

水汽输送对云南夏季风爆发及初夏降水异常的影响

陈 艳^{1,2} 丁一汇³ 肖子牛⁴ 晏红明²

1 南京信息工程大学大气科学系, 南京 210044

2 云南省气象科学研究所, 昆明 650034

3 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

4 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

摘 要 主要利用 1961~2000 年云南 120 个站的逐日降水资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究水汽输送对云南夏季风爆发和初夏 5 月降水异常的影响。结果表明, 5 月份云南上空为一致的西南风水汽输送, 主要来自印度半岛北部的副热带西风水汽输送和热带印度洋至孟加拉湾的西南风水汽输送汇合而成, 而来自南海地区西太平洋副高西侧转向的偏南水汽输送是构成云南东部地区水汽输送的重要分支。5 月下旬云南夏季风爆发期间, 热带印度洋至孟加拉湾地区的水汽输送显著增强, 云南上空增湿明显, 这为季风爆发提供了必要的水汽条件, 而东亚中纬地区冷空气的入侵则可能是触发季风降水的重要机制。进一步研究发现, 云南 5 月降水量显著的年际变化也与大尺度水汽输送异常密切相关, 即当热带印度洋至孟加拉湾地区的水汽输送强, 而南海至东亚大陆地区的水汽输送弱时, 降水量偏多, 反之偏少。

关键词 水汽输送 夏季风 云南初夏降水

文章编号 1006-9895(2006)01-0025-13

中图分类号 P463

文献标识码 A

The Impact of Water Vapor Transport on the Summer Monsoon Onset and Abnormal Rainfall over Yunnan Province in May

CHEN Yan^{1, 2}, DING Yi-Hui³, XIAO Zi-Niu⁴, and YAN Hong-Ming²

1 *Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044*

2 *Yunnan Institute of Meteorological Science, Kunming 650034*

3 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

4 *National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract Although the partial westerlies prevails perennially at low level over Yunnan Plateau, it exhibits prominent dry and wet seasons influenced by the monsoon climate. The conspicuous fluctuations of precipitation tend to cause severe disasters, especially in May, the critical early summer period for spring crops growing. As one of the most significant factors contributing to rain, the impact of water vapor transport (WVT) on the summer monsoon onset and the possible relationship between WVT and abnormal rainfall in May are investigated. The primary datasets analyzed in this study include the 1961-2000 observational precipitation at 120 stations scattered in Yunnan Province of China, NCEP/NCAR reanalysis data, 1979-2000 CPC (the Climate Prediction Center) Merged Analysis of Precipitation (CMAP) and Outgoing Longwave Radiation (OLR).

The climatological distribution of vertically integrated WVT vectors in May presents that Yunnan is generally

收稿日期 2004-12-22, 2005-07-04 收修定稿

资助项目 “九五”国家攀登 A 项目南海季风试验 SCSMEX, 国家重点基础研究发展规划项目 2003CB415101, 云南省气象局青年研究基金“云南初夏干旱的模式预测方法集成研究”

作者简介 陈艳, 女, 1976 年出生, 在读博士研究生, 主要从事季风动力学的研究工作。E-mail: ynychen@163.com

overlaid by southwestern WVT, which mainly consists of the subtropical westerly from the northern part of Indian subcontinent and southwesterly from the tropical Indian Ocean (TIO) and the Bay of Bengal (BOB). In addition, the partial southerly WVT that turns around the west flange of the western Pacific subtropical high is one of the important branches over the eastern part of Yunnan Province.

The results show that the average date of the summer monsoon onset in Yunnan is 28 May, identified by a criterion of Yunnan precipitation index. During the summer monsoon onset, the WVT over TIO and BOB greatly intensifies, strengthening the WVT over the western part of Yunnan accordingly. However, the WVT weakens over the eastern part associated with a cyclonic variation over the northwestern South China Sea (SCS). Consequently, the specific humidity over Yunnan increases rapidly, providing necessary moisture condition for the monsoon onset. Meanwhile, the composite result also reveals that cold surges from the mid-latitude may play a crucial role in triggering the monsoon onset.

In order to investigate the differences of WVT between floods and droughts in May, six typical flood years and seven typical drought years are figured out. The results of composite analysis indicate that the distinct interannual variation of rainfall in May is closely related to the abnormal situation of large-scale WVT. When the WVT over TIO and BOB is strong, but weak over the SCS and East Asian continent, along with that the cold surges is active over the mid-latitude, it is likely to have more rain, leading to flood in Yunnan Province in early summer, and vice versa.

Key words water vapor transport, summer monsoon, early summer rain in Yunnan Province

1 引言

初夏 5 月是亚洲大气环流开始发生季节性转变的月份。随着中南半岛和我国南海地区低层西南风和高层偏东风的建立,东南亚夏季风爆发,标志着东南亚及邻近地区开始进入季风雨季^[1, 2]。云南位于中南半岛北部,受季风气候的影响,干湿季节十分显著。从云南省 1961~2000 年 120 个气象站逐年平均的降水距平百分率(图 1)来看,5 月份降水量的年际变化很大,比 6~8 月份显著,其中最大的正距平百分率超过 95%,而最小的负距平百分率则低于-60%。此外,降水距平百分率超过 $\pm 40\%$ 的年份在 40 年中占了 13 年。5 月降水量显著的年

际变化易造成严重的初夏干旱和洪涝灾害。同时,5 月是大春作物的栽种季节,雨量的变化直接影响农作物的生长发育。因此,雨季的开始及 5 月降水量的多少,成为云南业务预报和科学研究的一个重点和难点。

强降水的发生必须具有持续不断的水汽供应条件^[3, 4]。何华等^[5]在研究 1980~1991 年云南出现的 46 次暴雨过程时,发现大暴雨前孟加拉湾至云南一带维持的强水汽输送对暴雨的产生起到了重要作用。另外,晏红明等^[6]分析多年平均初夏 850 hPa 的水汽输送场,认为 5 月西南地区的水汽输送主要来自赤道印度洋附近的西南气流。然而,也有研究^[7]显示孟加拉湾和南海都是我国南方降水的主

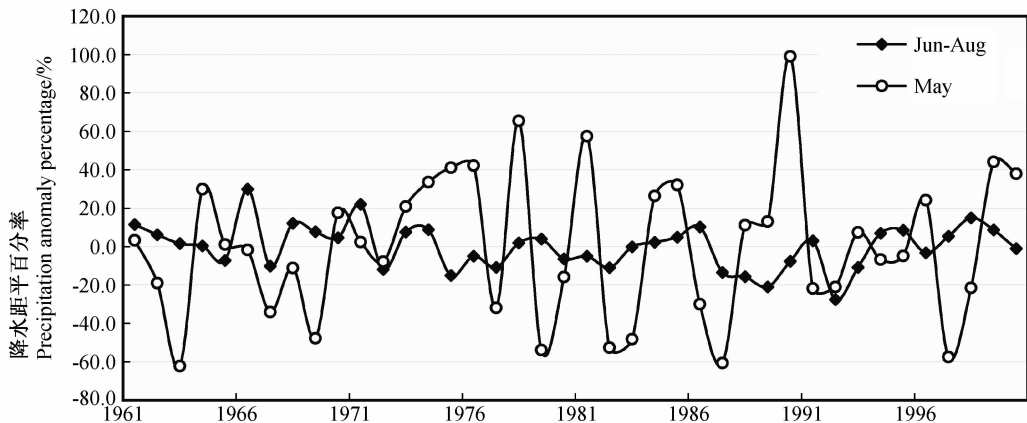


图 1 云南省 1961~2000 年 5 月和 6~8 月降水距平百分率的年际变化

Fig. 1 The interannual variations of precipitation anomaly percentage in Yunnan Province in May and Jun to Aug for 1961 - 2000

要水汽来源。5月,亚洲夏季风尚未完全建立,热带系统主要活跃于较低纬度,而副热带系统依然控制中纬度地区,东亚地区冷空气活动较为频繁^[8, 9],这必然会影响到我国西南地区的水汽输送,并形成与盛夏时期不同的水汽输送特征。另一方面,季风爆发期间水汽输送的异常也是季风系统异常变化的一种反映^[10, 11],从而影响着初夏降水量的变化。那么水汽输送的变化对云南季风雨季的开始有什么样的影响? 5月降水量的年际变化与水汽输送的异常又有怎样的关系? 本文将利用多年的气象资料,围绕以上问题展开讨论。

2 资料及计算方法

本文使用的数据主要是云南省自1961年以来,有降水记录的120个气象站1961~2000共40年的逐日平均降水量、NCEP/NCAR日平均纬向风(u)、经向风(v)、比湿(q)、地面气压(p_s)和气温

(T)的再分析资料,以及1979~2000年的CMAP(CPC Merged Analysis of Precipitation)逐候降水率和OLR向外长波辐射资料。对水汽输送整层积分的计算,垂直方向上取1000 hPa、925 hPa、850 hPa、700 hPa、600 hPa、500 hPa、400 hPa、300 hPa,共8层。

单位气柱大气水汽输送通量矢量 $\mathbf{Q}$ 的计算公式为

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_t}^{p_s} \mathbf{V} \cdot q dp, \tag{1}$$

式中, g 是重力加速度, $\mathbf{V}$ 是该单位气柱各层大气的风速矢量, p_t 为大气柱上边界气压,取300 hPa。

水汽输送通量散度的计算公式为

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} \nabla \cdot (\mathbf{V}q) dp. \tag{2}$$

我们先计算1961~2000年逐日的水汽输送通量及水汽输送通量散度,然后再把每日的水汽通量及水汽通量散度作各个时段的气候平均。

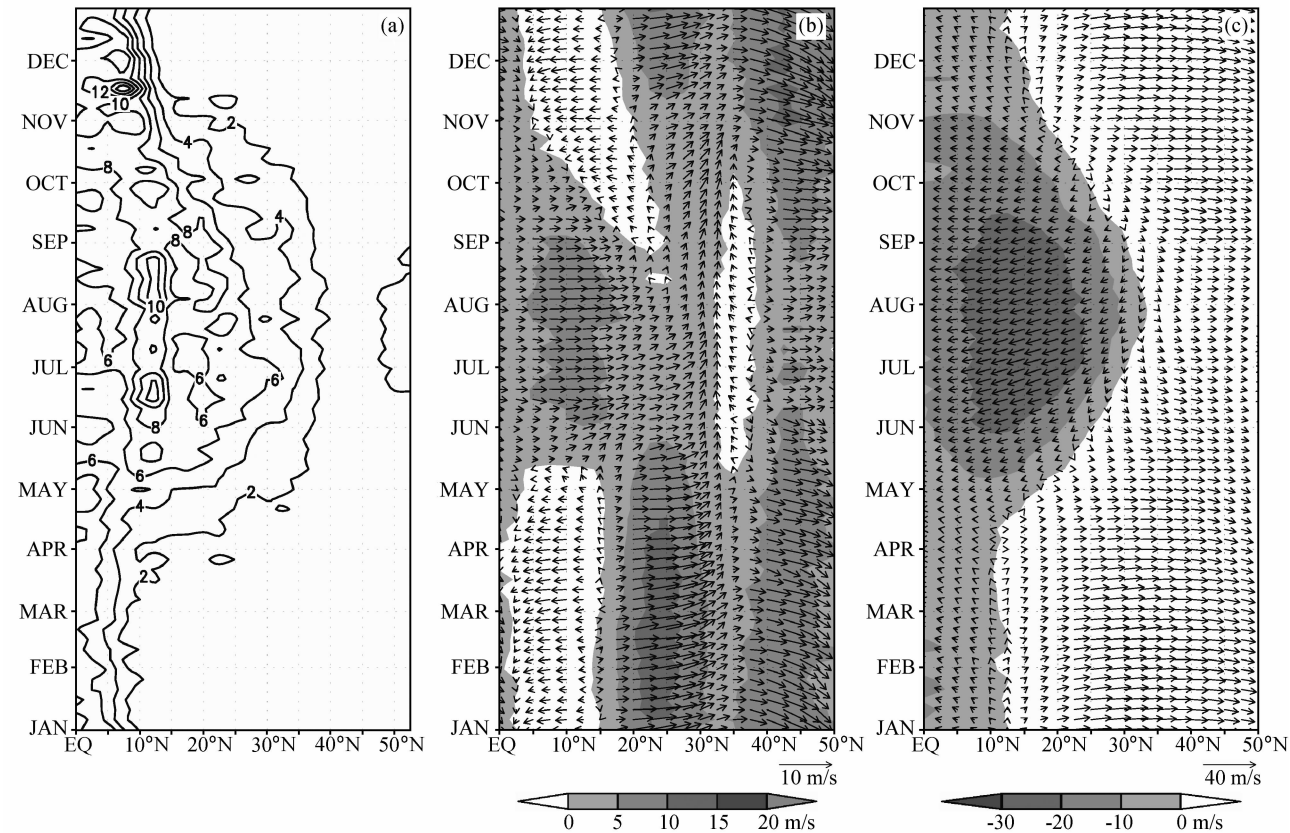


图2 1979~2000年云南地区(97.5°E~107.5°E)气候平均的CMAP降水率(a,单位:mm/d)、700 hPa [b,阴影为西风($u>0$)]和100 hPa [c,阴影为东风($u<0$)]风场的逐候演变图

Fig. 2 Time-latitude section of the climatological pentad mean CMAP rainfall (a, units: mm/d), 700 hPa [b, the shaded area is westerly ($u>0$)] and 100 hPa [c, the shaded area is easterly ($u<0$)] wind vectors over the Yunnan area (97.5°E–107.5°E) from 1979 to 2000

3 云南夏季风爆发日期的确定

王斌等的研究认为印度季风区和东南亚季风区对流活动的年际变化相关甚弱^[12], 另外对亚洲季风雨季变化的研究还发现^[13], 亚洲地区除了南亚季风区、东亚季风区和西太平洋季风区外, 在南亚季风区和西太平洋季风区之间, 即中南半岛和云贵高原一带, 还存在着一个过渡区, 在该过渡区内季风降水的变化与其他几个季风区的不同。因此, 沿用已有的南亚夏季风或东亚夏季风爆发的定义确定云南夏季风的爆发时间是不适宜的。此外, 尽管云南季风气候显著, 一年中具有明显的雨季(图 2a), 但其所在纬度范围内($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$)低空常年盛行偏西风(图 2b), 有别于经典的季风概念。100 hPa 高空风场虽有较明显的季节变化(图 2c), 但在季风爆发阶段 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 之间偏西风向偏东风的转变需要经历一个多月的时间, 因此不使用季风环流的变化来确定云南夏季风的爆发的具体日期。过去的有关研究^[14, 15] 主要是以雨量的季节变化为依据, 但目前还没有一个通用的标准。

Zhang 等^[16] 在研究中南半岛夏季风爆发的气候特征时, 根据降水量变化的突发性和持续性对夏季风的爆发了定义。参考他们的做法, 我们先利

用云南 40 年的降水资料, 计算全省 120 个站的平均降水量, 并称之为云南降水指数。图 3 给出了 1979~2000 年($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $97.5^{\circ}\text{E}\sim 107.5^{\circ}\text{E}$)区域平均的逐候 OLR、100 hPa 纬向风和降水指数的气候年变化曲线。可以看到, 在第 30 候降水指数从 3.7 mm 迅速变为 4.6 mm, OLR 也降至 225 W/m^2 以下, 100 hPa 西风减弱。因此, 我们以 4 mm 为季风爆发的阈值, 并规定: 某一日当降水指数的 5 天滑动平均值(即该日与其前两天和后两天的平均值)达到或超过 4 mm, 且持续 5 天或 5 天以上; 而且在此后连续的 20 天里, 降水指数达到或超过 4 mm 的日数大于或等于 10 天时, 则确定云南夏季风于该日爆发。

根据以上定义, 得到 1961 年至 2000 年各年夏季风爆发的日期(表 1)。可见, 云南夏季风的爆发时间具有显著的年际变化, 爆发最早的日期是 5 月 9 日(1978 和 1990 年), 而最晚的是 6 月 19 日(1977 年), 相差近 40 天。平均而言, 爆发时间为 5 月 28 日, 稍晚于云南省气象局业务上以昆明雨季开始的时间定为全省雨季的开始时间(5 月第 5 候)^[17]。另外与南海夏季风平均爆发时间 5 月第 4 候^[18] 相比, 云南夏季风的开始落后了近两周, 这与众多研究者^[19, 20] 得到的亚洲夏季风爆发进程相近。

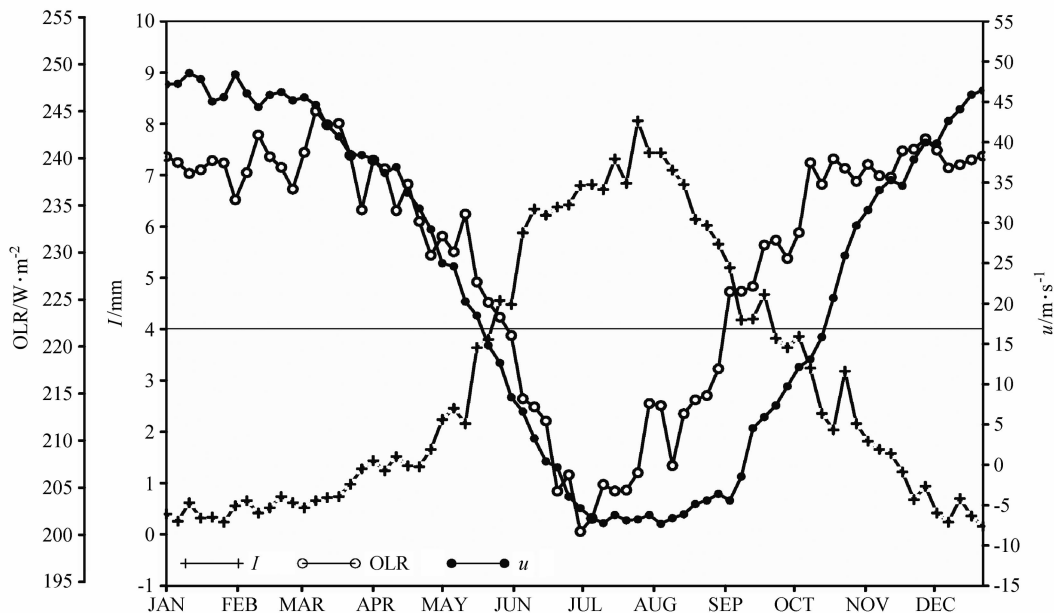


图 3 1979~2000 年云南地区($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $97.5^{\circ}\text{E}\sim 107.5^{\circ}\text{E}$)逐候平均的向外长波辐射 OLR、云南降水指数 I 和 100 hPa 纬向风风速 u 的年变化

Fig. 3 Climatological pentad mean time series of OLR, Yunnan precipitation index (I) and 100 hPa zonal wind (u) averaged over the Yunnan area ($20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $97.5^{\circ}\text{E}\sim 107.5^{\circ}\text{E}$) for 1979–2000

表 1 1961~2000 年云南夏季风爆发日期
Table 1 The dates of summer monsoon onset for 1961 - 2000

年份 Year	爆发日期 Onset date	年份 Year	爆发日期 Onset date	年份 Year	爆发日期 Onset date	年份 Year	爆发日期 Onset date
1961	05 - 22	1971	05 - 22	1981	05 - 17	1991	06 - 02
1962	05 - 22	1972	05 - 13	1982	06 - 04	1992	06 - 15
1963	06 - 07	1973	05 - 25	1983	06 - 04	1993	05 - 26
1964	05 - 31	1974	05 - 22	1984	05 - 16	1994	05 - 19
1965	05 - 25	1975	05 - 24	1985	05 - 18	1995	05 - 30
1966	05 - 23	1976	05 - 25	1986	06 - 09	1996	05 - 24
1967	06 - 01	1977	06 - 19	1987	05 - 31	1997	06 - 09
1968	05 - 27	1978	05 - 09	1988	05 - 16	1998	05 - 22
1969	06 - 02	1979	06 - 04	1989	05 - 13	1999	05 - 20
1970	05 - 14	1980	06 - 03	1990	05 - 09	2000	05 - 16

4 气候平均 5 月水汽输送特征

图 4 给出 40 年平均的 5 月整层积分水汽输送矢量分布,从图中可以看到,我国西南地区以一致的西南风水汽输送为主,并具有热带和副热带的混合特征。其中,来自南亚地区的有两条主要水汽输

送带,南面的一支来自赤道中印度洋,最强水汽输送中心在斯里兰卡以南地区,上游与非洲东海岸的跨赤道水汽输送带相连,下游则向东北方向偏转,进入孟加拉湾和中南半岛。另一支来自阿拉伯海,向东穿过印度半岛北部并在孟加拉湾东部及中南半岛附近与南面的西南风水汽输送带汇合,形成向我

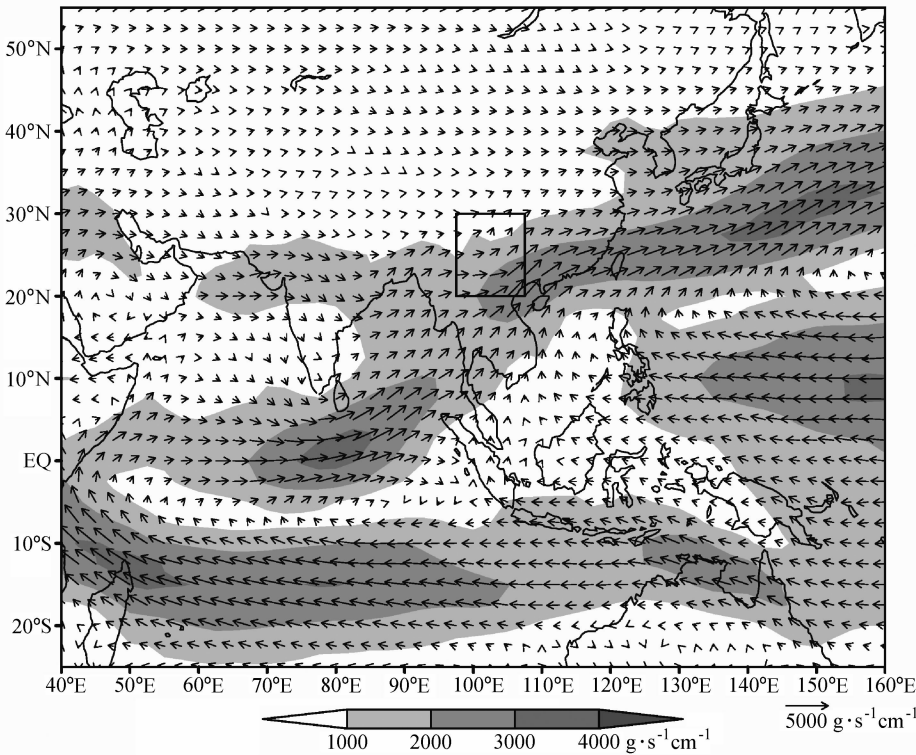


图 4 1961~2000 年 5 月平均的整层积分水汽输送矢量分布。阴影为水汽输送矢量大于 1000 个单位的区域;矩形表示云南省所在的大致位置(20°N~30°N, 97. 5°E~107. 5°E)
Fig. 4 Climatological mean vertically integrated water vapor transport pattern in May for 1961 - 2000. The regions where the magnitude of water vapor transport vector exceeds 1000 are shaded. The square frame denotes the rough area (20°N - 30°N, 97. 5°E - 107. 5°E) of Yunnan Province, the same in the following figures

国西南地区输送的一个重要水汽源。此外,南海地区由西太平洋副高西侧转向的偏南水汽输送是构成云南部地区水汽输送的重要分支。它与来自南亚地区强的西南水汽输送在中南半岛至华南沿海汇合,增强了向东亚地区的水汽输送。

5 水汽输送对夏季风爆发的影响

按表 1 所列的各年夏季风爆发日期,分别作季风爆发后 10 天与前 10 天平均的整层积分水汽输送合成图及其差值图,如图 5 所示。显然,夏季风爆发后,印度洋上空的西风水汽输送迅速增强北进,变化最大区域位于索马里以东洋面上,中心位置在(7.5°N, 60°E)附近(图 5e)。增强的西风水汽输送向东扩展,对孟加拉湾和南海地区的水汽输送有重要的影响。其中,孟加拉湾地区的西南水汽输送急剧增大,在水汽输送差值图上主要表现为向北输送分量的增加及孟加拉湾西北地区的气旋性水汽输送变化特征。南海地区,增强的偏西风水汽输送穿过中南半岛南部进入南海,使南海大部分地区的西南水汽输送得到了加强。但注意到,此时南海西北部至滇东地区的水汽输送也出现了气旋性变化特征,即云南东侧地区有东北风水汽输送差值出现(图 5e)。上述变化特征说明,伴随夏季风的爆发,与索马里跨赤道气流、印度洋西风、孟加拉湾低压和南海季风槽发展有关的水汽输送都明显加强。对云南而言,由于西侧有来自孟加拉湾增强的西南水汽输送,而东侧受东北风水汽输送矢量差值的影响,因此,与夏季风爆发对应的是云南西侧西南风水汽输送的增强和东侧水汽输送的减弱。

在相应的水汽输送通量散度图上,季风爆发前后在我国西南地区都维持着一条水汽辐合带(图 5b、d)。季风爆发后,在孟加拉湾北部地区、中南半岛和我国南海,包括云南的南部和西部均为大片的负值区,表现为水汽辐合的增强。不同的是,滇东及滇东北地区的水汽辐合却是减弱的(图 5f)。5 月下旬伴随夏季风的爆发,低纬地区水汽输送增强,这给我国南方地区带来大量的暖湿气流,但这时季风气流尚未深入东亚大陆内部,控制东亚中高纬地区依然是相对干冷的大陆气团。陈于湘和朱抱真的研究^[14]显示,云南雨季的开始往往是滇东北地区准静止锋向移动性冷锋转变造成的。而与来自热带的季风气流相比,冷空气一般是较干冷的,因

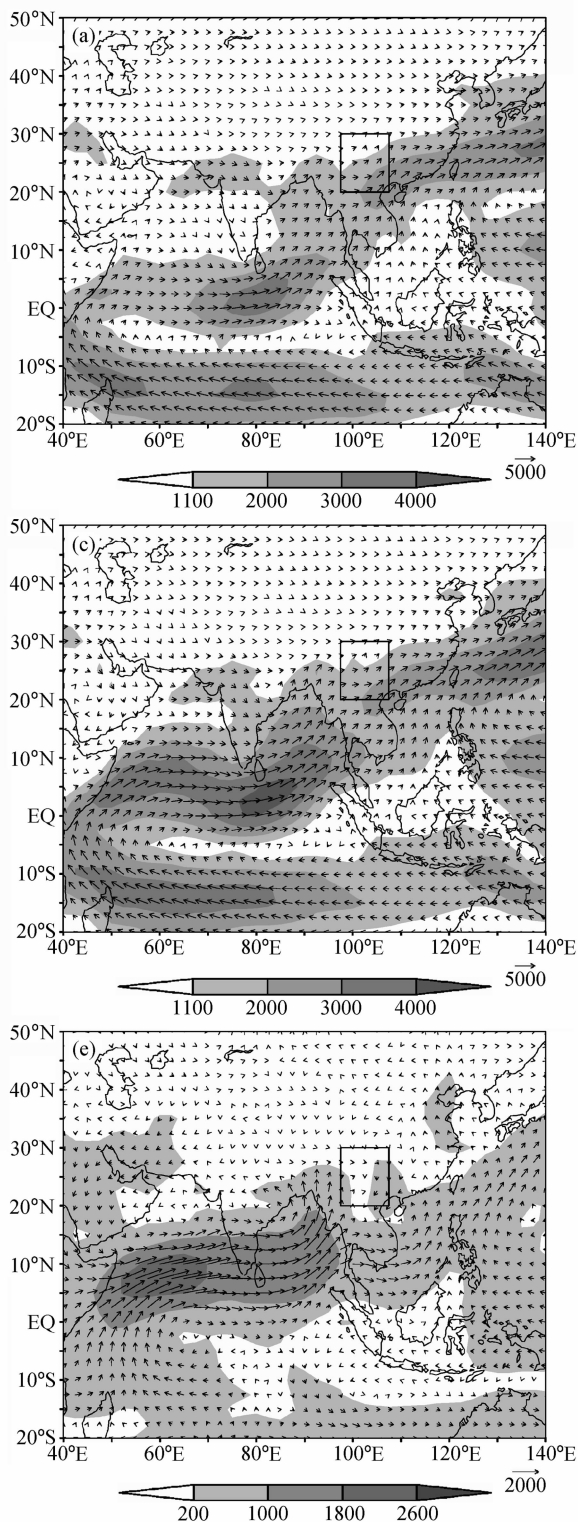


图 5 云南夏季风爆发前 10 天(a、b)和后 10 天(c、d)平均的整层积分水汽输送矢量(a、c,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)和水汽输送通量散度分布(b、d,单位: mm/d)以及季风爆发后 10 天与季风爆发前 10 天的水汽输送差值场(e)和水汽输送通量散度差值场(f)

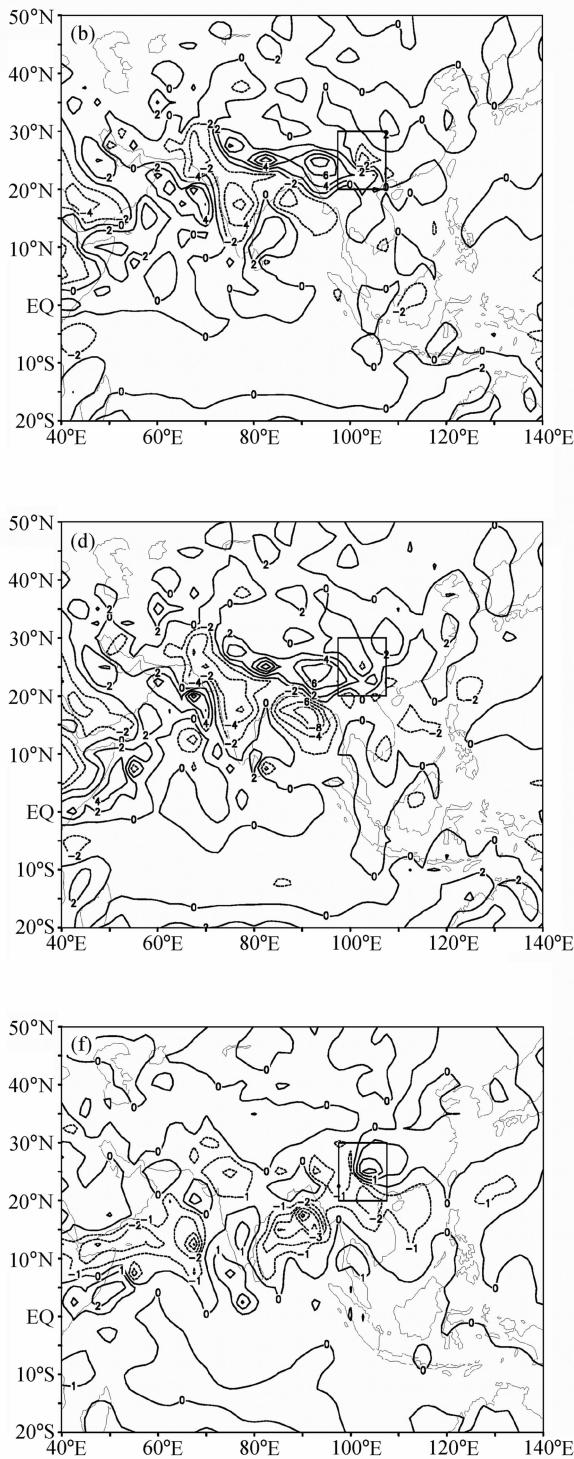


Fig. 5 Distributions of vertically integrated water vapor transport vectors (a and c, units: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and the flux divergence (b and d, units: mm/d) for 10 days before (a and b) and 10 days after (c and d) the summer monsoon onset along with the differences of water vapor transport vectors (e) and flux divergence (f) between 10 days after and 10 days before the onset

此冷空气在锋面一侧的堆积活跃可能是造成季风爆发期间滇东及滇东北地区水汽辐合减弱的重要原因。分析 1961~2000 年季风爆发前 10 天至后 10 天 700 hPa 沿 105°E 的比湿 q 、位温 θ 及风场的纬度-时间合成图(图 6), 可见在 20°N~28°N 范围内, 从季风爆发的前 4 天起, 比湿持续增大。在季风爆发当天, 25°N 附近的比湿再次增大, 达到 9 g/kg, 这是云南西侧西南风水汽输送增强而东侧水汽输送减弱的结果。中高纬地区 θ 等值线密集, θ 值向北快速递减。但从季风爆发的前 3 天起, 从中纬地区开始有冷空气向南扩张, 到季风爆发的前一天, 维持在 15°N~28°N 之间 314 K 的 θ 等值区断裂, 25°N~30°N 之间的比湿和位温梯度则迅速增大, 风场的气旋式切变增强。还可注意到, 在季风爆发之后的几天里中纬度地区的冷空气活动依然活跃, 25°N~30°N 之间的比湿差基本上也维持在 2 g/kg 左右。因此, 在云南上空空气迅速增湿的背景下, 冷空气入侵并与暖湿气流交绥可能是触发季风对流活动的重要机制, 而南下冷空气由于受到云贵高原地形的阻挡, 在滇东及滇东北地区的堆积则

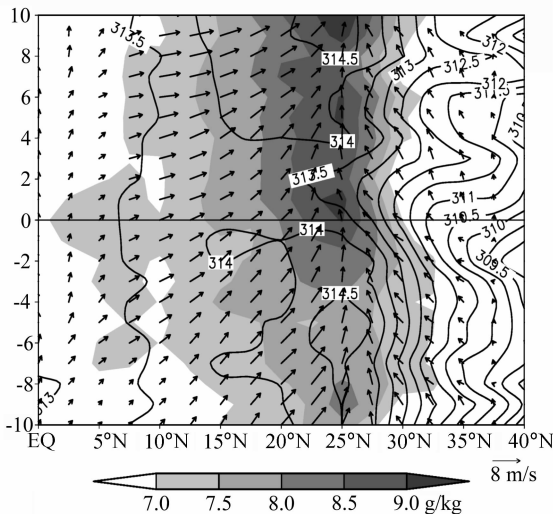


图 6 1961~2000 年云南夏季季风爆发前 10 天至后 10 天 700 hPa 沿 105°E 比湿 q (阴影)、位温 θ (等值线, 单位: K) 和风矢量的纬度-时间合成图。图中纵坐标为相对季风爆发前(负)后(正)的日期

Fig. 6 Composite time - latitude section of the specific humidity q (shadow), potential temperature θ (isoline, units: K) and wind vectors during the Yunnan summer monsoon onset across 105°E for 1961 - 2000. The ordinate represents the relative dates before (negative) and after (positive) the onset of summer monsoon respectively

可能是导致季风爆发后水汽输送通量散度有所增大的主要原因。

6 云南 5 月旱涝与水汽输送异常

在研究旱涝之前，我们先分析 5 月降水的主要分布形势。图 7 所示的是对 40 年云南 5 月平均降水资料作 EOF 分解得到的第一特征向量及其相应的时间系数，方差贡献占 48.7%。可以看出，云南 5 月降水分布以全区一致型为主，因此从总体上讨论云南 5 月的旱涝问题是有意义的。根据图 1 所示的云南 5 月降水距平百分率，我们定义降水距平百分率大于一个标准差($>+38\%$)的年份为典型涝年，而小于一个负标准差($<-38\%$)的年份为典型旱年。照此定义，分别得到 7 个典型旱年和 6 个典型涝年(表 2)。对照图 7b，可以看到典型旱涝年与时间系数的变化有很好的对应关系——超过一个标准差的年份与典型旱年完全相同，而小于一个负标

表 2 1961 - 2000 年云南 5 月典型旱涝年

Table 2 The typical flood and drought years of Yunnan Province in May for 1961 - 2000

涝年 Flood year	降水距平百分率 Percentage of precipitation anomaly	旱年 Drought year	降水距平百分率 Percentage of precipitation anomaly
1975	41	1963	-62
1976	42	1969	-48
1978	65	1979	-54
1981	58	1982	-53
1990	99	1983	-48
1999	44	1987	-61
		1997	-58

准差的 7 年中也包含了 6 个典型涝年。因此，无论从空间的分布还是从时间的变化来看，在所选的典型旱(涝)年里全省降水量都总体偏少(多)。但应注意到，第一特征向量绝对值的分布大致是从西南向东北方向递减的，其中最大差值可达 1 个量级。这说明，尽管从年际变化的角度来讲，云南 5 月全区降水量的变化较为一致，但从省内各地区之间的比较来看，滇西南降水量的变化要比滇东北地区的明显。

对照合成的典型旱年和典型涝年的平均水汽输送矢量分布(图 8)，发现涝年时热带印度洋地区向东的水汽输送要明显强于旱年，即在索马里以东洋面上出现了一条异常强的西风水汽输送带(图 8e)。当异常强的热带西风水汽输送到达孟加拉湾东南部时便分裂成了南北两支，南面的一支继续向东输送，另一支则突转北上，增强了向中南半岛西北部和云南西部的水汽输送。东亚地区，特别是南海和我国大陆东部的水汽输送则明显减弱。由于东亚地区经向水汽输送大于纬向输送^[21]，所以在水汽输送差值图上主要表现为在渤海、华北、长江中游至整个南海地区有异常的向南水汽输送，其中云南以东地区的变化最大(图 8e)。因此，5 月降水偏多的年份云南西部水汽输送强而东部水汽输送弱。我们用逐年的云南 5 月平均降水指数与整层积分水汽输送矢量大小作进一步相关分析，得到 5 月降水与大尺度水汽输送的相关场(图 9)。可见，低纬印度洋的大部分地区为显著的正相关区，东亚则主要是负相关区，而云南正好横跨正负相关区。以上分析表

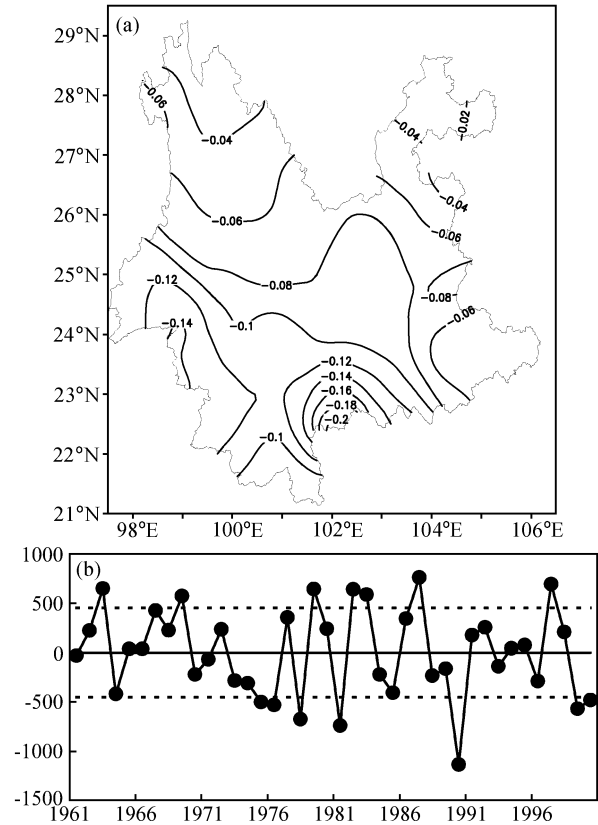


图 7 1961~2000 年云南 5 月降水量 EOF 分解第一特征向量 (a)及其时间系数(b, 虚线分别表示正负标准差)
Fig. 7 The spatial patterns of the first EOF mode of the rainfall of May in Yunnan Province for 1961 - 2000 (a) and its time coefficient (b, the dashed lines represent one standard deviation)

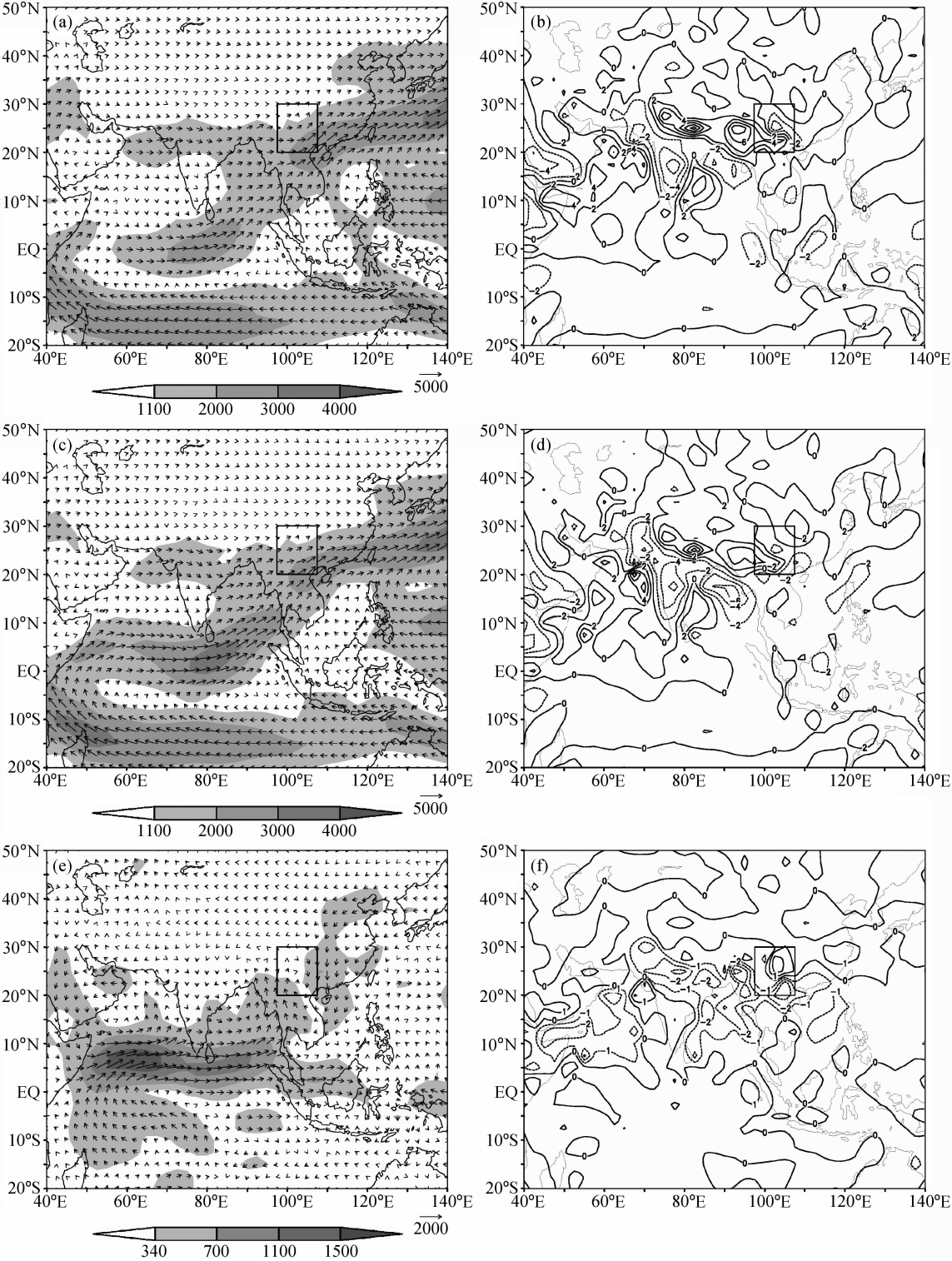


图 8 云南 5 月典型早年(a、b)和典型涝年(c、d)整层积分水汽输送矢量分布(a、c, 单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)与水汽输送通量散度(b、d, 单位: mm/d)以及典型涝年与典型早年之间的水汽输送矢量(e)和水汽输送通量散度(f)的差值场

Fig. 8 Distributions of vertically integrated water vapor transport vectors (a and c, units: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and the flux divergence (b and d, units: mm/d) for typical drought years (a and b) and flood years (c and d) in Yunnan Province along with the differences fields of water vapor transport (e) and flux divergence (f) between typical flood years and drought years

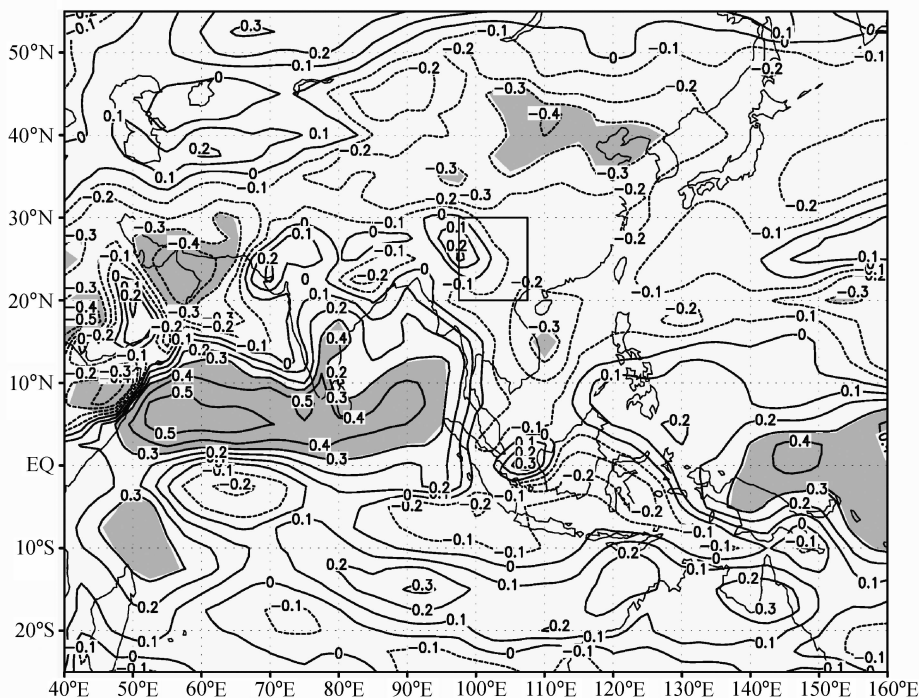


图9 1961~2000年云南5月云南降水指数与整层积分水汽输送矢量大小相关图(阴影为相关系数超过95%的信度检验)

Fig. 9 The distribution of correlation coefficients between the Yunnan precipitation index of May and the magnitude of vertically integrated water vapor transport vectors for 1961–2000. The area over the 95% confident level is shaded

明,当南亚季风区水汽输送增强而东亚季风区水汽输送减弱时,相应的,云南西部水汽输送增大而东部水汽输送减弱,有利于云南上空水汽的聚集从而导致降水量的增加。

从水汽辐合的变化来看,涝年时,西起阿拉伯海、东至西太平洋地区都出现了水汽的异常辐合(图8f),其中孟加拉湾、中南半岛中北部及南海的大部分地区水汽辐合显著增强。但注意到,早年时位于长江中游以北地区的水汽辐散中心在涝年时增强南移,从而使滇东及滇东北地区水汽辐合强度明显减弱。为分析初夏涝年时各异常水汽输送带的热力特征,我们给出了850 hPa云南5月典型涝年相对于典型早年 θ_{sc} 的异常分布(图10),从图中可以看到以华北、黄海一带为中心的广大地区为负值区,而低纬海洋却主要是强的正值区,沿云南东侧至华南一带等值线密集。这说明在云南5月降水偏多的年份,我国北部和东部冷空气活动异常增强,而由南而来的暖湿空气也十分活跃,这容易加大我国南方地区的水平温度梯度,增强大气斜压性,有利于锋区绕动的发展。特别在我国西南地区,由于受到云贵高原地形的阻挡,南下冷空气在云南东部

和北部停滞堆积,从而使该地区呈现为一条明显的冷舌,并形成最强的等值线密集区,具有明显冷锋的特征。由此可见,东亚大陆地区与云南初夏洪涝密切相关的水汽输送减弱,在很大程度上也反映了强冷空气的异常活动,同时也可能是滇东北地区水汽输送通量散度增大的原因。

综上所述,热带印度洋、南海及东亚中纬地区的大尺度水汽输送异常对云南5月降水量的变化有明显的影响。当索马里以东印度洋上空的西风水汽输送和孟加拉湾地区的西南风水汽输送异常增强时,云南西部的西南水汽输送量也相应增加。此时,若南海至东亚大陆地区水汽输送偏弱,云南东部向东输送的水汽相应减小,同时东亚中纬地区的冷空气也较往年活跃,这有利于冷空气与来自热带洋面上的暖湿气流在我国西南地区频繁交汇并形成锋面降水,从而导致云南初夏多雨。相反,当热带印度洋至孟加拉湾地区西南风水汽输送弱,而南海及我国东部地区水汽输送强,同时东亚中纬地区的冷空气活动也较弱时,则易发生干旱。事实上,张人禾的研究^[22]已经表明,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

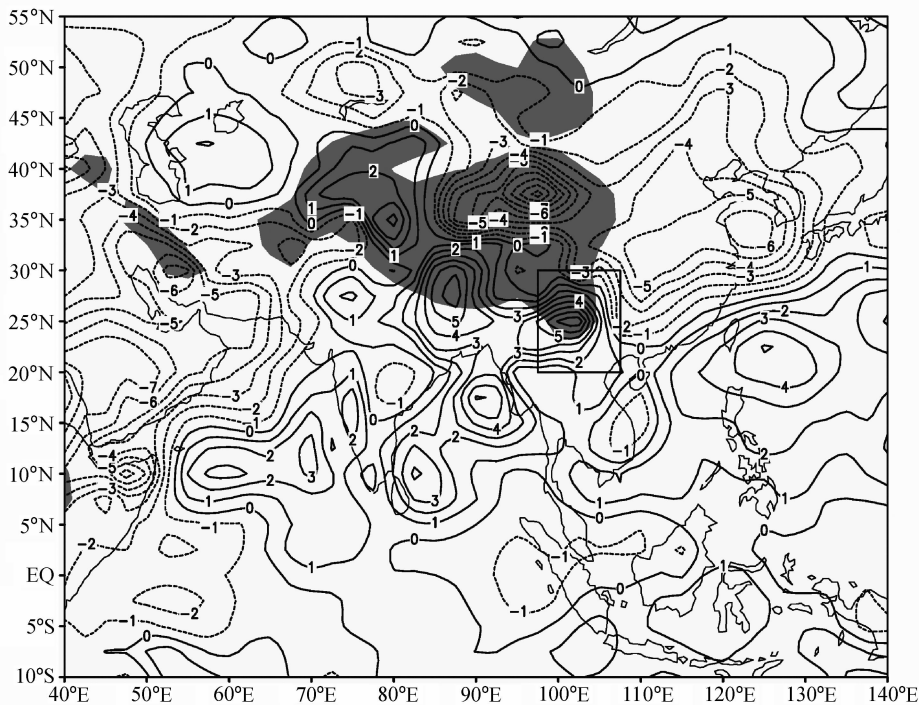


图 10 云南 5 月典型涝年与典型旱年 850 hPa θ_{se} (单位: K)差值场(阴影为海拔高度超过 1500 m 的地形)

Fig. 10 The differences of θ_{se} at 850 hPa (units: K) between the typical flood and drought years of Yunnan Province. The region where altitude exceeds 1500 m is shaded

当印度季风区水汽输送强时则东亚地区的水汽输送偏弱。由此可见,在印度季风区水汽输送强的年份往往就可能出现云南 5 月降水偏多的情况。

7 结论

由于云南具有明显的干湿季节,初夏降水量的异常时常发生,因此,我们用多年的 NCEP/NCAR 再分析资料和云南 120 个站的逐日降水等资料,从水汽输送的变化入手,研究水汽输送对云南夏季风爆发的影响以及 5 月旱涝与水汽输送的关系。结果显示,5 月份云南上空为一致的西南水汽输送,并主要来自于印度半岛北部的西风水汽输送和热带印度洋至孟加拉湾地区的西南风水汽输送汇合而成,而来自南海地区副热带高压西侧转向的偏南水汽输送对云南东侧的水汽输送也有重要影响。5 月下旬云南夏季风爆发期间,热带印度洋至孟加拉湾地区西南水汽输送迅速增强,同时受南海西北部气旋性水汽输送变化的影响,云南西侧的西南风水汽输送增大而东侧的水汽输送减弱,云南地区空气的湿度明显增大,为季风降水的形成创造了必要条件,而

中高纬冷空气的入侵则可能是触发云南季风降水的重要机制。进一步的研究发现,云南 5 月降水量显著的年际变化与大尺度水汽输送异常有关,即当索马里以东的热带印度洋洋面出现异常强的西风水汽输送,孟加拉湾的西南水汽输送也异常增强时,若南海至东亚大陆地区水汽输送弱,而中高纬地区冷空气活跃,并与来自孟加拉湾的暖湿气流在我国西南地区频繁交汇,易形成锋面降水从而导致云南初夏多雨。相反,当热带印度洋地区西风水汽输送弱,而南海及我国东部地区水汽输送强,同时东亚中高纬地区的冷空气活动较弱时,则易发生干旱。

致谢 本文在研究过程中得到了温敏博士和张万成研究员的帮助,谨致谢意。作者还要特别感谢两位审稿专家为本文提出了中肯的修改意见。

参考文献 (References)

- [1] Lau K M, Yang S. Climatology and interannual variability of the Southeast Asian summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, **14**(2): 141~162
- [2] 宋正山, 鲍媛媛, 杨辉. 初夏东南亚季风建立的气候特征及

- 年际变化. 见: 中国科学院大气物理研究所编. 东亚季风和
中国暴雨. 北京: 气象出版社, 1998. 250~264
- Song Zhengshan, Bao Yuanyuan, Yang Hui. The climatic
characteristics on the onset of southeast Asian monsoon in
early summer and its interannual variability. In: *East Asian
Monsoon and Torrential Rain in China* (in Chinese), Institu-
te of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,
Ed. Beijing: China Meteorological Press, 1998. 250~264
- [3] 丁一汇, 章名立, 李鸿洲, 等. 暴雨和强对流天气发生条件的
比较分析. 大气科学, 1981, **5**: 388~397
- Ding Yihui, Zhang Mingli, Li Hongzhou, et al. A compara-
tive study on the occurrence conditions of heavy rainfall and
severe convective weather. *Chinese Journal of Atmospheric
Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1981,
5: 388~397
- [4] 丁一汇, 胡国权. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究.
气象学报, 2003, **61**(2): 129~145
- Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water vapor budget o-
ver China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteo-
rologia Sinica* (in Chinese), 2003, **61**(2): 129~145
- [5] 何华, 孙绩华. 云南冷锋切变暴雨过程的环流及水汽输送
特征. 气象, 2003, **29**(4): 48~52
- He Hua, Sun Jihua. Circulation and moisture flux character-
istics at middle and lower levels during heavy rains in Yun-
nan. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 2003, **29**(4):
48~52
- [6] 晏红明, 肖子牛, 王灵. 孟加拉湾季风活动与云南 5 月降雨
量. 高原气象, 2003, **22**(6): 624~630
- Yan Hongming, Xiao Ziniu, Wang Ling. Activities of Bay of
Bengal monsoon and beginning date of rain season in Yunnan.
Plateau Meteorology (in Chinese), 2003, **22**(6): 624~630
- [7] 陈世训, 高绍风, 杨松. 5~6 月我国南方降水的水汽来源及
其异常. 见: 全国热带夏季风学术会议文集组编. 全国热带
夏季风学术会议文集(1982). 昆明: 云南人民出版社, 1983.
97~110
- Chen Shixun, Gao Shaofeng, Yang Song. The source of wa-
ter vapour in the southern part of China in May and June and
its abnormality. In: *Proceedings of the Symposium on the
Summer Monsoon in South East Asia* (1982) (in Chinese),
the Joint Research Group on the Summer Monsoon in South
East Asia, Ed. Kunming: People's Press of Yunnan Prov-
ince, 1983. 97~110
- [8] Chang C P, Chen G T J. Tropical circulation associated with
southwest monsoon onset and westerly surge over the South
China Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 1995, **123**: 3254~3267
- [9] 陈隆勋, 李薇, 赵平, 等. 东亚地区夏季风爆发过程. 气候与
环境研究, 2000, **5**(4): 345~355
- Chen Longxun, Li Wei, Zhao Pin, et al. On the process of
summer monsoon onset over East Asia. *Climatic and Envi-
ronmental Research* (in Chinese), 2000, **5**(4): 345~355
- [10] Fasullo J, Webster P J. Hydrological signatures relating the
Asian summer monsoon and ENSO. *Journal of Climate*,
2002, **15**: 3082~3095
- [11] Fasullo J, Webster P J. A hydrological definition of Indian
monsoon onset and withdrawal. *Journal of Climate*, 2003,
16: 3200~3211
- [12] 王斌, 樊真. 论南亚夏季风指数的选择. 见: 中国科学院大
气物理研究所编. 东亚季风和暴雨. 北京: 气象出版社,
1998. 170~183
- Wang Bin, Fan Zhen. On choice of dynamically coherent
south Asian summer monsoon indices. In: *East Asian Mon-
soon and Torrential Rain in China* (in Chinese), Institute of
Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Ed.
Beijing: China Meteorological Press, 1998. 170~183
- [13] Wang B, Lin H. Rainy season of the Asian-Pacific summer
monsoon. *Journal of Climate*, 2002, **15**: 386~396
- [14] 陈于湘, 朱抱真. 热带季风爆发前云南雨季的天气学特征.
大气科学, 1985, **9**: 101~106
- Chen Yuxiang, Zhu Baozhen. The synoptic features of rain
season in Yunnan province before outbreak of tropical mon-
soon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia At-
mospherica Sinica)* (in Chinese), 1985, **9**: 101~106
- [15] 秦剑, 据建华, 解明恩. 低纬高原天气气候. 北京: 气象出版
社, 1997. 123~131
- Qin Jian, Ju Jianhua, Xie Ming'en. *Weather & Climate over
Low Latitude Plateau* (in Chinese). Beijing: China Meteoro-
logical Press, 1997. 123~131
- [16] Zhang Yongsheng, Li Tim, Wang Bin, et al. Onset of the
summer monsoon over the Indochina Peninsula: climatology
and interannual variations. *Journal of Climate*, 2002, **15**:
3206~3221
- [17] 刘瑜. 云南雨季早迟的气候特征分析. 气象, 2000, **26**(7):
45~49
- Liu Yu. The climatic feature analysis of Yunnan rainy season
early or late onset. *Meteorological Monthly* (in Chinese),
2000, **26**(7): 45~49
- [18] 李崇银, 屈昕. 伴随南海夏季风爆发的大尺度大气环流演
变. 大气科学, 2000, **24**(1): 1~14
- Li Chongyi, Qu Xin. Large scale atmospheric circulation evo-
lutions associated with summer monsoon onset in the South
China Sea. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chi-
nese), 2000, **24**(1): 1~14
- [19] Tao Shiyan, Chen Longxun. A review of recent research on
the East Asian summer monsoon in China. *Monsoon Meteor-
ology*, C. P. Chang and T. N. Krishnamurti, Eds. Oxford:
Oxford University Press, 1987. 60~92
- [20] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, et al. Monsoons:
process, predictability, and the prospects for prediction. *J.
Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14451~14510
- [21] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 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, 1998, **22**(4): 460~469

Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scintia Atmospheric Sinica)* (in Chinese), 1998, **22**(4): 460~469

[22] Zhang Renhe. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18**(5): 1005~1017