

胡学平,王式功,许平平,等. 2014. 2009—2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析. 气象, 40(10):1216-1229.

# 2009—2013 年中国西南地区 连续干旱的成因分析<sup>\* 1</sup>

胡学平<sup>1,2</sup> 王式功<sup>1</sup> 许平平<sup>1,3</sup> 尚可政<sup>1</sup>

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 中国人民解放军 63801 部队, 西昌 615000

3 中国人民解放军 63796 部队, 西昌 615000

**提 要:** 2009 年以来, 中国西南地区连续 4 年秋、冬、春季出现严重干旱, 持续时间长、影响范围大、干旱程度重, 给旱区农林业生产和人民生活带来严重影响, 造成巨大的经济损失。本文利用多种资料从大尺度大气环流、水汽输送、太平洋及印度洋海温、平流层极涡等方面分析了此次连续干旱的原因。结果表明: 南支槽强度偏弱、孟加拉湾水汽输送偏少以及弱极涡背景下, 异常波活动造成的 AO 负异常引起的冷空气路径偏东是这 4 年持续干旱的共同特点。热带海表温度的异常变化对西南地区干旱的影响也不容忽视, 主要表现在对孟加拉湾和南海水汽输送的阻碍上。La Nina 事件中, 热带印度洋冬、春季海表温度的异常变化对干旱影响更为突出。冬、春季平流层和对流层的动力耦合作用结果使得 AO 位相发生变化, 其中异常负位相的强度及持续时间对这 4 年西南地区秋、冬、春连旱的影响显著。

**关键词:** 连续干旱, 南支槽, 水汽输送, 热带海表温度, 极涡

**中图分类号:** P461

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.10.006

## Analysis on Causes of Continuous Drought in Southwest China During 2009—2013

HU Xueping<sup>1,2</sup> WANG Shigong<sup>1</sup> XU Pingping<sup>1,3</sup> SHANG Kezheng<sup>1</sup>

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 The 63801 PLA Troops, Xichang 615000

3 The 63796 PLA Troops, Xichang 615000

**Abstract:** Severe droughts occurred in Southwest China continuously in 4 years' autumn, winter, spring beginning from 2009. Because of the long duration, large scope and heavy degrees, the drought has caused huge economic losses, seriously impacting on agroforestry production and people's life in arid zones. In this paper, the causes of the continuous drought are analyzed from the impacts of the anomalies of large-scale atmospheric circulation, water vapor transportation, the Pacific and Indian Ocean SST, stratospheric polar vortex strength by analyzing a variety of data. The results show that the common backgrounds of the 4 years' continuous drought are weaker south branch trough, less water vapor transport over the Bay of Bengal and easterly cold air mass caused by AO negative anomalies which are produced by abnormal wave activities during weak polar vortex. The abnormal changes of tropical SST during the drought over Southwest China play important roles in blocking water vapor transport over the Bay of Bengal and South China Sea. In the La Nina event, the effect of the tropical Indian Ocean SST changes in winter and spring is more outstanding. The phase of AO is always changed by the dynamic couple between stratosphere and tropo-

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206004 和 GYHY201106034)和甘肃省国际科技合作计划项目(1204WCGA016)共同资助  
2013 年 11 月 27 日收稿; 2014 年 5 月 3 日收修定稿  
第一作者: 胡学平, 主要从事航天气象保障和干旱气候变化相关研究. Email: huxp12@lzu.edu.cn

sphere in winter and spring, and the intensity and duration of the abnormally negative phase of AO have significant effects on the drought that occurred in Southwest China in the autumn, winter and spring of 4 consecutive years.

**Key words:** continuous drought, south branch trough, water vapor transportation, tropical sea surface temperature, polar vortex

## 引 言

我国西南地区干旱发生比较频繁(宋连春等, 2005)。2009 年以来,西南(云南、贵州、四川、重庆和广西)部分地区连续 4 年出现严重干旱(王遵娅等, 2011;李莹等, 2012;王有民等, 2013;王小玲等, 2013),总体呈现持续时间长、影响范围大、干旱程度重的特征,旱区农作物受旱面积大,造成了巨大的经济损失,并引发了人和牲畜饮水困难、湖泊水库出现干涸、森林火险居高不下和出现林业有害生物等衍生灾害,这在历史上是极其罕见的,因此,有必要对此进行认真研究。

西南地区干旱的成因比较复杂,影响因素较多,不少学者从不同角度进行了研究,得出了不少有意义的结论。解明恩等(2005)发现西太平洋副热带高压持续稳定且偏强偏西、季风低压偏弱偏西,是造成 2003 年云南初夏异常干旱的主要原因。彭京备等(2007)、邹旭恺等(2007)、李永华等(2009)分析了 2006 年夏季川渝地区罕见高温干旱的特征,指出西太平洋副热带高压异常、北方南下冷空气活动偏弱等是造成此次特大干旱的原因。白莹莹等(2010)统计分析了对 2006 年夏季重庆高温干旱的影响,发现可能是受全球气候变化和区域自身变率共同作用的结果,以区域自身的变率为主。以上的研究主要关注的是西南地区夏季的高温干旱事件。近几年,部分学者重点研究了 2009/2010 年西南地区秋冬春 3 季严重干旱(张新主等, 2011;黄慧君等, 2011;张万诚等, 2011;Lu et al, 2011;王晓敏等, 2012;晏红明等, 2012;Yang et al, 2012;Zhang et al, 2013b)。钱维宏等(2012)研究了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,指出气象干旱多为年循环的气候干季与干旱扰动的叠加所致;张江涛等(2010)重点分析了冷空气活动对 2009/2010 年西南地区干旱的影响;杨辉等(2012)指出西风带环流系统异常是造成这次严重干旱的主要成因;宋洁等(2011)讨论了 NAO 与云南省旱涝

之间的联系;黄荣辉等(2012)研究表明,处于升温状态的热带西太平洋上空产生反气旋异常环流,造成从孟加拉湾来的水汽很难到达云贵高原,引起此区域降水长期偏少;Lü 等(2012)指出热带大气 MJO 活动持续异常是此次干旱发生的重要原因之一。还有的学者(彭贵芬等, 2009;贺晋云等, 2011;李聪等, 2012;Ma et al, 2013;Zhang et al, 2013a)分析了西南地区干旱的气候特征和变化趋势,指出西南地区的严重干旱呈增加趋势。这些研究成果,对于我们进一步认识和研究西南地区连续 4 年干旱发生的气候背景、异常特征、形成原因等具有重要意义。

上述研究主要关注的是西南地区某一次严重干旱过程的成因或者干旱的气候特征。由于西南地区连续几年出现严重干旱的情况在历史上极为罕见,目前还没有相关的研究成果。因此,深入研究该地区 2009 年以来连续 4 年干旱的特征及成因,显得尤为迫切。本文拟从大尺度大气环流异常、水汽输送特征、太平洋及印度洋海温异常、平流层极涡强弱等方面对此次连续干旱进行系统研究,期望有助于进一步认识该地区干旱变化的特征和成因,从而提高对该地区的干旱监测水平和预测预警能力。

## 1 所用资料

本文所用资料包括:(1)中国气象科学数据共享服务网提供的中国地面气候资料月值数据集中 756 个气象观测站的降水和平均气温资料,从中选取了西南地区时间序列一致的 108 个站的资料,时间跨度为 1961 年 1 月至 2012 年 12 月,2013 年 1—4 月使用国家气候中心整编的全国 160 个气象观测站中西南地区 31 个站的降水和平均气温资料,站点分布如图 1 所示;(2)NCEP/NCAR 逐月再分析数据资料集,包括风场、温度场、高度场、地面气压、比湿等要素,水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ,垂直方向分为 17 层;(3)美国国家海洋大气局(NOAA)提供的逐月全球海表温度资料。本文使用 1971—2000 年 30 年的平均值作为气候平均态。

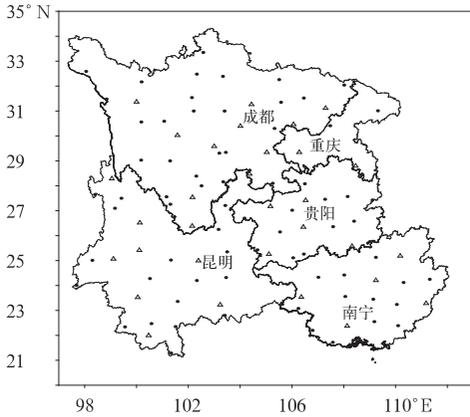


图1 研究区域和108个气象站点分布  
(三角形表示2013年1—4月使用的31个站点位置)

Fig.1 Location of the study area and the spatial distribution of 108 meteorological stations  
(Triangle denotes the location of 31 stations that are used from January to April 2013)

## 2 干旱的总体特征

### 2.1 气温和降水变化

西南地区属于亚热带、温带季风气候,干湿季分明,每年的5—10月为湿季,降水占全年降水的

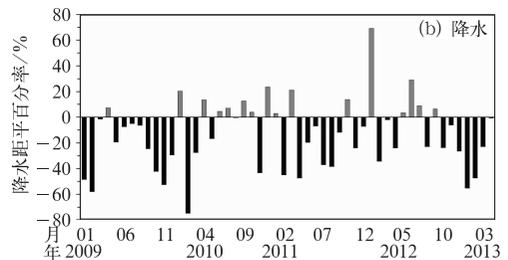
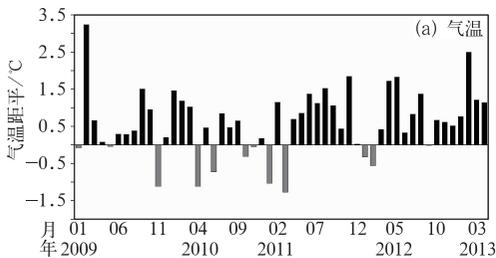


图2 西南地区2009年1月至2013年4月平均气温距平(a)和降水量距平百分率(b)变化

Fig.2 Series of mean temperature anomaly (a) and precipitation anomaly percentage (b) over Southwest China from January 2009 to April 2013

### 2.2 干旱的气候背景

西南地区连续4年干旱主要发生在秋冬春季,特别是2009/2010和2012/2013年,该地区都出现秋冬春3季、长达7—8个月的严重干旱。为研究连续干旱发生的气候背景,我们分析了西南地区各季节(图略)及秋冬春3季(图3)降水距平百分率的年际变化。可以看出,近50年来西南地区春季降水呈

80%~90%,11月至翌年4月为干季,降水只占全年的10%~20%(赵济,1995)。2009年以来,西南地区气温连续4年偏高,年平均气温16.3℃,较常年的15.3℃偏高1.0℃;降水量连续4年偏少,年平均降水量为1058.7 mm,比常年的1179.7 mm偏少10.3%。其中,2009年湿季降水量为827.9 mm,较常年平均的955.6 mm偏少13.4%,2011年湿季降水量为764.5 mm,较常年平均偏少20%,2010和2012年湿季的降水与常年平均基本持平。2009—2013年干季的降水量持续偏少,其中2009/2010年偏少最为严重,仅有175.6 mm,较常年平均的224.1 mm偏少21.7%,2010/2011年偏少7.0%,2011/2012年偏少14.2%,2012/2013年仅有180.3 mm,偏少19.6%。湿季和干季的降水量都偏少,使得“湿季不湿、干季更干”,导致蓄水不足,出现持续干旱。如图2所示,2009年1月至2013年4月,西南地区气温较常年偏高的月份达40个,占总数的77%,其中有11个月较常年同期偏高1.0℃以上,个别月份偏高3.0℃以上;降水量较常年偏少的月份达35个,占总数的67%,其中有19个月较常年偏少3成以上,有4个月偏少5~8成。分析表明,2009—2013年,西南地区持续温高雨少,呈现暖干化趋势。

减少趋势,20世纪60年代初降水偏少,60年代中期到80年代中期降水偏多,80年代中期到90年代中期降水偏少,90年代中期到21世纪初降水偏多,近5年降水偏少(图略)。夏季降水也呈弱的减少趋势,20世纪60年代初到70年代中期降水偏多,而70年代中期到90年代初降水偏少,90年代初到21世纪初降水偏多,近10年降水偏少(图略)。秋季降水减少的趋势最为明显,20世纪60年代初期到80

年代中期降水偏多,80 年代中期至今降水偏少,其中近 10 年偏少趋势十分明显(图略)。冬季降水总的变化趋势不明显,但降水变化幅度较大,从 60 年代初至 80 年代末降水偏少,90 年代初降水偏多,90 年代中期到 21 世纪初降水偏少,21 世纪前 5 年降水偏多,近 5 年降水偏少(图略)。从图 3 可以看出,西南地区秋冬春 3 季降水呈明显减少的趋势,20 世纪 60 年代初至 80 年代初降水偏多,80 年代初至今降水持续偏少,21 世纪以来,秋冬春季的降水严重偏少,其中 2009/2010 年是自 1961 年以来偏少最严重的一年,2012/2013 年偏少量排在第四位。分析表明,21 世纪以来,西南地区各季节的降水都处在偏少时期,特别是秋冬春 3 季降水偏少明显。因此,2009 年以来连续 4 年的严重干旱是发生在该地区降水偏少的背景下。

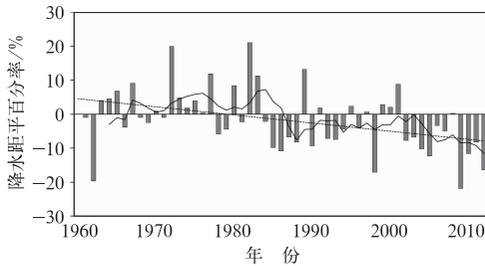


图 3 西南地区秋冬春季平均降水距平百分率的年际变化

Fig. 3 Interannual variation of precipitation anomaly percentages over Southwest China averaged for fall, winter and spring

### 3 大气环流异常特征分析

#### 3.1 700 和 500 hPa 环流异常特征

季节连旱是在特定的大尺度天气形势下发生的(池再香等,2012),明显的下沉运动是导致干旱少雨的动力因子,垂直速度场可以很好地反映下沉和上升运动(段海霞等,2013)。因此,图 4 给出了 2009—2013 年主要干旱时段南亚和东亚地区上空 700 hPa 风场距平和 500 hPa 垂直运动距平分布。

如图 4a 和 4b 所示,2009 年秋、冬季,青藏高原东南部和云贵高原受西北气流和强烈的下沉运动控制,孟加拉湾地区受反气旋距平环流影响,使得来自孟加拉湾的暖湿气流偏弱,冷暖空气难以在西南地区交汇,且流向该地区的水汽偏少,这些都不利于降

水的发生;2010 年春季(图 4c),青藏高原东侧出现气旋性距平环流,伴有较强的上升运动,四川、重庆等地旱情得以缓和,但云贵高原地区仍受下沉运动控制,降水继续偏少,出现了长达 8 个月的季节连旱。2010 年 11 月和冬季(图 4d 和 4e)热带印度洋和印度半岛上空有一气旋性距平环流,并逐渐东移减弱至孟加拉湾,与此同时,青藏高原南侧的反气旋性距平环流区也逐渐东移,西南地区处在反气旋性环流外围的西北气流之下,并伴有异常的下沉运动,不利于降水。2011 年春季(图 4f),云贵高原上空受异常东北气流影响,与高原南侧气旋性距平环流外围的南风交汇,配合 500 hPa 异常上升运动,旱情逐渐结束。2011 年秋季(图 4g),在孟加拉湾、中印半岛和青藏高原东南部以及云贵高原有西北风异常,西南地区受弱西北风控制,西太平洋副热带高压(以下简称副高)偏南偏弱,中印半岛受异常反气旋环流控制,致使来自南海和孟加拉湾地区的水汽输送受阻,云南上空 500 hPa 有明显下沉运动,这一时段西南地区以云南干旱最为严重。冬季(图 4h),西南地区低层受来自孟加拉湾的弱西南气流控制,500 hPa 下沉区范围逐渐扩大,同时下沉运动也有所增强。没有南侵的冷空气配合,单一西南气流的控制使得西南大部分地区气候偏暖干。2012 年春季(图 4i),云南东部及贵州西部地区还受下沉运动控制,但强度较冬季显著减弱,西太平洋副高向西增强,副高外围暖湿气流得以向我国内陆输送,广西、重庆和四川以东地区受来自南海地区的水汽输送,云南西部地区受来自孟加拉湾的西南气流,湿度增加,配合增强的上升运动,旱情得以缓解。2012 年秋季(图 4j),南海上空反气旋距平环流西移与孟加拉湾上空反气旋距平环流合并,异常西南气流输送到东南沿海地区,高原东侧受西北气流异常影响;冬季(图 4k),异常西北气流及 500 hPa 下沉运动减弱,西南地区受偏西气流影响;2013 年春季(图 4l),环流形势有了大幅调整,印度半岛、南海上空受异常气旋距平环流影响,高原北侧受反气旋距平环流影响,异常东北气流与东风气流在西南地区交汇,500 hPa 有异常上升气流,位于青藏高原东南侧的云贵川地区降水增多,旱情得以缓解,偏东北的重庆地区干旱仍在持续。500 hPa 风场异常(图略)与 700 hPa 结果相类似,不再赘述。

#### 3.2 南支槽异常变化

研究表明(晏红明等,2003;尹晗等,2013),冬半

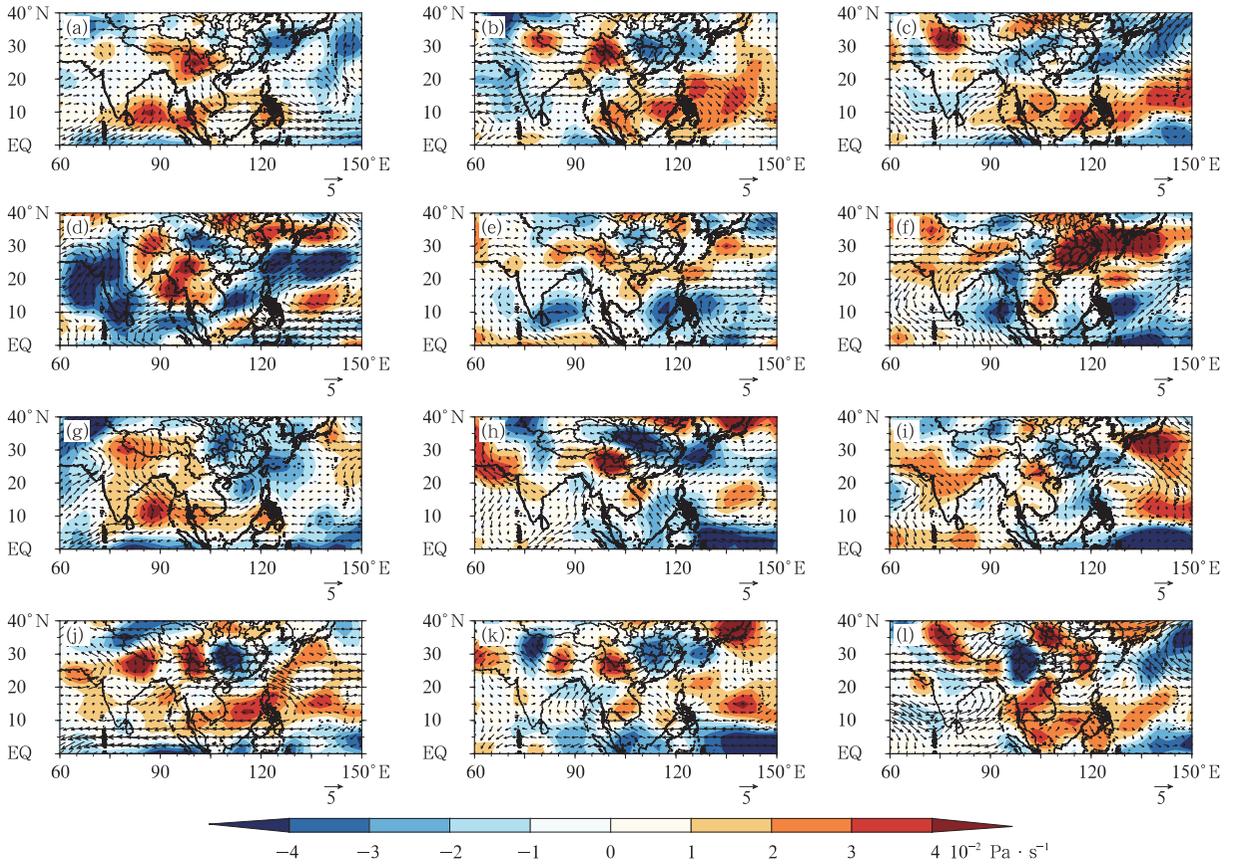


图4 2009年秋季(a)和冬季(b),2010年3—4月(c)、11月(d)和冬季(e),2011年3—4月(f)、秋季(g)和冬季(h),2012年3—4月(i)、10—11月(j)和冬季(k),

以及2013年3月(l)南亚和东亚地区上空700 hPa风场距平和500 hPa垂直运动距平分布

Fig. 4 Distributions of wind anomaly field at 700 hPa and vertical motion anomalies at 500 hPa over South Asia and East Asia in fall (a) and winter (b) of 2009; March–April (c), November (d) and winter (e) of 2010; March–April (f), fall (g) and winter (h) of 2011; March–April (i), October–November (j) and winter (k) of 2012; March (l) of 2013

年在高原南侧孟加拉湾地区有一半永久性低压槽称为南支槽,是冬半年影响南亚和东亚的主要天气系统。丁一汇(2005)指出冬季副热带急流从高原南缘通过,西风急流中的低槽可从印度西北里海地区南下,在喜马拉雅山南麓东移,移出印度后可到达中国,影响我国的天气,这就是南支槽。由于南支槽中西风经过孟加拉湾地区而携带大量的水汽,故与冷空气结合便可造成大范围的雨雪天气(秦剑等,1997)。董海萍等(2005)研究表明,西南地区的干旱与南支槽活动及整层水汽输送有着密切的关系,强调了南支槽水汽输送的重要性。南支槽强度指数是表征西南气流水汽输送强弱的重要指标。索渺清等(2009)指出南支槽所处范围为孟加拉湾北部至青藏高原南侧地区( $20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$ )。王斌等

(2010)研究发现,500 hPa上空南支槽与我国西南地区11月至翌年3月的降水关系更显著,因此,他们定义500 hPa上 $20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$ 内的高度和为南支槽强度指数,即 $\text{INDEX} = H_{500\text{ hPa}[20^{\circ}\sim 27.5^{\circ}\text{N}, 85^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}]}$ ,其值越大,表示槽区高度场越高,槽变浅,南支槽越弱;反之,其值越小,表示槽区高度场越低,槽加深,南支槽越强。

本文分析了2009—2013年冬半年(9月至翌年4月)各月南支槽强度指数的距平变化(图5a),可以看出,这4年的9—12月南支槽强度指数均为正距平,表明这段时间南支槽强度持续偏弱,槽前西南气流水汽输送偏弱,到达西南地区的水汽相应减少,造成了这段时间西南地区的严重干旱。2009年12月至2010年4月、2012年12月至2013年4月,南支

槽强度指数正距平增大,分别在 2010 年 1 月和 2013 年 2 月达到最大,此时南支槽强度最弱。同时,从西南地区 850 hPa 温度距平(图 5b)可以看出,这段时间温度持续偏高,冷空气影响偏弱,这样的冷暖配置,使得旱情在 1—2 月最为严重。3—4 月 500 hPa 南支槽仍偏弱,由于春季南支槽前的西南风水汽输送强度增强(强于冬季),到达我国西南地区水汽增多,旱情有所缓解。2010 年 12 月至 2011 年 1 月,南支槽稍有增强,与此同时,冷空气活动也较频繁,这段时间西南局部地区旱情有所缓解。同样,2011 年 12 月中旬至 2012 年 1 月中旬,南支槽和冷空气都有所加强,局部地区旱情有所缓解,而

12 月上旬、1 月下旬和 2 月中下旬,由于冷暖空气影响不同步,南支槽偏强时,冷空气较弱;冷空气较强时,南支槽却偏弱,使得西南地区旱情持续。2011、2012 年的 3 月下旬开始,南支槽逐渐增强,水汽条件改善,旱情缓解。

此外,王斌等(2010)还指出,前期 11 月 500 hPa 南支槽区高度场对我国西南地区 11 月至翌年 3 月的降水有一定的指示意义。前期 11 月南支槽区负距平,南支槽加深,水汽输送充足,西南地区降水偏多;反之,西南地区降水偏少。从图 5 左可以看出,2009—2012 年 11 月南支槽指数都为正距平,对应西南地区降水偏少,与研究结果一致。

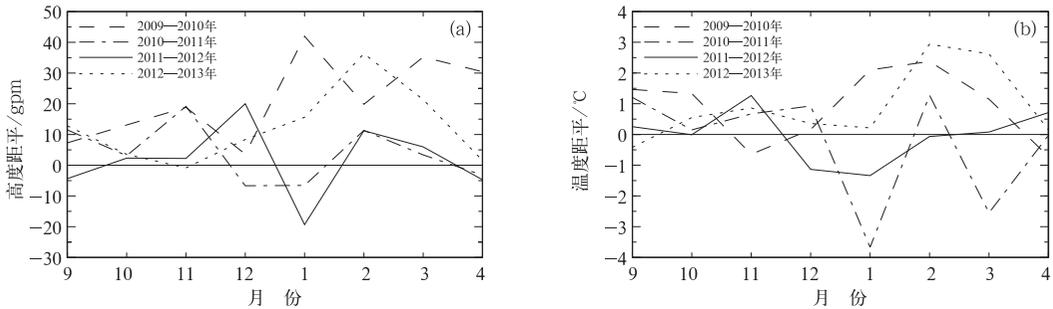


图 5 2009—2013 年 9 月至翌年 4 月南支槽指数的距平变化(a)以及西南地区 850 hPa 的温度距平变化(b)

Fig. 5 Variations of south trough index anomalies (a) and temperature anomalies at 850 hPa over Southwest China (b) from September to the next April during 2009—2013

#### 4 水汽输送异常特征分析

张万诚等(2011)研究表明,孟加拉湾、中南半岛至云贵高原的南风水汽通量较强时,云南等地秋季易出现洪涝;反之易出现干旱。当孟加拉湾、中南半岛至云贵高原的南风水汽通量输送偏强、云贵高原为纬向异常正距平时,冬季降水偏多;反之偏少。为了进一步了解近 4 年连续干旱的原因,下面从纬向和经向的水汽通量距平分布来分析水汽输送的异常特征。

从 2009 年秋季纬向水汽通量距平图(图 6a)上可以看出,从西南地区东部的云南、贵州至华南沿海为异常东风水汽通量输送,中心位于台湾附近;孟加拉湾、中南半岛及南海一带为纬向水汽通量异常正距平,表明低纬西风水汽通量输送较常年偏强。经向水汽通量距平图(图 6b)显示,在孟加拉湾、中南半岛至云南为异常北风水汽通量,云南中部及以南

地区被  $-20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  以上的水汽通量距平线包围。东印度洋、菲律宾附近虽然有异常南风水汽通量大值区,但其以北被异常强大的北风水汽通量距平区阻隔。这表明 2009 年秋季由于向南的经向水汽通量控制孟加拉湾至中南半岛的大范围地区,使得向西南地区输送的水汽偏少,造成干旱。从 2009 年冬季的纬向水汽通量距平图(图 6c)上可看出,西南地区为异常东风输送,表明 2009 年冬季影响西南地区的西风水汽通量输送异常偏弱。而从经向水汽通量距平(图 6d)分布上,孟加拉湾、中南半岛东北部、华南为经向水汽通量异常正距平,西南地区除云南外均为水汽通量正距平。由于冬季降水的水汽主要来源于中纬度的西风水汽输送(张万诚等, 2011),因此 2009 年冬季较弱的西风水汽通量输送造成了西南地区的干旱。从 2010 年 3—4 月的纬向水汽通量距平图(图 6e)上可以看出,西南地区仍然受异常东风的影响,但  $20^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$  的异常东风输送带,逐渐被孟加拉湾到南海地区的异常西风水汽通

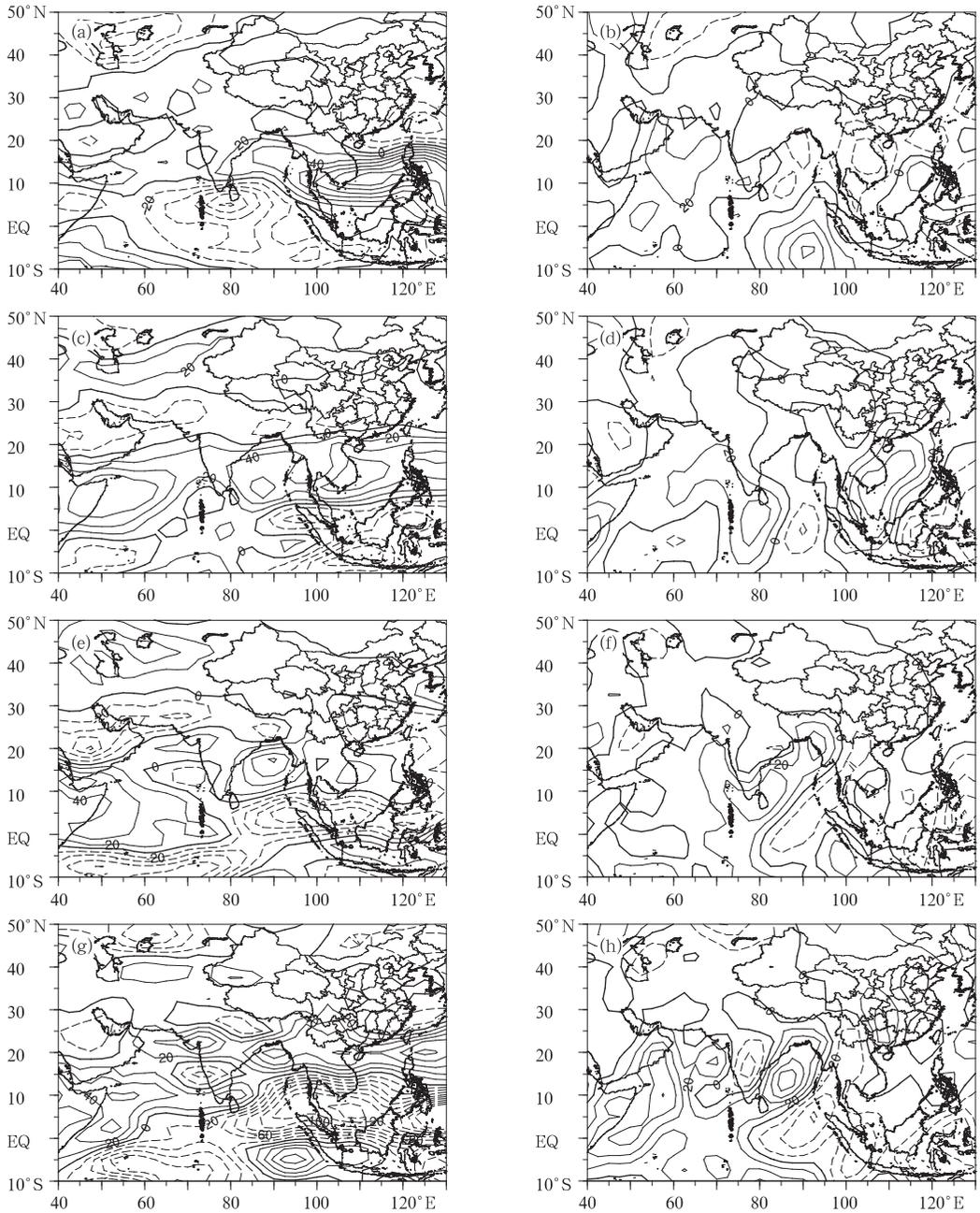


图 6 2009 年秋季、冬季,以及 2010 年春季和 5 月纬向(a, c, e, g)、经向(b, d, f, h)水汽通量距平分布(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 Distributions of the anomalies of zonal (a, c, e, g) and meridional (b, d, f, h) vapor transportation flux in fall and winter of 2009 and spring and May of 2010 (unit:  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

量输送切断,5月开始转为受异常西风控制(图6g)。与此同时,经向水汽通量距平(图6f~6h)上也从5月开始转为异常南风输送,旱情从2010年5月得到明显缓解。

同理分析2010年秋季到2013年春季(图略)。2010年11月,纬向水汽通量距平图上除云南北部,其余地区均为异常东风输送,在经向水汽通量距平

图上,南海、西太平洋的异常南风输送主要将水汽输送到我国的东南沿海地区,西南地区是异常北风输送。2010年冬季到2011年4月,纬向水汽通量距平图上西南地区东部各省(区、市)受东风异常输送控制;在经向水汽通量距平图上,除云南以外的西南地区受异常北风输送控制,西南地区水汽输送较前一年明显改善,水汽输送异常偏少区位置偏东。

2011 年秋季至 2012 年春季,纬向水汽通量距平图上西南地区一直受异常东风输送的影响,经向水汽通量距平图上西南地区一直受异常南风输送的影响,2012 年 5 月开始纬向水汽距平图上低纬的西风气流加强,西南地区开始受异常西风输送控制,旱情缓解。2012 年秋、冬季,经向和纬向水汽通量距平图均显示西南地区有正的水汽输送异常,2013 年 3 月开始,西南地区东部有负的水汽输送异常,对应干旱区域偏东。

### 5 热带海表温度异常特征分析

上文中 700 hPa 的环流形势分析表明,热带西太平洋上空对流层低层反气旋环流从 2009 年冬季一直维持到 2010 年春季,对于我国西南地区 2009

年秋季至 2010 年春季持续性严重干旱有着重要影响。Wang 等(2003)研究表明 El Nino 事件成熟之后,在热带太平洋上空会出现反气旋环流异常,这种异常使得来自孟加拉湾的水汽大量流向华南、东南沿海地区而不是西南地区,图 7 表明 2009/2010 年的干旱出现在热带太平洋发生中等强度 El Nino 事件的背景下。从图 7a~7c 可以看出,这次 El Nino 事件在 2009 年冬季成熟,之后逐渐衰减,2009 年冬季和 2010 年春季正处于本次 El Nino 事件的衰减期。依据 Zhang 等(1996)和张人禾等(1998)的研究结果,在 2009 年冬季和 2010 年春季热带西太平洋上空对流层下层将出现反气旋环流异常,如图 4b~4c 所示,与上述文献分析结果一致。从图 7d~7i 可以看出,2010 年秋、冬季和 2011 年春季,2011 年秋、冬季和 2012 年春季均受 La Nina 事件影响,尤

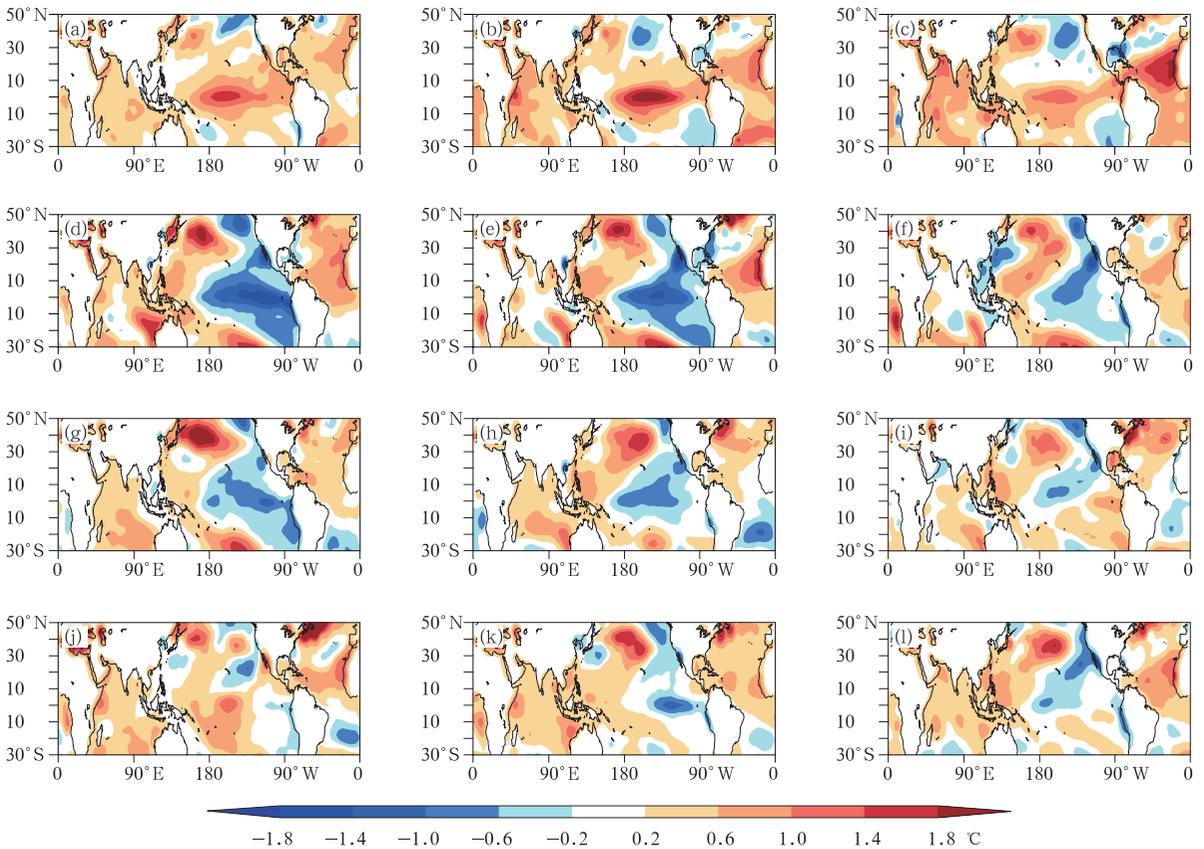


图 7 2009 年秋季(a)、冬季(b),2010 年 3—4 月(c)、11 月(d)和冬季(e),2011 年 3—4 月(f)、秋季(g)和冬季(h),2012 年 3—4 月(i)、10—11 月(j)和冬季(k),以及 2013 年 3 月(l)热带太平洋和印度洋海表温度距平分布

Fig. 7 Distributions of SST anomalies in tropical Pacific and tropical Indian Ocean in fall (a) and winter (b) of 2009; March—April (c), November (d) and winter (e) of 2010; March—April (f), fall (g) and winter (h) of 2011; March—April (i), October—November (j) and winter (k) of 2012; March (l) of 2013

其是 2010 年 La Nina 事件强度较强。2010 年秋、冬季,中东太平洋海温异常偏低使得西太平洋副高反气旋环流较常年偏弱,位置偏东南,尤其是在 La Nina 事件发展成熟的冬季(如图 4e),这一期间降水主要集中在江南和华南地区。2011 年秋、冬和 2012 年春季受热带印度洋和太平洋海温异常的影响,在孟加拉湾—南海—菲律宾以东的洋面上逐渐激发出一个异常的反气旋性环流(如图 4g~4i),从而有利于副高加强和西伸,促使该反气旋西侧的西南暖湿水汽向我国东南部地区输送。2012 年 3 月 La Nina 事件结束后,赤道中东太平洋 7—8 月出现明显的暖水波动,进入 9 月后海表温度正异常逐渐减弱,海温变化幅度较小,这种状态在 11 月仍继续维持,随后的冬、春季出现弱的海温负距平。2012 年秋季西太平洋副高明显偏强且面积偏大(如图 4j),这种环流异常是对 7 和 8 月赤道中东太平洋暖水波动的响应(王遵娅等,2013a;2013b;柳艳菊等,2013)。这种异常反气旋环流可分为东西两个部分,东部偏东,不利于水汽向中国地区输送,使中国大部分地区降水偏少;西部造成西南暖湿气流深入华南一带,在这一区域冷暖交汇形成降水,而西南地区水汽较少。冬季,海温偏低使得西太平洋副高的主体偏弱、偏东,但其环流范围较大,其西边界一直西伸到孟加拉湾地区(如图 4k),西南暖湿气流在我国东南沿海地区形成辐合,这一区域降水较多。因此,相较 2009/2010 年,2010/2011,2011/2012 和 2012/2013 年秋、冬、春季热带太平洋海表温度的异常偏低,影响了副高强度和面积的变化,减少了来自南海的水汽输送,对 2010/2011,2011/2012 和 2012/2013 年秋、冬、春季的干旱造成了一定影响。

相关研究表明(黄荣辉等,2012),热带印度洋冬、春季海表温度与我国西南和中印半岛上空的冬、春降水呈现很好的负相关关系。当热带印度洋冬、春季海表温度偏高时,我国南海、孟加拉湾和中印半岛上空低层反气旋异常环流偏强;反之,低层气旋异常环流偏强。从图 8 中可以看出,2008 年 12 月以来热带印度洋海表温度较气候平均一直偏高,2010 年春季此区域海表面温度达最大正距平  $0.51^{\circ}\text{C}$ 。除 2010 年冬季到 2011 年春季海表面温度正距平值较小外,2011 年冬季到 2012 年春季、2012 年冬季到 2013 年春季的海表面温度正距平值都较大。这点从图 7 中印度洋海表温度距平变化也可以明显看出。对比图 7 发现,这些时段的热带印度洋海表面

异常增温,使得菲律宾周围热带西太平洋反气旋异常环流增强,阻碍了孟加拉湾暖湿气流向西南地区的输送,进而造成西南地区的干旱。

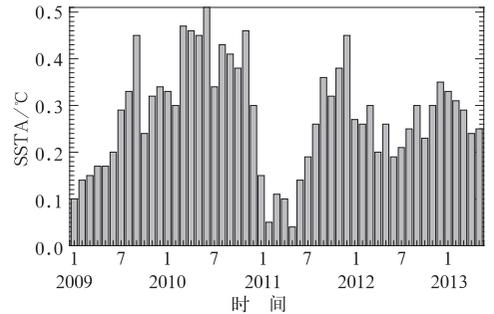


图 8 2009 年 1 月至 2013 年 4 月热带印度洋 ( $30^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{S}, 80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ) 区域平均的 SST 距平变化

Fig. 8 Variation of mean SST anomalies (SSTAs) during January 2009 to April 2013 for the area ( $30^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{S}, 80^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$ ) of tropical Indian Ocean

## 6 平流层环流异常特征分析

### 6.1 冬季平流层极涡异常的等熵位涡分析

冬季大气环流的异常与极涡的变化密切相关,因而极涡的异常变化及其影响一直很受关注。Hartley 等(1998)发现平流层大气动力异常对对流层的反馈比原先预想的要重要得多, Haynes 等(1991)通过垂直运动与经向环流的匹配关系阐述了向下控制的观点, Baldwin 等(1999)发现北极涛动(AO)异常先出现在平流层然后向下传播,讨论了平流层极涡异常变化对于对流层天气变化的先兆意义。黄荣辉等(2012)研究显示,无论冬、春季, AO 与我国西南地区的降水有正相关,而与我国东南沿海和海南地区的降水有负相关。即在冬、春季,当 AO 为负位相时,西南地区降水偏少,东南沿海地区降水偏多;相反,西南地区降水偏多,东南沿海地区降水偏少。因此,为了进一步了解 AO 异常变化对西南地区连续 4 年干旱的影响,必须先对平流层极涡的异常变化进行分析。

气象业务上常使用极涡强度和面积指数来分析极涡的变化,很显然这样的方案主要是针对对流层极涡的,不能够准确反映平流层极涡的特点。本文将采用 500 K 等熵位涡(易明建,2009)来诊断平流

层冬季极涡的强弱变化。易明建(2009)将冬季平流层极涡形态大致分为 4 类:加强、拉伸、偏心和分裂。加强和拉伸的极涡属于极涡偏强的类型,其余两类属于极涡偏弱的类型。如图 9 所示,2009 年冬季极涡的形态分布类似于分裂型,极涡整体较弱且向两端拉伸,极涡很有可能发生分裂形成欧亚大陆和北美洲北部两个独立的高位涡中心。2012 年冬季极涡的形态分布属于偏心型,极涡中心偏离极地,整体移向东半球一侧,移动到欧亚大陆北部,且强度减弱。2009 和 2012 年极涡强度明显偏弱,500 K 等熵面上极涡的强度较典型的强极涡偏少约 20 PVU。2010 和 2011 年冬季极涡的形态分布近似于偏心型,但极涡中心强度减弱并不明显。如图 10 所示,2010 和 2013 年 1 月西南地区 300 K 等熵面上位涡

较常年无异常变化,而 2011 和 2012 年 1 月在四川东部、重庆和贵州东部地区有近 0.4 PVU 的位涡异常,表明北方高位涡冷空气渗入此地,并且随着纬度变低,相对涡度将变大,气旋性低压会加强,在这些地区更容易形成降水。但是,图 10 中 2011 年 1 月受高原北侧一致西北风影响,孟加拉湾西南水汽输送受阻,同 2012 年 1 月来自中印半岛一致的西南水汽输送相比,暖湿空气明显偏弱,致使西南地区仍然干旱。

### 6.2 AO 对我国西南地区冬、春季降水的影响

图 11 是 2008 年 1 月至 2013 年 4 月的逐月 AO 指数。2009 年 12 月至 2010 年 4 月 AO 指数持续负异常,特别是 2010 年 2 月 AO 指数达到 -4.3;

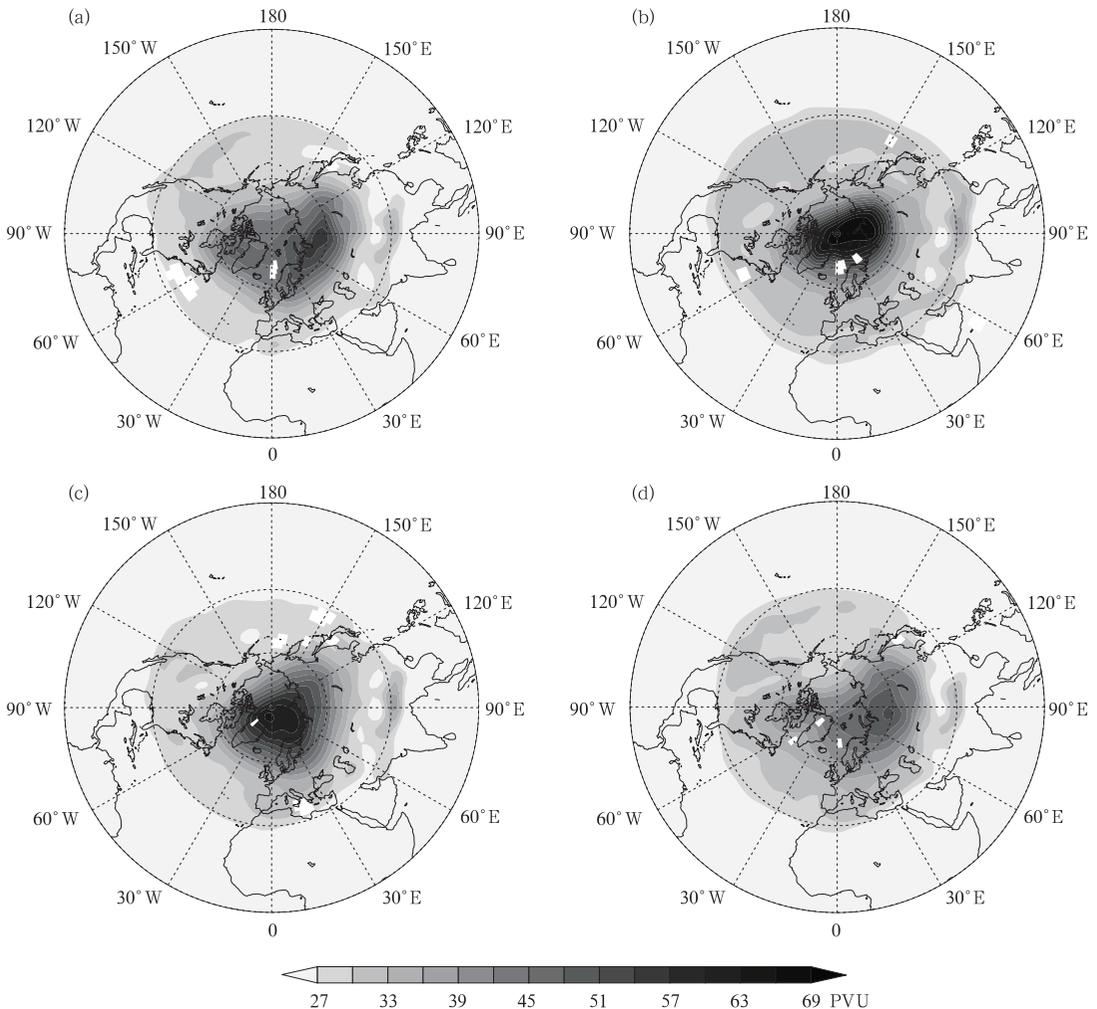


图 9 2009—2012 年冬季 500 K 极涡的形态分布

(a)2009 年, (b)2010 年, (c)2011 年, (d)2012 年

Fig.9 Form distributions of polar vortex at 500 K in the winter of 2009—2012

(a) 2009, (b) 2010, (c) 2011, (d) 2012

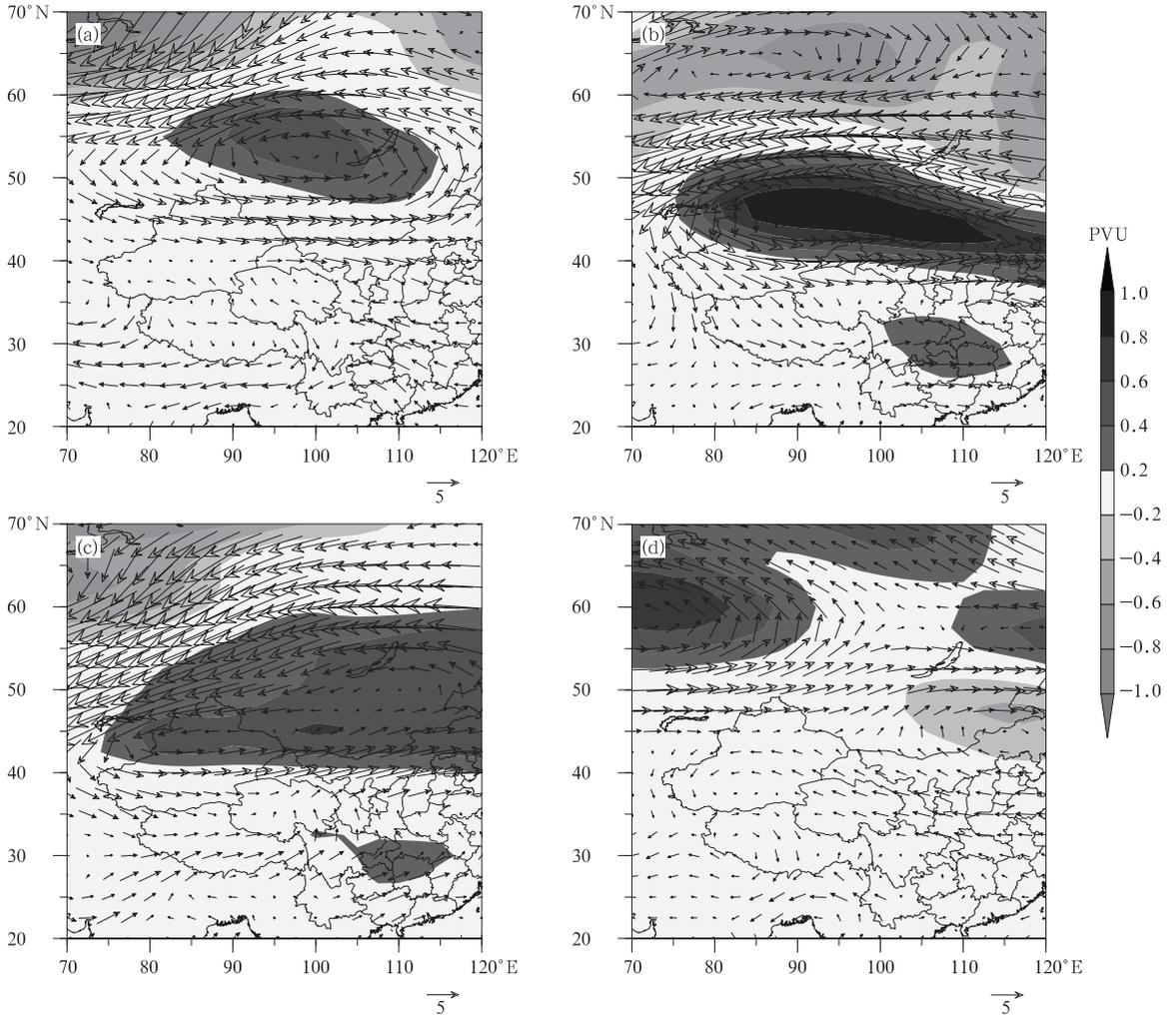


图 10 2010—2013 年 1 月 300 K 等熵位涡和风场距平图  
 (a)2010 年,(b)2011 年,(c)2012 年,(d)2013 年

Fig. 10 Isentropic vortex at 300 K and wind field anomalies in January of 2010—2013  
 (a) 2010, (b) 2011, (c) 2012, (d) 2013

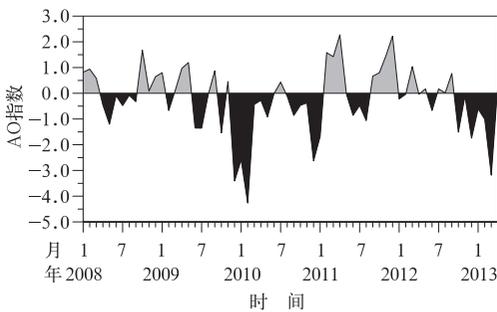


图 11 2008 年 1 月至 2013 年 4 月逐月 AO 指数  
 Fig. 11 Monthly AO (Arctic Oscillation) index from January 2008 to April 2013

2010 年 12 月和 2011 年 1 月 AO 负异常明显,最强为 12 月的 -2.6;2011 年冬季到 2012 年春季,AO

指数在 1、2 月出现较弱负异常,春季短暂的出现 AO 正异常;2012 年 12 月到 2013 年 3 月 AO 持续负异常,3 月达到最强为 -3.2。因此,AO 的持续负异常对 2009/2010、2012/2013 年冬、春季西南地区的干旱作用显著,正是这种负异常使得西南地区降水偏少,而东南沿海地区降水偏多。2010/2011、2011/2012 年冬、春 AO 负异常变化较弱且持续时间短,西南地区干旱的局地性强。

AO 变化对西南地区降水的影响主要通过影响南支槽的强弱得以实现(琚建华等,2011;Ju et al, 2005)。AO 处于负位相时,极涡减弱,北半球中高纬度地区的西风气流偏弱,大气环流以经向型环流为主,利于冷空气向南侵袭。与此同时,青藏高原南

侧的南支西风气流也减弱,不利于孟加拉湾北部气旋性环流加强发展,南支槽减弱变浅,西南地区水汽输送受阻,降水偏少。2009/2010 和 2012/2013 年, AO 负位相持续时间长,强度较其余两年也明显偏大。对比图 5 也可看出,这两年冬季南支槽明显偏弱,水汽输送差,旱情也较其余两年严重。2010/2011 和 2011/2012 年冬季 AO 负值持续时间短,且强度偏弱,尤其是 2011 年冬季。从图 5 可以明显看出,这两年冬季时南支槽强度并不弱,前面的分析显示,干旱主要是冷空气和暖湿气流影响不同步所致,这点从图 12 也可以得到佐证。

研究表明 AO 的季节内持续负异常在影响南支槽强弱的同时,也会通过罗斯贝波破碎及非线性反射(宋洁等,2011)影响贝加尔湖脊系统的强弱,从而影响冷空气南下的强度及路径。贝加尔湖脊指数定义为( $45^{\circ} \sim 65^{\circ} \text{N}$ 、 $90^{\circ} \sim 130^{\circ} \text{E}$ )这一矩形区域 300 hPa 位势高度的平均值。在冷空气南侵的过程中,由于行星涡度减小,根据绝对涡度守恒原理,其相对涡度逐渐增加,冷空气路径将逐渐转向偏东;贝加尔湖脊偏强时,脊前入侵我国的西北冷空气的相对负涡度较强,根据绝对涡度守恒的原理,拥有较强相对负涡度的冷空气由北向南入侵我国时,将在更低的纬度上转向,因此冷空气可以入侵到更低的纬度,其路径也明显偏西。当贝加尔湖脊系统减弱时,入侵我国的冷空气将在较高纬度转向,致使路径偏东。从图 12 可以明显看出,2009/2010 和 2012/2013 年,10 月至翌年 3 月贝加尔湖脊持续偏弱,虽然 AO 处于负位相,利于冷空气南袭,但冷空气在较高纬度就发生了转向,路径主体偏东(如图 10a 和

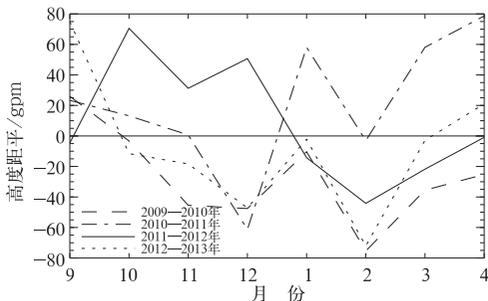


图 12 2009—2013 年 9 月至翌年 4 月贝加尔湖脊指数的距平变化

Fig. 12 Variations of anomalies of the Lake Baikal ridge index from September to the next April during 2009—2013

10d)。2010/2011 年冬季,图 10b 中的位涡变化也可以看出,冬季西南地区东北部冷空气活动较频繁,如第三部分分析所示,这段时间的干旱并不是冷空气影响偏弱所致。2011/2012 年秋季,贝加尔湖脊较强,冷空气路径偏西,图 10c 中 1 月西南地区东北部冷空气影响还较明显。之后贝加尔湖脊强度逐渐减弱,冷空气路径偏东,西南地区冷空气影响减弱。

### 6.3 平流层极涡异常与行星波活动的关系

大气平流层和对流层主要是通过行星波的活动而动力地耦合在一起的,这是因为只有行星波(波数为 1 和 2 的波动)才可以自对流层向上传播进入平流层(Andrews et al, 1987),较小尺度的天气尺度波仅存在于对流层。与此同时,也只有平流层的行星尺度异常才能下载到对流层。因此,对流层和平流层中任何一层的改变都会对行星波的传播产生影响并通过行星波的变化而影响另一层。前面分析的 AO 持续异常必然与北半球准定长行星波传播波导的振荡有密切关系。

E-P 通量是描述波流相互作用的物理量,分析 2009—2013 年 12 月至翌年 3 月的 E-P 通量及纬向平均气流的距平变化(图略),结果显示,2009 年 12 月准定常行星波在对流层以极地波导为主,平流层以低纬波导为主,到 2010 年 2 月,1000~50 hPa 基本都为极地波导。整个时间段,北半球准定常行星波传播的极地波导加强,而低纬波导减弱,这就使得  $60^{\circ} \text{N}$  附近上空和高纬地区上空的对流层和平流层准定常行星波 E-P 通量辐合,而在  $30^{\circ} \text{N}$  附近上空的对流层中、高层准定常行星波 E-P 通量辐散。根据波-流相互作用,即 E-P 通量辐合将导致西风气流减速,北半球纬向平均气流在  $60^{\circ} \text{N}$  附近上空的对流层和平流层西风减弱,而在  $30^{\circ} \text{N}$  附近的对流层中、上层西风加强,从而导致了这段时间 AO 的持续负值。对比发现,这种波-流相互作用在 2 月最强, AO 指数也在 2 月达到最大 -4.3。2010 年 12 月至 2011 年 3 月,北半球准定常行星波的传播同 2009/2010 年情况类似,只是早在 2 月的时候波导方向就发生了反转,对流层以低纬波导传播为主,平流层还是向极波导。这种改变使得北半球纬向平均气流在  $60^{\circ} \text{N}$  附近上空的对流层和平流层西风加强,而在  $30^{\circ} \text{N}$  附近的对流层中、上层西风减弱, AO 指数转为正值(如图 11)。2012 年 12 月至 2013 年 3 月准定常行星波传播波导的变化和 2009/2010 年类似,

只是总体强度偏弱。2011 年 12 月至 2012 年 3 月, 12 月对流层以低纬波导传播为主, 平流层还是向极波导为主, E-P 通量的辐合、辐散较其他几年偏弱, 对应 AO 指数负值较小, 呈现正负交替变化, AO 无持续异常。

## 7 结论和讨论

本文从大尺度大气环流、水汽输送、太平洋及印度洋海温、平流层极涡强弱等方面分析了 2009—2013 年我国西南地区连续 4 年秋、冬、春季严重干旱的原因, 得到以下结论:

(1) 2009—2013 年西南地区秋、冬、春季严重干旱同热带西太平洋、南海、中印半岛、孟加拉湾以及青藏高原东部的大气环流异常关系密切。这 4 年的秋、冬季西南大部分地区 500 hPa 都受异常下沉气流控制。2009/2010 和 2010/2011 年受青藏高原东南侧的反气旋性距平环流外围西北气流影响, 孟加拉湾暖湿空气难以输送到西南地区。2011/2012 年以弱西风控制为主, 2012/2013 年受单一暖湿气流控制, 冷暖交汇不明显。

(2) 西南地区连续 4 年的秋、冬、春季严重干旱同 500 hPa 南支槽的强弱及冷空气活动有密切关系。这 4 年的 9—12 月南支槽持续偏弱, 2009/2010 和 2012/2013 年影响最弱, 槽前西南气流水汽输送减弱, 到达西南地区的水汽相应偏少。2010/2011 和 2011/2012 年冬季冷暖空气影响不同步, 南支槽偏强时, 冷空气较弱; 冷空气较强时, 南支槽却偏弱。

(3) 这连续 4 年的秋、冬、春季干旱中, 2009/2010 年、2010/2011 年的连旱中经、纬向水汽通量距平总体呈现负异常, 整层西风和南风水汽输送明显偏弱; 2011/2012 年, 南风水汽输送明显加强, 但是西风水汽输送依然偏弱, 对应西部地区旱情较东部严重; 2012/2013 年, 西风和南风水汽输送增强, 这种增强主要是南亚季风的作用。

(4) 热带海表温度异常特征分析表明, 受 El Nino 事件影响, 在 2009 年冬季和 2010 年春季热带西太平洋上空对流层下层将出现反气旋环流异常, 阻碍了西南地区的水汽输送。2010、2011 和 2012 这 3 年的秋冬春季受 La Nina 事件影响, 尤其是 2010 年 La Nina 事件强度较强, 西太平洋副高反气旋环流较常年偏弱, 位置偏东南, 阻碍了来自南海的水汽输送。这 3 年中热带印度洋冬、春季海表面温

度的异常偏高在干旱变化中也起了重要作用。

(5) 对平流层极涡的分析显示, 2009—2013 年都处于弱极涡控制下, 北半球准定常行星波的异常变化使得 2009/2010、2010/2011 和 2012/2013 年冬春季 60°N 附近对流层中、上层的纬向平均西风减弱, 而 30°N 附近对流层中、上层的纬向平均西风加强, 造成了 AO 指数长时间的负值, 使得东亚冬、春季冷空气活动路径偏东, 到达西南地区的冷空气偏弱。

总体而言, 这 4 年连旱中 2009/2010 年的旱情最为严重, 2012/2013 年次之, 2010/2011 和 2011/2012 年旱情较弱且局地性强。影响西南地区干旱的因素很多, 各因素的相互作用也较复杂, 本文只是从较为主要的几个方面进行了分析, 如青藏高原冬季积雪对高原热力因素的影响, 进而如何对西南干旱造成影响; El Nino 和 La Nina 事件及其转换期对西南地区干旱的作用机理; 前一年干旱(如土壤湿度、工程蓄水等)对下一年干旱的影响等方面还需要进一步研究。

## 参考文献

- 白莹莹, 高阳华, 张众, 等. 2010. 气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响. 气象, 36(9): 47-54.
- 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.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学(第二版). 北京: 气象出版社, 266.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2005. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 II. 2005 与 2001 年 5 月云南旱涝成因的对比分析. 气候与环境研究, 10(3): 460-473.
- 段海霞, 王素萍, 冯建英. 2013. 2012 年全国干旱状况及其影响与成因. 干旱气象, 31(1): 220-229.
- 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.
- 黄慧君, 李庆红, 高月忠, 等. 2011. 云南省 2009/2010 年秋冬季罕见干旱诊断分析. 热带地理, 31(1): 28-33.
- 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.
- 据建华, 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. 干旱气象, 29: 401-406.
- 李聪, 肖子牛, 张晓玲. 2012. 近 60 年中国不同区域降水的气候变化特征. 气象, 38(4): 419-424.
- 李莹, 高歌, 叶殿秀, 等. 2012. 2011 年中国气候概况. 气象, 38(4): 464-471.
- 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.
- 柳艳菊, 王艳娇, 司东, 等. 2013. 2012 年秋季我国气候异常及成因分析. 气象, 39(4): 526-530.

- 彭贵芬,刘瑜,张一平. 2009. 云南干旱的气候特征及变化趋势研究. 灾害学,24(4):40-44.
- 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.
- 秦剑,瑯建华,解明恩,等. 1997. 低纬高原天气气候. 北京:气象出版社,200.
- 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.
- 宋连春,邓振镛,董安祥,等. 2005. 干旱. 北京:气象出版社.
- 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. 大气科学,33(3):425-442.
- 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):28-37.
- 王小玲,丁一汇. 2013. 2010 年夏季欧亚异常阻高演变过程及对天气气候的影响. 气象,39(9):1089-1095.
- 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.
- 王有民,叶殿秀,艾婉秀,等. 2013. 2012 年中国气候概况. 气象,39(4):500-507.
- 王遵娅,任福民,王东阡,等. 2013a. 2012 年海洋和大气环流异常及其对中国气候的影响. 气象,39(4):508-515.
- 王遵娅,周兵,王艳姣,等. 2013b. 2013 年春季我国气候异常特征及其可能原因. 气象,39(10):1374-1378.
- 王遵娅,曾玲玲,高歌,等. 2011. 2010 年中国气候概况. 气象,37(4):439-445.
- 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.
- 晏红明,程建刚,郑建萌,等. 2012. 2009 年云南秋季特大干旱的气候成因分析. 大气科学学报,35(2):229-239.
- 晏红明,肖子牛,王灵. 2003. 孟加拉湾季风活动与云南 5 月雨量. 高原气象,22(6):622-630.
- 杨辉,宋洁,晏红明,等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析. 气候与环境研究,17(3):315-326.
- 易明建. 2009. 平流层极涡异常及其对对流层的影响研究. 中国科学技术大学,28-30.
- 尹哈,李耀辉. 2013. 我国西南干旱研究最新进展综述. 干旱气象,31(1):182-193.
- 张江涛,李勇. 2010. 强冷空气影响我国大部,全国降水分布不均匀. 气象,36(3):136-139.
- 张人禾,黄荣辉. 1998. El Nino 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析. 大气科学,22(4):587-599.
- 张万诚,万云霞,任菊章,等. 2011. 水汽输送异常对 2009 年秋、冬季云南降水的影响研究. 高原气象,30(6):1534-1542.
- 张新主,章新平,关华德,等. 2011. 我国西南地区 2009 年秋季特大旱灾大气环流特征分析. 热带地理,31(1):21-27.
- 赵济. 1995. 中国自然地理(3 版). 北京:高等教育出版社,342.
- 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.
- Andrews D G, Holton J R, Leovy C B. 1987. Middle Atmosphere Dynamics. Satt Lake City: Academic Press, 489.
- Baldwin M P, Dunkerton T J. 1999. Propagation of the arctic oscillation from the stratosphere to the troposphere. J Geophys Res, 104(D24):30937-30946.
- Haynes P H, McIntyre M E, Shepherd T G, et al. 1991. On the "Downward control" of extratropical diabatic circulations by eddy-induced mean zonal forces. J Atmos Sci, 78(4):651-678.
- Hartley D E, Villarin J T, Black R X, et al. 1998. A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere. Nature, 391(6666):471-474.
- Ju J H, Lü J M, Cao J, et al. 2005. Possible impacts of the Arctic Oscillation on the interdecadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia. Adv Atmos Sci, 22(1):39-48.
- Lu E, Luo Y L, Zhang R H, et al. 2011. Regional atmospheric anomalies responsible for the 2009—2010 severe drought in China. J Geophys Res, 116, D21114.
- 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 Earth Sci, 55(1):98-112.
- Ma Z F, Liu J, Zhang S Q, et al. 2013. Observed climate changes in Southwest China during 1961—2010. Adv Clim Change Res, 4(1):30-40.
- Wang B, Wu R T, Li T. 2003. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. J Climate, 16(8):1195-1211.
- Yang J, Gong D Y, Wang W S, et al. 2012. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China. Meteorol Atmos Phys, 115(3-4):173-184.
- Zhang M J, He J Y, Wang B L, et al. 2013a. Extreme drought changes in Southwest China from 1960 to 2009. J Geogr Sci, 23(1):3-16.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Nino on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the 86/87 and 91/92 events. J Meteor Soc Japan, 74(1):49-62.
- Zhang W J, Jin F F, Zhao J X, et al. 2013b. The possible influence of a non-conventional El Nino on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China. J Climate, 26(21):8392-8405.