

蒋薇,张祖强,刘芸芸. 2016. 21 世纪以来西南地区干季降水与西太平洋副热带高压年代际变化的关系. 气象, 42(11):1335-1341.

## 21 世纪以来西南地区干季降水与西太平洋副热带高压年代际变化的关系<sup>\*1</sup>

蒋 薇<sup>1</sup> 张祖强<sup>2</sup> 刘芸芸<sup>2,3</sup>

1 江苏省气候中心, 南京 210008

2 国家气候中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

**提 要:** 利用 1961—2011 年观测资料分析了西南地区干季(11 月至次年 4 月)降水的变化特征, 发现西南地区干季降水在 2000 年前后发生了年代际尺度的转折, 其前后降水空间分布呈现相反分布特征, 特别是 21 世纪以来降水显著偏少, 干旱加剧, 降水量显著减少的区域主要在云南大部及其周边地区。西南干季降水和西太平洋副热带高压的负相关在 20 世纪 90 年代后期明显加强, 而 21 世纪以来副热带高压表现出明显的年代际增强, 即面积增大、强度增强、西伸脊点位置偏西。西南干季降水与副热带高压关系的增强, 以及副热带高压本身的年代际增强, 对西南干季降水减少造成显著的影响, 是西南干旱加剧的可能原因。

**关键词:** 西南地区, 干季降水, 西太平洋副热带高压, 年代际

**中图分类号:** P466

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.11.005

### Relationship Between the Dry-Season Precipitation in Southwest China and Decadal Changes of the Western Pacific Subtropical High Since the 21st Century

JIANG Wei<sup>1</sup> ZHANG Zuqiang<sup>2</sup> LIU Yunyun<sup>2,3</sup>

1 Jiangsu Climate Centre, Nanjing 210008

2 National Climate Centre, Beijing 100081

3 Collaborative Innovation Centre on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** The variation characteristics of precipitation in the dry season (from November to the following April) in the Southwest of China are investigated by using the observation data from 1961 to 2011. The results indicated that the precipitation during the dry season changed remarkably around 2000. The spatial distribution characteristics of the precipitation before 2000 was distinctively different from the characteristics after 2000. The rain was much less than normal and drought got worsened in the 21st century. Precipitation in Yunnan and its surrounding areas reduced significantly. The negative correlation between the rain of the dry season in Southwest and the western Pacific subtropical high (WPSH) strengthened rapidly in late 1990s. Meanwhile the feature of WPSH has shown markedly decadal enhancement since the 21st century. Its area has been growing, with intensity enhancing and position being farther western than

\* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2013CB430200)、江苏省气象科研开放基金项目(KZ201505)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206017)共同资助

2016 年 3 月 10 日收稿; 2016 年 8 月 10 日收修定稿

第一作者: 蒋薇, 主要从事气候变化及气候预测研究. Email: vivi\_1018@163.com

normal. Enhancement of the relation between the rainfall during the dry season and WPSH and the decadal enhancement of WPSH, both contribute remarkably to the decline of the dry-season rainfall, and probably result in the frequent drought in the Southwest of China.

**Key words:** Southwest of China, precipitation of the dry season, the western Pacific subtropical high, decadal

## 引 言

在气象灾害中,干旱是影响最大的气象灾种,占气象总灾害的 50%以上(宋连春等,2005)。在气候变暖背景下,西南地区持续性干旱呈多发重发趋势,日益引起学者们的关注。21 世纪以来几次严重的干旱灾害都发生在西南地区,如 2005 年云南异常春旱、2006 年川渝特大伏旱、2009 年秋至 2010 年春西南地区罕见秋冬春连旱以及 2011 年西南地区秋冬连旱等,干旱发生频率不断增加,给当地农业生产和社会经济造成严重影响。西南地区地处青藏高原东部,地形复杂,局地因子影响很大,是一个典型的气候多变区,具有很强的区域气候特征代表性(徐裕华,1991;鲍媛媛等,2007)。受高原动力、热力因子的影响,降水分布极不均匀,干湿季节相当分明。一般来说,11 月至次年 4 月为干季,5—10 月为湿季,年降水量的 80%集中在湿季,干季降水量较少,特别是冬、春季节的降水更少。由于西南地区蓄水主要集中在秋季,如果此时蓄水不足,加上冬、春季降水连续偏少,就容易出现秋冬春连旱(晏红明等,2012),因此,虽然西南地区干季降水量相对较少,却对干旱的发生发展非常重要。

目前有关西南地区干旱的研究主要集中在某一个季节(邹旭恺等,2007;陈丽华等,2010;李永华等,2010;2016;张顾炜,2016;周秀华,2015;肖子牛等,2016),以及利用干旱指数比较干旱发生的季节和区域差异(Vicente-Serrano et al, 2010;王素萍等,2010;2014;Qian et al, 2011;Ren et al, 2012;王明田等,2012;李韵婕等,2014;贺晋云等,2011;韩兰英等,2014;王东等,2014;熊光洁等,2013;任福民等,2014;李维京等,2015)。王素萍等(2014)指出,西南地区东部 2000 年后干旱日数最多,20 世纪 60—70 年代较少。贺晋云等(2011)指出,四川盆地西南部、横断山区南端、广西南部沿海和贵州北部是近 50 年来年极端干旱发生频率明显增加的地区,进入 21 世纪后,极端干旱距平呈现正距平,且增幅较大,区域间差异却显著减小。韩兰英等(2014)指出,近 10 年来干旱重灾中心发生了转移,云南和贵州干旱面积

明显增加,西南干旱重灾中心向南北两边分离。王东等(2014)指出,西南地区 21 世纪初干旱发生最频繁,干旱强度、极端干旱及中等干旱的频次均呈增加趋势。熊光洁等(2013)指出,少雨期(11—4 月)6 个月尺度干旱频率在西南全区显著增加,而在多雨期(5—10 月)大部分区域干旱频率呈缓慢减少趋势。

也有一些工作分析了区域持续性干旱个例的成因(晏红明等,2007;刘瑜等,2006;王晓敏等,2012;钱维宏等,2012;段海霞等,2013;胡学平等,2015;解明恩等,2005;黄荣辉等,2012;蒋兴文等,2010;孔祥伟等,2012;彭京备等,2007)。晏红明等(2007)对 2005 年春季云南持续性异常干旱成因进行诊断,认为 850 hPa 北印度洋地区持续的东风异常和持续偏强偏西的西太平洋副热带高压(以下简称副高)是导致这次云南重大春旱发生的重要原因。还有学者(胡学平等,2015;解明恩等,2005;黄荣辉等,2012)指出,西太平洋上空反气旋环流造成的孟加拉湾水汽输送偏弱,和 AO 负异常引起的冷空气强且位置偏东,是引起西南地区持续性干旱的主要原因。蒋兴文等(2010)和孔祥伟等(2012)认为,西南降水与北半球环状模(NAM 和 AO)密切相关,NAM 和 AO 偏弱时西南降水偏少。彭京备等(2007)认为,2006 年夏季西南高温干旱与西太平洋副高和大陆副高的异常活动有关。

目前针对西南地区干季(11 月至次年 4 月,下同)旱涝长期变化的研究还相对较少,该时段降水特征的研究对于了解区域持续性干旱的变化趋势具有重要意义,其相应的环流背景、海温状况也值得进一步研究。这项工作对于提高西南地区干旱预测水平,进而为干旱防灾减灾提供科学决策依据具有实际意义。

## 1 资料和方法

本文所用逐日降水资料是由国家气候中心提供的 1961 年 1 月至 2011 年 12 月中国 2480 站地面观测资料,选取云南、四川、贵州、广西、西藏共 401 站作为西南区域代表站。同时段的大气环流资料为 NCEP/NCAR 逐月再分析资料集中的 500 hPa 位

势高度场,水平分辨率为  $2.5^{\circ}\text{lat} \times 2.5^{\circ}\text{lon}$  (Kalnay et al, 1996; Kistler et al, 2001)。逐月副高面积、强度、脊线和西伸脊点指数由中国气象局国家气候中心提供的 74 项环流指数(赵振国, 1999)。

## 2 21 世纪以来西南干季降水特征

选取 11 月至次年 4 月累积降水量来表征干季降水。首先,参考 Ting 等(1997)划分降水区的方法,先计算西南地区 401 站 1961—2011 年干季降水标准差,得到该地区降水变率最大的测站为云南的福贡,然后以福贡为基点(图 1a 中用 A 标记),计算其与西南地区所有站点干季降水的单点相关,相关系数在基点处为 1,然后向周围逐渐减小。图 1a 中红色的点为相关系数通过 0.05 的显著性水平检验 ( $r \geq 0.276$ ) 的站点,其中大部分站点的相关系数均

通过 0.01 显著性水平检验 ( $r \geq 0.358$ ),相关系数通过检验的区域以云南为中心,还包括四川南部、重庆西南部和贵州中西部地区(图 1a),该区域反映较为一致的降水变率。西南地区面积广大,降水区域差异明显,采用 REOF 分析进一步讨论降水的分区,REOF 第一模态占 31.63% 方差贡献,其空间模态表现为整个西南地区以云南为中心及其周边地区一致偏少的特征(图略),结果和图 1a 一致。因此,选取通过 0.05 显著性水平检验的 148 个测站(图 1b),与近年来西南旱情较重的区域也是相吻合的(李永华等, 2009; 王晓敏等, 2012; 钱维宏等, 2012; 段梅霞等, 2013)。本文着重探讨以云南大部及其周边部分地区为代表的西南地区干季降水偏少的特征及可能原因,下面用该区域的降水平均值表征西南地区干季降水,做进一步地分析。

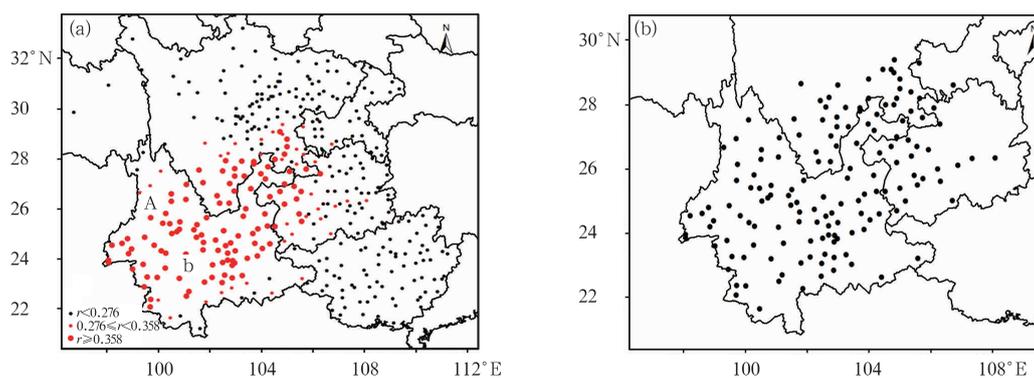


图 1 相关系数站点分布图(a)和西南地区 148 个站点示意图(b)

Fig. 1 The scatter diagram of 401 stations of correlation coefficients (a) and 148 stations in Southwest (b)

图 2 为 1961—2011 年西南地区干季降水距平百分率的逐年变化,图中实线为 6 阶多项式拟合线。从拟合线的演变可以清楚看到,西南地区干季降水呈现明显的阶段性变化,在 20 世纪 60 年代明显偏少,70 年代起降水有增加的趋势,80—90 年代在气候值(1981—2010 年平均)附近波动较小,21 世纪开始呈现显著减少的趋势,偏少的程度较 20 世纪 60 年代更为明显,西南地区干季降水在 21 世纪异常偏少的强度加大,从而导致持续干旱事件更为频发,如 2009 年秋至 2010 年春的严重干旱(钱维宏等, 2012; 段海霞等, 2013; 黄荣辉等, 2012)。说明西南干季降水可能在 2000 年前后发生了年代际转折,在 21 世纪以来表现为显著减少,西南干旱频发与干季降水的减少是密切相关的。

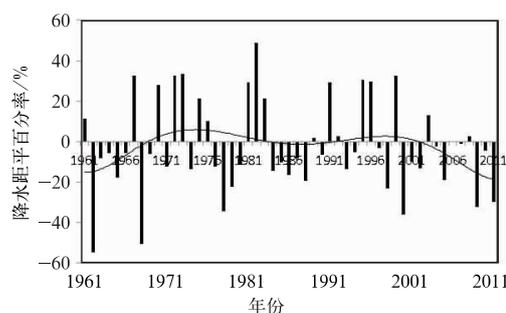


图 2 1961—2011 年西南地区干季降水距平百分率的逐年演变(实线为 6 阶多项式拟合线)

Fig. 2 Annual variation of precipitation departure percentage in Southwest during the dry season from 1961—2011 (Solid line represents the 6-order polynomial fitting value)

为了进一步说明西南干季降水在 21 世纪以来的显著减少,比较 21 世纪前后降水的变化特征,分别合成偏多时段 1971—2000 年和偏少时段 2001—2011 年的降水距平百分率(图 3a、3b),发现前后两个时段呈现几乎反相的分布特征。1971—2000 年云南降水偏多,高值中心位于西部和东南部地区,而四川南部和贵州中西部降水偏少;21 世纪以来全区基本是一致偏少,低值中心位于云南西部和南部地区,仅四川南部小部分地区降水偏多。比较前后两个时段,云南地区的降水由前期的偏多转变为偏少,发生了明显的转折;贵州中西部地区的降水由偏少转为明显偏少,偏少的程度加深;四川南部部分地区维持偏少的特征,部分地区降水有所增加;重庆南部地区的降水在后期有所减少,偏多的程度减弱。说

明 21 世纪以来西南大部地区干季降水是显著减少的,降水减少的区域为云南大部地区,以及贵州中西部、四川南部和重庆南部地区。图 3c 给出了西南干季降水 2001—2011 年平均与 1971—2000 年平均的差值空间分布,其分布特征与 21 世纪以来空间分布十分接近,整体是显著偏少的特征,仅四川南部小部分地区降水为弱的正距平,低值中心分布在云南西部和东南部地区,进一步说明 21 世纪以来西南大部地区降水是显著减少的。这些结果表明,21 世纪以来与前一时段相比,西南干季降水在显著减少,这与 21 世纪以来西南干旱加剧是相对应的,显著减少的区域为云南大部及其周边地区,与已有的研究结果相一致(贺晋云等,2011;韩兰英等,2014;王东等,2014)。

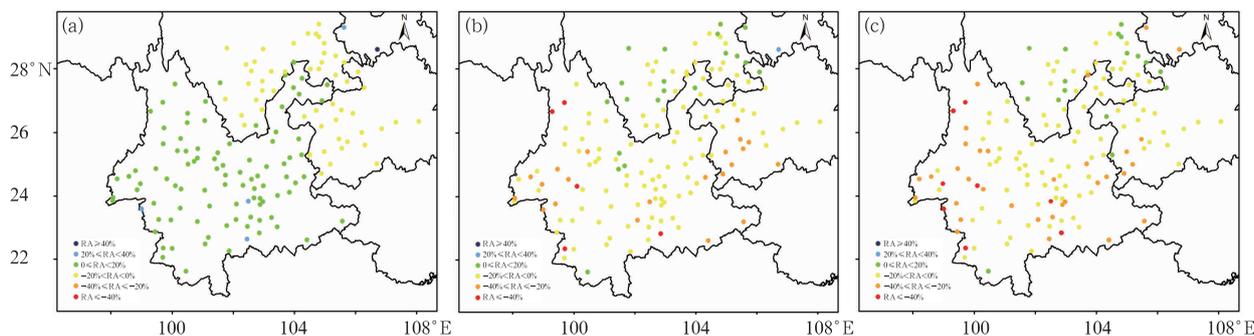


图 3 西南地区干季降水距平百分率合成站点分布图(单位:%)

(a)1971—2000 年平均,(b)2001—2011 年平均,(c)2001—2011 年平均与 1971—2000 年平均差值

Fig. 3 The scatter diagram of precipitation departure percentage of the dry season in Southwest (unit: %)

(a) the 1971—2000 average, (b) the 2001—2011 average,

(c) the difference value between the 2001—2011 average and the 1971—2000 average

### 3 西南干季降水与副高关系的年代际变化

副高是东亚夏季风的重要成员,它常用 500 hPa 位势高度图上西太平洋地区(180°E 以西)5880 gpm 等值线包围的区域来表示。副高形态、强度和位置的变化会直接影响进入我国的水汽输送路径和强度,从而导致西南地区降水也产生变化。为此计算了西南干季降水与同期 10°~20°N 平均的 500 hPa 位势高度场的 21 年滑动相关(图 4a),图 4a 清楚地揭示了我国西南干季降水与副高强度关系的年代际变化。在 20 世纪 90 年代中期以前,西南干季降水与副高强度表现为弱的负相关关系,但在之后,西

南干季降水与副高强度的负相关关系明显增强,尤其是在 110°~170°E 的副高主体区域,特别是在 21 世纪以来,负相关系数均可通过 0.05 显著性水平检验。由此可见,21 世纪以来西南干季降水明显偏少,可能和西南干季降水与副高两者之间关系的年代际增强有密切关系。

### 4 副高的年代际变化对西南地区干季降水的影响

在西南干季降水与副高关系增强的同时,副高本身发生了什么样的变化?随着东亚夏季风从 20 世纪 90 年代初期以来的增强,副高也表现出明显的年代际变化。图 4b 给出了 1961—2010 年沿 10°~

20°N 平均的干季 500 hPa 位势高度场。一个非常明显的变化是在 20 世纪 80 年代之后,副高强度增强明显,500 hPa 高度场上出现 5880 线,且范围增大,明显西伸,这个特点在 21 世纪以来尤为显著,表明 80 年代之后副高面积增大,强度增强,且位置更加偏西,个别年份如 2009 年,5880 线西伸至大陆附

近。副高本身的这种年代际变化特征,与西南地区干季降水的年代际转变有很好地对应关系。因此可以认为,21 世纪以来西南干季降水明显减少与副高的增强西伸存在密切联系,这与以往的研究中(晏红明等,2007;刘瑜等,2006)通过个例分析得出的西南干旱与西太副高增强西伸之间的对应关系一致。

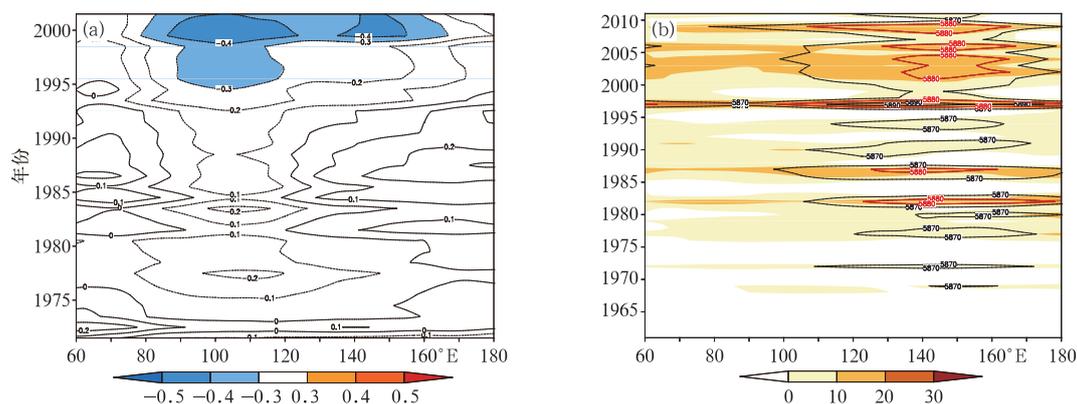


图 4 西南干季降水与 10°~20°N 平均的 500 hPa 位势高度场的 21 年滑动相关(a)和同期 10°~20°N 平均 500 hPa 高度场逐年变化(b)

[图 a 中纵坐标数值表示以该年为中心的前后各 10 年(共 21 年,如 1975 年表示 1965—1985 年共 21 年);等值线 0.4 以上的阴影区通过 0.05 显著性水平检验;图 b 中红色曲线为副高 5880 gpm,特征等值线;阴影区为正距平区域]

Fig. 4 The 21 years running correlation coefficients between the 500 hPa geopotential height averaged at (10°—20°N) and the precipitation of the dry season in Southwest (a) and the 500 hPa geopotential height averaged at (10°—20°N) (b)

(The number in the abscissa in Fig. a means the central year of the 21 years running period and the shaded areas mean the values  $\geq 0.4$ , having passed the 0.05 significance level; the red curve in Fig. b is the 5880 contour and shaded area represents positive anomaly area)

为说明副高的年代际变化对西南干季降水减少的影响,比较 21 世纪前后副高自身的变化特征,分别合成偏多时段 1971—2000 年和偏少时段 2001—2011 年的 500 hPa 高度场上副高特征线(图 5),可以看出,1971—2000 年时段没有出现闭合的 5880 线,2001—2011 年时段出现闭合的 5880 线,说明后一时期副高强度明显增强。并且 2001—2011 年 5870 线的范围明显较 1971—2000 年增大,西伸脊点位置明显西移,也表明副高强度增强。表 1 基于副高指数对比了两个时段副高的变化特征,也可以得到基本一致的结论,21 世纪以来副高的面积、强度、西伸脊点指数较 1971—2000 年时段都有明显的变化,表现出面积增大、强度增强、西伸脊点位置偏西的特征,说明 21 世纪以来副高确实存在明显的年代际增强。

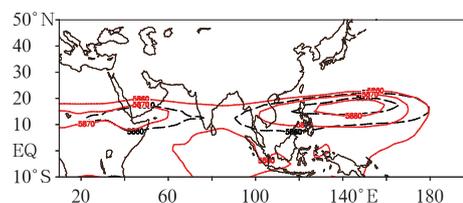


图 5 两个时段干季 500 hPa 高度场(单位:gpm;黑色虚线,1971—2000 年平均;红色实线,2001—2011 年平均)

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height in dry season of the two periods (unit: gpm; black dotted lines mean the average 1971—2000; red solid lines mean the 2001—2011 average)

为进一步分析副高在 21 世纪以来的年代际增强,分别合成两个时段干季 500 hPa 高度距平场

(图 6a,6b),可以发现,1971—2000 年时段,在 500 hPa 距平场上副高主体区域( $10^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N},0\sim 160^{\circ}\text{W}$ )表现为大范围的负距平,在 2001—2011 年时段,该区域表现为大范围的正距平,负距平到正距平的转变表明 21 世纪以来副高是增强的。图 6c 的差值场则反映出两个时段干季 500 hPa 高度场存在显著的差异,通过 0.05 显著性水平检验的区域呈带

表 1 两个时段干季副高特征值

Table 1 The Western Pacific Subtropical High index values in the two periods

	面积	强度	脊线	北界	西伸脊点
1971—2000 年	11.8	20.7	14.7	18.8	117.8
2001—2011 年	14.8	25.5	14.7	18.5	111.7

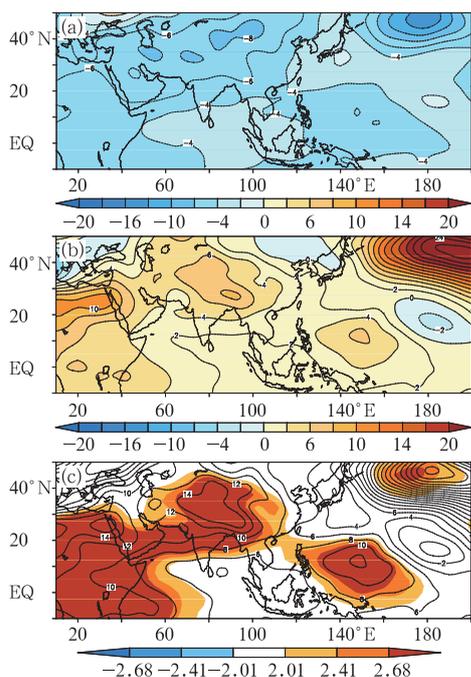


图 6 干季 500 hPa 位势高度距平场(单位:gpm)  
(a)1971—2000 年平均,(b)2001—2011 年平均,  
(c)2001—2011 年平均与 1971—2000 年平均差值  
(阴影区表示通过 0.05 显著性水平检验的区域,  
 $\pm 2.68, \pm 2.41$  和  $\pm 2.01$  分别对应 0.01、  
0.02 和 0.05 显著性检验水平)

Fig. 6 The 500 hPa geopotential height in the two periods (unit: gpm)

(a) the 1971—2000 average, (b) the 2001—2011 average, (c) the difference value between the 2001—2011 average and the 1971—2000 average

(Shaded areas have passed the 0.05 significance level;  $\pm 2.68, \pm 2.41$  and  $\pm 2.01$  respond to the 0.01, 0.02, 0.05 significance test levels, respectively)

状分布,主要位于非洲中部—亚洲南部—西太平洋一线,西南地区和西太平洋地区的 500 hPa 高度场在 2001—2011 年有显著增强的趋势,说明 21 世纪以来干季副高的年代际增强西伸是显著的。结合前面的分析结果,可以认为,西南干季降水与副高关系的增强,以及副高本身的年代际增强,对西南干季降水显著减少造成显著的影响,是西南干旱加剧的可能原因。

## 5 主要结论

在全球变暖背景下,西南干季(11 月至次年 4 月)降水从 21 世纪初开始呈现显著减少的趋势,这也是造成西南地区 21 世纪以来持续干旱事件频发的可能原因。结合整体趋势分析和空间分布特征得出,20 世纪 60 年代西南干季降水偏少,70—90 年代以偏多为主,21 世纪以来明显偏少,2000 年前后发生了年代际尺度的转折,21 世纪以来显著减少的区域主要在云南大部及其周边地区。

西南干季降水和西太副高的关系在 20 世纪 90 年代后期起增强,降水与副高主体区域高度场的负相关通过显著性检验,并且 21 世纪以来其负相关进一步加强。而副高自身在 21 世纪以来表现出明显的年代际增强,当副高面积增大、强度加强、西伸脊点位置偏西的时候,西南降水容易出现显著偏少,是干旱加剧的可能原因。

影响西南降水的因素复杂,副高只是影响因子之一。已有的研究表明,从大气内部动力过程来说,中高纬度的槽脊活动把能量输送到副高内,使得副高维持,热带系统的活跃和热带地区的非绝热加热也可能加强副高。对某一段时间来说,各个因子所起的作用大小可能不同,因此有关高、中、低纬环流系统的相互作用的动力与热力作用的物理过程,是如何引起副高的年代际增强,如何造成西南干旱加剧,需要我们进一步深入研究。

## 参考文献

- 鲍媛媛,康志明,金荣花,等. 2007. 川渝地区夏季旱涝与海温异常浅析. 气象,33(5):89-93.  
陈丽华,周率,党建涛,等. 2010. 2006 年盛夏川渝地区高温干旱形成的物理机制研究. 气象,36(5):85-91.  
段海霞,王劲松,刘芸芸,等. 2013. 2009/2010 年我国西南秋冬春连旱特征及其大气环流异常分析. 冰川冻土,35(4):1022-1035.  
韩兰英,张强,姚玉璧,等. 2014. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律

- 与成因. 地理学报, 69(5):632-639.
- 贺晋云, 张明军, 王鹏, 等. 2011. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征. 地理学报, 66(9):1179-1190.
- 胡学平, 王式功, 许平平, 等. 2015. 2009—2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析. 气象, 40(10):1216-1229.
- 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.
- 蒋兴文, 李跃清. 2010. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子. 地理学报, 65(11):1325-1335.
- 孔祥伟, 于乐江, 刘新伟. 2012. 西南地区冬季旱涝特征及其与北极涛动关系. 干旱区地理, 35(6):875-882.
- 李维京, 左金清, 宋艳玲, 等. 2015. 气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化. 气象, 41(3):261-271.
- 李永华, 向波, 卢楚翰, 等. 2016. 热带大气季节内振荡对西南地区东部夏季降水的影响及其可能机制. 大气科学, 40(2):437-450.
- 李永华, 徐海明, 白莹莹, 等. 2010. 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.
- 李韵婕, 任福民, 李亿平, 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.
- 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. 气象, 32(6):91-96.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析. 气候与环境研究, 12(3):464-474.
- 钱维宏, 张宗婕. 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.
- 任福民, 高辉, 刘绿柳, 等. 2014. 极端天气气候事件监测与预测研究进展及其应用综述. 气象, 40(7):860-874.
- 宋连春, 邓振镛, 董安祥, 等. 2005. 干旱. 北京:气象出版社.
- 王东, 张勃, 安美玲, 等. 2014. 基于 SPEI 的西南地区近 53a 干旱时空特征分析. 自然资源学报, 29(6):1003-1016.
- 王明田, 王翔, 黄晚华, 等. 2012. 基于相对湿度指数的西南地区季节性干旱时空分布特征. 农业工程学报, 28(19):85-92.
- 王素萍, 段海霞, 冯建英. 2010. 2009/2010 年冬季全国干旱状况及其影响与成因. 干旱气象, 28(1):107-112.
- 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 等. 2014. 基于标准化降水指数的 1960—2011 年中国不同时间尺度干旱特征. 中国沙漠, 34(3):827-834.
- 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.
- 肖子牛, 石文静, 段玮. 2016. 云南夏季降水量在 21 世纪初的突变减少及原因分析. 气象, 42(3):261-270.
- 解明恩, 程建刚, 范菠, 等. 2005. 2003 年云南夏季罕见高温干旱的诊断研究. 气象, 31(7):32-37.
- 熊光洁, 张博凯, 李崇银, 等. 2013. 基于 SPEI 的中国西南地区 1961—2012 年干旱变化特征分析. 气候变化研究进展, 9(3):192-198.
- 徐裕华. 1991. 西南气候. 北京:气象出版社.
- 晏红明, 程建刚, 郑建萌, 周建琴. 2012. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析. 南京气象学院学报, 35(2):229-239.
- 晏红明, 段旭, 程建刚. 2007. 2005 年春季云南异常干旱的成因分析. 热带气象学报, 23(3):300-306.
- 张顾炜, 曾刚, 倪东鸿, 等. 2016. 西南地区秋季干旱的年代际转折及其可能原因分析. 大气科学, 40(2):311-323.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场. 北京:气象出版社.
- 周秀华, 肖子牛. 2015. 我国西南周边地区夏秋季节降水变化及相应环流特征分析. 大气科学, 39(4):653-666.
- 邹旭恺, 高辉. 2007. 2006 年夏季川渝高温干旱分析. 气候变化研究进展, 3(3):149-153.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Ame Meteor Soc, 77:437-472.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation. Bull Ame Meteor Soc, 82:247-268.
- Qian W H, Shan X, Zhu Y. 2011. Ranking regional drought events in China for 1960—2009. Adv Atmos Sci, 28(2):310-321.
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events. J Climate, 25(20):7015-7027.
- Ting M F, Wang H. 1997. Summer time U. S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. J Climate, 10:1853-1873.
- Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. 2010. A multi-scale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. J Climate, 23(7):1696-1718.