

西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征^{* 1}

李永华^{1,2} 徐海明¹ 高阳华² 李 强¹
LI Yonghua^{1,2} XU Haiming¹ GAO Yanghua² LI Qiang¹

1. 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
2. 重庆市气象科学研究所, 重庆, 401147

1. *Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

2. *Chongqing Institute of Meteorological Sciences, Chongqing 401147, China*

2008-10-06 收稿, 2009-05-02 改回.

Li Yonghua, Xu Haiming, Gao Yanghua, Li Qiang. 2010. The characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the southwestern China. *Acta Meteorologica Sinica*, 68(6):932-943

Abstract Based on the NCEP/NCAR reanalysis monthly data and daily precipitation data for the 20 stations in the east of the southwestern China from 1959 to 2006, the characteristics of moisture transport associated with drought/flood in summer over the east of the southwestern China have been analyzed. The results show that there are two main water vapor paths directed to the area of the east of the southwestern China. One comes initially from the Tibetan Plateau and then turns toward the Bay of Bengal and reaches the east of the southwestern China through Burma and Yunnan province. The other comes from the south of the Bay of Bengal with the strong vapor transport band directed to the Indo-China Peninsula and the South China Sea merging with crossing equator vapor therein. The moisture turning north from south of Western Pacific Subtropical High (WPSH) contributes also to the east of the southwestern China. The intensity of the Indian Ocean Vapor Path (IOVP) is the strongest, and the one of the Pacific Ocean Path is the weakest associated with vapor transport in the east of the southwestern China. The intensity of the Tibetan Plateau Southern Side Path is far less than that of the IOVP in the Indian Ocean monsoon area. Over the Eastern Asian monsoon area the meridional moisture transport is stronger than the zonal one, whereas the zonal vapor transport is stronger than the meridional one over the Indian Ocean area. The summer rainfall in the east of the southwestern China is connected closely with changes in the zonal moisture transport, but there is no obvious relationship between this rainfall and changes in the meridional one. The precipitation over the east of the southwestern China is more prone to flood in case the water vapor transport of the southern IOVP is weak when the strong moisture transport of by the northern Indian and the eastern Asian monsoon result in the transport direction becoming more longitudinal over the Indian monsoon zone while becoming more latitudinal over the eastern Asian area, which causes the whole water vapor transport band tend to be more western, and conversely it tends to drought. Over the area the east of the southwestern China there are a net outcome in summer, and it is a weak water source with the most income entering through its southern border. In drought years the vapor flowing out is more dramatic than normal whereas in flood years there is weak net outcome. There is closely relationship of the vapor transport intensity with the 500 hPa and SST patterns.

Key words The east of the southwestern China, Drought/flood in summer, Moisture transport, Moisture path

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, 分析了西南地区东部夏季旱涝年的水汽输送特征。结果表明, 西南地区东部水汽来源主要有两个: 第 1 条主要来自青藏高原转向孟加拉湾经

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(40975058, 40633018)、重庆市自然科学基金计划重点项目(CSTC, 2008BA0022)、重庆市科技攻关项目(CSTC, 2009AC0125)、中国气象局省所科技发展专项(CMATG2008S09)。

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

缅甸和云南进入西南地区东部,第2条水汽经由孟加拉湾南部,强大的水汽输送带继续向东输送至中南半岛及南海,与南海越赤道气流所携带的水汽汇合后转向至西南地区东部,而由西太平洋副热带高压西侧转向的偏南水汽对向西南地区东部水汽输送也有影响。与西南地区东部夏季降水相联系的水汽通道中,印度洋水汽通道强度最强,太平洋水汽通道强度最弱。在印度季风区,偏北的高原南侧水汽通道(经向)强度远小于偏南的印度洋水汽通道。东亚季风区夏季水汽输送经向输送大于纬向输送,而印度季风区夏季水汽输送则是纬向输送大于经向输送。西南地区东部夏季降水与纬向通道的强度变化关系密切,而与经向通道的水汽输送强度变化关系不明显。当印度季风区南支水汽输送偏弱时,印度季风区北支(高原南侧)和东亚季风区向西的水汽输送偏强,使得以纬向输送为主的印度季风区经向水汽输送加大,而以经向输送为主的东亚季风区纬向水汽输送加大,从而使东亚地区的水汽输送带偏西,西南地区东部夏季降水偏多,可能出现洪涝,反之则可能出现干旱。西南地区东部夏季水汽有弱的净流出,是一个弱的水汽源区,南边界流入水汽量最多,干旱年整个区域水汽流出较常年明显,而洪涝年则有弱的净流入。夏季水汽通道水汽输送强弱变化与同期 500 hPa 高度场和 SST 场的分布形势密切相关。

关键词 西南地区东部,夏季旱涝,水汽输送,水汽通道

中图法分类号 P461

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(陶诗言等,1962;Filippo, et al,1996;孙力等,2003;梁平德等,2006;Ricardo, et al,2007;Diriba,2007;李永华等,2009)。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增加趋势,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。

大气中水汽输送和收支是研究全球大气环流持续和变化的一个重要方面,因为水汽是形成降水的必要条件之一。水汽输送分为水平输送和垂直输送两种,前者主要把海洋上的水汽带到陆地,是水汽输送的主要形式,后者由空气的上升运动,把低层的水汽输送到高空,是成云致雨的重要原因。通过对水汽输送的研究可以探讨气候的形成和天气过程的发生与发展,可以揭示包括大气水、地面水和地下水在内的水循环与水平衡的基本规律,因此引起了高度关注,不少气象专家对中国大陆的水汽输送问题进行了研究。谢义炳等(1959)指出中国夏季降水的两个水汽来源:一是从太平洋高压南沿以南风及东南风的形式进入中国内陆,二是印度低压的东南方以西南风的形式进入中国西南部。黄荣辉等(1998)分析了东亚季风区夏季风的水汽输送特征,并与印度季风区夏季水汽输送进行比较,指出两者水汽输送特征明显不同,东亚季风区夏季水汽输送经向输送要大于纬向输送,

而印度季风区夏季水汽输送则以纬向输送为主。丁一汇等(2003)通过水汽通量的势函数和流函数的计算分析了1998年中国大洪水时期的全球水汽背景,进而从雨情分析入手对水汽收支作诊断分析,得到了中国大洪水时期部分水汽收支图像,揭示了水汽循环的一些规律。Simmonds等(1999)指出中国东南部的水汽主要来自南海和孟加拉湾,而中纬度西风水汽输送对东北及华北的部分地区起主导作用。高登义等(1985,2003)和杨逸畴等(1987)对藏东南水汽通道进行了分析研究,指出雅鲁藏布江下游河谷是青藏高原四周向高原水汽输送的最主要水汽通道。Zhang(2001)的研究表明,印度季风区水汽输送强度和东亚季风区水汽输送强度存在反相关关系,即当印度季风区水汽输送强时则东亚地区的水汽输送偏弱。徐祥德等(2002)分析了南亚季风水汽输送关键区“大三角扇型”区域(以青藏高原地区为顶端,南海季风与印度季风涉及的低纬活动源区为底边)特征,指出夏季青藏高原地区是中国东部地区夏季长江流域梅雨带西边界重要水汽源或“转运站”,大三角区域热源强信号源区域的水分循环时空演变、遥相关特征及其对亚洲季风爆发的综合影响等均是认识中国及东亚旱涝异常成因的重要科学问题。谢安等(2002)研究了夏季风期间长江中下游地区水汽输送的气候特征,指出来自孟加拉湾经中南半岛和来自华南的水汽输入是长江中下游地区水汽的主要来源,孟加拉湾地区及南海地区对长江中下游地区水汽输送的长时间维持是造成1998年长江流域洪涝的主要原因。陈艳等(2006)对水汽输送对云南夏季风爆发和初夏5月降水异常的影响进行了研究,发现云南5月降水量显著的年际变化与大尺度水汽输送异常密切相关。周晓霞等

(2008)分析了华北汛期水汽输送的时空特征及其与降水的关系,发现不同水汽通道对华北降水的影响区域不同,华北汛期水汽主要来自亚洲季风区水汽输送,其次是西风带的水汽输送。

对于西南地区东部及其邻近地区的水汽输送问题,目前也有一些研究(周长艳等,2005a,2005b,2008;蒋兴文等,2007),这对认识西南地区东部的水汽输送特征有很好的借鉴作用,但相对于中国其他地区尤其是东部地区而言,类似的研究还是比较少的,需要作进一步的工作。另外西南地区东部位于青藏高原东侧,且距离印度洋也较近,该地区天气气候既受青藏高原的影响,同时也受南亚(印度)季风和东亚季风的影响,因此该地的天气气候成因及水汽输送特征非常复杂。以往针对西南地区东部及其邻近地区的水汽输送问题的分析,仅限于讨论本区域水汽输送异常特征、水汽来源或水汽收支的某个方面,而对影响该区域的水汽通道异常特征以及水汽输送异常时相应的大气海洋背景等问题的讨论不多,缺乏对本区域水汽输送定量、系统的分析,因此,在借鉴和综合已有的研究方法及成果的基础上,拟对影响西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征、影

响该地的不同水汽通道及水汽收支状况、水汽输送异常时的大气和海洋背景等进行较为系统的分析研究,从而为夏季旱涝短期气候预测提供背景。需要特别指出的是,严格意义的水汽输送应是水分子的输送,由于水汽有相变(如降水、蒸发、升华等),大气水分不具有守恒示踪属性,很难追踪单个水汽分子的运动路径。因此,本文所讨论的水汽输送应是和环流形势相关联的大尺度水汽场的平流、辐合和辐散运动。另外,本文所提及的“水汽通道”实际上主要反映的是相关地区的大气水分和环流形势。

2 资料和方法

本文所指的西南地区东部是指(27°—32°N, 105°—110°E)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西南地区东部20个台站(表1)1959—2006年逐日降水量资料和NCEP/NCAR月平均海表温度场(SST)、高度场(h)、纬向风(u)、经向风(v)、比湿(q)、地面气压(p_s)等再分析资料。对水汽的整层积分的计算,在垂直方向上取1000、925、850、700、600、500、400、300 hPa共8层。

表1 西南地区东部20个测站

Table 1 List of the 20 observation stations in the east of the southwestern China

站名	经度(E)	纬度(N)	站名	经度(E)	纬度(N)	站名	经度(E)	纬度(N)
阆中	105°58'	31°35'	万州	108°24'	30°46'	西阳	108°46'	28°48'
巴中	106°46'	31°51'	恩施	109°28'	30°17'	吉首	109°44'	28°19'
达州	107°30'	31°12'	沙坪坝	106°28'	29°35'	遵义	106°53'	27°42'
奉节	109°30'	31°03'	涪陵	107°25'	29°45'	湄潭	107°28'	27°46'
遂宁	105°35'	30°30'	来凤	109°25'	29°31'	思南	108°15'	27°57'
南充	106°06'	30°47'	檀梓	106°50'	28°08'	黔西	106°01'	27°02'
梁平	107°48'	30°41'	习水	106°13'	28°20'			

周天军等(1999)的研究表明,水汽输送中定常分量比瞬变分量大一个量级,是决定水汽输送的主要部分,特别是在陆地上,因此本文采用月平均资料计算水汽输送的定常分量。

单位气柱大气水汽输送通量矢量 \mathbf{Q} 的计算公式为

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp \quad (1)$$

纬向和经向水汽通量为

$$Q_\lambda = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} u q dp \quad (2)$$

$$Q_\varphi = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} v q dp \quad (3)$$

水汽输送通量散度的计算公式为

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} \nabla \cdot (\mathbf{V}q) dp \quad (4)$$

边界积分的水汽输送表示为

$$F_u = \int Q_\lambda a d\varphi \quad (5)$$

$$F_v = \int Q_\varphi a \cos\varphi d\lambda \quad (6)$$

区域的总水汽收支为

$$D_s = \sum (F_u, F_v) = F_1 - F_0 \quad (7)$$

式(1)–(7)中, g 是重力加速度, \mathbf{V} 是该单位气柱各层大气的风速矢量。 F_1 为水汽流入总量, F_0 为水汽流出总量, a 为地球半径。

为了反映区域的降水总体状况,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1959—2006年西南地区东部夏季区域降水指数 γ ,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序列插补。

$$\gamma = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\bar{R}_i} + \frac{n^+}{n} \right) \times 100\% \quad (8)$$

式(8)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。降水指数 γ 可以较好地刻画区域降水的多寡,其值越大,表示区域降水越多,正常值为150。

3 水汽输送与西南地区东部夏季旱涝的关系分析

3.1 西南地区东部夏季旱涝的变化

从西南地区东部1959—2006年夏季区域降水指数的变化情况(图1)可以看到,在整个时段内,西南地区东部夏季降水略有增加的趋势。在20世纪60和70年代,降水指数总体偏小,表明这段时间总体偏旱,而在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、1980和1993年是降水偏多最为明显的年份,而2006和1972年降水偏少最

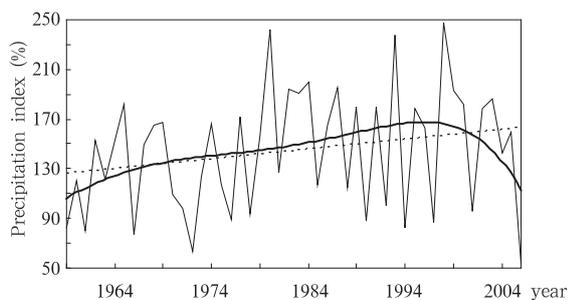


图1 西南地区东部1959—2006年夏季降水指数序列
(细实线:指数序列;虚线:线性趋势;
粗实线:5阶多项式拟合)

Fig. 1 Precipitation index series in summer in the east of the southwestern China from 1959 to 2006
(thin line: index series; dashed line: the line trend;
thick line: 5th order multinomial fitting)

为明显。根据降水指数序列及早涝实况,本文分别确定了9个干旱年($\gamma < 90$)和9个洪涝年($\gamma > 185$),9个典型干旱年有2006、1972、1966、1961、1959、1994、1997、1990和1976年,9个典型洪涝年有1998、1980、1993、1984、1987、1982、1999、1983和2003年。

3.2 夏季水汽输送的多年平均状况

从48年(1959—2006年)平均的夏季(6—8月)整层积分水汽输送矢量分布(图2a)可以看到,夏季西北气流退缩到 35°N 以北,中国西北及东北的北部盛行偏西气流,而中国南部及东部地区盛行偏南气流,夏季黄河中下游以南广大地区为夏季风控制,偏南和西南气流携带丰沛水汽可送达华北平原甚至东北地区。西南地区东部以西南风水汽输送为主,水汽来源主要有两个:第1条主要来自于青藏高原转向孟加拉湾经缅甸、云南进入西南地区东部,这条水汽输送的主要方向为西南偏西方向,其上游可追溯到近赤道的南印度洋,水汽从那里由东风向西输送,在非洲东海岸越过赤道,转向阿拉伯海,经印度半岛及其南部海洋进入孟加拉湾,其最强水汽输送中心在阿拉伯海及孟加拉湾;第2条水汽经由孟加拉湾南部,强大的水汽输送带继续向东输送至中南半岛及南海,和南海越赤道气流所携带的水汽汇合后转向至西南地区东部,这条水汽输送主方向为西南偏南方向。这两条水汽汇合在西南地区东部形成西南—东北向的水汽输送。实际上,由西太平洋副热带高压西侧转向的偏南水汽也对西南地区东部的水汽供应有影响,但与前面的两条水汽输送相比相对次要,在平均图上不明显。从图2a也可以看到,西南地区也是西南向水汽(尤其是南亚季风区水汽)进入中国东部地区的重要通道,同时西南地区东部本身也位于水汽通道大值区及其边缘,受年际变化的影响较大。

水汽通量散度指单位时间汇入单位体积或从该体积辐散出去的水汽量,散度为正的地区表示水汽自该地区向四周辐散,称该地区为水汽源;散度为负的地区表示四周有水汽向该处汇集,称该地区为水汽汇。从水汽输送通量散度分布(图2b)来看,最强的水汽辐合中心位于阿拉伯海东南部、印度半岛北部、孟加拉湾、青藏高原南侧以及中国长江流域中下游地区直至日本及其以东洋面,另外在中南半岛南部至南海、菲律宾至赤道太平洋也为较强的水汽辐

合中心,这些水汽辐合区正好位于行星尺度水汽输送带大值区或附近地区,而这些水汽通量强辐合区也往往正好对应降水大值区,这从降水的实际分布情况的分析中已得到证实(周长艳等,2005c)。最强的水汽辐散中心位于青藏高原以南的印度北部地区

及孟加拉湾以北地区和阿拉伯海北部,这是影响西南地区东部乃至中国东部地区最重要的水汽源,另外印度洋总体也为水汽源区。西南地区东部水汽通量散度总体为小的正值区,说明该地区夏季为微弱的水汽源区。

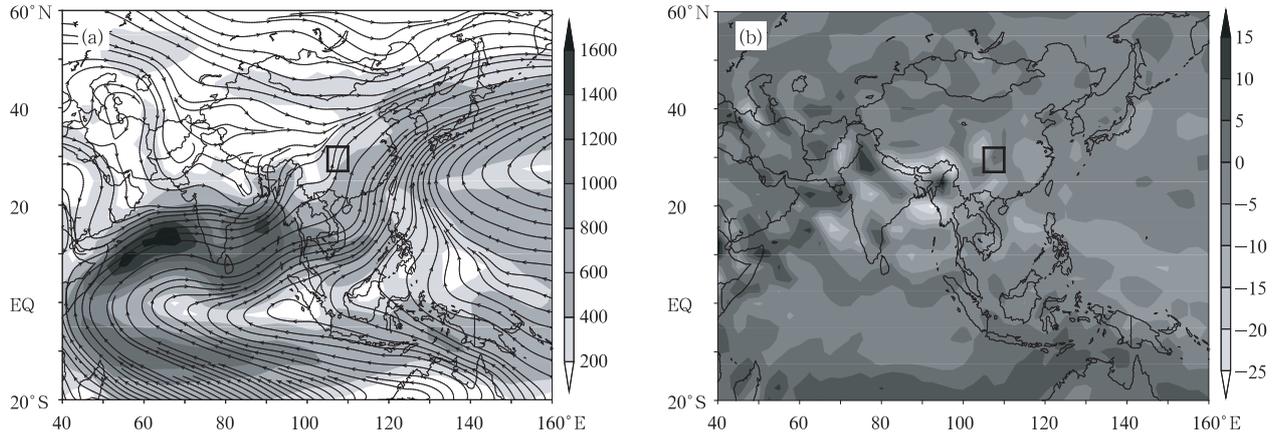


图2 1959—2006年夏季平均水汽通量(a,单位:kg/(m·s))及其散度(b,单位: 10^{-5} kg/(m²·s))

(矩形框为西南地区东部)

Fig. 2 Summer (Jul-Aug) moisture transport vectors (a, unit: kg/(m·s)) and its flux divergence (b, unit: 10^{-5} kg/(m²·s)) averaged over 1959–2006 (the rectangle frames indicate the position of the east of Southwest China)

3.3 不同水汽通道与西南地区东部夏季降水的关系

图3显示的是1959—2006年西南地区东部区域降水指数与整层积分的水汽通量的相关分布。从区域降水指数和水汽输送通量矢量大小的相关图(图3a)可见,显著正相关区主要位于青藏高原以南的印度北部至中国云南,另一个显著相关区在长江中下游直至日本以南的洋面上,还有一个正相关区位于菲律宾以东洋面上,主要的负相关区位于咸海—中国偏北地区(包括新疆、甘肃北部、内蒙古、东北地区)—日本北部及库页岛,另一个负相关区位于阿拉伯海—印度南部—孟加拉湾南部—中南半岛南部—菲律宾以西。区域降水指数和纬向水汽输送通量的相关场(图3b)分布与图3a大体相似,主要的区别在图3a中菲律宾以东洋面的正相关区为图3b负相关区取代,而其他主要相关区基本一致,只是范围和强度略有差异,这与徐祥德等(2003)的计算结果基本一致。区域降水指数与经向水汽通量的相关分布(图3c)显示,沿阿拉伯海北部—印度北部—青藏高原南部及孟加拉国、缅甸及中国云南西部—华北、蒙古东部及中国东北西南部—东北东北部—俄罗斯远东地区出现西南—东北走向“+”、“-”相间

的分布,其次沿阿拉伯海南部—赤道东印度洋—澳大利亚北部地区出现西北—东南向的显著负相关区。综合图2和图3,并参照周晓霞等(2008)定义水汽通道的方法,定义了5条与西南地区东部夏季降水相联系的水汽通道:(1)高原南侧通道(25°—30°N,100°E)的纬向通量,主要表征来自印度洋和孟加拉湾转向或经青藏高原转向向东输送的水汽强度,实际代表印度季风区偏北的西风水汽支输送强度;(2)印度洋通道(10°—20°N,100°E)的纬向通量,主要表征印度季风区偏南的西风水汽支输送强度;(3)太平洋通道(10°—20°N,130°E)的纬向通量,主要表征西太平洋副热带高压南侧的东风水汽输送强度(定义此通道东风为正),虽然它不是西南地区东部的最主要水汽供应通道,但其与西太平洋副热带高压等环流系统相联系,影响水汽输送路径和强度;(4)孟加拉湾通道(22.5°N,85°—100°E)的经向通量,本通道主要表征来自孟加拉湾向北输送的水汽强度;(5)中南半岛南海通道(22.5°N,100°—110°E)的经向通量,本通道主要表征来自印度洋和孟加拉湾在中南半岛转向以及来自南海的水汽。高原南侧通道、印度洋通道和孟加拉湾通道所输送的水汽主

要体现西南季风(印度季风)输送水汽的特征,水汽主要来源于印度洋;而太平洋通道水汽主要体现东南季风输送水汽的特征,水汽主要来源于热带太平

洋;中南半岛南海水汽通道则比较复杂,它处于印度季风及东南季风的过渡区域,水汽来源比较复杂,既有来自印度洋的,也有来自太平洋的,还有来自南海

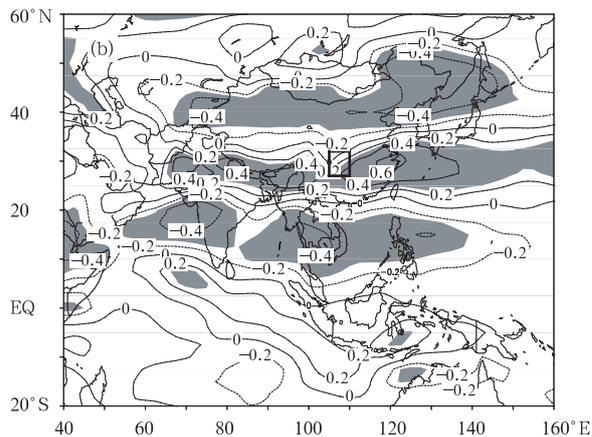
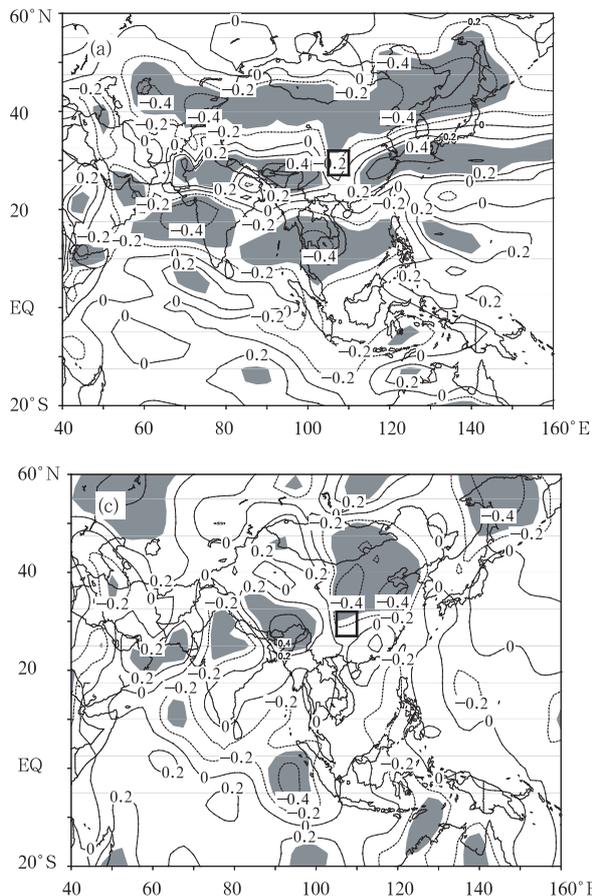


图3 西南地区东部区域降水指数与水汽
 输送相关场分布

(阴影区为相关系数通过95%信度检验的区域;
 a. 水汽输送通量矢量大小, b. 纬向水汽输送通量,
 c. 经向水汽输送通量)

Fig. 3 Distribution of the correlation coefficients
 between the vapor transport and the rainfall index
 during summer in the east of the southwestern China
 (the area passed the test at the 95% confidence level
 is shaded. (a) magnitude of vertically integrated
 water vapor transport vectors, (b) zonal moisture
 transport, (c) meridional moisture transport)

越赤道气流的。

各水汽通道1959—2006年平均值及其各水汽通道序列与西南地区东部夏季降水指数的相关系数(表2)表明,印度洋水汽通道强度最强,太平洋水汽通道强度最弱,经向的孟加拉湾通道和中南半岛南海通道的强度基本相当,其强度强于纬向的高原南侧通道和太平洋通道。在印度季风区,偏北的高原南侧经向水汽通道远小于偏南的印度洋经向水汽通道。总体而言,东亚季风区夏季水汽的经向输送要大于纬向输送,而印度季风区夏季水汽输送则是纬向输送大于经向输送。从相关系数来看,西南地区东部夏季降水与纬向通道的强度变化关系密切,而与经向通道的水汽输送强度变化关系不显著。高原南侧通道的西风输送强度和太平洋通道的东风水汽输送强度与西南地区东部夏季降水呈显著的正相关,而印度洋通道的西风水汽输送强度与西南地区

东部夏季降水呈显著的负相关。从表3可以看出,印度洋通道水汽输送强度与高原南侧通道和太平洋通道水汽输送强度呈显著的反相关关系,表明当印度季风区南支水汽输送偏强时,则印度季风区北支(高原南侧通道)水汽输送偏弱,同时东亚季风区向西的水汽输送也偏弱。从表3还可以看到,太平洋通道东风水汽通量与高原南侧西风水汽通量、孟加拉湾通道向北的水汽通量和中南半岛南海通道向北的水汽通量均为显著的正相关。综上可以初步得出:当通过太平洋通道向西水汽输送较强时,可以抑制印度洋向东的水汽输送,使得印度洋的水汽输送偏西偏北,在高原南侧转向或经高原向西南地区东部“转运”的水汽偏多,同时在孟加拉湾和中南半岛、南海向北输送的水汽也增加,这使得以纬向输送为主的印度季风区经向水汽输送加大,而以经向输送为主的东亚季风区纬向水汽输送加大,使得东亚地

区的水汽输送带偏西;反之,当太平洋向西水汽输送较弱时,则印度洋向东的水汽输送加强,这样印度洋通道水汽可以一直向东输送到菲律宾以东洋面,整个水汽输送带偏东,使得转向进入西南地区东部乃至中国大陆的水汽减少,从而造成该地区出现夏季干旱。

表2 水汽通道的平均值及其

与西南地区东部夏季区域降水指数的相关系数

Table 2 Mean values (unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) for the moisture paths and their correlation coefficients with the rainfall indexes in the east of the southwestern China during summer

水汽通道	平均值 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$	相关系数
高原南侧通道	52.9	0.48*
印度洋通道	255.5	-0.44*
太平洋通道	17.4	0.35*
孟加拉湾通道	102.6	0.10
中南半岛南海通道	104.1	0.02

注: *表示相关显著性通过了95%的信度。

表3 各水汽通道的相关系数

Table 3 The correlation coefficients between the five moisture paths

水汽通道	高原南侧通道	印度洋通道	太平洋通道	孟加拉湾通道	中南半岛南海通道
高原南侧通道	1.00	-0.38*	0.34*	0.11	0.42*
印度洋通道	——	1.00	-0.63*	-0.20	-0.09
太平洋通道	——	——	1.00	0.34*	0.50*
孟加拉湾通道	——	——	——	1.00	0.27
中南半岛南海通道	——	——	——	——	1.00

注: *表示相关显著性通过了95%的信度。

(* means that the corresponding significance tested at the 95% confidence level)

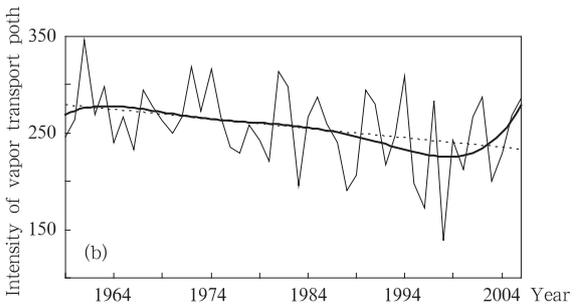
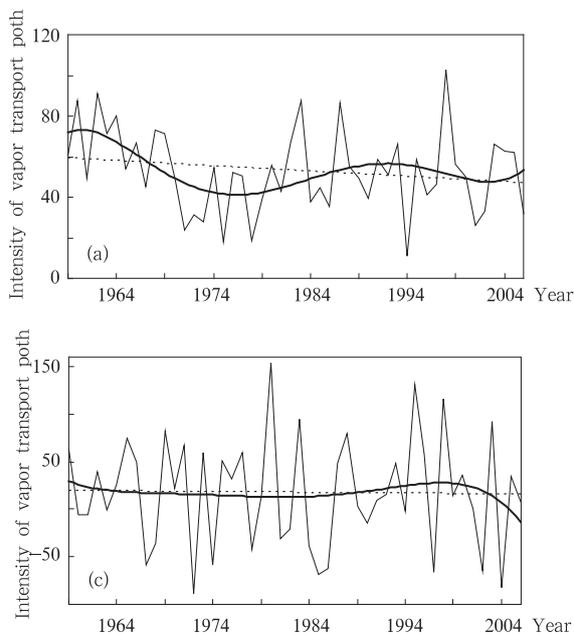


图4 1959—2006年各水汽通道强度(单位: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)变化
(a. 高原南侧通道, b. 印度洋通道, c. 太平洋通道)
Fig. 4 Intensity changes of the vapor transport paths (unit: $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)
(a. the southern side of the Tibetan Plateau, b. the India Ocean, c. the Pacific)

由上面的分析可见,西南地区东部夏季降水与高原南侧通道、印度洋通道、太平洋通道的水汽输送变化的相关关系密切,下面进一步分析3个通道水汽输送与西南地区夏季旱涝的关系。

图4显示的是高原南侧通道、印度洋通道和太平洋通道水汽输送强度的变化情况。1959—2006年,高原南侧通道和印度洋通道水汽输送强度总趋势是下降的,太平洋通道水汽输送强度则基本没有变化,表明在这期间整个印度季风区水汽输送呈减弱趋势,而东南季风区水汽输送强度并没有明显的变化趋势。但从近年来的变化趋势来看,印度季风区水汽输送有所加强,而东南季风区水汽输送强度则有所减弱,这与近年来西南地区东部的降水略有偏少的变化趋势一致。

从西南地区东部夏季典型旱涝年高原南侧通道、印度洋通道、太平洋通道水汽输送强度的比较(表4)来看,干旱年,高原南侧通道和太平洋通道的水汽输送强度较常年偏弱,印度洋通道的水汽输送强度较常年偏强,洪涝年正好相反,这与上面的相关分析结果一致。根据图5,我们选择了上述3个通道的强弱年各5年,分析它们异常时相应的西南地区东部的降水情况(表5),从表5可见,一般来说,当高原南侧通道和太平洋通道水汽输送偏强(偏弱)时,西南地区东部夏季降水可能偏多(偏少),易出现洪涝(干旱)灾害;当印度洋通道水汽输送偏强(偏

表4 典型旱涝年各水汽通道强度比较
Table 4 Comparison of intensity changes between the vapor transport paths

干旱年	高原南侧通道	印度洋通道	太平洋通道	洪涝年	高原南侧通道	印度洋通道	太平洋通道
2006	31.9(-)	286.0(+)	8.6(-)	1998	102.6(+)	138.2(-)	116.1(+)
1972	31.5(-)	318.6(+)	-88.8(-)	1980	55.7(+)	220.2(-)	154.1(+)
1966	66.5(+)	232.4(-)	49.0(+)	1993	65.9(+)	247.8(-)	47.9(+)
1961	49.3(-)	346.6(+)	-5.5(-)	1984	37.9(-)	267.1(+)	-38.8(-)
1959	60.8(+)	246.2(-)	63.9(+)	1987	86.5(+)	239.5(-)	48.3(+)
1994	10.9(-)	308.7(+)	-1.9(-)	1982	66.4(+)	297.5(+)	-20.9(-)
1997	46.4(-)	283.4(+)	-65.9(-)	1999	56.2(+)	242.1(-)	14.5(-)
1990	39.2(-)	294.8(+)	-14.5(-)	1983	87.5(+)	194.9(-)	94.4(+)
1976	52.0(-)	235.4(-)	32.1(+)	2003	66.2(+)	200.8(-)	92.3(+)
平均	43.2(-)	283.6(+)	-2.6(-)	平均	69.4(+)	227.6(-)	56.4(+)

注:括号内“+”“-”分别表示相对于平均值的距平符号。

(“+”or“-”in bracket stands for the anomaly sign against the mean)

表5 各通道强弱年对应的西南地区东部夏季降水指数

Table 5 Indexes of summer rainfall in the east of the southwestern China for the vapor transport paths in strong or weak years

通道	类型	年份(括号内为降水指数值)					指数平均
高原南	偏强年	1998(247.5)	1962(153.3)	1960(120.8)	1983(190.8)	1987(194.7)	181.4
侧通道	偏弱年	1994(82.9)	1975(117.1)	1978(93.9)	1971(97.7)	2001(95.3)	97.3
印度洋	偏强年	1961(79.8)	1972(63.0)	1974(166.7)	1981(127.5)	1994(82.9)	104.0
通道	偏弱年	1998(247.5)	1996(162.8)	1988(114.6)	1983(190.8)	2003(186.0)	180.3
太平洋	偏强年	1980(242.1)	1995(179.0)	1998(247.5)	1983(190.8)	2003(186.0)	209.1
通道	偏弱年	1972(63.0)	2004(142.7)	1985(117.5)	1997(86.7)	2002(178.9)	117.8

弱)时,西南地区东部夏季降水可能偏少(偏多),易出现干旱(洪涝)。由此可见,西南地区东部夏季旱涝年与上述3个水汽通道的强弱变化有密切关系。

3.4 夏季西南地区东部的水汽收支

为了进一步分析西南地区东部的水汽收支情况,本文计算了上述确定的9个干旱年和9个洪涝年各边界及区域的水汽收支(表6)。从表6可以看出,1959—2006年平均而言,西南地区东部的水汽输入来自南边界的量最大,是西边界流入量的4倍多,而水汽从东边界流出的量比北边界略大,总体而言,西南地区东部夏季水汽有弱的净流出,是一个弱的水汽源区,这与通量散度(图2b)的计算结果一致。干旱年整个区域水汽流出较多年平均明显,而洪涝年则有弱的净流入;干旱年的西边界水汽流入较常年偏弱,而洪涝年水汽流入较常年偏强;东边界在干旱年流出较常年偏弱,而洪涝年偏强;南边界干旱年与洪涝年弱于多年平均或基本相当,南边界的水汽流入量与该地区的夏季旱涝关系并不明显;北边界干旱年流出的水汽量大于多年平均而洪涝年则相反;在干旱年,东边界流出量小于北边界,而洪涝年则是东边界流出量远大于北边界。由此可见,西南地区东部夏季各边界(除南边界)和区域水汽收支

旱涝年明显不同。

表6 干旱年和洪涝年各边界和区域水汽收支(单位:10⁵ kg/s)

Table 6 The moisture budget (unit:10⁵ kg/s) in drought and flood years for the whole area as well as each boundary

	西边界	东边界	南边界	北边界	区域收支
干旱年	113.4	333.3	588.0	391.1	-23.0
洪涝年	166.5	512.7	538.9	190.8	1.9
多年平均	130.1	423.5	598.0	315.3	-10.7

4 水汽输送异常时的大气环流和海温分布特征

前面的分析指出,西南地区东部水汽输入量以南边界为最大,但西南地区东部夏季降水与纬向的水汽输送变化的关系更密切,纬向水汽输送异常变化会引起西南地区东部夏季降水异常,那么水汽输送为什么会异常变化呢?一般来说,海洋是水汽的主要源地,海洋的性状改变如海温变化等可能对水汽量的供应有影响,同时水汽输送的强度、路径等也受制于大气环流,海洋和大气本身也存在复杂的相互作用,某区域的水汽输送还与地形有关。下面对上述的3个通道水汽输送异常时的大气环流和海温特征进行初步分析。

图 5 表示的是高原南侧通道、印度洋通道和太平洋通道强弱年夏季 500 hPa 高度场的距平差值场(图 5a₁—5c₁)及相关场(图 5a₂—5c₂)分布,以及西南地区东部夏季典型涝年和旱年夏季 500 hPa 高度场的距平差值场(图 5d₁)和降水指数与同期夏季 500 hPa 高度场的相关(图 5d₂)分布,从图可见,距平场和相关场的分布比较一致。从图 5a 可以看出,高原南侧通道的向东水汽输送偏强的年份,西太平洋副热带高压偏西偏南偏强,同时在乌拉尔山附近和鄂霍茨克海地区出现阻塞高压,亚洲中纬度地区高度场偏低,最大低值中心位于华北至日本以东洋面,表明中纬度西风带位置偏南,总体来说东亚地区高度场存在“+ - +”的距平分布型,而同时印度低压偏弱;从图 5c 可以看到,太平洋通道向西水汽输送偏强的年份,夏季 500 hPa 高度场的分布与高原南侧通道偏强年份类似,显著的特点也是在东亚地区高度场呈“+ - +”的距平分布型,这与西南地区东部夏季多雨(洪涝)年的 500 hPa 高度距平场分布(图 5d)相似。从图 5b 可见,当印度洋通道水汽输送偏强时,东亚地区高度场呈“- + -”的距平分布形势,印度低压偏强,与前两者的分布形势相反,也与西南地区东部的多雨环流形势分布相反。由上分析可知,3 个通道水汽输送强弱变化与 500 hPa 高度场的分布型密切相关,当东亚地区高度场呈“+ - +”的距平分布型时,则此时西太平洋高压偏强偏南偏西,从而引导太平洋通道向西的水汽输送加强,也抑制了印度洋通道水汽的向东输送,同时印度低压也偏弱,越赤道气流总量减弱,低压南侧的西风减弱,因此印度洋水汽向东输送也减弱,南亚季风水汽在较偏西的地方向北转向,使得高原南侧向东的水汽输送加强;反之,当东亚地区高度场呈“- + -”的距平分布型时,则此时西太平洋高压偏弱偏北偏东,太平洋向西的水汽输送减弱,印度洋水汽向东输送可直达菲律宾以东,同时印度低压也偏强,低压南侧的西风加强,因此印度洋水汽向东输送也加强,同时南亚季风水汽向北转向也偏东,从而高原南侧向东的水汽输送也减弱。

图 6 表示的是高原南侧通道、印度洋通道和太平洋通道强弱年夏季 SST 场的距平差值场(图 6a₁—6c₁)及相关场(图 6a₂—6c₂)分布,以及西南地区东部夏季典型涝年和旱年夏季 SST 场的距平差值场(图 6d₁)和降水指数与同期夏季 SST 场的相关(图 6d₂)分布,距平场和相关场吻合较好。从图 6a 可见,当高原南侧通道水汽输送偏强时,对应的海表温度分布特点是:在印度洋地区,阿拉伯海、孟加拉湾和赤道东印

度洋海温偏高,而南印度洋海温偏低,在太平洋地区,赤道中东太平洋偏南侧海温和南海海温偏高,而黑潮区及西风漂流区和南太平洋东部海温偏低。印度洋通道水汽输送偏强时海温分布(图 6b)特点是:在印度洋地区,阿拉伯海、孟加拉湾及东印度洋海温偏低,在太平洋地区,南海、菲律宾附近洋面、澳大利亚东部洋面以及赤道中东太平洋地区偏南地区海温偏低,赤道中东太平洋及黑潮区和西风漂流区海温偏高。太平洋通道水汽输送偏强时海温分布(图 6c)特点是:在印度洋地区,阿拉伯海、孟加拉湾及东印度洋海温偏高,在太平洋地区,南海、菲律宾东北太平洋海温偏高,赤道中东太平洋及美国西海岸以西附近洋面海温偏低。西南地区东部夏季降水偏多的海温分布(图 6d)特点是:在印度洋地区,孟加拉湾和赤道东印度洋海温偏高,在太平洋,南海及菲律宾附近地区洋面海温偏高,西风漂流区海温偏低,而赤道太平洋中东部南侧海温偏高,总体说来,降水偏多时两大洋海温的分布与高原南侧通道、太平洋通道偏强时的海温分布相类似,而与印度洋通道水汽输送偏强时的海温分布大体相反。综上所述可见,影响高原南侧通道、印度洋通道和太平洋通道水汽输送强弱的关键区为印度洋地区的阿拉伯海和孟加拉湾,还有太平洋地区的南海、西风漂流区及赤道东太平洋南侧区域(10°—20°S, 140°—80°W),当阿拉伯海和孟加拉湾海温偏高(偏低)、南海及其附近洋面和赤道东太平洋南侧区域海温偏高(偏低),而西风漂流区海温偏低(偏高)时,高原南侧通道和太平洋通道水汽输送偏强(偏弱),印度洋通道水汽输送偏弱(偏强),西南地区东部夏季降水可能偏多(偏少)。实际上,当夏季阿拉伯海和孟加拉湾海温偏高时,可引起南亚夏季风偏弱(谷良雷等, 2006),同时由于下垫面海温的升高引起印度低压也偏弱,低压南侧的西风减弱,使得印度洋通道向东的水汽输送减弱,同时北印度洋海温的异常升高还能导致西太平洋副热带高压加强西伸(吴国雄等, 2000),从而加强太平洋通道向西的水汽输送,反之亦然。南海海温偏高时,南海热带辐合带活跃,使得经向哈得来环流发展,造成西太平洋副热带高压脊加强西伸,位置偏南(陈烈庭, 1991),另外当西风漂流区海温偏低,而赤道东太平洋附近地区海温偏高时(北太平洋海温北低南高),出现类似厄尔尼诺现象时,也会增强哈得来环流,同样也会造成西太平洋副热带高压脊加强西伸,位置偏南,这种情况下,太平洋通道向西输送的水汽沿着副高南侧能到达更偏西的地区且强度偏强。

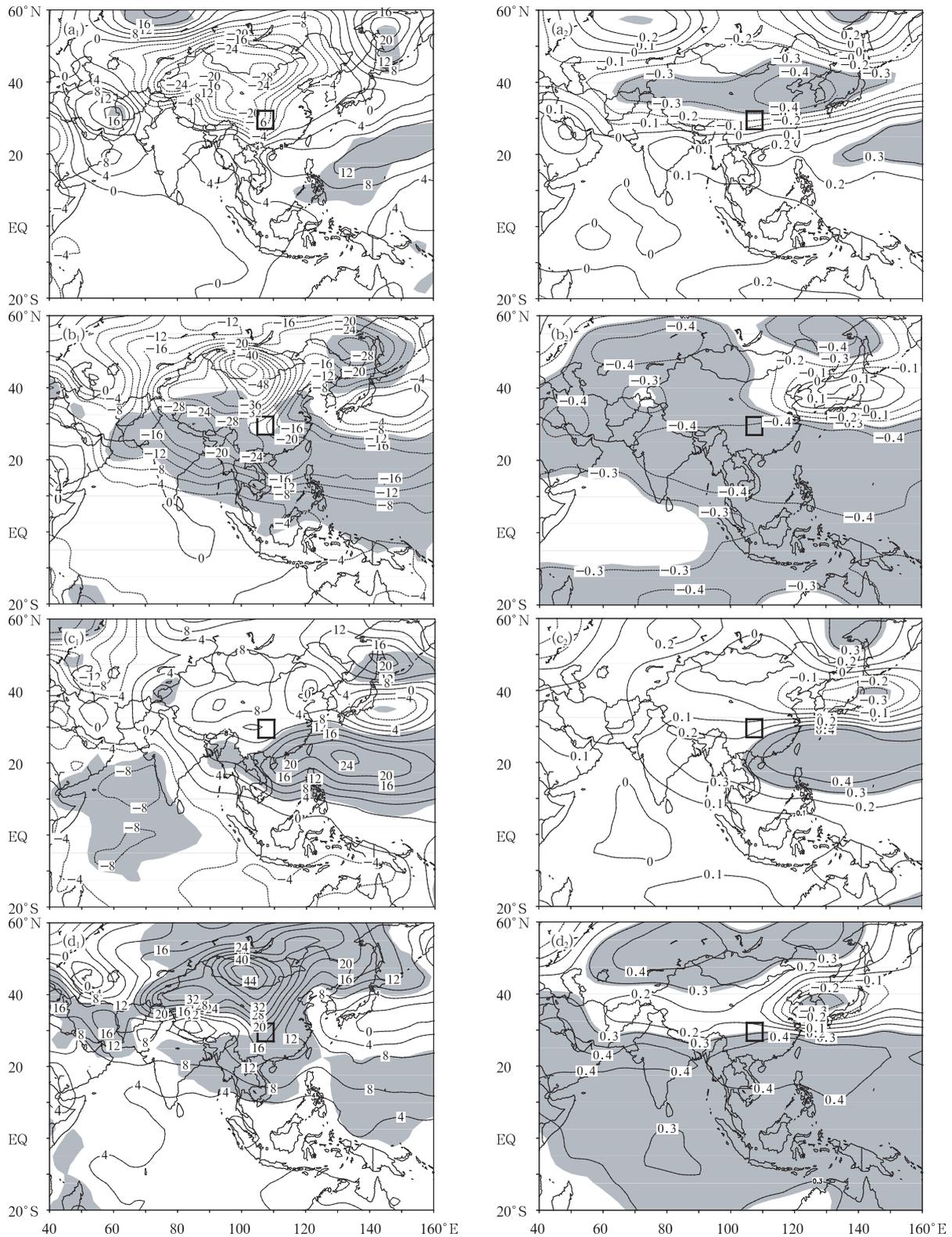


图5 水汽通道强度强弱(西南地区东部旱涝)年夏季 500 hPa 高度场的距平差值($a_1 - d_1$)/相关($a_2 - d_2$)场分布 (阴影区为 t 检验/相关系数通过 95% 信度检验的区域; a. 高原南侧通道, b. 印度洋通道, c. 太平洋通道, d. 降水指数)
 Fig. 5 Fields of the departure ($a_1 - d_1$) at 500 hPa in summer/the correlation coefficients ($a_2 - d_2$) between the vapor transport for the vapour paths or the rainfall index and the 500 hPa height; the area passed the t -test at the 95% confidence level is shaded. (a) the southern side of the Tibetan Plateau; (b) the India Ocean; (c) the Pacific and (d) the rainfall index

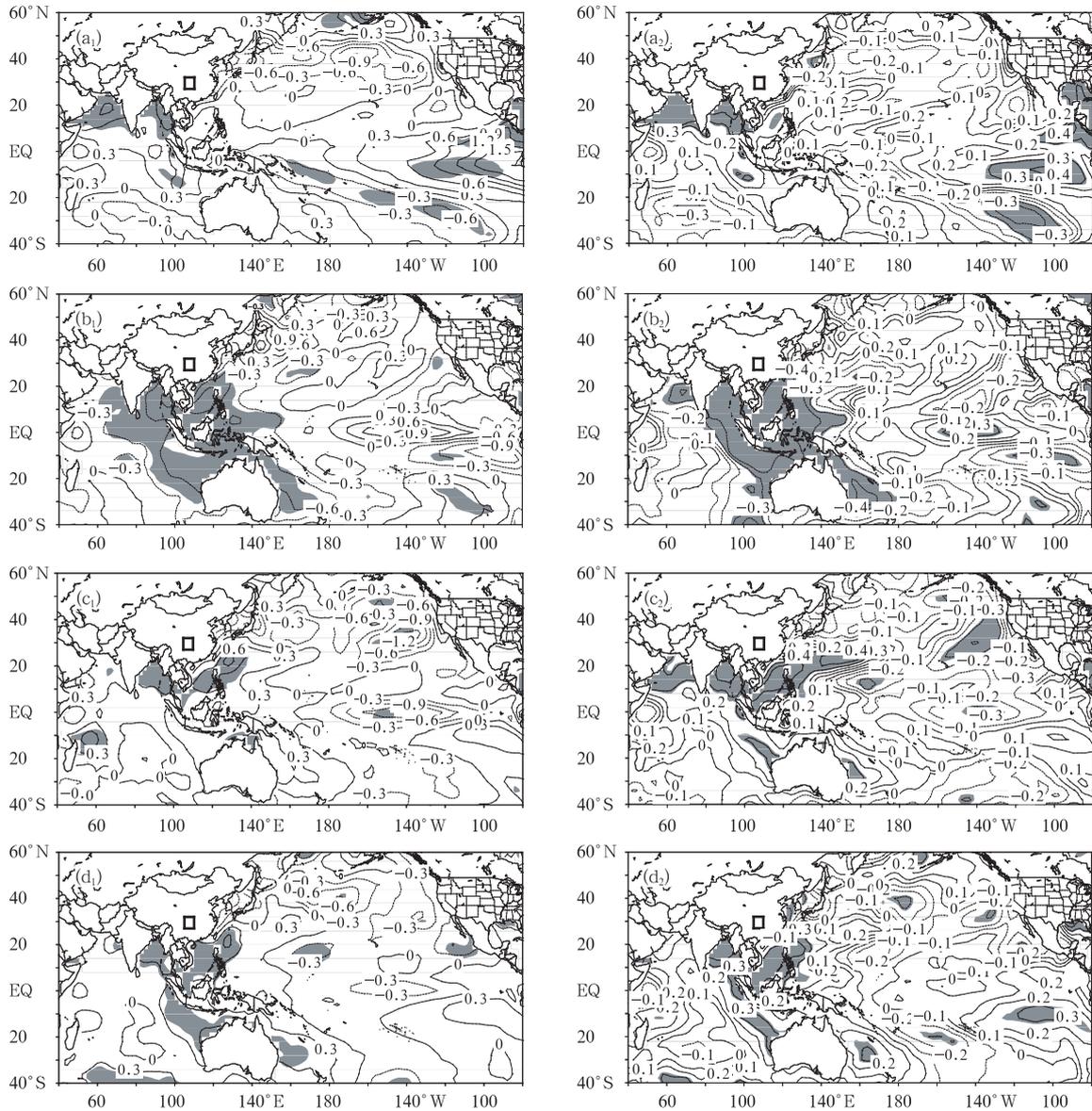


图6 同图6,但为 SST
Fig.6 The same as Fig.6 but for SST

由上分析可知,水汽通道水汽输送强弱的变化与海温和大气环流的变化密切相关,而海温主要是通过影响大气环流而影响水汽通道的输送路径和强度。

5 结论与讨论

本文对影响西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征进行了分析,指出西南地区东部水汽来源主要有两个:第1条主要来自于青藏高原转向和孟加拉湾经缅甸和云南进入西南地区东部,第2条水汽经由孟加拉湾南部,强大的水汽输送带继续向东输送

至中南半岛及南海,和南海越赤道气流所携带的水汽汇合后转向至西南地区东部,而由西太平洋副热带高压西侧转向的偏南水汽对西南地区东部水汽输送强弱也有影响。印度洋和孟加拉湾偏北地区是西南地区东部重要的水汽源地,而夏季西南地区东部也为弱的水汽源。东亚季风区夏季水汽输送经向输送要大于纬向输送,而印度季风区夏季水汽输送则是纬向输送大于经向输送。西南地区东部夏季降水与纬向通道的强度变化关系密切,而与经向通道的水汽输送强度变化关系不明显。当印度季风区南支水汽输送偏强时,则印度季风区北支(高原南侧通

道)水汽输送偏弱,同时东亚季风区向西的水汽输送也偏弱。从水汽收支计算结果来看,常年西南地区东部夏季水汽有弱的净流出,是一个弱的水汽源区,干旱年整个区域水汽流出较多年平均明显,而洪涝年则有弱的净流入。水汽通道水汽输送强弱变化与500 hPa高度场的分布形势及印度洋和太平洋的SST分布密切相关。

本文主要讨论了各个水汽通道的特征,得到的结果是初步的。由于大气水分不具有守恒示踪属性,降水和蒸发等相变过程限制了“水汽通道”概念的空间尺度,文中提及的“水汽通道”实际上反映了相关地区的大气水分和环流形势,本文只是沿用了这一习惯提法(黄荣辉等,1998;徐祥德等,2002,2003;陈艳等,2006;周晓霞等,2008;张雪梅等,2009;李生辰等,2009)。实际上水汽输送强度和路径不仅与海温和西太平洋副热带高压、印度低压等热带和副热带环流系统有关,还与中高纬的环流系统有关,同时海洋和大气也存在复杂的耦合作用,高、中、低纬环流系统也存在复杂的相互作用。如前所述,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,同时也受印度季风和东亚季风的影响,因此这里的天气气候成因非常复杂,旱涝预测非常困难。作者将对西南地区东部夏季旱涝的水汽输送和收支特征及其他影响因素作进一步的分析,从而为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、刘海文博士和白莹莹硕士提供热情帮助。

参考文献

陈烈庭. 1991. 阿拉伯海—南海海温距平纬向差异对长江中下游降水的影响. *大气科学*, 15(1): 33-42

陈艳, 丁一汇, 肖子牛等. 2006. 水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响. *大气科学*, 30(1): 25-37

丁一汇, 胡国权. 2003. 1998年中国大洪水时期的水汽收支研究. *气象学报*, 61(2): 129-145

高登义, 邹捍, 王维. 1985. 雅鲁藏布江水汽通道作用对降水的影响. *山地研究*, 3(4): 239-249

高登义, 邹捍, 周立波等. 2003. 中国山地环境气象研究进展. *大气科学*, 27(4): 567-590

谷良雷, 姚济敏, 胡泽勇. 2006. 南亚夏季风典型强弱年与阿拉伯海海温. *热带气象学报*, 22(4): 374-379

黄荣辉, 张振洲, 黄刚等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. *大气科学*, 22(4): 460-469

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

李生辰, 李栋梁, 赵平等. 2009. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输

送特征. *气象学报*, 67(4): 591-598

李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006年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

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兆. *气象学报*, 64(3): 385-391

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. *气象学报*, 61(3): 346-353

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. *气象学报*, 32(1): 1-10

吴国雄, 刘平, 刘屹岷等. 2000. 印度洋海温异常对西太平洋副热带高压的影响——大气中的两级热力适应. *气象学报*, 58(5): 513-522

谢安, 毛江玉, 宋焱云等. 2002. 长江中下游地区水汽输送的气候特征. *应用气象学报*, 13(1): 67-77

谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. *气象学报*, 30(2): 171-185

徐祥德, 陶诗言, 王继志等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系. *气象学报*, 60(3): 259-265

徐祥德, 陈联寿, 王秀荣等. 2003. 长江流域梅雨带水汽输送源—汇结构. *科学通报*, 48(21): 2288-2294

杨逸畴, 高登义, 李渤生. 1987. 雅鲁藏布江下游河谷水汽通道初探. *中国科学(B辑)*, 17(8): 893-902

张雪梅, 江志红, 刘晓东等. 2009. 东亚地区水汽输送强、弱年水汽输送的异同. *气象学报*, 67(4): 561-568

周长艳, 李跃清. 2005a. 长江上游地区水汽输送的气候特征. *长江科学院院报*, 22(5): 18-22

周长艳, 李跃清, 李薇等. 2005b. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征. *高原气象*, 24(6): 880-888

周长艳, 何金海, 李薇等. 2005c. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征. *南京气象学院学报*, 28(1): 18-27

周长艳, 李跃清, 房静等. 2008. 高原东侧川渝盆地东西部夏季降水及其大尺度环流特征. *高原山地气象研究*, 28(2): 1-9

周天军, 张学洪, 王绍武. 1999. 全球水循环的海洋分量研究. *气象学报*, 57(3): 264-282

周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程. *大气科学*, 32(3): 345-357

Diriba K, Anthony G B. 2007. Predictability of June-September rainfall in Ethiopia. *Mon Wea Rev*, 2: 628-650

Filippo G, Linda O M, Christine S, 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 Climate*, 9: 1150-1162

Michelle H A, David W. W J. Annual and warm season drought intensity-duration-frequency analysis for Sonora, Mexico. *J Climate*, 2007, 9: 1897-1909

Ricardo G H, Daniel P, Ricardo M T, et al. 2007. The outstanding 2004/05 drought in the Iberian Peninsula: Associated atmospheric circulation. *J Hydrometeorol*, 3: 483-498

Simmonds I, Bi D, Hope P. 1999. Atmospheric water vapor transport associated with rainfall over China in summer. *J Climate*, 12: 1353-1367

Zhang Renhe. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 18: 1005-1017