

李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35 (3): 422 - 434. Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 422 - 434.

# 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系

李永华<sup>1, 2</sup> 卢楚翰<sup>2</sup> 徐海明<sup>2</sup> 程炳岩<sup>1</sup> 王勇<sup>1</sup>

1 重庆市气候中心, 重庆 401147

2 南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

**摘 要** 利用 1959~2006 年西南地区东部 20 个测站逐日降水量资料和 NCEP/NCAR 再分析月平均资料, 分析了夏季青藏高原大气热源特征, 指出了影响西南地区东部夏季旱涝的热源关键区域, 并就关键区大气热源对该区域夏季旱涝的影响进行了诊断, 得出了以下主要结论: 西南地区东部夏季降水与高原主体东南部的热源变化关系密切, 当该区域 (该区域的平均大气热源值定义为热源指数) 大气热源偏强时, 西南地区东部夏季降水偏多的可能性大。当夏季青藏高原关键区大气热源值偏强 (偏弱) 时, 西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南 (偏北), 东亚夏季风偏弱 (偏强), 出现有利于西南地区东部夏季降水偏多 (偏少) 的环流形势; 同时西南地区东部夏季水汽输送增强 (减弱), 水汽辐合上升运动也增强 (减弱), 因此, 该地区夏季降水容易偏多 (偏少), 出现洪涝 (干旱) 的可能性大。

**关键词** 西南地区东部 夏季旱涝 高原热源 影响

**文章编号** 1006-9895 (2011) 03-0422-13

**中图分类号** P463

**文献标识码** A

## Contemporaneous Relationships between Summer Atmospheric Heat Source over the Tibetan Plateau and Drought/Flood in Eastern Southwest China

LI Yonghua<sup>1, 2</sup>, LU Chuhan<sup>2</sup>, XU Haiming<sup>1</sup>, CHENG Bingyan<sup>1</sup>, and WANG Yong<sup>1</sup>

1 Chongqing Climate Center, Chongqing 401147

2 Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

**Abstract** Based on the NCEP/NCAR reanalysis monthly data and daily precipitation data at 20 stations in eastern Southwest China from 1959 to 2006, the features of atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and the key area associated with the drought/flood in summer over eastern Southwest China have been analyzed. Results show that there is a close relationship between the flood/drought over eastern Southwest China and the intensity of the atmospheric heat source over southeastern Tibetan Plateau (key area), i. e., the rainfall is more than normal while the heat source is stronger. It is propitious to appearance of circulation making for the summer rainfall in eastern Southwest China; furthermore, the vapor transport and convergent upward velocity are strengthened, the East Asian summer monsoon is weaker, and the ridge positions of the western Pacific subtropical high and South Asia high lean to south when the intensity of the atmospheric heat source over eastern Tibetan Plateau (key area) is stronger than

**收稿日期** 2010-06-28, 2010-10-19 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40975058, 重庆市自然科学基金计划重点项目 CSTC2008BA0022, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006054

**作者简介** 李永华, 男, 博士研究生, 主要从事气候诊断预测及区域气候变化研究。E-mail: lyhcq@163.com

normal, vice versa.

**Key words** eastern Southwest China, drought/flood in summer, atmospheric heat source over the Tibetan Plateau, effect

## 1 引言

全球变暖背景下旱涝等极端天气气候事件发生更为频繁, 因此, 旱涝成因及预测研究备受关注(陶诗言和徐淑英, 1962; Giorgi et al., 1996; 孙力和安刚, 2003; 梁平德等, 2006; García-Herrera et al., 2007; Korecha and Barnston, 2007; 李永华等, 2009; 刘富弘等, 2010; 孟祥新和符淙斌, 2010)。中国西南地区东部是夏季旱涝发生频率较高的地区之一, 近年来其强度和频率都有加剧趋势, 如 1998 年的特大洪涝和 2006 年的特大干旱都给当地造成了特别严重的损失和较大的社会影响。因此, 认识该地区夏季旱涝的特征以及研究该地区旱涝成因, 对于提高旱涝预测水平, 进而为防御旱涝灾害提供科学决策依据具有十分重要的意义。

青藏高原由于其复杂的地形和独特的气候特点而被称作地球“第三极”, 对中国、亚洲甚至全球的大气环流都有非常重要的影响(叶笃正和高由禧, 1979; 冯松等, 1998), 也因此备受科学家们的关注。青藏高原对大气环流的影响主要有动力作用和热力作用, 动力方面主要是高原大地形的机械阻挡作用(Charney and Ellassen, 1949; Yeh, 1950), 热力方面主要是高原对大气的非绝热加热(Yeh, 1957; 叶笃正和高由禧, 1979; 吴国雄等, 2005)。Bolin (1950) 和 Yeh (1950) 对地形绕流效应的研究表明, 大地形的绕流作用使气流分支, 并在地形下游形成会流急流, 冬季青藏高原对西风气流的分支作用是形成东亚大槽的重要原因。顾震潮(1951)指出冬季环绕青藏高原的北支和南支西风气流在下游的汇合导致了强大的东亚急流的形成。青藏高原的绕流作用在冬、春季形成印缅槽, 使中印半岛和我国西南多阴雨(Yin, 1949), 在夏季激发高原低涡和西南低涡, 东移常伴有长江中下游的激烈天气过程(陶诗言, 1980)。

叶笃正等(1957)和 Flohn (1957) 分别发现青藏高原夏季是大气运动热源。自此以后, 许多学者研究了青藏高原加热场的时空分布特征以及青藏高原热源对天气、气候的影响(叶笃正和高由禧,

1979)。以青藏高原的机械和热力强迫作用为核心的青藏高原气象学成为重要的天气、气候研究领域。吴国雄等(1997)在前人研究的基础上, 把 Ertel (1942) 位涡理论引进高原研究中, 从位涡一位温观点出发, 利用新的再分析数据和数值模拟来证明高原加热状况所驱动的上空大气运动犹如一个巨大气泵, 调节着亚洲季风的变化。青藏高原在夏季不仅是重要的热源, 而且是重要的负涡度源(刘新等, 2001), 青藏高原上空的涡源所激发的 Rossby 波列影响着亚洲乃至北半球的大气环流异常(吴国雄, 2004; 吴国雄等, 2004)。近年来, 不少学者研究了高原的加热作用对中国夏季环流和降水的影响, 罗会邦和陈蓉(1995)发现当高原热源增强时, 长江上游和淮河流域降水偏多, 而华南地区降水偏少。Zhao 和 Chen (2001) 分析发现夏季高原热源强(弱)的年份, 在高原及其邻近地区的对流层中, 低层为偏差气旋环流(反气旋环流), 在长江流域低层为异常的西南风(东北风), 对应着东亚强(弱)夏季风。刘新等(2002)认为高原加热有利于江淮地区夏季降水偏多。赵声蓉等(2003)研究了夏季高原上热力异常与华北汛期降水的关系, 结果发现夏季高原为热源和水汽汇区, 它们的异常对华北地区降水有很大影响, 当热源和水汽汇增强(减弱)时, 华北地区降水偏少(偏多), 通过数值试验表明, 高原上潜热加热异常引起青藏高原、西太平洋副热带高压、亚洲季风以及欧亚中高纬地区环流的变化, 进而影响到华北地区的降水。巩远发等(2007)研究了夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系, 发现在夏季的 5~8 月期间, 青藏高原中南侧和中国南海的大气低频热源热汇变化与我国的江淮流域的降水有显著的滞后相关。关于高原热源对西南地区东部及其邻近地区天气气候影响也有一些研究成果。李跃清(2003)研究了青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系, 指出青藏高原地面加热场强度前期 1~3 月偏弱(强), 4~10 月偏强(弱), 则后期高原上空 100 hPa 高度场偏高(低), 未来高原东侧川渝地区夏季降水偏多(少), 易于发生洪涝(干旱)。陈忠

明等(2003)分析了青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的关联,结果表明高原地表热源异常与四川盆地降水和旱涝有显著的相关;高原地表热源异常通过强迫 500 hPa 东亚大气环流异常来影响四川盆地降水。华明(2003)应用诊断和数值模拟方法研究了青藏高原热状况的特征及其对西南地区环流和降水的影响,表明冬季青藏高原热状况与西南地区降水有同期和滞后的相关关系,热源的强弱对川渝等地降水有指示意义。这些研究表明,高原热源与西南地区天气气候有联系,本文将在借鉴这些研究成果的基础上,分析青藏高原大气热源特征及其与西南地区东部夏季旱涝的联系,初步分析高原大气热源影响该区域夏季旱涝的成因和机制,从而为夏季旱涝短期气候预测提供基础。

## 2 资料和方法

本文所指的西南地区东部是指(27°N~32°N, 105°E~110°E)范围内的地区,主要包括四川东部、重庆、贵州北部以及湖南西部局部和湖北西部的局部地区。

本文所使用的资料包括 1959~2006 年夏季 6~8 月的 NCEP/NCAR 全球逐月的 2.5°×2.5°经纬度再分析资料,西南地区东部 20 个台站(测站见图 1)逐日降水资料以及国家气候中心提供的环流特征量资料。在本文中,除特别说明外,均采用 1971~2000 年的平均值作为气候平均态。

为了反映西南地区东部逐年夏季降水(旱涝)的总体状况,我们按照中国气象局国家气候中心气候预测室所采用的方法计算了 1959~2006 年夏季区域降水指数  $\gamma$ (赵振国, 1999; 陈兴芳和赵振国, 2000)。

$$\gamma = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\bar{R}_i} + \frac{n^+}{n} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

其中,  $n$  为测站数,  $R_i$  为 6~8 月总降水量,  $\bar{R}_i$  为降水多年平均值,  $i$  为测站序号 ( $i=1, 2, \dots, n$ ),  $n^+$  表示  $n$  个测站中降水量距平  $\Delta R \geq 0$  的站数。夏季降水指数  $\gamma$  可以较好地刻画区域夏季降水的多寡,其值越大,表示区域降水越多,正常值为 150。在计算的测站中有个别站资料部分年份缺测,采用比值订正法进行了序列插补。

关于大气热源(汇)的计算,可由(2)式所示的热力学方程计算可得,已有文献(孙颖和丁一汇, 2002; 赵声蓉等, 2003; 巩远发等, 2007; 简茂球等, 2007)作了详细的介绍,此处不再赘述。

$$Q_1 = c_p \left[ \frac{\partial \theta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \theta + \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\kappa}, \quad (2)$$

其中,  $\theta$  为位温,  $\mathbf{V}$  为水平风矢量,  $\omega$  为  $p$  坐标垂直速度,  $\kappa = R/c_p$ ,  $R$  和  $c_p$  分别是气体常数和干空气的等压比热,  $p_0 = 1000$  hPa。

## 3 夏季高原大气热源特征及其与西南地区东部旱涝的关系

### 3.1 西南地区东部夏季旱涝变化简析

图 2 显示的是西南地区东部 1959~2006 年夏季区域降水指数的变化情况,可以看到,在整个时间域内,西南地区东部夏季降水略有增加的趋势。在 20 世纪 60 年代和 70 年代,降水指数总体偏小,表明这段时间总体偏旱;而在 20 世纪 80 年代前期总体偏涝;80 年代中后期开始波动加剧,旱涝交替发生,但总体相对偏涝;21 世纪初以来,西南地区东部总体偏旱。西南地区东部夏季降水趋势在 20 世纪 70 年代末发生了一次转折,由偏少转为偏多;而在 90 年代后期,又由偏多转为偏少。这种较为明显的年代际变化的原因值得探讨。1959 年以来,1998 年、1980 年和 1993 年是降水偏多最为明显的年份,而 2006 年和 1972 年降水偏少最为明显。根据序列夏季降水指数大小及旱涝实况,可以分别确定 9 个干旱年 ( $\gamma < 90$ ) 和 9 个洪涝年 ( $\gamma > 185$ ), 9

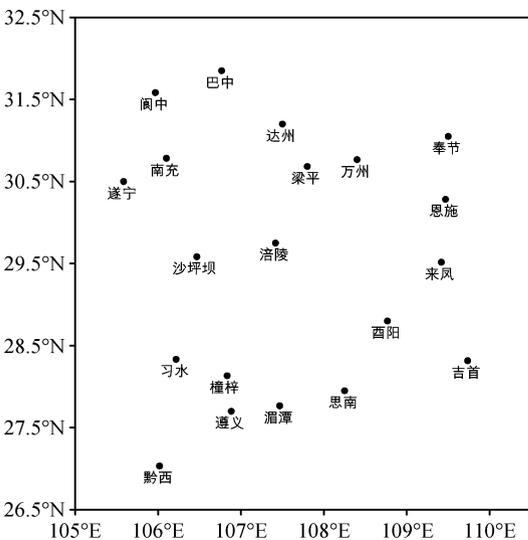


图 1 西南地区东部 20 个测站

Fig. 1 Distribution of 20 observation stations in the east of Southwest China

个典型干旱年依次有 2006、1972、1966、1961、1959、1994、1997、1990 和 1976 年, 9 个典型洪涝年依次有 1998、1980、1993、1984、1987、1982、1999、1983 和 2003 年。

### 3.2 夏季高原大气热源与西南地区夏季降水的联系

图 3a 表示的是西南地区东部夏季降水指数与夏季青藏高原大气热源的相关场分布, 由图可见, 西南地区东部夏季降水与高原主体东南部 (30°N~35°N, 90°E~100°E) 的热源变化关系密切, 当该区域大气热源偏强时, 西南地区东部夏季降水偏多的可能性大, 反之, 当该区域大气热源偏弱时, 西南地区东部夏季降水偏少的可能性大。西南地区东部夏季 9 个典型洪涝年和 9 个干旱年的青藏高原大气

热源差值场 (图 3b) 分布形式与图 3a 基本一致, 也体现出西南地区东部夏季洪涝年青藏高原东南部热源偏强, 而干旱年该区域热源偏弱的特征。鉴于夏季高原主体东南部热源异常与西南地区东部夏季降水 (旱涝) 关系密切, 因此, 将区域 (30°N~35°N, 90°E~100°E) 定义为热源关键区, 将该区域的平均大气热源值定义为热源指数。

图 4a 表示青藏高原关键区夏季大气热源指数的变化。总体来看, 关键区热源指数在 1959~2006 年时间段内是减少的, 其递减率为  $-2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。夏季热源指数变化有明显的阶段性特征, 在 20 世纪 60 年代中期以前偏弱, 而后至 90 年代前期偏强, 之后到 2006 年总体偏弱。热源明显偏强的年份依次有 1998 年、1974 年、1969 年、1997 年、1991 年、1987 年、1980 年、1978 年和 1970 年; 热源明显偏弱的年份依次有 2003 年、1961 年、2001 年、2002 年、1960 年、1959 年、2004 年、2006 年和 1994 年。而从 Morlet 小波变换功率谱图可见, 在多种时间尺度下, 除 20 世纪 90 年代具有较明显的 2~4 年周期外, 其它时间尺度上均没有显著的周期。我们计算热源指数序列与西南地区东部夏季降水指数的相关系数为 0.36, 通过 95% 的显著性检验, 说明该热源指数与西南地区夏季降水具有基本一致的变化特征。

### 4 夏季青藏高原关键区大气热源变化对西南地区东部夏季旱涝的影响

以上的分析表明, 夏季高原关键区大气热源与同期西南地区东部降水关系密切, 下面将主要分析

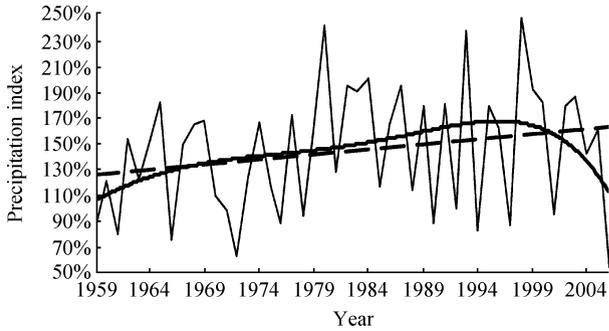


图 2 西南地区东部 1959~2006 年夏季降水指数序列。细实线: 指数序列; 虚线: 线性趋势; 粗实线: 5 阶多项式拟合  
Fig. 2 The precipitation index series during summer in the east of Southwest China from 1959 to 2006. Thin solid line is index series, dashed line is linear trend, and thick line is five-order polynomial fitting curve

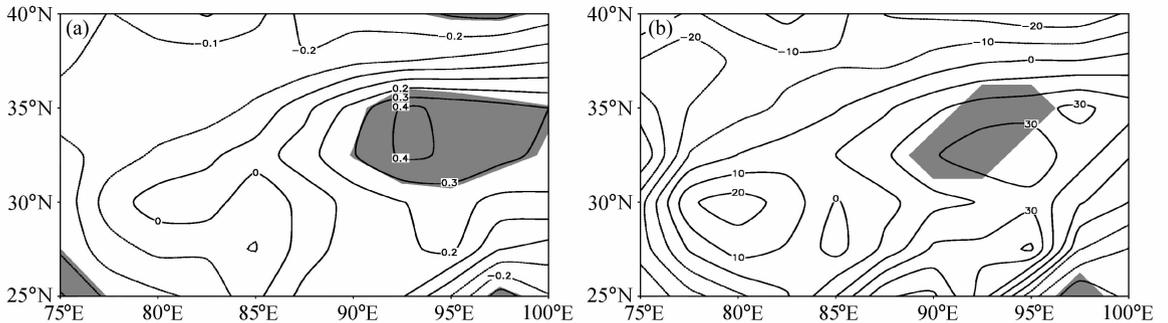


图 3 西南地区东部夏季降水指数与夏季青藏高原大气热源的相关场 (a) 及典型涝年与旱年夏季青藏高原大气热源差值场 (b) (单位:  $\text{W}/\text{m}^2$ )。阴影: 通过 95% 置信水平的统计检验  
Fig. 3 (a) The correlation field between summer rainfall index in eastern southwest China and summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and (b) the deviation field of summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau between typical flood and drought years (units:  $\text{W}/\text{m}^2$ ). The areas over the 95% confidence level are shaded

关键区大气热源变化影响该地区夏季旱涝的原因和初步分析影响的可能机制。

### 4.1 夏季高原关键区大气热源变化对同期 100 hPa 环流场及南亚高压的影响

图 5a 显示的是青藏高原关键区大气热源和 100 hPa 位势高度场的相关场，由图可见，从高原东南部到我国华南及南海北部为显著的正相关区（通过

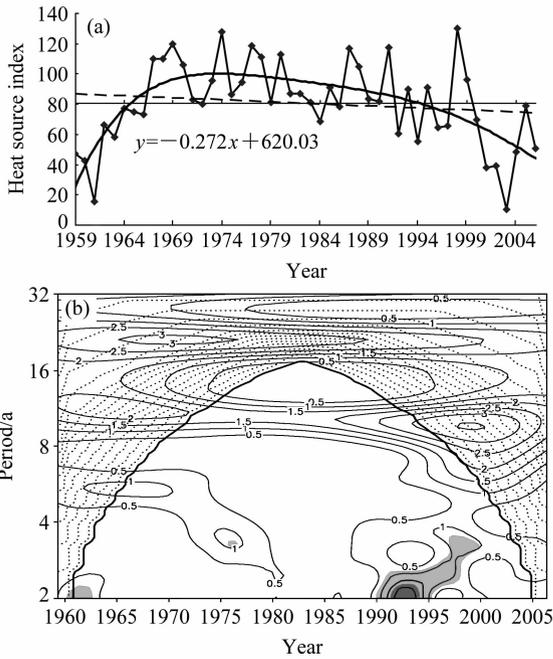


图 4 (a) 关键区夏季热源指数逐年变化 (菱形: 指数序列, 实线: 5 阶多项式拟合, 虚线: 线性趋势) 及 (b) 小波变换功率谱图 (阴影: 通过 90% 置信水平的统计检验; 虚线区域: 小波变换受边界影响的区域)

Fig. 4 (a) The annual change of summer heat source index over the key area (diamond; index series; dashed line; linear trend; real line; five-order polynomial fitting curve) and (b) its power spectrum analysis of the Morlet wavelet transform (shaded areas; the values are significant above the 90% confidence level; areas with dotted lines; the cone of influence)

95% 的信度检验, 下同), 我国华北及东北、朝鲜半岛、日本为负相关区 (未通过信度检验)。当关键区大气热源偏强 (偏弱) 时, 高原东南部到我国华南及南海北部 100 hPa 高度场偏高 (偏低), 而我国华北及东北、朝鲜半岛、日本 100 hPa 高度场偏低 (偏高), 这表明关键区大气热源偏强 (偏弱) 时 100 hPa 上重要的环流系统南亚高压可能偏南 (偏北)。图 5b 显示的是西南地区东部夏季降水指数和 100 hPa 环流场的相关分布场, 由图可见, 青藏高原南侧到我国华南及南海、菲律宾地区为显著的正相关区, 而在我国华北西北部及东北西南部为显著的负相关区。当西南地区东部夏季降水偏多 (偏少) 时, 高原南侧到我国华南及南海、菲律宾地区 100 hPa 高度场偏高 (偏低), 而我国华北西北部及东北西南部 100 hPa 高度场偏低 (偏高), 这表明南亚高压偏南 (偏北) 时西南地区东部夏季降水可能偏多 (偏少)。图 5a 和图 5b 相比, 正负相关区域基本相对应, 只是通过信度检验的区域有所不同, 后者通过信度检验的区域更大, 通过信度检验的正相关区域稍偏南, 但它们都大体反映了南亚高压脊线位置特征。由此可见, 当夏季青藏高原关键区大气热源偏强 (偏弱) 时, 南亚高压可能偏南 (偏北), 在 100 hPa 容易出现有利于西南地区东部夏季降水偏多 (偏少) 的环流形势。下面, 进一步分析计算该区域热源异常时 100 hPa 环流场上南亚高压有何变化。

表 1 表示的是西南地区东部夏季降水指数及高原关键区大气热源指数与南亚高压特征量之间的同期相关系数。本文中南亚高压特征指数定义如下: ① 面积指数: 100 hPa 高度场上 (10°N~50°N, 10°E~140°E) 区域内位势高度值 ≥ 1675 dagpm 的格点数; ② 主中心强度及主中心经度和纬度: 100 hPa

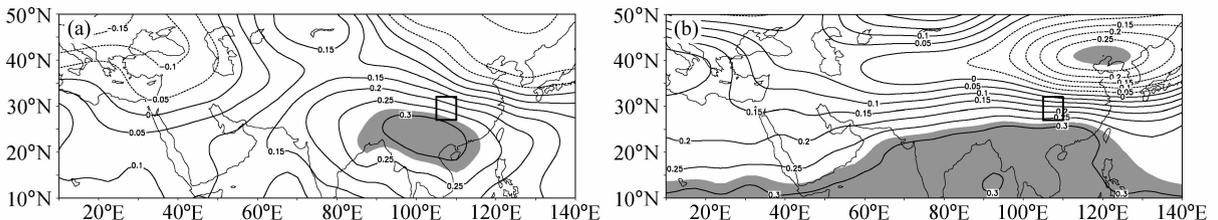


图 5 (a) 夏季关键区大气热源和 100 hPa 高度场的同期相关场; (b) 夏季西南地区东部降水指数和 100 hPa 高度场的同期相关场。阴影: 通过 95% 置信水平的统计检验

Fig. 5 The correlation fields between the 100-hPa geopotential height and (a) summer atmospheric heat source over the key area / (b) summer rainfall index in eastern Southwest China. The areas over the 95% confidence level are shaded

高度场上 ( $10^{\circ}\text{N}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $10^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ ) 区域内最大位势高度值 (在 1675 dagpm 等值线范围内) 为主中心强度, 其对应的经、纬度就是南亚高压主中心的地理位置, 分别定义为主中心经度和纬度; ③东伸经度: 100 hPa 高度场上 1675 dagpm 等值线最东端点所在位置的经度; ④南亚高压脊线位置: 100 hPa 高度场上  $10^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$  范围内 (在 1675 dagpm 等值线范围内) 位势高度最大值的平均纬度值。由表 1 可见, 关键区大气热源指数与南亚高压脊线位置关系密切, 当高原大气热源偏强 (弱) 时, 南亚高压位置偏南 (北), 这会引起西南地区东部夏季降水偏多 (偏少)。事实上夏季强大的南亚高压主体在高原上空就应该与该地区大气的热效应应有密切的关系, 吴国雄等 (1997) 提出“感热气泵”概念, 认为夏季高原表面感热输送造成了低层气流向高层的辐合, 形成了夏季高原上空强烈的上升运动, 由此造成的降水凝结潜热加剧了上升运动以及高空的辐散, 维持着高原上空的高压。吴国雄和刘屹岷 (2000) 还提出“热力适应”的理论, 揭示了高原上空非绝热加热的垂直不均匀分布是形成近地层浅薄热低压和中高层深厚的青藏高压的重要原因。张琼 (1999) 根据观测资料诊断分析认为青藏高压 (南亚高压偏东的一种平衡态) 具有“趋热性”, 即向大气暖中心的位置靠拢。基于此, 当关键区热源偏强时, 容易使南亚高压位置偏南; 反之, 当关键区热源偏弱时, 则容易使南亚高压位置偏北。这与前面的计算结果一致。

表 1 夏季降水指数、高原关键区大气热源指数与南亚高压特征量之间的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between six feature indices of South Asia high and summer rainfall index/heat source index over the key area

	面积 指数	主中心 强度	主中心 经度	主中心 纬度	东伸 经度	脊线 位置
降水指数	0.16	0.14	0.06	-0.24	0.16	-0.52*
高原关键区大 气热源指数	0.14	0.20	0.18	-0.12	0.18	-0.29*

注: \* 表示相关显著性通过了 95% 的置信水平。

#### 4.2 夏季高原关键区大气热源变化对同期 500 hPa 环流场及西太平洋副高的影响

图 6a 显示的是夏季青藏高原关键区大气热源和 500 hPa 环流场的同期相关场, 由图可见, 在巴尔喀什湖及其以北地区 (乌拉尔山南部) 为显著的正相关区; 中南半岛北部及南海北部也为显著的正相关区, 而在黄海及朝鲜半岛西部为显著的负相关区。从相关场总的分布形势来看, 当高原关键区热源指数偏强时, 在乌拉尔山及鄂霍次克海地区夏季容易出现阻塞高压, 而在东亚地区 500 hPa 高度场上也容易出现“十一十”的距平分布型, 这是我国长江流域 (包括西南地区东部) 夏季降水偏多的典型环流形势 (黄荣辉和李维京, 1988), 反之亦然。图 6b 显示的是西南地区东部夏季降水指数和 500 hPa 环流场的同期相关分布场。由图可见, 从乌拉尔山、贝加尔湖到鄂霍次克海以西地区为显著

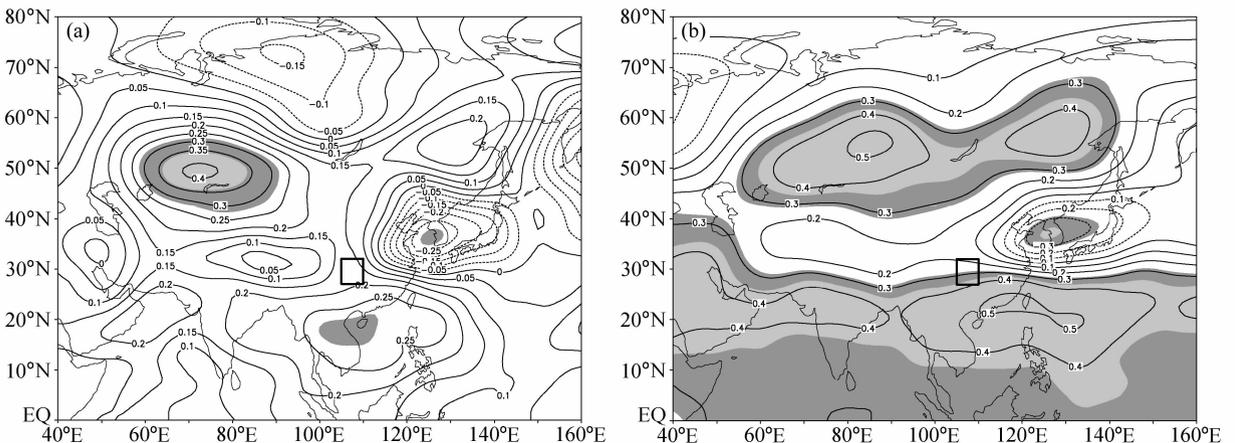


图 6 (a) 夏季关键区大气热源和 500 hPa 高度场的同期相关场; (b) 夏季西南地区东部夏季降水指数和 500 hPa 高度场的同期相关场。阴影: 通过 95% 置信水平的统计检验

Fig. 6 The correlation fields between the 500-hPa geopotential height field and (a) summer atmospheric heat source over the key area/ (b) summer rainfall index in eastern Southwest China. The areas over the 95% confidence level are shaded

的正相关区；同时在 30°N 以南也为显著的正相关区；而在朝鲜半岛及其附近地区为显著的负相关区。说明在东亚地区 500 hPa 高度场上出现“十一”的距平分布型时，西南地区东部降水可能偏多，容易出现洪涝。此时鄂霍次克海出现阻塞高压，而西太平洋副高偏南。图 6a 与图 6b 相比，正负相关区域基本对应，只是后者通过信度检验的区域更大。当关键区热源指数偏强时，乌拉尔山地区出现阻塞高压的可能性大，而鄂霍次克海阻塞高压出现的可能性相对较小；乌拉尔山地区阻塞高压和鄂霍次克海地区阻塞高压均与西南地区夏季旱涝有密切的关系。夏季青藏高原的加热强（弱）的年份，高原及邻近地区的上升运动、下层辐合及上层辐散均增强（减弱），使高原加热对周边地区低层暖湿空气的抽吸效应对高层大气向周边地区的排放作用加强（减弱），从而影响着高原和周边地区的环流以及亚洲季风区大尺度环流系统。而且高原的加热强迫能够激发产生一支沿亚欧大陆东部海岸向东北方向传播的 Rossby 波列，其频散效应可影响到更远的东太平洋以至北美地区的大气环流（刘新等，2002；段安民等，2003）。当夏季青藏高原关键区大气热源偏强（偏弱）时，在 500 hPa 容易出现利于西南地区东部夏季降水偏多（偏少）的环流形势，下面进一步分析计算该区域热源异常时 500 hPa 环流场上的重要系统西太平洋副高的变化。从以上的分析还可以看到，夏季西南地区东部降水不仅中高纬的环流有关，也与大尺度热带环流关系密切，实际上以上合成分析的大部分年份也是 ENSO 年，因此可以说，高原热源是影响夏季西南地区东部降水的一个因素，而来自热带的信号（如 ENSO）也是不可忽略的，这有待于进一步分析研究。

表 2 表示的是西南地区东部夏季降水指数及高原关键区大气热源指数与西太平洋副高特征量（赵振国，1999）之间的同期相关系数，从中可见，夏季高原关键区大气热源与西太平洋副高的南北位置（包括脊线位置和北界指数）关系密切。当夏季高原关键区大气热源偏强（弱）时，同期西太平洋副高位置往往偏南（北），西南地区东部夏季降水往往偏多（少），出现洪涝（干旱）的可能性大。为什么青藏高原关键区大气热源的强弱变化会引起西太平洋副高南北位置的变化？实际上，高原关键区位于西太平洋副高的西北侧，当关键区大气热源偏强

（主要为凝结潜热偏强）时，或阻止西太平洋副高北进，因此西太平洋副高位置往往偏南；反之，西太平洋副高则可能偏北（温敏和施晓晖，2006）。

表 2 夏季降水指数、高原关键区大气热源指数与西太平洋副高特征量之间的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between five feature indexes of the western Pacific subtropical high and summer rainfall index/heat source index over the key area

	面积指数	强度指数	脊线指数	北界指数	西伸脊点
降水指数	0.15	0.23	-0.47*	-0.35*	-0.15
高原关键区大气热源指数	-0.12	-0.07	-0.38*	-0.31*	0.19

注：\* 表示相关显著性通过了 95% 的置信水平。

#### 4.3 夏季高原关键区大气热源变化与水汽输送的关系

图 7a 表示的是夏季高原关键区大气热源指数与同期整层水汽输送通量的矢量相关场，由图可见，当夏季大气热源指数偏强（偏弱）时，我国华北、东北地区以及日本大部地区水汽输送减弱（增强），而在淮河以南广大地区西南向水汽输送则增强（减弱）；另外，阿拉伯海、孟加拉湾南部、印度尼西亚群岛、中南半岛南部以及菲律宾上空水汽输送均有所减弱（增强），而青藏高原偏南地区及孟加拉湾北部水汽输送偏强（偏弱）。上面的分析表明，高原关键区大气热源异常可引起南亚高压脊线与西太平洋副高脊线同时偏北或者同时偏南，西太平洋副高的南边盛行东风气流，而西北边缘则盛行西南气流。当热源偏弱时，西太平洋副高往往偏北，西北边缘的西南气流也偏北，正好位于我国华北、东北及日本一带，造成该地区水汽输送偏强，而江淮地区西南向水汽输送减弱而东风水汽输送则有可能增强，整个西南水汽输送偏东，表现为南海南部至菲律宾地区水汽输送偏强；反之，当热源偏强时，副高往往偏南，西北边缘的西南气流正好位于江淮地区，该地区水汽输送增强。从图 7a 可以看到，西南地区东部水汽在关键区大气热源偏强时西南向水汽输送略有增强，东风水汽输送有所减弱，但水汽输送总体是增强的。青藏高原以南地区及孟加拉湾北部是西南地区东部最重要的水汽通道，该地区水汽输送增强也有利于向西南地区东部的水汽输送。综上所述，当夏季高原关键区大气热

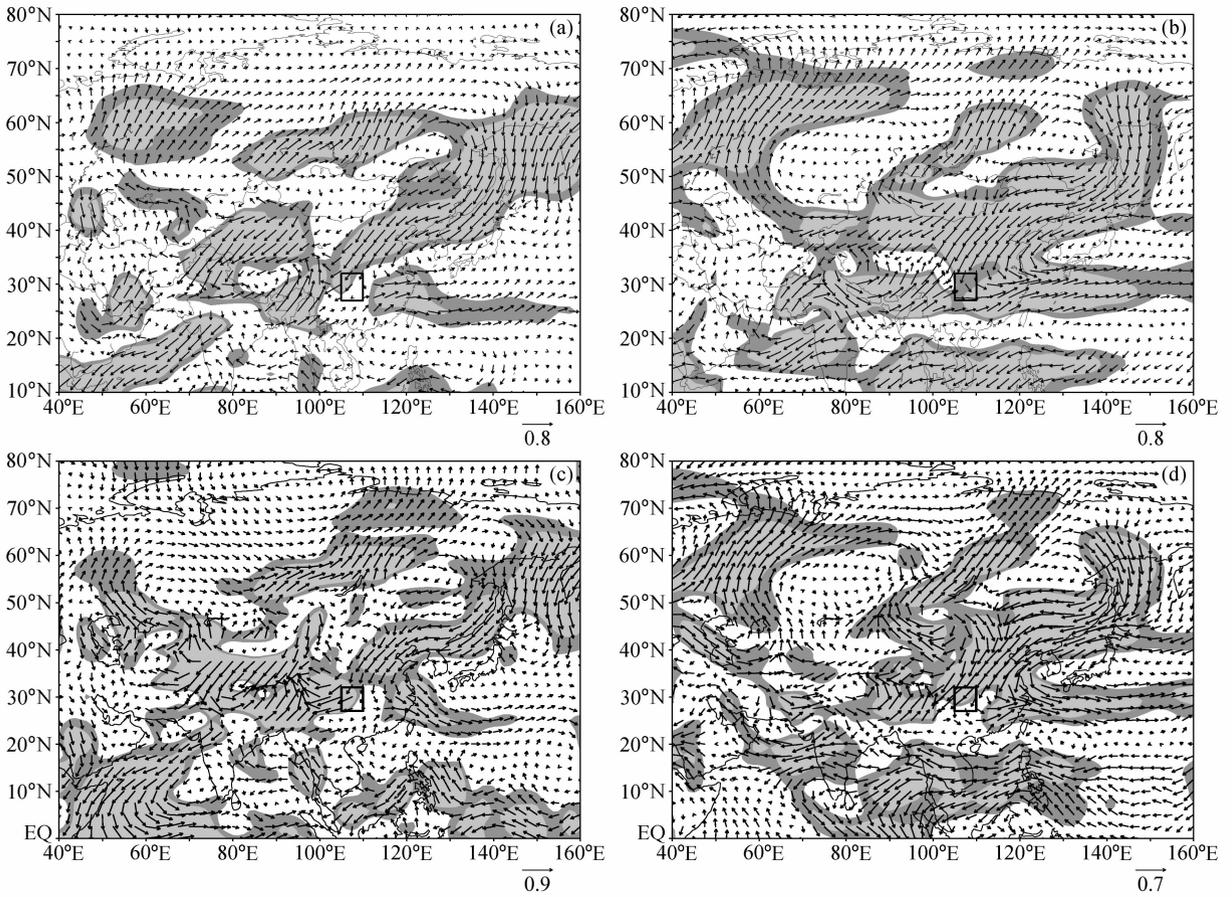


图 7 关键区大气热源指数 (a) 及西南地区东部夏季降水指数 (b) 与整层水汽输送通量的相关场；关键区大气热源指数 (c) 及西南地区东部夏季降水指数 (d) 与 850 hPa 风场的相关场。阴影：相关系数通过 95% 置信水平的区域；箭头：相关矢量  
 Fig. 7 Correlation coefficients between (a) the heat source index in the key area or (b) rainfall index in the east of Southwest China and the vertically integrated vapor transport flux in summer; correlation coefficients between (c) the heat source index in the key area or (d) rainfall index in the east of Southwest China and wind field at 850 hPa in summer. The areas over the 95% confidence level are shaded

源偏弱时，不利于西南地区东部水汽输送；反之，当大气热源偏强时，西南地区水汽输送增强。图 7b 表示的是西南地区东部夏季降水指数与整层水汽输送通量的矢量相关场，与图 7a 对比发现，其相关显著区基本相同，当夏季西南地区东部降水偏多（偏涝）时，与关键区大气热源偏强时的水汽输送相类似。

低层 850 hPa 风场（流场）形势能够在一定程度上表征水汽及冷暖空气输送。图 7c 显示的是夏季高原关键区大气热源指数与同期 850 hPa 风场的矢量相关场，其分布与图 7a 非常相似。图 7d 显示的是西南地区东部夏季降水指数与同期 850 hPa 风场的矢量相关场，其分布同样与图 7b 也非常相似。

以上的分析表明，当夏季青藏高原关键区大气

热源偏弱时，不利于同期西南地区东部水汽输送，因而引起该地区夏季降水偏少，出现干旱的可能性大；反之，当夏季关键区大气热源偏强时，有利于西南地区东部水汽输送，因而引起该地区夏季降水偏多，出现洪涝的可能性大。

#### 4.4 夏季高原关键区大气热源变化与亚洲夏季风的关系

亚洲季风是影响中国夏季旱涝的重要系统，亚洲夏季风的强弱和西南地区东部夏季降水关系密切，夏季高原关键区大气热源变化与亚洲夏季风强弱有何联系？我们计算了夏季关键区大气热源指数与李建平和曾庆存（2005）定义的东亚夏季风和南亚夏季风指数的相关系数，它们分别是一 0.36 和 -0.18，前者通过 95% 信度的显著性检验。结果表明，当高原关键区大气热源偏强时，东亚夏季风往

往偏弱;反之,当夏季高原关键区大气热源偏弱时,东亚夏季风往往偏强,这与已有的研究结果(赵声蓉等,2003)一致。

#### 4.5 夏季高原关键区大气热源变化与东亚垂直环流的关系

图 8a 表示的是夏季高原关键区大气热源偏弱的典型年份(1959、1960、1961、1994、2001、2002、2003、2004 和 2006 年)沿 30°N 纬向垂直环流的合成距平场。由图可见,在大部分区域西风气流较常年偏弱,在青藏高原以西垂直上升运动偏强,而青藏高原上空及以东地区垂直上升运动较常年偏弱,在西南地区东部(105°E~110°E)的上升运动较常年偏弱,这与西南地区东部夏季降水偏少(干旱)典型年(年份为 3.1 节所列)的垂直环流形势(图 8c)相类似。而在夏季高原关键区大气热源偏强的典型年份(1969、1970、1974、1978、1980、1987、1991、1997 和 1998 年)沿 30°N 纬向垂直环

流的合成距平场显示,在大部分区域西风气流较常年偏强,在青藏高原以西垂直上升运动偏弱,下沉运动偏强,而青藏高原上空及以东地区垂直上升运动较常年偏强,在西南地区东部(105°E~110°E)的上升运动较常年偏强,这与西南地区东部夏季降水偏多(洪涝)典型年(年份为 3.1 节所列)的垂直环流形势(图 8d)相类似。

射出长波辐射(Outgoing Longwave Radiation,简称 OLR)为卫星观测地气系统向外长波辐射资料,OLR 可精确描述地(海)表观测记录稀少的热带天气系统,也可以反映对流发展的强弱、大尺度垂直运动的信息等。图 9a 为夏季高原关键区大气热源指数与夏季 OLR 的相关系数场。当夏季高原大气热源偏强时,20°N~40°N 范围内,从青藏高原东部一直到朝鲜半岛、日本以东洋面的广大地区 OLR 值偏低,孟加拉湾南部及赤道东印度洋地区也偏低,而中南半岛以东至菲律宾以东洋面、

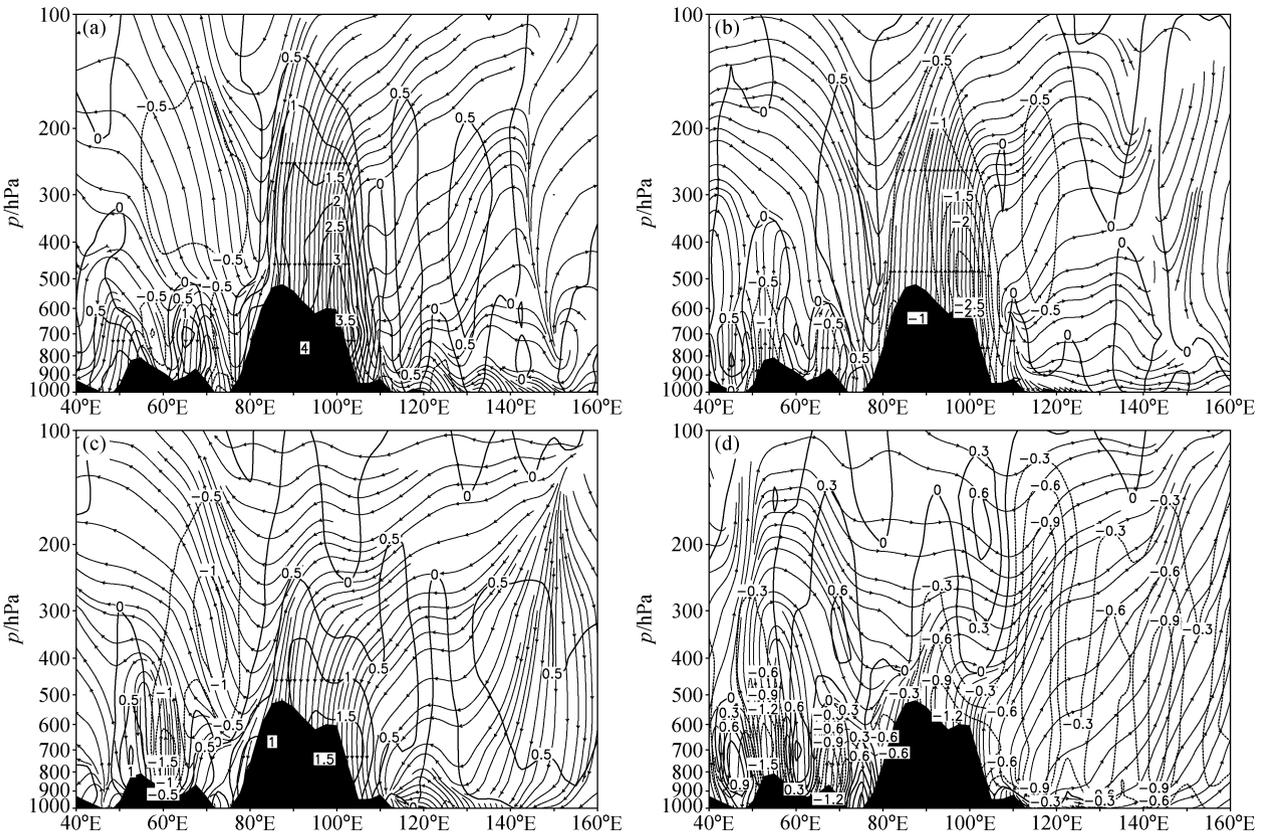


图 8 夏季高原关键区大气热源偏弱 (a) 和偏强 (b) 的典型年份以及西南地区东部夏季典型旱年 (c) 和涝年 (d) 沿 30°N 的纬向垂直环流 ( $u$  单位为  $m/s$ , 垂直速度  $\omega$  单位为  $10^{-2} Pa/s$ )。等值线: 垂直速度  $\omega$  (单位:  $10^{-2} Pa/s$ )

Fig. 8 The zonal-vertical circulation (units of  $u$ :  $m/s$ , units of  $\omega$ :  $10^{-2} Pa/s$ ) through 30°N in summer in the years with (a) weaker or (b) stronger heat source in the key area and in the typical drought (c) or flood (d) years in the east of Southwest China. Isolines: vertical velocity (units:  $10^{-2} Pa/s$ )

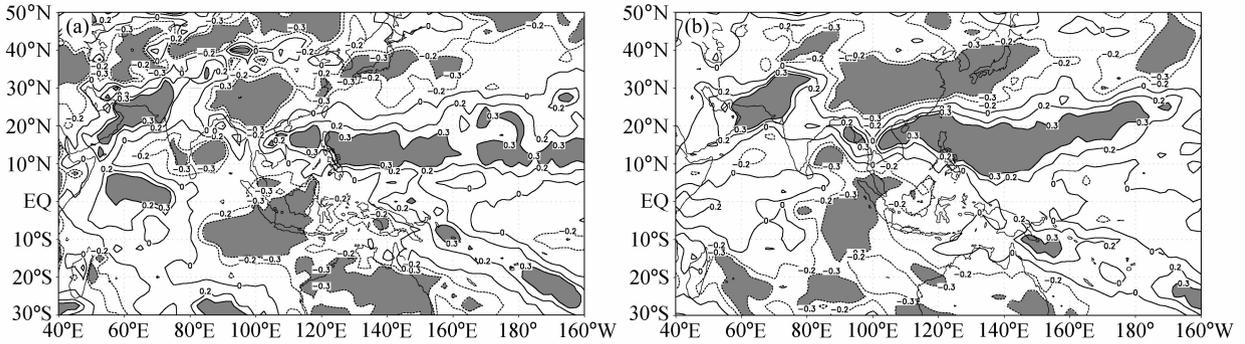


图9 夏季高原关键区大气热源指数 (a) 及西南地区东部夏季降水指数 (b) 与夏季 OLR 相关系数场 (阴影区为相关系数通过 95% 置信水平的区域)

Fig. 9 The correlation fields between the OLR field and (a) summer atmospheric heat source index over the key area/ (b) summer rainfall index in eastern Southwest China. The areas over the 95% confidence level are shaded

阿拉伯半岛和伊朗高原南部偏高；偏弱年的分布特征相反。该分布与西南地区东部夏季降水指数与夏季 OLR 的相关系数场的分布 (图 9b) 比较一致。如前所述, OLR 可以综合反映对流发展的强弱、大尺度垂直运动的信息, 由图 9a 可见, 关键区热源偏强时, 从青藏高原东部一直到江淮地区 OLR 值偏低, 表明包括西南地区东部在内的地区上升气流加强。而孟加拉湾南部及赤道东印度洋地区是西南地区东部乃至东亚地区重要的水汽输送源地和通道, 该区 OLR 值偏低, 表明对流活动偏强, 水汽输送也偏强; 而菲律宾及其附近地区 OLR 值偏高, 表明西太平洋暖池及菲律宾附近地区对流偏弱。黄荣辉和孙凤英 (1994) 的研究表明, 该地区对流偏弱, 则使夏季西太平洋副热带高压偏南, 这些都可引起西南地区东部夏季降水偏多。

以上的分析表明, 当夏季青藏高原关键区大气热源置偏强 (偏弱) 时, 夏季西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南 (偏北), 东亚夏季风偏弱 (偏强), 出现有利于西南地区东部夏季降水偏多 (偏少) 的环流形势, 同时, 西南地区东部夏季水汽输送增强 (减弱), 水汽辐合上升运动也增强 (减弱), 因此该地区夏季降水容易偏多 (偏少), 出现洪涝 (干旱) 的可能性大。

### 5 结论与讨论

本文分析了夏季青藏高原大气热源特征, 指出了影响西南地区东部夏季旱涝的关键区域, 并就关键区大气热源对该区域夏季旱涝的影响进行了诊断, 得出了以下主要结论: (1) 西南地区东部夏季

降水与高原主体东南部 [范围为 (30°N~35°N, 90°E~100°E)] 的热源变化关系密切, 当该区域大气热源偏强时, 西南地区东部夏季降水偏多的可能性大, 将该区域定义为热源关键区, 将该区域的平均大气热源值定义为热源指数。(2) 夏季西南地区东部降水指数和青藏高原关键区夏季大气热源指数均有明显的年代际变化特征, 两者具有基本一致的变化特征。(3) 当夏季青藏高原关键区大气热源置偏强 (偏弱) 时, 夏季西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南 (偏北), 东亚夏季风偏弱 (偏强), 出现有利于西南地区东部夏季降水偏多 (偏少) 的环流形势, 同时, 西南地区东部夏季水汽输送增强 (减弱), 水汽辐合上升运动也增强 (减弱), 因此该地区夏季降水容易偏多 (偏少), 出现洪涝 (干旱) 的可能性大。

本文初步揭示了西南地区东部夏季旱涝与青藏高原夏季大气热源变化的关系, 分析指出高原东南部大气热源变化与该区域旱涝的关系较密切。虽然本文从统计的关系上揭示了这些关系的存在, 并对影响的机制做了一些初步分析, 但实际上西南地区东部由于处在特殊的地理位置, 该地区天气气候既受青藏高原的影响, 也同时受印度季风和东亚季风的影响, 热带对流活动也是重要的影响因素, 因此这里的天气气候成因非常复杂, 旱涝预测非常困难。因此, 今后还需要做大量的工作, 尤其是成因机制的分析尚待深入开展。我们将对西南地区东部夏季旱涝的多种影响因素作进一步的分析, 从而提高该区域旱涝短期气候预测水平提供更多的依据和线索。

**致谢** 感谢两位审稿专家提出宝贵意见,同时感谢在论文修改过程中何卷雄博士和刘海文博士提供的帮助。

## 参考文献 (References)

- Bolin B. 1950. On the influence of the Earth's orography on the general character of the westerlies [J]. *Tellus*, 2: 184-195.
- Charney J G, Eliassen A. 1949. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitude westerlies [J]. *Tellus*, 1 (2): 38-55.
- 陈兴芳, 赵振国. 2000. 中国汛期降水预测研究及应用 [M]. 北京: 气象出版社, 8-9. Chen X F, Zhao Z G. 2000. The Application and Research of Precipitation of Summer Rainfall in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 8-9.
- 陈忠明, 闵文彬, 刘富明. 2003. 青藏高原地表热源异常与四川盆地夏季降水的关联 [J]. *气象*, 29 (5): 9-12. Chen Z M, Min W B, Liu F M. 2003. Relationship between surface heating fields over Qinghai-Xizang Plateau and precipitation in Sichuan basin during summer [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 29 (5): 9-12.
- 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 2003. 4~6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常 [J]. *中国科学 (D辑)*, 33 (10): 997-1004. Duan A M, Liu Y M, Wu G X. 2003. Heating status of the Tibetan Plateau from April to June and rainfall and atmospheric circulation anomaly over East Asia in midsummer [J]. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), 33 (10): 997-1004.
- Ertel H. 1942. Ein neuer Hydrodynamische Wirbelsatz [J]. *Meteorology Zeitschr*, Braunschweig, 59: 277-281.
- 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 1998. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据 [J]. *科学通报*, 43 (4): 633-636. Feng S, Tang M C, Wang D M. 1998. New evidence for Qinhai-Xizang (Tibet) Plateau as a pilot of climatic fluctuation in China [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 43 (4): 633-636.
- Flohn H. 1957. Large-scale aspects of the summer monsoon in south and East Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 75: 180-186.
- García-Herrera R, Hernández E, Barriopedro D, et al. 2007. The outstanding 2004/05 drought in the Iberian Peninsula: Associated atmospheric circulation [J]. *J. Hydrometeorol.*, 8: 483-498.
- Giorgi F, Mearns L O, Shields C, et al. 1996. A regional model study of the importance of local versus remote controls of the 1988 drought and the 1993 flood over the central United States [J]. *J. Climate*, 9: 1150-1162.
- 巩远发, 段廷扬, 张茜. 2007. 夏季亚洲大气热源汇的变化特征及其与江淮流域旱涝的关系 [J]. *大气科学*, 31 (1): 89-98. Gong Y F, Duan T Y, Zhang H. 2007. Characteristics of the atmospheric heating source/sink over Asia and its relationship with drought/flood in the Yangtze River-Huaihe River valley [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (1): 89-98.
- 顾震潮. 1951. 西藏高原对东亚大气环流的动力影响和它的重要性 [J]. *中国科学*, 2: 283-303. Gu Z C. 1951. The dynamical effects of Xizang Plateau on the atmospheric circulation over East Asia and its importance [J]. *Science in China (in Chinese)*, 2: 283-303.
- 华明. 2003. 青藏高原热状况对夏季西南地区气候影响的分析及模拟 [J]. *高原气象*, 22 (增刊): 152-156. Hua M. 2003. Analysis and simulation study on the influence of heat condition over Qinghai-Xizang Plateau on climate over Southwest China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 22 (Suppl.): 152-156.
- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. *大气科学*, 12 (特刊): 95-107. Huang R H, Li W J. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 12 (Special Issue): 95-107.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. *大气科学*, 18 (2): 141-151. Huang R H, Sun F Y. 1994. Impacts of the thermal state and the convective in the Tropical Western Warm Pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 18 (2): 141-151.
- 简茂球, 乔云亭, 罗会邦, 等. 2007. 初夏东亚-太平洋大气热源与长江流域及邻近地区7、8月降水异常的关系 [J]. *大气科学*, 31 (4): 735-746. Jian M Q, Qiao Y T, Luo H B, et al. 2007. The relationship of the atmospheric heat sources in early summer over East Asia-Pacific to the abnormality of precipitation in the Yangtze River basin and its vicinity in July and August [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 31 (4): 735-746.
- Korecha D, Barnston A G. 2007. Predictability of June-September rainfall in Ethiopia [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135: 628-650.
- 李建平, 曾庆存. 2005. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 351-365. Li J P, Zeng Q C. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 351-365.
- 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 [J]. *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 South China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. *Acta Meteorological Sinica* (in Chinese), 67: 122-132.
- 李跃清. 2003. 青藏高原地面加热及上空环流场与东侧旱涝预测的关系 [J]. *大气科学*, 21 (1): 107-114. Li Y Q. 2003. Surface heating in the Tibetan Plateau and general circulation over it and their relations with the prediction of drought-flood at its eastern side [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 21 (2): 107-114.
- 梁平德, 段丽瑶, 周鸣盛, 等. 2006. 华北盛夏旱涝的环流型特征及

- 其在初夏的预报 [J]. 气象学报, 64 (3): 385-391. Liang P D, Duan L Y, Zhou M S, et al. 2006. Circulation patterns for mid-summer drought/flood in North China and their early-summer precursors [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 64: 385-391.
- 刘富弘, 陈星, 程兴无, 等. 2010. 气候过渡带温度变化与淮河流域夏季降水的关系 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 169-178. Liu F H, Chen X, Cheng X W, et al. 2010. Relationship between temperature change in climate boundary and summer precipitation over the Huaihe River basin [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 169-178.
- 刘新, 吴国雄, 李伟平, 等. 2001. 夏季青藏高原加热和大尺度流场的热力适应 [J]. 自然科学进展, 11 (1): 33-39. Liu X, Wu G X, Li W, et al. 2001. Thermal adaptation of the large-scale circulation to the summer heating over the Tibetan Plateau [J]. Progress in Nature Science (in Chinese), 11 (1): 33-39.
- 刘新, 李伟平, 吴国雄. 2002. 夏季青藏高原加热和北半球环流年际变化的相关分析 [J]. 气象学报, 60 (3): 267-277. Liu X, Li W P, Wu G X. 2002. Interannual variation of the diabatic heating over the Tibetan Plateau and the northern hemispheric circulation in summer [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 60 (3): 267-277.
- 罗会邦, 陈蓉. 1995. 夏半年青藏高原东部大气热源异常对环流和降水的影响 [J]. 气象科学, 15 (4): 94-102. Luo H B, Chen R. 1995. The impact of the anomalous heat sources over the eastern Tibetan Plateau on the circulation over East Asia in summer half year [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 15 (4): 94-102.
- 孟祥新, 符淙斌. 2010. 一个区域地气耦合柱状模式的发展及其对半干旱区的模拟 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 141-151. Meng X X, Fu C B. 2010. Development of a coupled regional column model and its simulations in semi-arid areas [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 141-151.
- 孙力, 安刚. 2003. 北太平洋海温异常对中国东北地区旱涝的影响 [J]. 气象学报, 61 (3): 346-353. Sun L, An G. 2003. The effect of North Pacific sea surface temperature anomaly on the summer precipitation in Northeast China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 61: 346-353.
- 孙颖, 丁一汇. 2002. 青藏高原热源异常对1999年东亚夏季风异常活动的影响 [J]. 大气科学, 26 (6): 817-828. Sun Y, Ding Y H. 2002. Influence of anomalous heat sources over the Tibetan Plateau on the anomalous activities of the 1999 East Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (6): 817-828.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32 (1): 1-18. Tao S Y, Xu S Y. 1962. Some aspects of the circulation during the period of the persistent drought and flood in Yangtze and Huaihe valleys in summer [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 32: 1-18.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 225pp. Tao S Y. 1980. The Rainstorm over China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 225pp.
- 温敏, 施晓晖. 2006. 1998年夏季西太副高活动与凝结潜热加热的关系 [J]. 高原气象, 25 (4): 616-623. Wen M, Shi X H. 2006. Relationship between activity of West Pacific Subtropical High and condensation latent heating in summer of 1998 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 616-623.
- 吴国雄, 李伟平, 郭华, 等. 1997. 青藏高原感热气泵和亚洲夏季风 [M]//叶笃正. 赵九章纪念文集. 北京: 科学出版社, 116-126. Wu G X, Li W P, Guo H, et al. 1997. The sensible heat driven air pump over the Tibetan Plateau and the Asian summer monsoon [M]//Ye D Z. Collection in Memory of Dr. Zhao Jiuzhang (in Chinese). Beijing: Science Press, 116-126.
- 吴国雄, 刘屹岷. 2000. 热力适应、过流、频散和副高 I: 热力适应和过流 [J]. 大气科学, 24 (4): 433-446. Wu G X, Liu Y M. Thermal adaptation, overshooting, dispersion, and subtropical anticyclone. Part I: Thermal adaptation and overshooting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2000, 24 (4): 433-446.
- 吴国雄. 2004. 我国青藏高原气候动力学研究的近期进展 [J]. 第四纪研究, 24 (1): 1-9. Wu G X. 2004. Recent progress in the study of the Qinghai-Xizang Plateau climate dynamics in China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 24 (1): 1-9.
- 吴国雄, 毛江玉, 段安民, 等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展 [J]. 气象学报, 62 (5): 528-540. Wu G X, Mao J Y, Duan A M, et al. 2004. Recent process in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 2004, 62 (5): 528-540.
- 吴国雄, 刘屹岷, 刘新, 等. 2005. 青藏高原加热如何影响亚洲夏季的气候格局 [J]. 大气科学, 29 (1): 47-56. Wu G X, Liu Y M, Liu X, et al. 2005. How the heating over the Tibetan Plateau affects the Asian climate in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2005, 29 (1): 47-56.
- Yeh T C. 1950. The circulation of the high troposphere over China in the winter of 1945-1946 [J]. Tellus, 2 (3): 173-183.
- Yeh T C. 1957. On the formation of quasi-geostrophic motion in the atmosphere [J]. J. Meteor. Soc. Japan, the 75th Anniversary Volume, 130-134.
- 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 [J]. 气象学报, 28 (2): 108-121. Yeh T C, Lo S W, Chu P C. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 1957, 28: 108-121.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 279pp. Ye D Z, Gao Y X. 1979. Meteorology of the Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 279pp.
- Yin M T. 1949. A synoptic-aerologic study of the onset of the summer monsoon over India and Burma [J]. J. Meteor., 6: 393-400.

- Zhao P, Chen L X. 2001. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18: 106-116.
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2003. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 27 (5): 881-893.
- Zhao S R, Song Z S, Ji L R. 2003. Heating effect of the Tibetan Plateau on rainfall anomalies over North China during rainy season [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (5): 881-893.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 8-9.
- Zhao Z G. 1999. The Summer Drought-Flood in China and Their Environment Fields (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 8-9.
- 张琼. 1999. 南亚高压的演变规律、机制及其对区域气候的影响 [D]. 南京大学博士学位论文, 148pp.
- Zhang Q. 1999. The evolvement rule/mechanism and its affection on the regional climate [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University, 148pp.