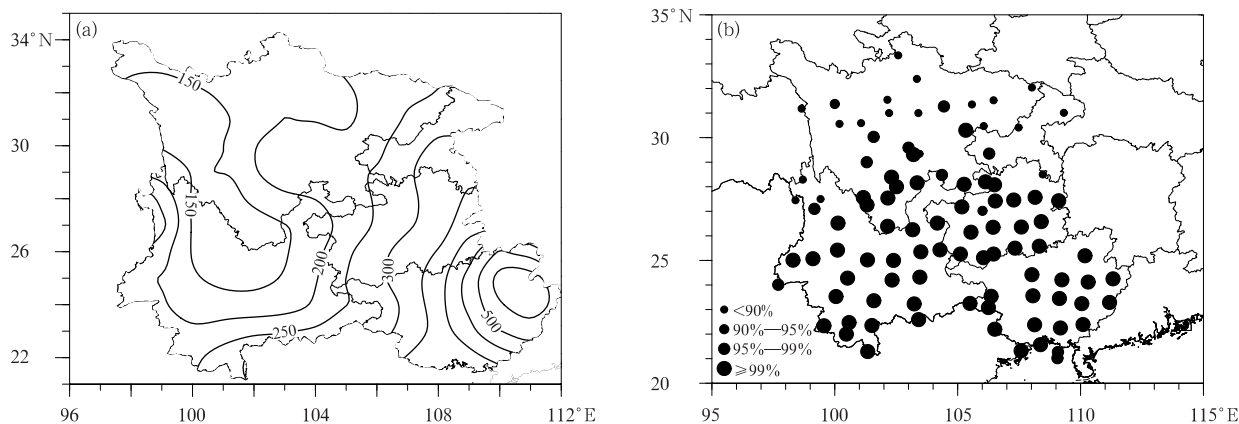


图 1 中国西南地区春季气候态降水(a,单位:mm,等值线间隔 50)及区域平均降水的时间序列与区域内各站点降水的相关分布(b,不同大小圆点表示通过不同置信度水平显著性的统计 t 检验)

Fig. 1 (a) Precipitation climatology in Southwest China during March, April and May (unit:mm, contour interval:50), and (b) distribution of correlation coefficient between regional average precipitation and precipitation at each individual station. Different sizes of dots indicate different significance levels using a t -test

东南逐渐增多的分布特征。降水低值位于云南中北部及四川西部的高海拔山区,在四川盆地、云南西部边缘地带及广西中东部为西南地区春季降水的高值区域,其中云南西部山区的降水高值区与来自孟加拉湾地区异常活跃的水汽输送有关。而西南地区春季降水年际变率的分布(图略)与降水的分布相似,即降水多的区域,其年际变率亦较大。此外,图 1b 给出了西南地区区域平均降水与区域内各站点降水的相关分布,由图可见,除了在四川北部及重庆东部等少部分区域外,包括云贵高原、广西、四川盆地在内的绝大部分区域的相关系数通过了 99% 置信度的显著性检验,四川盆地附近亦达到了 95%,而四川北部、尤其是西北部地区的相关较差,可能是由于当地的海拔较高,季风系统对其影响与其余地区有差别所致,但这并不影响其余绝大部分地区之间降水的一致性。因此可以认为,所选西南地区的区域范围内的降水变化存在较为显著的一致性,该区域范围的选择是合理的。

3.2 时空分解

为进一步分析西南地区春季降水的时空分布特征,对该地区 1961—2013 年的春季降水进行了经验正交函数分解。表 1 为前 5 个模态的方差贡献及累计方差贡献分布,可见该 5 个模态共解释西南地区春季降水总方差的 51.6%,其中,第 1 模态最大,解释了总方差的 20.6%,第 2 模态次之,为 10.6%,其余 3 个模态的方差贡献率均低于 10%。5 个模态亦通过了 North 准则(North, 1990)的检验,其所代表的空间分布型也能较完整地体现西南地区春季降水的典型分布结构。

从方差贡献最大的第 1 模态特征向量分布及其对应的时间系数(图 2)可见。第 1 模态(图 2a)空间型呈现为西南地区全区域一致的降水分布特征。其中,在云南中部至四川南部一带以及广西中北部存在大值中心,说明滇中及川南边缘地区的春季降水年际变化较大,而川东及重庆地区的春季降水相对稳定少变。将第 1 模态的时间系数(图 2b)与空间分布联系起来可见,西南地区春季降水在近半个多世纪以来逐渐增多,且在荷载值相对较高的云南中

表 1 中国西南地区春季降水经验正交函数分解前 5 个模态统计结果
Table 1 Statistical results of the first five EOF modes of spring precipitation over Southwest China

序号	λ_i	方差贡献(%)	累计方差贡献(%)	$\lambda_i - \lambda_{i+1}$	e_i
1	1058.08	20.6	20.6	512.49	205.54
2	545.59	10.6	31.2	106.00	105.98
3	439.59	8.6	39.8	102.43	85.39
4	337.16	6.6	46.4	70.57	65.50
5	266.59	5.2	51.6	62.59	51.79

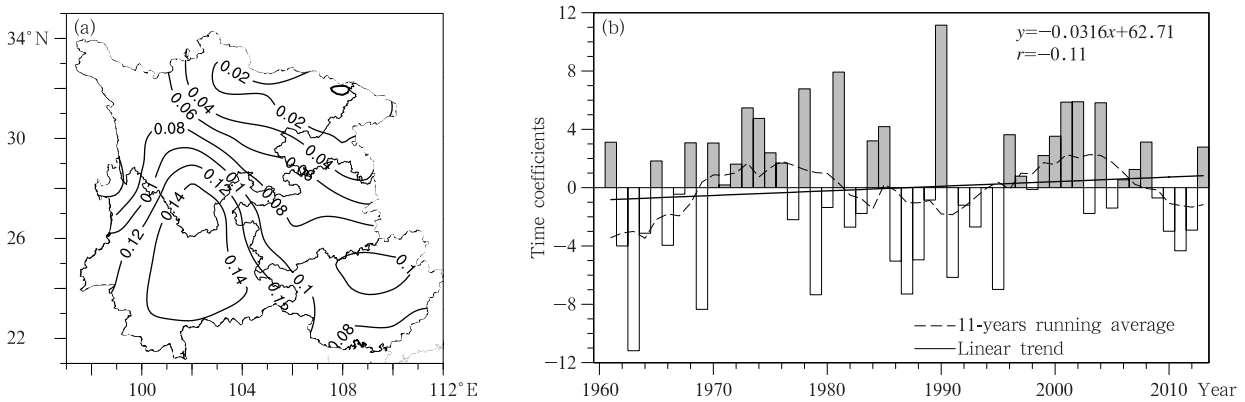


图 2 中国西南地区春季降水经验正交函数分解第 1 模态(a)及其对应的时间系数
(b, 实心柱表示正位相, 空心柱表示负位相, 实线代表线性趋势, 虚线为 11 a 滑动平均)

Fig. 2 The first EOF mode (a) and corresponding time coefficients (b, Grey bars are for positive phase, white bars are for negative phase, the black solid line indicates the linear trend, the dotted line shows 11-year running mean) of spring precipitation over Southwest China

部与广西北部降水量的增大较其余地区明显。从 11 a 滑动平均可见,第 1 模态时间系数还表现出明显的年代际变化特征,从 20 世纪 60 年代初期至 21 世纪最初 10 年的中期经历了负-正-负-正的变化,其中,20 世纪 70 年代以前及 80 年代中期至 90 年代中期为西南地区降水的偏少时期,而 70 年代至 80 年代初及 90 年代末至 21 世纪初期为降水的偏多期,2008 年以后又开始呈现下降趋势。此外,第 2 模态(图略)呈现为西南地区降水东西反位相的分布特征,其时间系数(图略)在 1987 年以前基本上呈正位相,而在这之后则以负位相居多,近 51 年来表现出了显著的下降趋势,相关系数($r = -0.54$)亦通过了 99.9% 的显著性 t 检验。而第 3、第 4 模态(图略)则显示西南地区春季降水还存在南北反位相型及西北至东南一带与西南东北反位相型的分布特征。

3.3 主模态周期分析

由于西南地区春季降水经验正交函数分解第 1 模态的时间系数存在明显的年(代)际变化特征,为进一步的提取第 1 模态中的周期变化特征,对该模态的时间系数的小波方差及全时域功率谱进行了分析(图 3)。帽子小波分析(Torrence, et al, 1998)结果显示,西南地区春季降水在 20 世纪 60 年代中后期与 80 年代初以及 90 年代初存在 2—3.5 a 的显著周期,在 80 年代至 90 年代以准 5 a 的活动周期为主。此外,从 70 年代至 90 年代末,还表现出一定的准 8 a 周期。而全时域功率谱的分析结果与小波分析较为一致,即西南地区春季降水的第 1 模态存在显著的 2—3.5 a 及准 5 a 的变化周期,而 8 a 的活动周期较弱。值得注意的是,在小波分析及功率谱分析的结果中均显示存在一个超过 16 a 的变化周期,但该周期处于受边界影响的区域内,可信度较低。

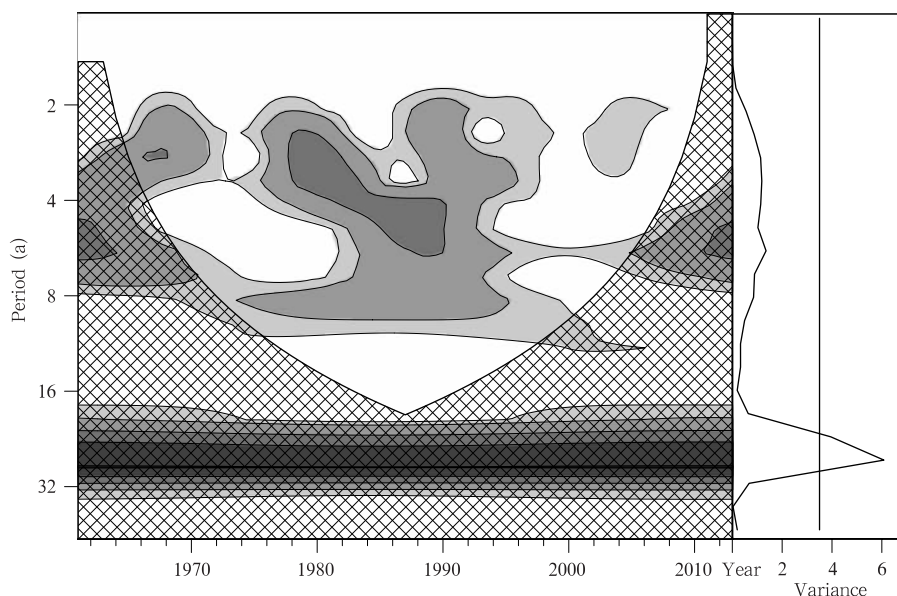


图 3 中国西南地区春季降水经验正交函数分解第 1 模态时间系数的帽子小波分析及全时域功率谱
(小波分析中阴影部分表示通过 90% 置信度水平检验,交叉斜杠区域表示小波变换受边界影响的区域;功率谱中实线为方差分布)

Fig. 3 Morlet wavelet analysis and power spectrum analysis of the time coefficients corresponding to the first EOF mode of spring precipitation over Southwest China (shaded areas are for values at and above the 0.1 significance level and the thick solid line is for variance)

4 中国西南地区降水异常的环流特征

从前文的分析中可知,西南地区春季降水主模态存在显著的波动周期,其中在 20 世纪 60 年代、80 年代后期至 90 年代为相对少雨时段,多雨时段主要

集中在 20 世纪 70 年代至 80 年代初、90 年代后期至 21 世纪初期。为分析西南地区春季主模态降水在异常偏多及偏少时的环流背景差异及其成因,根据经验正交函数第 1 模态时间系数的标准差($\sigma = 4.51$),选取绝对值大于 1 倍 σ 的年为西南地区春季降水的典型异常年,分别得到典型多雨年 8 a(1973、

1974、1978、1981、1990、2001、2002 和 2004 年);典型少雨年 8 a(1963、1969、1979、1986、1987、1988、1991 和 1995 年)。接下来对降水异常典型年份的有关气象要素进行合成差值分析(除特别说明,均为降水偏多年减去偏少年)。

4.1 水汽输送异常

能否产生降水尤其是大范围强降水,这与是否存在充足水汽向相关区域输送密切相连。蒋兴文等(2007)、李永华等(2010a)指出,影响西南地区降水

的水汽主要来源于青藏高原、孟加拉湾及中国南海地区,且由于大气中的水汽含量大值区集中在 850—700 hPa(李秀珍等,2010),同时考虑到西南地区的地势高度,因此仅对与西南地区同异常降水相联系的 700 hPa 及整层的水汽通量和水汽通量散度进行分析。在计算整层水汽通量时考虑到大气中的水汽含量及水汽输送主要位于 300 hPa 以下(Zhou, 2003),水汽通量的积分仅从地表(p_s)计算至高空 300 hPa。

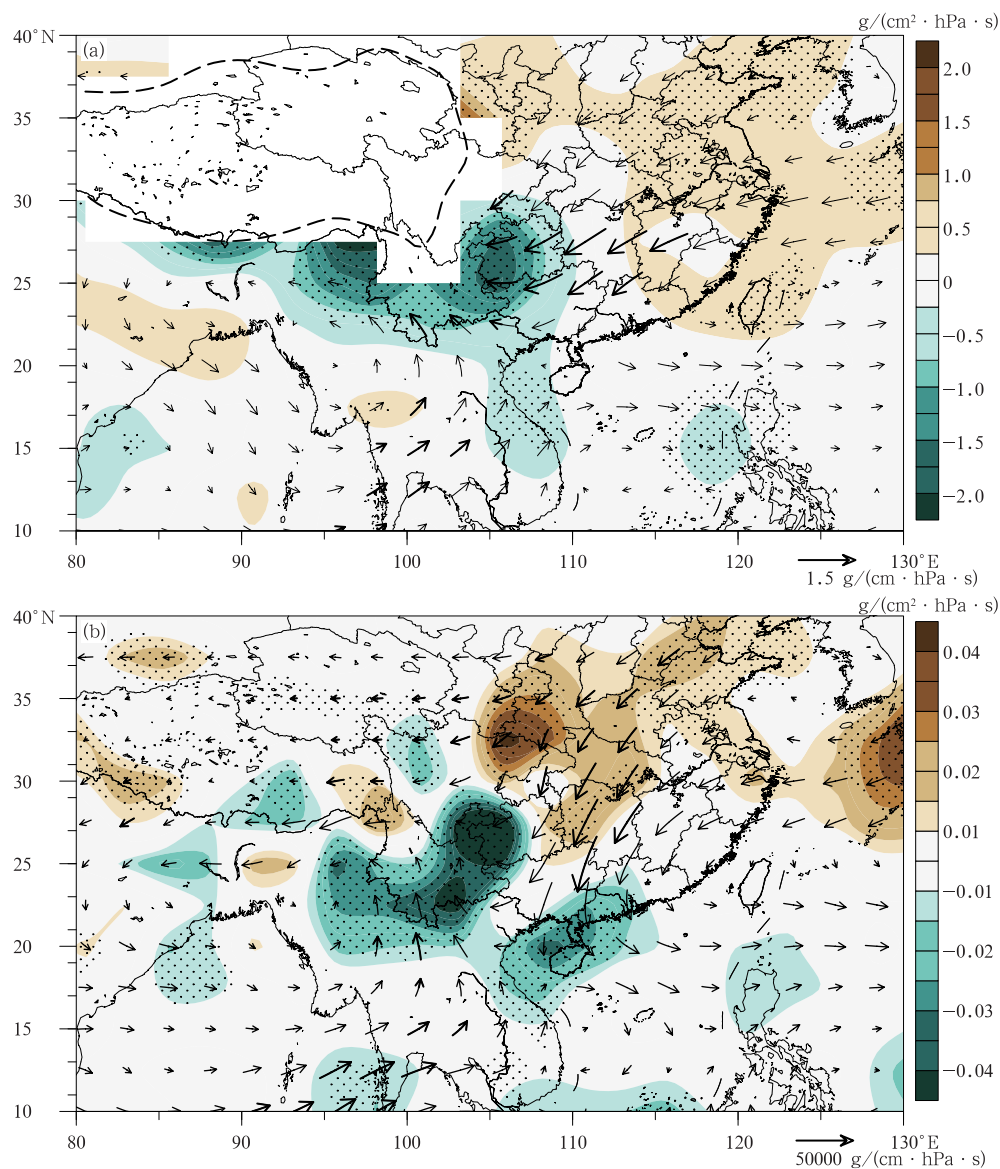


图 4 东亚地区春季 700 hPa(a,虚线为地形)与整层大气(b)水汽通量(箭头,加粗箭头表示通过 95%显著性 t 检验)及水汽通量散度(色阶,其中 700 hPa 上已人为放大 10^6 倍,打点区域表示通过 95%显著性 t 检验)的合成差值

Fig. 4 Composite differences in vapor flux (vectors) as well as the divergence of the flux (shaded) at 700 hPa (a, divergence of the flux multiplied by 10^6) and vertically integrated water vapor flux from the surface up to 300 hPa (b). The thick vectors and dotted areas are respectively for the water vapor flux as well as its divergence significant at and above the 0.05 significance level using a t -test

从东亚地区对流层低层 700 hPa(图 4a)及整层大气积分(图 4b)水汽通量、水汽通量散度的合成差值上可见,在青藏高原南侧中南半岛西北部以及西北太平洋上空均存在异常的气旋式环流,前者的存在加强了春季常年位于孟加拉湾地区的南支槽前西南气流,从而有利于将低纬度热带地区的暖湿气流向西南内陆地区输送。位于西北太平洋上空的异常气旋则减弱了副高北侧的水汽输送作用,阻塞了南方水汽向中国东部地区的输送,而当地上空亦为水汽通量的辐散区,于是中国东部水汽通道作用的减弱反而促进了来源于热带海洋上空的水汽在西南地区的堆积,与此同时,在整层大气的水汽通量上还观察到中高纬度的偏北气流携带北方水汽向南输送,驱动北方中低层大气中的冷空气南下渗透,此时两个异常气旋间的区域成为两股暖湿气流的交汇地带,为西南地区降水的产生提供了有利条件。而该水汽输送的异常形势与华南地区的降水亦有密切联系(常越等,2006)。从水汽通量散度的异常分布上亦可看到,除四川东北及重庆北部的部分区域外,西南地区大部分区域均存在显著的水汽通量辐合。700 hPa 与整层大气中的水汽通量辐合中心均位于贵州西部,其中 700 hPa 等压面上辐合中心的水汽通量散度大小为 $-1.75 \times 10^{-6} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,整层水汽通量散度则达到 $-0.04 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 。

4.2 局地水平环流异常

异常的降水与水汽输送往往同异常的水平环流及天气系统相联系,如南支槽、热低压、西风带北支高压脊以及热带大气中的马登-朱利安振荡(MJO)等均是影响中国西南地区春季降水的重要天气系统(王斌等,2010;吕俊梅等,2012;杨静等,2013;张永莉等,2014;Fan, et al, 2015)。为分析西南地区春季降水异常时期的大气环流异常背景,将对流层不同层次的东亚地区春季风场的辐散分量与旋转分量、散度、垂直速度以及海平面气压等有关气象要素进行了合成差值分析(图 5)。

海平面气压的合成差值(图 5a)显示,包括西南地区在内的中国中西部地区为海平面气压的正异常,正值中心位于青海东南部与四川交界地带,中心值超过了 2.5 hPa,而除中国中西部以外其余地区均呈现为海平面气压的负异常,而在青藏高原东南侧及日本海上空分别存在两个低于 -1 hPa 的显著

负异常中心。同多年平均的东亚春季海平面气压场(图略)分布相比可知,该种异常形势使得位于阿留申群岛东侧的低压强度均有所增强,蒙古的冷高压位置南移,且海陆间气压梯度增大,使得北方冷空气活动强度及频率增大,路径较往常偏南,西南地区能更多地受到由北方扩散而下的冷空气影响,从而有利于当地降水的产生(陶云等,2014)。对流层中层 500 hPa 垂直速度上,包括西南地区在内的中国西部及中南半岛均处于明显的异常强上升气流控制区域。

从 700 hPa 风场(图 5b)可见,在 15° — 30°N 的副热带地区存在一个异常气旋式环流波列,3 个气旋中心分别位于印度西部、中南半岛及菲律宾岛北岸,3 个气旋北侧的偏东气流形成了一条从西北太平洋经中国南方地区延伸至北印度洋的异常偏东气流,青藏高原北侧的异常反气旋东南侧的偏北气流与其在西南地区上空交汇形成显著的辐合中心。位于中南半岛的异常气旋东南部的偏南气流则将孟加拉湾、中国南海地区洋面上空的暖湿气流向中国内陆输送,为西南地区的降水提供充足的水汽,同时,西北太平洋上空异常气旋西北侧的东北气流对西南地区向外的水汽输送形成了阻挡作用,从而造成水汽在西南地区上空汇集,而在中国东部地区形成异常的辐散区,中国西南地区上空 700 hPa 存在的辐合中心以及 500 hPa 上的异常上升运动同样表明水汽在当地具有明显的辐合及抬升过程,促进当地降水的形成。此外,在 700 hPa,中国南海上空以及西太平洋上空仍存在显著的辐合中心,周边大气中有气流向上述两个区域及中国西南地区上空辐合。

在对流层高层(200 hPa,图 5c),热带海洋性大陆区域上空存在明显的辐散中心,而在西亚帕米尔高原及中国北方存在较强的辐合,气流从热带海洋性大陆区域向外辐散,在帕米尔高原及中国北方辐合下沉,补充低层流失的大气。同时,中国西南地区上方为较强的辐散区,抽吸作用使得当地低层大气产生较强的辐合上升运动,配合充足的水汽供应,为西南地区降水的形成提供了充足的动力条件。此外,在中国地区上空存在较强的气旋式异常环流,其东西两侧分别存在反气旋式异常环流。该异常环流波列的出现可能与热带地区强烈的辐合上升运动带来的涡度源强迫有关(Gill, 1980; Sardeshmukh, et al, 1988; Rodwell, et al, 1996)。

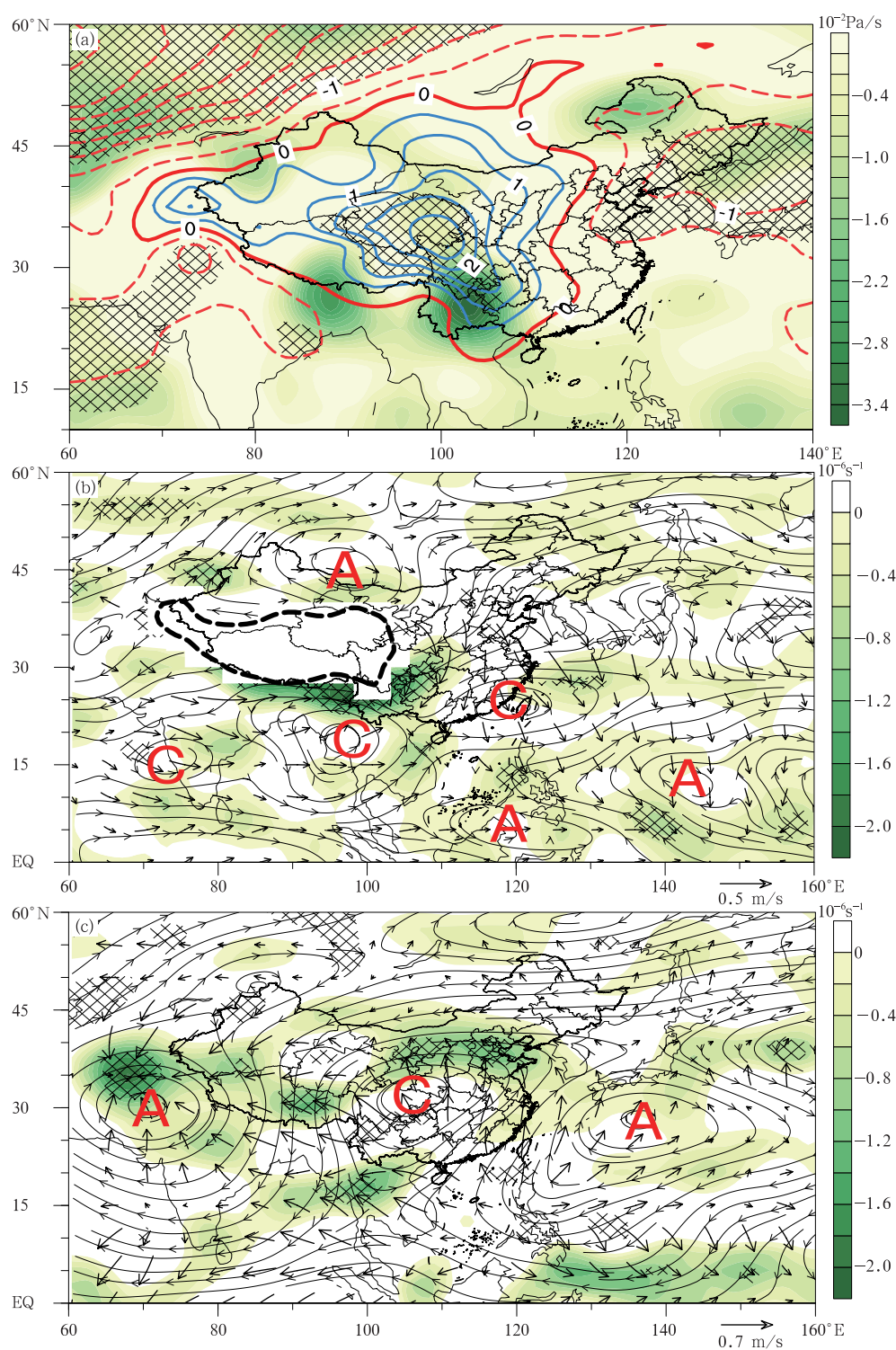


图 5 海平面气压(等值线,单位:hPa,红色虚线表示负值,蓝色实线表示正值,红色粗线为 0 值;交叉斜线区域为海平面气压通过 95%显著性 t 检验的区域)、500 hPa 垂直速度(色阶)(a)及 700 hPa 风场(b,粗虚线表示地形高于 3000 m 的区域)、200 hPa 风场(c)的合成差值(b,c 中矢线为辐散风,流线为旋转风;色阶为散度,交叉斜线区域表示通过 95%显著性 t 检验)

Fig. 5 Composite differences in sea level pressure anomalies (contours, the zero contour line is bolded, units: hPa) and vertical velocity at 500 hPa (shaded) in (a), the rotational (streamlines) and divergent (arrows) components of wind as well as wind divergence (shaded) at 700 hPa (b, thick dotted lines for the 3000m topography) and at 200hPa (c). The cross-hatched areas are for values of divergence significant at and above the 0.05 significance level using a t -test

4.3 异常垂直环流

为分析西南地区产生异常降水及水汽输送的垂直环流原因,给出了西南地区主体所在区域(25° — 30°N , 100° — 110°E)的垂直剖面环流特征。从 25° — 30°N 平均的纬向环流合成差值(图 6a)可见,在 110°E 附近的高空(400 hPa)大气中存在异常的环流圈,西南地区东部上空中低层大气位于异常环流圈中心下部,受其低层异常偏东下沉气流影响较大,偏东气流随地形抬升,使得西南地区西部的大部分地区为明显的异常上升气流控制,垂直速度中心位于 102°E 上空对流层中层 500 hPa 附近,中心值达到 $-2.5 \times 10^{-2} \text{ Pa/s}$ 。此外, 100° — 110°E 平均的经

向环流合成差值(图 6b)显示,西南地区存在明显偏北风异常和上升运动异常,上升运动中心位于对流层中层(500—400 hPa),且一直向上延伸至高层 100 hPa,西南地区南侧还出现明显的偏南暖湿气流。与多年平均(图略)相比可知,在西南地区春季降水偏多的年,由于西北太平洋及中南半岛上空异常气旋式环流的存在,受到东侧来源于太平洋与中南半岛的水汽输送以及北方冷空气活动的共同影响,西南地区上空整个对流层受原本就存在的上升气流得到加强,伴随冷暖空气的相互作用,有利于当地降水的形成。

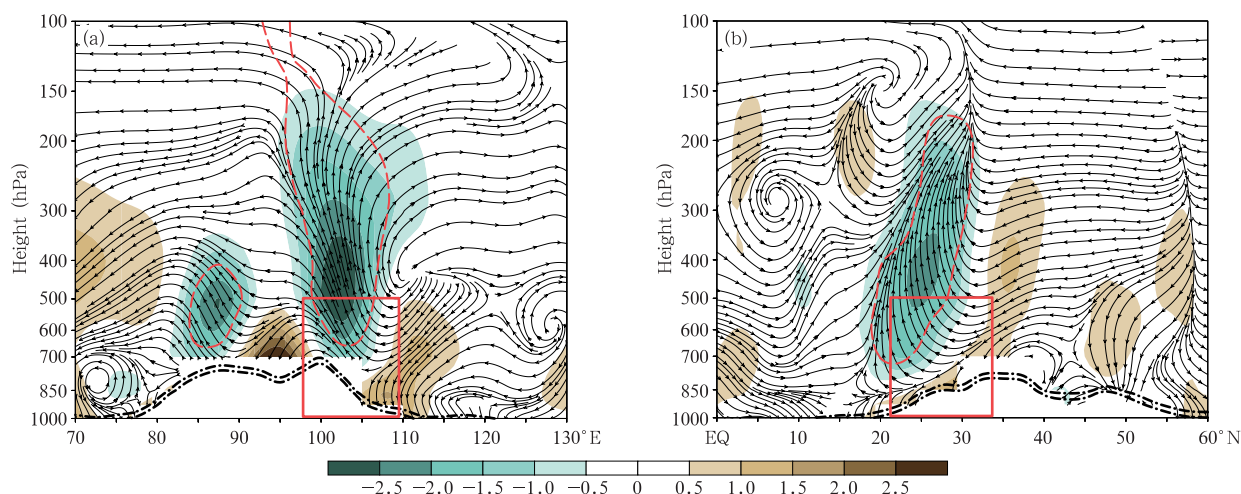


图 6 中国西南地区典型涝、早年春季 25° — 30°N 平均的纬向环流(a)及 100° — 110°E 平均的经向环流(b)垂直剖面的合成差值(流线为异常垂直环流,阴影为 ω ,其量级已放大 100 倍,单位: 10^{-2} Pa/s ,红色虚线为 ω 通过 95% 显著性 t 检验的区域,黑色虚线表示地形,红色方框为西南地区)

Fig. 6 Composite differences in zonal circulation (stream) averaged from 25° — 30°N (a) and meridional circulation (stream) averaged from 100° — 110°E (b) (Shaded are for vertical velocity (multiplied by 100) and the red dashed lines indicate the values are significant at and above the 0.05 confidence level using a t -test, and double black dotted lines indicate the topography. The red rectangular boxes denote the study region of Southwest China)

4.4 大尺度环流及波扰能量

曾有研究(段长春等,2007;夏阳等,2015)指出,影响云贵高原晚秋前冬及汛期降水的环流系统异常可能与热带强迫源激发大尺度准定常波的传播有关。那北半球中高纬度西风带中罗斯贝波列的传播对欧亚地区异常环流形势的产生与维持所具有的作用又是怎样的呢?下文给出了不同对流层高度(700、500 和 200 hPa)上西南地区典型旱涝年位势高度的合成差值以及 T-N 通量(Takaya, et al, 1997, 2001)(图 7)。

从对流层低层 700 hPa 位势高度场的合成差值场(图 7a)可见,西欧沿岸及中亚至白令海峡一带为位势高度的正异常区,而在乌拉尔山地区及南亚至西北太平洋一带为位势高度的显著负异常。与气候态的春季位势高度相比可知,东亚大槽的强度有所减弱,位置偏南,位于青藏高原北侧的高压脊有所增强,且向东倾斜,东亚地区上空经向环流增大,偏北气流活动旺盛。此外,在西欧沿岸的对流层低层,有较强的波作用量通量沿北支西风气流向东传播至东亚地区附近,能量在乌拉尔山地区及东亚地区上空

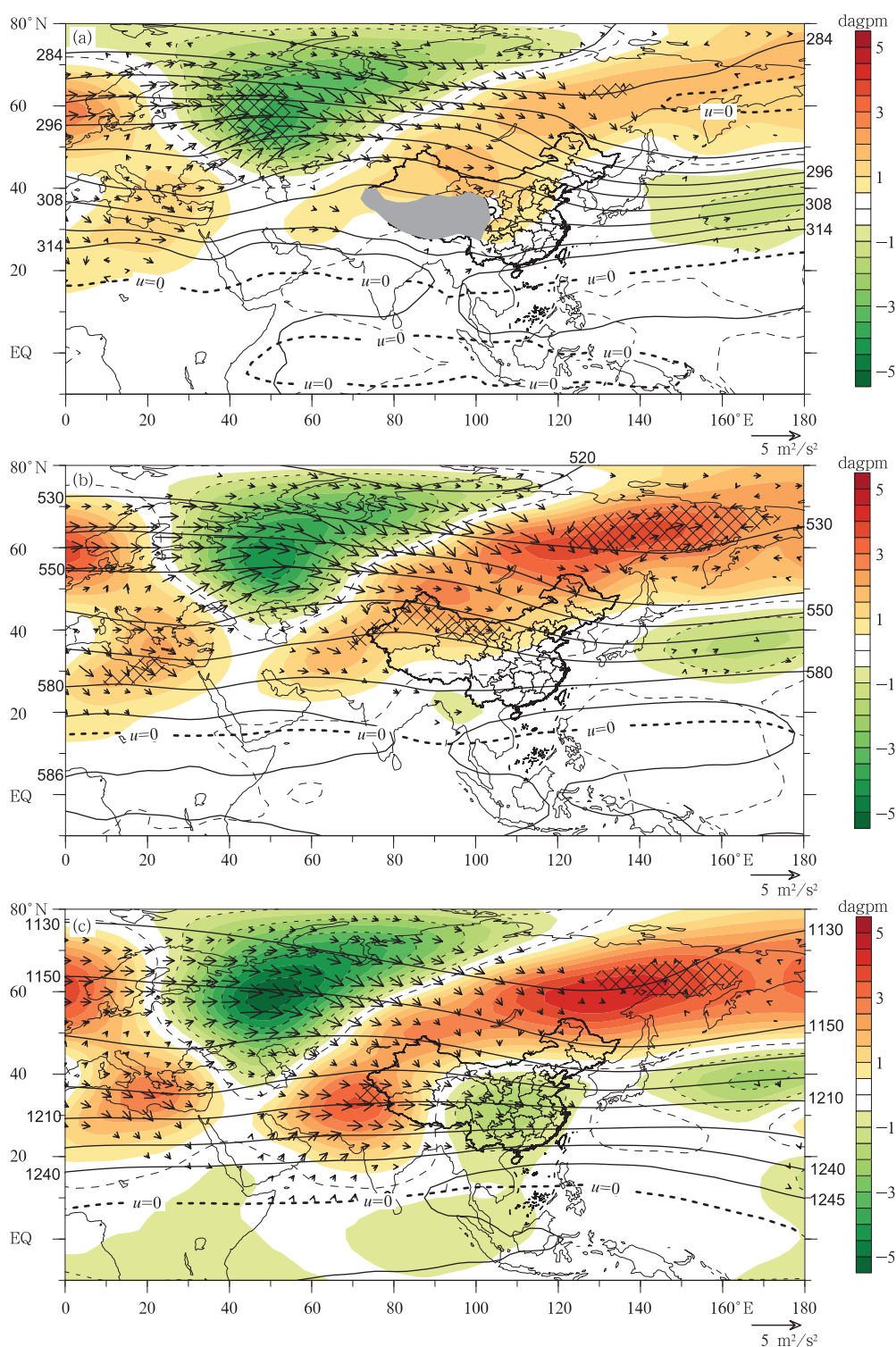


图 7 700 hPa(a)、500 hPa(b)、200 hPa(c)位势高度平均场(黑色实线)与合成差值场(阴影为位势高度异常,细虚线为 0 线;交叉斜线区域表示通过 95%显著性 t 检验;矢线为 T-N 通量;粗虚线为纬向风 0 线)

Fig. 7 Climatology of geopotential height (contours) along with the composite difference in geopotential height anomalies (shaded), and corresponding T-N wave activity fluxes (arrows) at 700 hPa (a), 500 hPa (b), and 200 hPa (c). The cross-hatched areas show values of geopotential height anomalies significant at and above the 0.05 significance level using a t -test

辐合,产生并维持当地上空的位势高度异常。

在对流层中高层(图 7b、c)亦观察到与低层相类似的分布,即位势高度异常在欧亚大陆中高纬度地区呈现出“+ - + -”的分布型,表明位于上述地区的位势高度扰动在垂直方向上均为深厚系统。在 T-N 通量的传播上,200 hPa 与对流层中低层的路径有所不同,波扰动能量虽均来自于西欧沿岸及地中海地区,但能明显地观察到其分为南、北两支分别沿中高纬度及副热带西风急流向下游地区频散,其中南支能量在中国地区上空辐合堆积,维持当地对流层高层位势高度的负异常中心。此外,对流层中低层的南支波作用量通量并没有高层明显,此可能与青藏高原大地形的阻挡作用有关。

5 中国西南地区春季降水与前期青藏高原热力作用的关系

拥有“世界第三极”之称的青藏高原在影响亚洲

乃至世界的气候格局分布方面扮演重要角色。下文采用 1 月青藏高原地面加热场距平指数来表征青藏高原前期冬季的加热作用,并给出了 1961—2013 年 1 月的青藏高原地面加热场强度距平指数时间序列及其与西南地区春季降水的相关(图 8),试图探索前期青藏高原主体的加热作用与西南地区的降水的可能关系。

由图 8a 可见,1 月的加热场距平指数具有明显的年(代)际波动,近 53 年来,最高值出现在 2012 年,达到了 15.99 W/m^2 ,最低值为 2001 年的 -17.02 W/m^2 。其中,1 月青藏高原地面加热场强度在前 40 年间逐渐减弱,直到 2001 年达到极低值,这也与李栋梁(2006)针对冬季青藏高原地面加热场强度变化的研究结论一致。尽管从长期线性趋势上来看,近 53 年的指数具有明显的下降趋势,但自 2001 年以来,该指数开始出现明显的上升,近 10 年的趋势系数甚至超过了 $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot 10 \text{ a})$,青藏高原地面加热场强度上升明显。

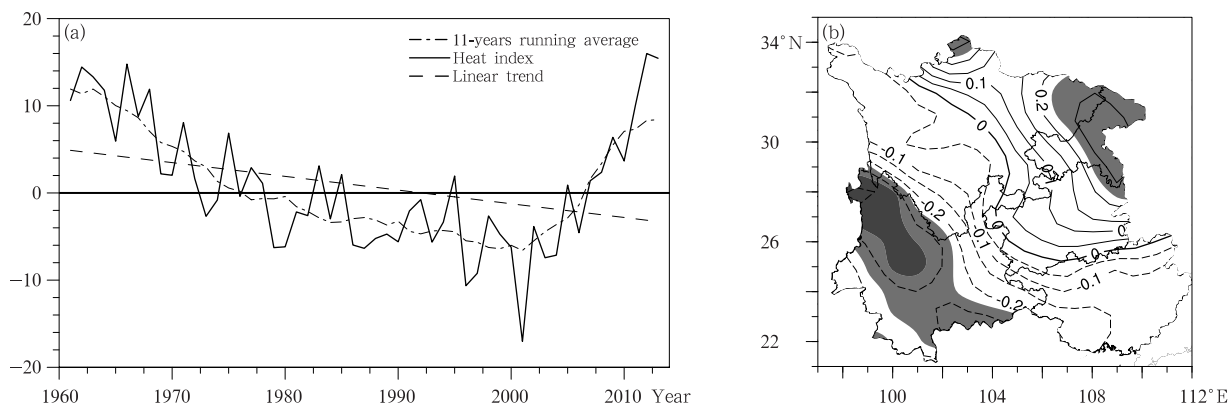


图 8 1961—2013 年 1 月青藏高原地面加热场距平指数时间序列(a,粗实线表示地面加热场距平指数,虚线为长期线性趋势,点虚线为 11 a 滑动平均,单位: W/m^2)及其与中国西南地区春季降水的相关(b,深、浅色阴影分别表示通过 95%、90% 显著性检验)

Fig. 8 Time-series of the surface heating anomaly index on the Tibetan Plateau in January from 1961 to 2013(a) with the thick line for the index and the dotted line for the linear trend and the pecked line for 11-year-running-mean. The correlation between the heating anomaly index and spring rainfall over Southwest China is shown in (b), in which areas shaded in dark (shallow) grey are for values at and above the 0.05(0.1) level of confidence using a t -test

为探究前期青藏高原加热作用与西南地区降水的关系,将 1 月青藏高原地面加热场距平指数同西南地区当年春季降水进行了相关分析(图 8b)。由图可见,在西南地区西部与南部的广大地区为负相关,负相关中心主要位于云南中部、西北部地区,该

区域相关系数超过 -0.3 ,通过了 95% 的显著性检验。而在包括贵州、重庆、四川东北部在内的地区为正相关区域,正相关中心位于重庆东部,相关系数中心值超过 0.25,通过了 90% 的显著性检验。由此可知,与西南地区主模态降水为全区域一致的分布特

征不同,青藏高原前期地面加热场与西南地区降水的关系整体上表现为东北—西南反位相的分布特征,即当青藏高原地面加热场偏强时,西南地区的西部及南部易出现降水异常偏少,而中部及东北部则易出现降水异常偏多,反之亦然。因此,前期1月青藏高原地面加热场的异常变化,可以作为西南地区后期春季旱涝异常的一个前兆信号,但为何会形成西南地区异常降水东北—西南反位相的分布特征值得进一步的关注。

6 结论与讨论

对中国西南地区的春季降水时空分布特征进行了分析,并从动力作用的角度出发,研究了西南地区春季降水异常时的环流背景,得到以下结论:

(1)西南地区春季降水呈西北向东南逐渐增多。降水低值区与高值区分别位于高海拔山区与广西东部。此外,在四川盆地及云南的西部边缘地带出现了降水的次高值区域。

(2)西南地区春季降水经验正交函数分解第1模态解释了总方差的20.6%,其空间型呈现为西南地区全区域一致的分布特征。西南地区春季降水主模态在近53年来呈逐渐增多的趋势,但并不显著;此外,其还具明显的年(代)际变化特征,变化周期以2.5—3.5 a及准5 a为主。

(3)西南地区春季降水异常的形成与对流层中低层副热带地区强烈的异常气旋式环流波列有关。存在于副热带地区的3个异常气旋北侧偏东气流带与位于中南半岛地区异常气旋东南部的偏南气流相配合,将海洋上空的水汽向西南地区输送,并沿地形向上抬升,在西南地区东侧对流层中低层产生异常的纬圈环流,加强当地上空原本就强盛的上升运动。同时,异常偏南的蒙古冷高压造成中高纬度地区中低层大气中的冷空气活动强度及频率增大,使得西南地区更多地受到北方冷空气南下的渗透影响,从而有利于冷暖空气在西南地区交汇,促进当地降水的形成。此外,西南地区、热带地区的异常辐合/辐散运动造成的位涡扰动能量与中高纬度波扰能量下欧亚大陆下游地区的频散及辐合,对维持对流层位势高度的异常扰动具有重要作用,亦为对流层中低

层的环流异常提供了能量来源。

(4)冬季1月的青藏高原地面加热场可作为预测后期西南地区春季降水异常变化的一个前期信号。当青藏高原地面加热作用偏强(弱)时,西南地区的西部及南部易出现降水的异常偏少(多),而中部及东北部则易出现降水的异常偏多(少)。

以前的研究(叶笃正等,1957;Yeh, et al, 1983;张顺利等,2001)表明,陆面过程具有数月的记忆,且青藏高原的感热作用能够通过季尺度低频波的传播影响到下游地区后期时段的气候特征。但前期青藏高原的热力分布与后期春季西南地区降水异常之间如何通过季节尺度的低频传播引发大气环流的响应从而产生联系,是否与冬季青藏高原热力作用的异常影响到亚洲冬夏季风的季节转变进程有关,以及为何造成西南地区异常降水的东—西反位相分布还需要进一步的分析。

参考文献

- 常越,何金海,刘芸芸等. 2006. 华南旱、涝年前汛期水汽输送特征的对比分析. 高原气象, 25(6): 1064-1070. Chang Y, He J H, Liu Y Y, et al. 2006. Features of moisture transport of in pre-summer flood season of drought and flood years over South China. Plateau Meteor, 25(6): 1064-1070 (in Chinese)
- 池再香,杜正静,陈忠明等. 2012. 2009—2010年贵州秋、冬、春季干旱气象要素与环流特征分析. 高原气象, 31(1): 176-184. Chi Z X, Du Z J, Chen Z M, et al. 2012. Analyses on meteorological elements and general circulation of drought in Guizhou Province in autumn-winter-spring from 2009 to 2010. Plateau Meteor, 31(1): 176-184 (in Chinese)
- 段长春,朱勇,尤卫红. 2007. 云南汛期旱涝特征及成因分析. 高原气象, 26(2): 402-408. Duan C C, Zhu Y, You W H. 2007. Characteristic and formation cause of drought and flood in Yunnan Province rainy season. Plateau Meteor, 26(2): 402-408 (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分析. 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. Chinese J Atmos Sci, 36(3): 443-457 (in Chinese)
- 黄小梅,管兆勇,戴竹君等. 2013. 冬季东亚大槽强度年际变化及其与中国气候联系的再分析. 气象学报, 71(3): 416-428. Huang X M, Guan Z Y, Dai Z J, et al. 2013. A further look at the interannual variations of East Asian trough intensity and

- their impacts on winter climate of China. *Acta Meteor Sinica*, 71(3): 416-428 (in Chinese)
- 季国良, 蒲明, 席蕴玉. 1986. 1983 年夏季青藏高原地区的地面和大气加热场. *高原气象*, 5(2): 155-166. Ji G L, Pu M, Xi Y Y. 1986. The characteristics of the surface and atmospheric heating fields over the Qinghai-Xizang plateau in summer of 1983. *Plateau Meteor*, 5(2): 155-166 (in Chinese)
- 蒋兴文, 李跃清, 李春等. 2007. 四川盆地夏季水汽输送特征及其对旱涝的影响. *高原气象*, 26(3): 476-484. Jiang X W, Li Y Q, Li C, et al. 2007. Characteristics of summer water vapor transportation in Sichuan basin and its relationship with regional drought and flood. *Plateau Meteor*, 26(3): 476-484 (in Chinese)
- 李崇银. 2000. 气候动力学引论(第二版). 北京: 气象出版社. Li C Y. 2000. Introduction to Climate Dynamics (2nd ed.). Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 李栋梁. 2006. 青藏高原地面加热场强度变化及其与太阳活动的关系. *高原气象*, 25(6): 975-982. Li D L. 2006. Relationship between variation of strength departure indices of surface heating fields over Qinghai-Xizang plateau and sun activation. *Plateau Meteor*, 25(6): 975-982 (in Chinese)
- 李秀珍, 梁卫, 温之平. 2010. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系. *热带气象学报*, 26(5): 626-632. Li X Z, Liang W, Wen Z P. 2010. Characteristics of the atmospheric water vapor and its relationship with rainfall in South China in Northern autumn, winter and spring. *J Trop Meteor*, 26(5): 626-632 (in Chinese)
- 李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常. *气象学报*, 67(1): 122-132. Li Y H, Xu H M, Liu D. 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006. *Acta Meteor Sinica*, 67(1): 122-132 (in Chinese)
- 李永华, 徐海明, 高阳华等. 2010a. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征. *气象学报*, 68(6): 932-943. Li Y H, Xu H M, Gao Y H, et al. 2010a. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the Southwestern China. *Acta Meteor Sinica*, 68(6): 932-943 (in Chinese)
- 李永华, 徐海明, 白莹莹等. 2010b. 我国西南地区东部夏季降水的时空特征. *高原气象*, 29(2): 523-530. Li Y H, Xu H M, Bai Y Y, et al. 2010b. Spatial-temporal characteristics of summer precipitation in the east of Southwest China. *Plateau Meteor*, 29(2): 523-530 (in Chinese)
- 李韵婕, 任福民, 李忆平等. 2014. 1960—2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析. *气象学报*, 72(2): 266-276. Li Y J, Ren F M, Li Y P, et al. 2014. A study of the characteristics of the Southwestern China regional meteorological drought events during 1960—2010. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 266-276 (in Chinese)
- 刘晓冉, 李国平, 程炳岩. 2008. 青藏高原前期冬春季地面热源与我国夏季降水关系的初步分析. *大气科学*, 32(3): 561-571. Liu X R, Li G P, Cheng B Y. 2008. The preliminary analysis of the relationships between the surface heat source over the Tibetan Plateau in winter and spring and the summer rainfall over China. *Chinese J Atmos Sci*, 32(3): 561-571 (in Chinese)
- 刘晓冉, 程炳岩, 杨茜等. 2009. 川渝地区夏季高温干旱变化特征及其异常年环流形势分析. *高原气象*, 28(2): 306-313. Liu X R, Cheng B Y, Yang Q, et al. 2009. Changing characteristics of high temperature and drought of Sichuan-Chongqing regions in summer and its analysis of circulation patterns in anomalous years. *Plateau Meteor*, 28(2): 306-313 (in Chinese)
- 刘银峰, 徐海明, 雷正翠. 2009. 2006 年川渝地区夏季干旱的成因分析. *大气科学学报*, 32(5): 686-694. Liu Y F, Xu H M, Lei Z C. 2009. Possible causes for drought in Sichuan-Chongqing region in summer 2006. *Trans Atmos Sci*, 32(5): 686-694 (in Chinese)
- 吕俊梅, 琚建华, 任菊章等. 2012. 热带大气 MJO 活动异常对 2009~2010 年云南极端干旱的影响. *中国科学 D: 地球科学*, 42(4): 599-613. 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. *Sci China D: Earth Sci*, 55(1): 98-112
- 苗春生, 赵文宁, 王坚红等. 2014. 近 53 a 云南东部春季旱涝及其环流距平波列影响. *干旱区研究*, 31(2): 250-260. Miao C S, Zhao W N, Wang J H, et al. 2014. Influences of drought, flood and zonal circulation anomaly over east Yunnan Province in spring in recent 53 years. *Arid Zone Res*, 31(2): 250-260 (in Chinese)
- 齐冬梅, 李跃清, 李英等. 2010. 夏季青藏高原东部大气热源变化及其对相邻区域气候的影响. *干旱气象*, 28(2): 113-120. Qi D M, Li Y Q, Li Y, et al. 2010. Variation of atmospheric heat source over East of the Tibetan Plateau in summer and its influence on climate of surrounding region. *J Arid Meteor*, 28(2): 113-120 (in Chinese)
- 钱维宏, 张宗婵. 2012. 西南区域持续性干旱事件的行星尺度和天气尺度扰动信号. *地球物理学报*, 55(5): 1462-1471. Qian W H, Zhang Z J. 2012. Planetary-scale and regional-scale anomaly signals for persistent drought events over Southwest China. *Chinese J Geophys*, 55(5): 1462-1471 (in Chinese)
- 宋洁, 杨辉, 李崇银. 2011. 2009/2010 年冬季云南严重干旱原因的进一步分析. *大气科学*, 35(6): 1009-1019. Song J, Yang H, Li C Y. 2011. A further study of causes of the severe drought in Yunnan Province during the 2009/2010 winter. *Chinese J Atmos Sci*, 35(6): 1009-1019 (in Chinese)
- 孙国武, 李震坤, 冯建英. 2014. 西南地区两次严重干旱事件与大

- 气低频振荡的研究. 高原气象, 33(6): 1562-1567. Sun G W, Li Z K, Feng J Y. 2014. Relationship between atmospheric low-frequency oscillation and two severe drought events in Southwest China. Plateau Meteor, 33(6): 1562-1567 (in Chinese)
- 陶云, 黄玮, 郑建萌等. 2014. 云南冬季降水的演变特征及成因分析. 高原气象, 33(1): 130-139. Tao Y, Huang W, Zheng J M, et al. 2014. Evolutive features and its causes of the winter-time precipitation in Yunnan Province. Plateau Meteor, 33(1): 130-139 (in Chinese)
- 王斌, 李跃清. 2010. 2010年秋冬季西南地区严重干旱与南支槽关系分析. 高原山地气象研究, 30(4): 26-35. Wang B, Li Y Q. 2010. Relationship analysis between south branch trough and severe drought of Southwest China during autumn and winter 2009/2010. Plateau Mountain Meteor Res, 30(4): 26-35 (in Chinese)
- 王晓敏, 周顺武, 周兵. 2012. 2009/2010年西南地区秋冬春持续干旱的成因分析. 气象, 38(11): 1399-1407. Wang X M, Zhou S W, Zhou B. 2012. Causative analysis of continuous drought in Southwest China from autumn 2009 to spring 2010. Meteor Mon, 38(11): 1399-1407 (in Chinese)
- 伍红雨, 王谦谦. 2003. 近49年贵州降水异常的气候特征分析. 高原气象, 22(1): 65-70. Wu H Y, Wang Q Q. 2003. Climate characteristics analysis of Guizhou Precipitation anomaly in recent 49 years. Plateau Meteor, 22(1): 65-70 (in Chinese)
- 夏阳, 管兆勇, 孙一. 2015. 晚秋前冬海洋性大陆区域向外长波辐射年际变化及其与云贵高原降水异常的联系. 气象学报, 73(4): 725-736. Xia Y, Guan Z Y, Sun Y. 2015. Interannual variations of OLR in the Maritime Continent in late autumn and early winter and their relationships with precipitation anomalies over the Yunnan-Kweichow Plateau. Acta Meteor Sinica, 73(4): 725-736 (in Chinese)
- 杨静, 汪超, 雷云等. 2013. 春季西南热低压的发生发展与结构特征. 气象, 39(2): 146-155. Yang J, Wang C, Lei Y, et al. 2013. Genesis, development and structure characteristics of southwest heat low in spring. Meteor Mon, 39(2): 146-155 (in Chinese)
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 西藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报, 28(2): 108-121. Ye D Z, Luo S W, Zhu B Z. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding. Acta Meteor Sinica, 28(2): 108-121 (in Chinese)
- 张顺利, 陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及数值研究. 大气科学, 25(3): 372-390. Zhang S L, Tao S Y. 2001. Influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon. Chinese J Atmos Sci, 25(3): 372-390 (in Chinese)
- 张永莉, 范广洲, 周定文等. 2014. 春季南支槽变化特征及其与降水和大气环流的关系. 高原气象, 33(1): 97-105. Zhang Y L, Fan G Z, Zhou D W, et al. 2014. Variation of springtime southern branch trough and its relationship with precipitation and atmospheric circulation. Plateau Meteor, 33(1): 97-105 (in Chinese)
- 郑建萌, 张万诚, 马涛等. 2014. 云南极端干旱和多雨年5月异常环流的合成特征. 高原气象, 33(4): 916-924. Zheng J M, Zhang W C, Ma T, et al. 2014. Composite characteristics of the abnormal circulation in May between extreme drought years and rainy years of Yunnan. Plateau Meteor, 33(4): 916-924 (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 Hydrometeorol, 13(4): 1251-1267
- de Lima Nascimento E, Ambrizzi T. 2002. The influence of atmospheric blocking on the Rossby wave propagation in Southern Hemisphere winter flows. J Meteor Soc Japan, 80(2): 139-158
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August. Quart J Roy Meteor Soc, 129(587): 157-178
- Fan G Z, Zhang Y L, Wang B Y, et al. 2015. Interannual variability of the wintertime northern branch high ridge in the subtropical westerlies and its relationship with winter climate in China. J Meteor Res, 29(5): 703-719
- Feng L, Li T, Yu W D. 2014. Cause of severe droughts in Southwest China during 1951-2010. Climate Dyn, 43(7-8): 2033-2042
- Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. Quart J Roy Meteor Soc, 106(449): 447-462
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77(3): 437-471
- Nakamura H. 1994. Rotational evolution of potential vorticity associated with a strong blocking flow configuration over Europe. Geophys Res Lett, 21(18): 2003-2006
- Nakamura H, Nakamura M, Anderson J L. 1997. The role of high- and low-frequency dynamics in blocking formation. Mon Wea Rev, 125(9): 2074-2093
- Naoh H, Matsuda Y. 2002. Rossby wave propagation and blocking formation in realistic basic flows. J Meteor Soc Japan, 80(4): 717-731
- North D C. 1990. Institutions, Institutional Change and Economic Performance. Cambridge: Cambridge University Press
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1996. Monsoons and the dynamics of deserts. Quart J Roy Meteor Soc, 122(534): 1385-1404
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence. J Atmos Sci, 45(7): 1228-1251

- Takaya K, Nakamura H. 1997. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow. *Geophys Res Lett*, 24(23): 2985-2988
- Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow. *J Atmos Sci*, 58(6): 608-627
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull Amer Meteor Soc*, 79(1): 61-78
- Wang B, Lin H. 2002. Rainy season of the Asian-Pacific summer monsoon. *J Climate*, 15(4): 386-398
- Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. 1983. A model study of the short-term climatic and hydrologic effects of sudden snow-cover removal. *Mon Wea Rev*, 111(5): 1013-1024
- Zhou T J. 2003. Comparison of the global air-sea freshwater exchange evaluated from independent datasets. *Prog Nat Sci*, 13(8): 626-631