

江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析

周玉淑¹ 高守亭¹ 邓 国²

¹ 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

² 中国气象局国家气象中心, 北京 100081

摘 要 在分析 2003 年 6 月 21 日到 7 月 11 日江淮流域强梅雨期间降水概况和大气环流基本特征的基础上, 通过对水汽输送流函数及非辐散分量、势函数及辐散分量及江淮地区水汽收支的分析, 表明江淮流域是该时期全球范围内水汽汇的一个高值中心, 且水汽通量大值区和水汽辐合区与降水大值区基本一致。从水汽的输送来看, 夏季印度风环流和南海夏季风是向江淮流域输送水汽的主要通道。梅雨期内, 中层大气中的水汽主要是垂直上升运动对低层水汽的抬升作用, 同时, 低纬大洋上的水汽也可途经青藏高原后再从西边界向东输入到江淮地区, 它的输送有可能增大江淮流域上空对流层中层大气中的水汽含量, 从而有利于强梅雨在江淮流域的发生。计算分析还表明 2003 年强降水从前期的长江流域移到后期的淮河流域, 是与大范围的水汽输送和辐合中心北移相联系的, 较小空间范围的强暴雨洪涝的发生在有利的大尺度环境下, 还与其他条件有关。

关键词 梅雨 水汽输送 水汽收支

文章编号 1006-9895(2005)02-0195-10

中图分类号 P441

文献标识码 A

A Diagnostic Study of Water Vapor Transport and Budget during Heavy Precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River Basins in 2003

ZHOU Yu-Shu¹, GAO Shou-Ting¹, and DENG Guo²

¹ Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² National Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract By analyzing the features of the atmospheric circulation systems from 21 June to 11 July 2003, which corresponds to the heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003, the water vapor transport vector is decomposed into the sum of its nondivergent (rotational) and divergent (irrotational) components in terms of the streamfunction and potential, and the water vapor budgets are calculated in three regions of the Meiyu front system. The results indicate that the Changjiang River and the Huaihe River basins are the strongest water vapor sink over the global from 21 June to 11 July 2003. The minimum potential region (the maximum convergent region) of water vapor transport vector corresponds to strong precipitation region. The Indian monsoon circulation and the South China Sea monsoon in summer play important roles in the moisture transportation. Besides the vertical ascending motion transporting the moisture up to the middle levels, the moisture, which comes from low latitudes and turns to west when it goes through the Tibetan Plateau, can increase the humidity content in the middle levels over the Changjiang River and the Huaihe River basins and is favorable for the forming of the severe precipitation.

Key words Meiyu, water vapor transport, water vapor budget

1 引言

中国是一个多暴雨的国家, 每年由暴雨造成的洪

涝灾害时有发生, 其中最严重的洪水受灾地区之一是江淮流域。每年的 6 月到 7 月, 江淮流域都会有二到三周的持续阴雨天气, 即为江淮梅雨^[1]。20 世纪 90 年

收稿日期 2004-01-16 收到, 2004-05-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40405007, 40205010 和中国科学院海外杰出学者基金 2002-1-2

作者简介 周玉淑, 女, 1971 年出生, 博士, 助理研究员, 目前主要从事中尺度动力学、资料诊断分析及中尺度数值模拟研究。E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

代以来,继 1991 和 1998 年的江淮梅雨期的特大暴雨过程后,2003 年江淮流域又发生了严重的洪涝灾害,其中 6 月下旬到 7 月上旬的大暴雨过程是造成该年洪涝灾害的直接原因,尤其是 6 月 29 日到 7 月 11 日,淮河流域出现了持续性的大到暴雨,且降水集中并形成全流域性大洪水。这次洪水无论从干流中下游的最高水位还是最大流量都已经全面超过了 1991 年的水平,使人民的生命财产又一次蒙受了惨重损失。

过去的工作指出^[2],中国暴雨发生的温、湿和动力条件主要有 5 种:位势不稳定层结、水汽辐合、位势不稳定释放机制、高低空急流及耦合作用及弱的风垂直切变,而暴雨的发生往往是几种尺度系统相互作用的结果,它们的有利配置又决定着暴雨过程的降水强度。大气中充沛的水汽和水汽持续的输送是形成强降水的必需条件,丁一汇等^[3]分析了 1998 年中国大洪水时期的全球水汽背景,得到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。由于 2003 年强降水发生的区域和大环境与 1998 年不尽相同,分析对应时期的大范围的水汽输送特征对理解 2003 年江淮流域暴雨洪涝的形成和维持也是有必要的。本文将利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 的分析资料,重点探讨大尺度的水汽输送和辐合在 2003 年的江淮强梅雨期强降水过程中的作用。

2 2003 年江淮流域梅雨降水基本概况和环流形势

2003 年江淮流域在 6 月 21 日入梅,7 月 22 日出梅。对降水实况进行的分析表明,2003 年江淮地区主要的降水集中在两个时段:6 月 21 日~28 日,降水主要集中在长江流域,降水中心在长江中游(图 1a);6 月

29 日~7 月 11 日,除了湘北有一个降水中心达到 350 mm 以外,400 mm 以上大范围的降水带主要集中在淮河流域(图 1b);7 月 12 日以后淮河流域的降水属于西风带的过程性降水(图略)。在强降水集中的 6 月底至 7 月上旬的两周内,淮河流域普降大到暴雨,降水集中并且多持续性暴雨,从而形成全流域性的大洪水。下面的内容主要针对 6 月 21 日~28 日和 6 月 29 日~7 月 11 日这两个降水集中的时段进行分析。

在降水较集中的梅雨期间(6 月 21 日~7 月 11 日),在对流层中低层(图略),欧亚大陆中高纬主要被一个暖高压控制,在贝加尔湖以东到鄂霍次克海之间为一个闭合的低压,鄂霍次克海附近又是一个高压区。温度场上,中国大陆上没有明显的温度梯度,只是 50°N 附近有一条与极锋对应的明显的温度梯度带。由 1480 gpm 线代表的副高在降水第一阶段(6 月 21 日~28 日)还没有北推到中国大陆上,但是在第二阶段(6 月 29 日~7 月 11 日),它已经北进到华南地区。在 850 hPa 和 700 hPa 上,有一支西南低空急流稳定维持(图略)。

在 500 hPa 气压面图(图 2a,b)上,中高纬度的环流形势呈典型的“双阻型”,即乌拉尔山地区和鄂霍次克海被强大的阻塞高压所控制,两个阻高之间是一宽广的西风槽。对降水两个阶段的环流形势进行分析后可知,虽然同为“双阻型”,但在不同的阶段,“双阻型”的强度和位置也是有所变化的。在降水第一阶段,乌拉尔山阻高中心偏北(接近 70°N),发展强盛,呈典型的经向环流型,强度明显强于鄂霍次克海高压。而鄂霍次克海阻高中心偏南,走向相对平缓。紧靠乌拉尔山阻高的东边,即在贝加尔湖地区出现了闭合等值线的切断低压,槽线为西南东北走向。在降水第二阶段,

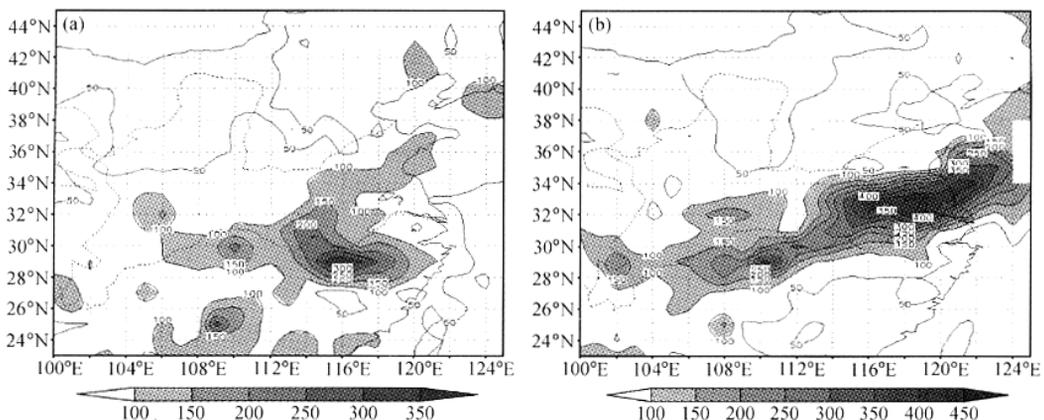


图 1 2003 年江淮流域强梅雨期降水分布(单位: mm)(a) 6 月 21~28 日 8 天实况降水总量 (b) 6 月 29 日到 7 月 11 日 13 天实况降水总量

Fig. 1 The distribution of precipitation during the heavy Meiyu period in 2003 (units: mm) (a) the total precipitation from 21 to 28 June; (b) the total precipitation from 29 June to 11 July

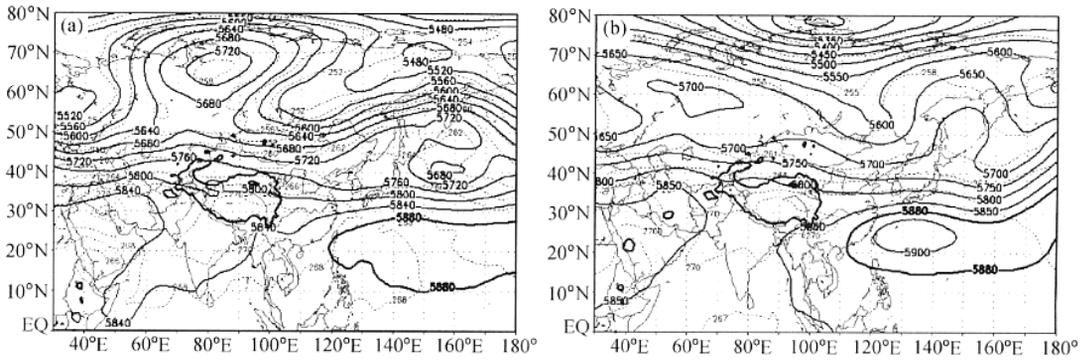


图 2 500 hPa 上位势高度和温度场分布, 实线: 等高线(单位: gpm), 虚线: 等温线(单位: K), (a) 6 月 21 ~ 28 日 (b) 6 月 29 日 ~ 7 月 11 日

Fig. 2 The distribution of potential height and temperature at 500 hPa. Solid line : potential height (units : gpm), dashed line : temperature (units : K). (a) Averaged from 29 to 28 June ; (b) averaged from 21 June to 11 July

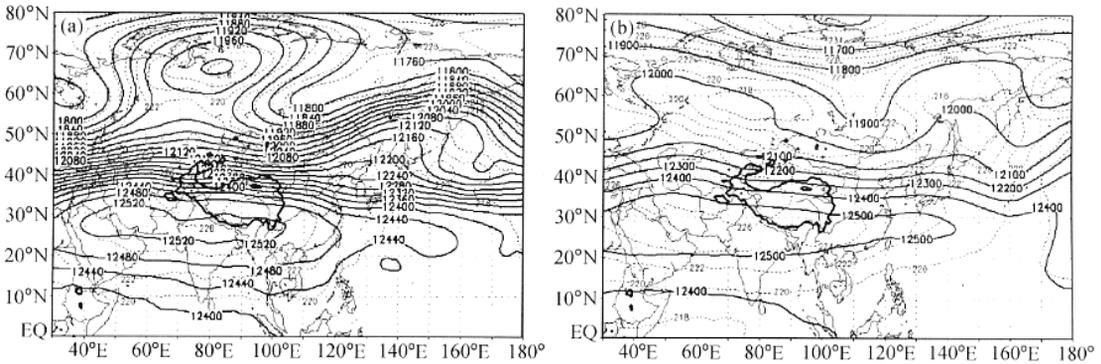


图 3 200 hPa 上位势高度和温度场分布, 实线: 等高线(单位: gpm), 虚线: 等温线(单位: K), (a) 6 月 21 ~ 28 日 (b) 6 月 29 ~ 7 月 11 日

Fig. 3 The distribution of potential height and temperature at 200 hPa. Solid line : potential height (units : gpm), dashed line : temperature (units : K). (a) Averaged from 21 to 28 June (b) averaged from 29 June to 11 July

乌拉尔山阻高形状变化较大,从第一阶段的正 Ω 型变化到向西倾斜,脊线呈西北东南走向,鄂霍次克海阻高也有明显的经向变化,从第一阶段比较平缓宽广的形势收缩并沿经向发展,强度明显加强。随着阻高的发展变化,阻高之间低槽的槽线由西南东北走向变为东南西北走向。两个阶段的中纬度上均为相对平直西风气流,西风带内小槽东移活跃,不断有冷空气随槽后的偏北气流南下影响江淮流域。在降水第一阶段(图 2a)副高的西伸脊点在 118°E 以东,副高控制范围主要在洋面上,到第二阶段(图 2b),5880 gpm 线向西伸过 115°E,向北到 29°N 附近,西伸脊点则到了 112°E,表明副高控制了江南和华南大部分地区,较第一阶段有明显的西伸和北抬。梅雨锋随副高的北跳从长江流域移到了淮河流域,与 850 hPa 上体现的北进是一致的。雨带由前期的长江流域推进到后期的淮河流域,与副热带高压的西伸和北进是密切关联的。

在 200 hPa 层上,南亚高压(图 3a,b)也稳定维持,其中心在降水第一阶段时还维持在 28°N,高空急流出

现在 35°N ~ 40°N 之间,在江南和华南上空是高压的辐散气流控制;在降水第二阶段,整个高压主体有北移和东进的趋势,其中心基本上到了 30°N,控制范围也从亚洲大陆向东扩展到太平洋上,高空急流在 40°N 附近,高层辐散气流位于长江流域及其以南地区的上空。

总之,从高层到低层的环流系统的配置都是较典型的梅雨环流形势,在大尺度天气系统的配置上是有利于强梅雨发生的。

3 2003 年梅雨期水汽通量流函数和势函数分析

强梅雨的形成离不开大尺度空间范围的水汽输送和水汽在江淮流域的持续性的辐合,分析这一时期对应的大范围的水汽输送特征对理解 2003 年江淮流域暴雨洪涝的形成和维持是有必要的。下面的内容主要以 2003 年梅雨期的水汽输送流函数、势函数以及对应的水汽输送非辐散分量和辐散分量的分布以及梅雨区的水汽收支来进行分析和讨论。

3.1 水汽通量流函数和势函数的计算方法

通过求取水汽通量输送的流函数和势函数^[41],得到它的旋转(非辐散)分量和非旋转(辐散)分量,从而可以分析具体的水汽通量输送特征。设

$$\mathbf{Q} = \mathbf{k} \times \nabla \psi + (-\nabla \chi) = \mathbf{Q}_\psi + \mathbf{Q}_\chi, \quad (1)$$

则有：

$$\begin{cases} \nabla^2 \psi = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{Q}_\psi, \\ -\nabla^2 \chi = \nabla \cdot \mathbf{Q}_\chi, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_\psi = \mathbf{k} \times \nabla \psi, \\ \mathbf{Q}_\chi = -\nabla \chi. \end{cases} \quad (3)$$

具体计算步骤为：

(a) 根据格点上的 q, u, v 的值, 计算出 \mathbf{Q} 及其散度和涡度场；

(b) 求解泊松方程, 用超张弛法数值求解(2)式得到流函数和势函数；

(c) 由(3)式得到水汽通量的辐散部分和旋转部分；

(d) 对(1)和(2)式进行垂直积分, 得到单位面积空气柱的势函数和流函数以及水汽通量的辐散和非辐散分量。

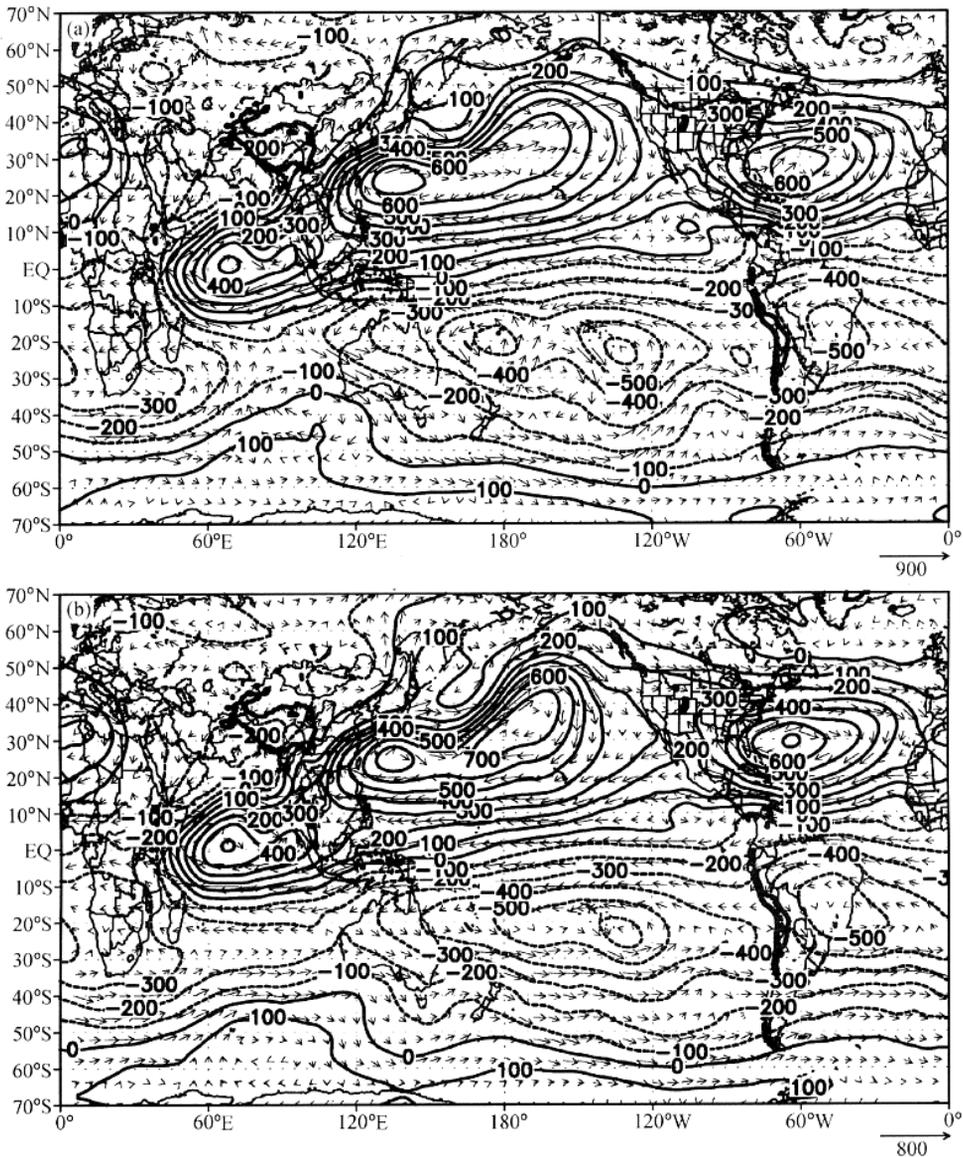


图4 2003年江淮流域强梅雨期整层水汽流函数及非辐散分量分布, 实线: 水汽输送流函数的值(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), 矢量: 非辐散分量。
(a) 6月21~28日平均 (b) 6月29日~7月11日平均

Fig. 4 The distribution of integrated stream function and nondivergent component mode of the water vapor transport (a) averaged from 21 to 28 June, and (b) averaged from 29 June to 11 July. Solid line: isolines of stream function (units: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), vector: nondivergent component mode

3.2 梅雨期全球水汽流函数和水汽势函数以及对应的水汽输送无辐散分量和辐散分量的分析

对 2003 年 6 月 21 日到 7 月 11 日强降水期间平均的全球水汽输送和水汽的辐合辐散状况分析,以及对水汽通量的计算均表明,江淮流域是该时期全球范围内水汽汇的一个高值中心,水汽通量大值区和水汽辐合区与降水大值区基本对应。

首先,分别分析 6 月 21~28 日和 6 月 29 日~7 月 11 日的水汽流函数无辐散分量的分布情况。非辐散水汽流函数,即非辐散水汽通量,反映的是水汽通量沿

等压线输送的部分,在全球水汽输送中占主要分量。具体看图 4a、b,无论是在长江流域降水集中时期(6 月 21~28 日,图 4a)还是淮河流域降水时期(6 月 29 日~7 月 11 日,图 4b),水汽流函数的整层分布在全球都有三个大值中心:印度洋、太平洋和大西洋,这与 1998 年和 1999 年的强梅雨时期的分布是类似的^[5]。其中,太平洋上的中心偏于西太平洋一侧。在中国大陆上主要是水汽输送流函数的低值中心。从水汽的输送来看,夏季印度季风环流和南海夏季风是向北输送水汽的主要通道,同时,索马里急流在水汽的输送过程中也充当

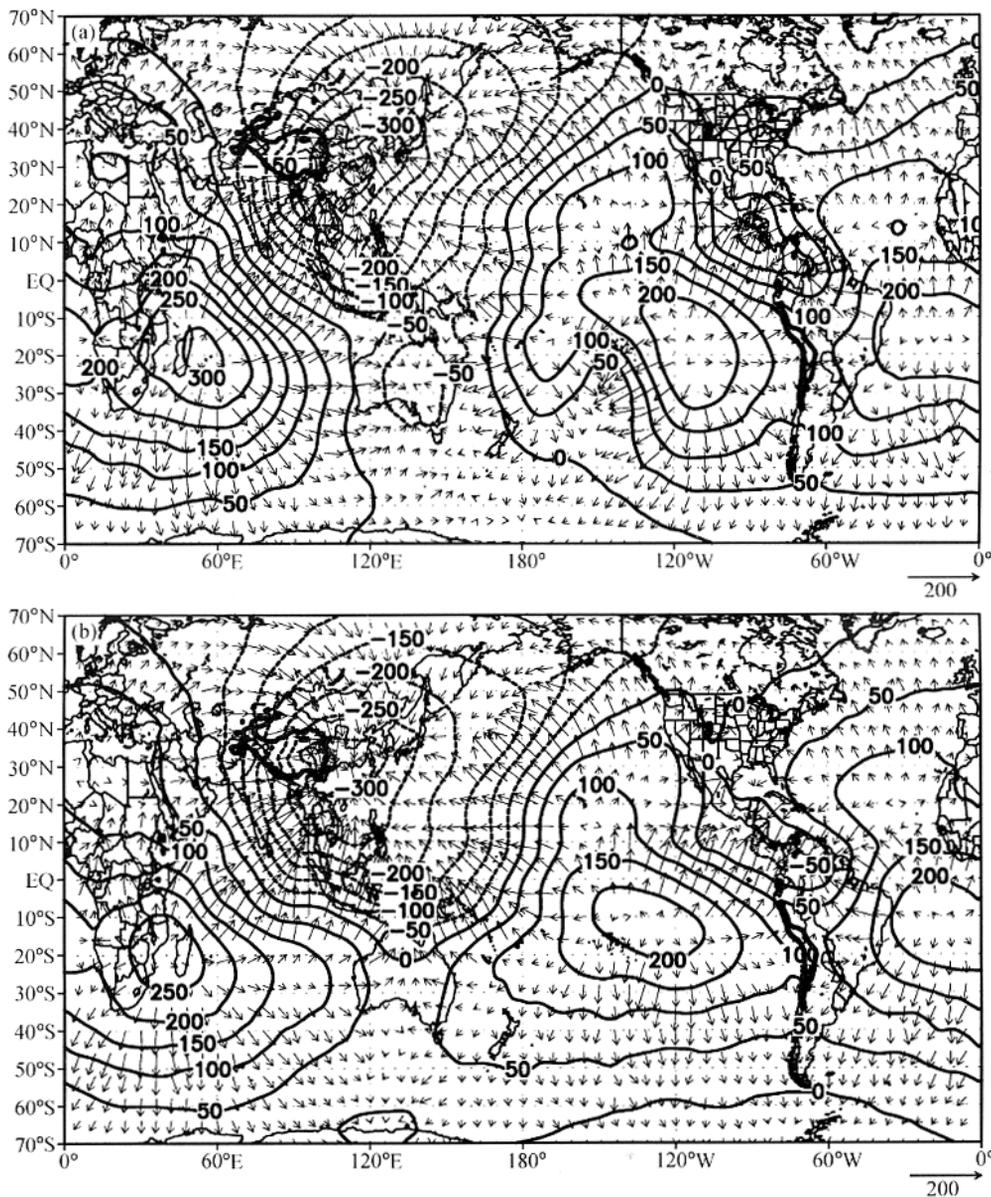


图 5 2003 年江淮流域强梅雨期整层水汽势函数及辐散分量分布,实线:水汽势函数的值(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),矢量:辐散分量。(a) 6 月 21~28 日平均;(b) 6 月 29 日~7 月 11 日平均

Fig. 5 The distribution of integrated potential function and divergent mode of the water vapor transport in 2003:(a) averaged from 29 to 28 June;(b) averaged from 29 June to 11 July. Solid line: isolines of potential function (units: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), vector: divergent component mode

了重要的角色。赤道东风带是大西洋向太平洋水汽输送的主要通道,而且在夏季,这个通道可以直达印度洋,为印度季风环流提供源源不断的水汽。这支气流在图 4 中表现很明显,从大西洋开始往西,经赤道东太平洋后到达印度洋,在索马里转向,经过孟加拉湾后呈西南气流形势向西北方向输送,成为梅雨期降水的主要水汽来源。从图 4 可以看出,在西太平洋上的高值中心左侧,也有一支很强的偏南风气流输送。如果这股气流很强且与来自印度洋方向的西南季风气流在我国东部地区汇成一支气流,就会使得低空急流加强,而低空急流的加强是造成梅雨期强降水的主要原因之一。这些大尺度空间范围的水汽输送路径是和梅雨期

相关的天气系统相联系的。再来看水汽势函数及辐散分量的分布情况。辐散水汽通量反映的是水汽通量穿过等压线输送的部分,在全球水汽输送过程中是一个小量,但是它对水汽输送的源和汇具有重要指示作用。从整层水汽的势函数分布和辐散分量来看(图 5a, b, 正值表示水汽辐散,负值则为水汽辐合),在降水的两个阶段,副热带洋区也都是水汽势函数的高值区,说明夏季时海洋是全球主要的水汽源区。同时,长江和淮河流域所在的区域是水汽势函数分布的低值中心,说明长江和淮河流域是对应时期全球最大的水汽集中区,表明这种区域性的强降水是与大范围的水汽输送和水汽辐合相联系的。由图 5a, b 可见,在三个水汽源

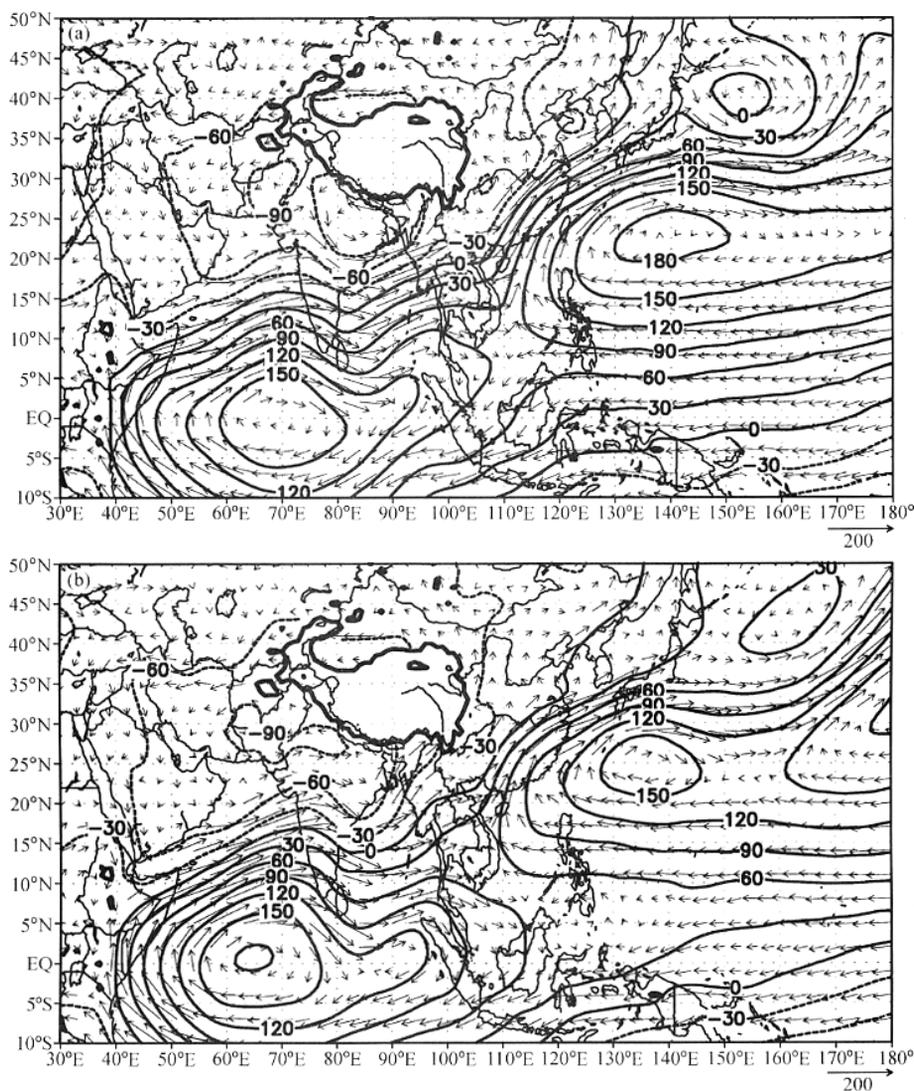


图 6 850 hPa 上水汽流函数及非辐散分量分布,实线:水汽流函数的值(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),矢量:非辐散分量。(a) 6 月 21 ~ 28 日平均; (b) 6 月 29 日 ~ 7 月 11 日平均

Fig. 6 The distribution of stream function and nondivergent component mode of the water vapor transport at 850 hPa: (a) averaged from 21 to 28 June; (b) averaged from 29 June to 11 July. Solid line: isolines of stream function (unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), vector: nondivergent component mode

区中,对我国有直接影响的应该是印度洋和太平洋。最大的水汽源区在印度洋上,中心值达到了 300 个单位。这与水汽流函数分布所示的强印度西南季风气流对水汽的输送是一致的。从水汽辐合的中心来看,在 6 月 21~28 日的平均图(图 5a)上,水汽输送势函数的矢量箭头辐合中心在长江流域及其以南地区,到了 6 月 29 日~7 月 11 日的平均图(图 5b)上,此矢量箭头的辐合中心北移到长江以北的淮河流域。强降水从前期的长江流域移到后期的淮河流域,应该是与此大范围的水汽输送和辐合中心北移有关。从图 4 和 5 也可见到,虽然在 6 月 21~28 日,降水主要是集中在长江流域,而 6 月 29 日~7 月 11 日的降水则是集中在淮河

流域,但是从全球尺度的水汽流函数及非辐散分量、水汽势函数及辐散分量的分布来看,水汽输送的路径以及对应的水汽辐合辐散在全球尺度来说没有明显的不同,表明较小空间范围的强暴雨洪涝发生在大尺度条件满足的情况下,还与其他条件有关。

以上是对 2003 年江淮流域强梅雨期平均的整层水汽流函数、势函数以及对应水汽输送的非辐散分量和辐散分量的分析,表明整层水汽的分布在梅雨期时,主要汇集到长江和淮河流域。对流层中层如 500 hPa 上在江淮地区是湿度的大值区,与两侧的空气有明显的湿度对比,说明在对流层中层沿长江和淮河流域的水汽梯度也是很明显的。虽然,水汽输送集中在大气

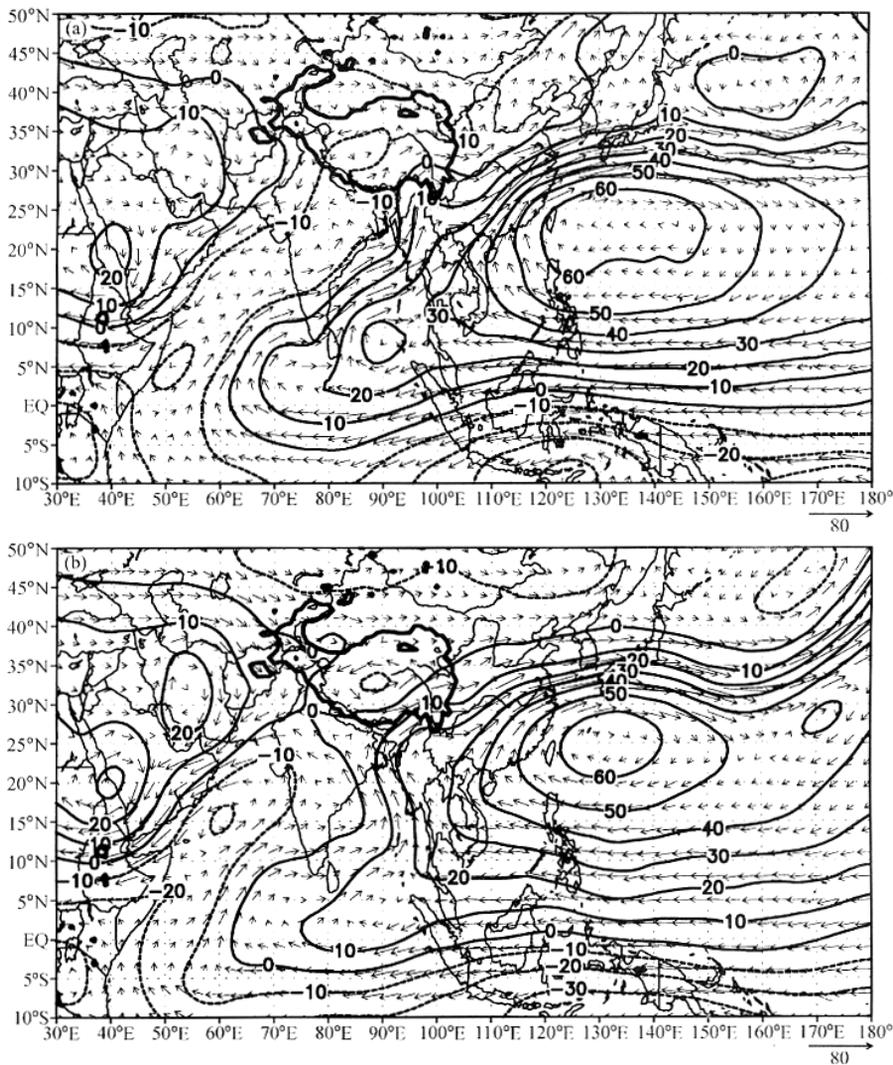


图 7 550 hPa 上水汽流函数及非辐散分量分布,实线:水汽流函数的值(单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$),矢量:非辐散分量。(a)6 月 21~28 日平均;(b)6 月 29 日~7 月 11 日平均

Fig. 7 The distribution of stream function and nondivergent component mode of the water vapor transport at 550 hPa : (a) averaged from 21 to 28 June ; (b) averaged from 29 June to 11 July. Solid line : isolines of stream function (units : $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), vector : nondivergent component mode

低层 700 hPa 以下,但除了分析整层水汽的分布外,对不同等压面从低层到中层各层的水汽输送进行更详细的讨论也是有必要的。

对水汽输送在不同层次分布特征的分析表明,在梅雨期,虽然整层的水汽输送和辐合都是沿降水集中的长江和淮河流域发生的,但是在不同的气压层上,水汽辐合的地点不一定上下层重合,有时会有所偏移。水汽输送虽然主要在对流层低层,但是当低层的水汽辐合中心与降水中心不重合时,对流层中层的水汽辐合对降水的产生也会有作用^[5]。以下的分析就是对 2003 年强梅雨期的水汽输送流函数、势函数以及对应的无辐散分量和辐散分量,在不同气压层(低层以 850 hPa 为例,中层以 550 hPa 为例)上的分布来讨论水汽输送流函数、势函数和非辐散、辐散分量的分布特征。

850 hPa 等压面(图 6a, b)的水汽输送与整层积分的水汽输送型类似,明显有与西南季风、南海季风和副高外围的西南气流对应的水汽输送。而中层 550 hPa(图 7a, b)上,来自于西太平洋副高外围的水汽输送较低层更明显一些。值得注意的是,来自低纬大洋的水汽流经孟加拉湾后分为两支,一支呈明显的西南气流

向东北方向输送到达江淮地区,这支气流在图 6 中比较显著;另一支气流则是沿着青藏高原南侧爬升,经过青藏高原以后转为偏西气流向东流到江淮地区,这支气流在图 7 中比较明显。在图 6 和 7 中,降水第二阶段的水汽输送较第一阶段有明显北移。与副高对应的西太平洋上的水汽流函数输送呈明显的反气旋环流结构。从不同层次上水汽输送的源汇项(图略)来看,在整个中国东部大陆都有水汽辐合,对应的中心位置从青藏高原以东一直到长江流域。这与 1999 年长江流域梅雨期的水汽辐合是不太一致的,该年水汽输送路径与 2003 年基本一致,但是水汽辐合的中心在不同层次上是不重合的^[5],这也可能是 2003 年梅雨期降水区域与 1999 年梅雨降水区域不一致(偏北)的原因之一。这种从低层到中层的水汽都汇集到江淮地区,对该地区的暴雨发生是有利的。

4 江淮流域梅雨双锋对应区域的水汽收支

在有利的大尺度环流背景下,西南暖湿气流与北方南下的干暖空气在江淮地区强烈辐合,伴随着强的

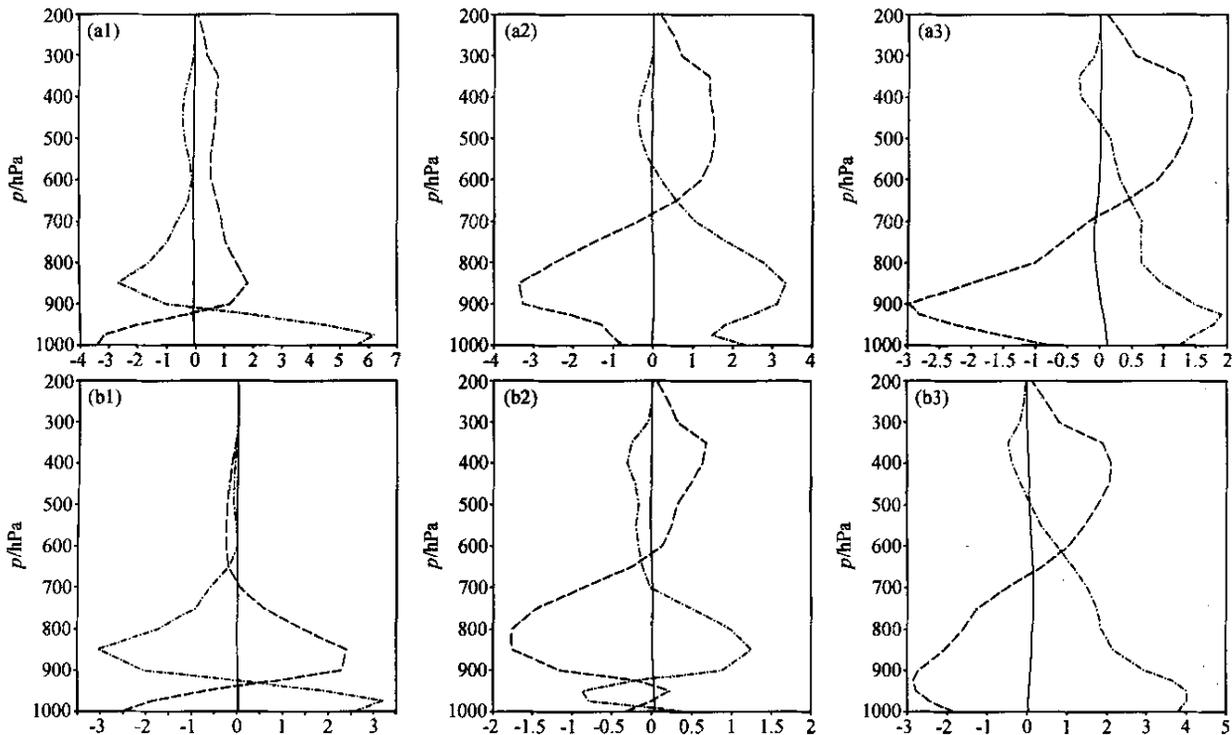


图 8 三个区域水汽收支分布(单位: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) 6月 21~28 日平均 (b) 6月 29 日~7月 11 日平均 1: 第一个区域, 2: 第二个区域, 3: 第三个区域; 点虚线: 散度项, 实线: 水汽局地变化项, 虚线: 水汽垂直输送项

Fig. 8 The distribution of the water vapor transport budget for the three regions: (a) averaged from 21 to 28 June; (b) averaged from 29 June to 11 July. 1 means region 1, 2 means region 2, and 3 means region 3. Dot dashed line: divergent term; solid line: the local change of the water vapor; dashed line: the vertical transport term

上升运动,水汽从对流层低层抬升到中高层,与两侧的相对干暖的下沉气流之间形成了明显的水汽梯度,对应了梅雨锋和副高边缘的另一条露点锋,这两条锋面形成了强梅雨期的梅雨锋系^[6]。梅雨锋系的形成又加强了水汽的输送和辐合,有利于强降水的加强和维持。为了了解水汽来源,详细分析不同区域的水汽收支也是有必要的。为此,我们取了三个区域:纬度分别为 20°N~25°N,25°N~30°N,30°N~35°N,经度都从 105°E~121°E,这三个区域可以大概表示露点锋、梅雨双锋间的水汽输送通道以及中国大陆上梅雨锋的位置,以这三个区域的水汽收支情况来分析降水两个阶段中水汽的变化。其中,水汽收支方程为

$$P - E_s = - \frac{1}{\sigma g} \int_{p_s}^{p_t} \int_{\sigma} \left(\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot qv + \frac{\partial \omega q}{\partial p} \right) dp d\sigma, \quad (4)$$

这里, P 是降水量, E_s 是蒸发量, σ 是选定的区域, g 是重力加速度, p_s 是地面气压, p_t 是顶层气压, 分别取为 1000 hPa 和 100 hPa, $\partial q/\partial t$ 是水汽的局地变化, $\nabla \cdot qv$ 是水汽散度, 而 $\partial \omega q/\partial p$ 是垂直运动对水汽的输送。水汽散度项由下式计算:

$$\nabla \cdot qv = \frac{1}{\sigma} \oint v_n q dl = \frac{1}{\sigma} \left(\sum_{i=1}^m - \bar{v}_i \bar{q}_i \Delta l_s + \sum_{j=1}^n \bar{u}_j \bar{q}_j \Delta l_e + \sum_{i=1}^m \bar{v}_i \bar{q}_i \Delta l_n + \sum_{j=1}^n - \bar{u}_j \bar{q}_j \Delta l_w \right), \quad (5)$$

上式右边 4 项表示水汽从不同边界进入选定区域的值, $v_n q$ 是边界的法向分量, m 和 n 是选定区域沿经向和纬向的格点数, “-”表示空间步长的平均值, Δl_s , Δl_e , Δl_n 和 Δl_w 则分别是边界上的格距。用(4)和(5)式对选定三个区域的具体计算结果见图 8 和 9。

从图 8 可见,无论是哪个区域,水汽的局地变化都是最小的项,可以忽略。水汽收支主要由散度项和垂直输送项共同决定。在降水的两个阶段,水汽的收支有明显的变化。在 6 月 21~28 日,水汽收支的大值集中在 30°N 以南的一区和二区,到了 6 月 29 日~7 月 11 日,水汽收支的大值区移到江淮地区,与整个水汽输送的北移是一致的。其中,水汽主要在低层辐合,而垂直输送项总是把水汽从低层往高层输送,这一特征在第二区域和第三区域的水汽收支中尤其明显,对应的项总是低层失去水汽为负而高层得到水汽为正。

在水汽的散度项(图 9)中,从南边界进入的水汽占主导地位,其次是西边界,北边界和东边界一般是水汽的流出边界,对应的水汽收支一般都是负值,尤其是东边界。但是对不同的边界,水汽从西边界流入的层

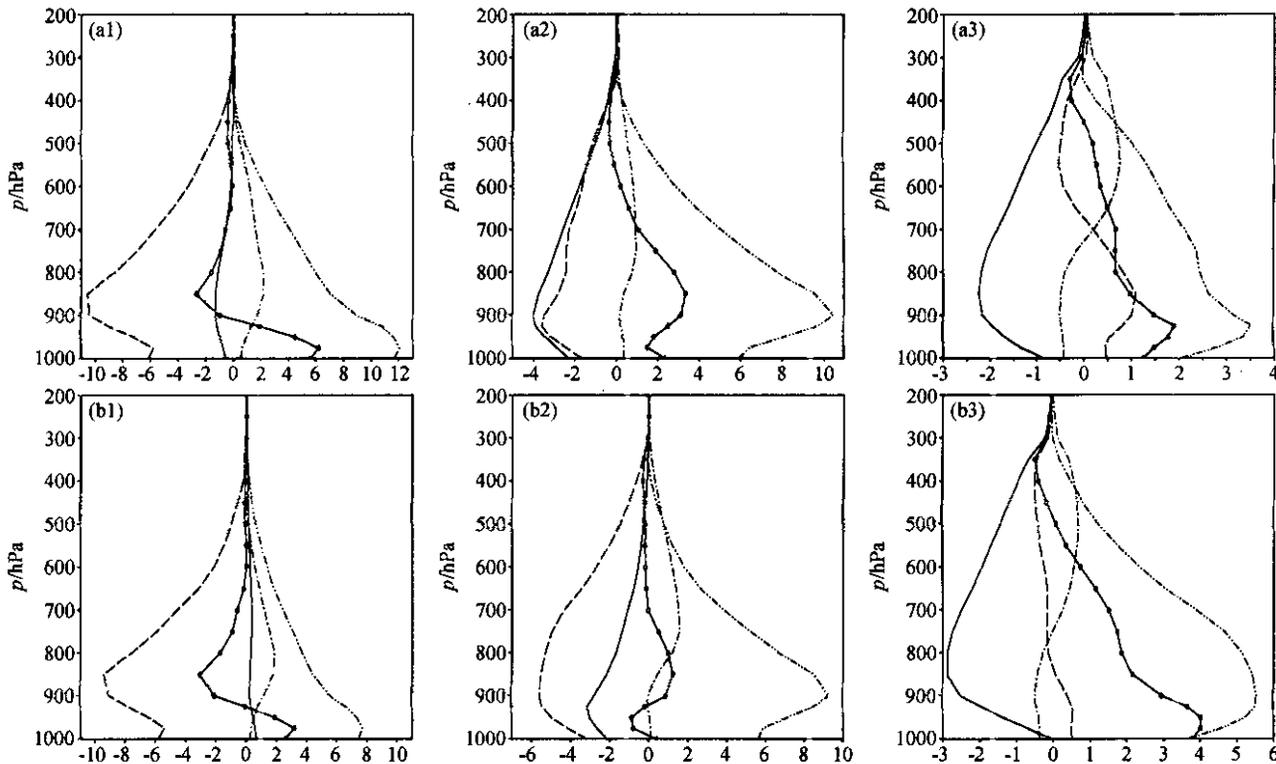


图 9 三个区域水汽收支散度项的分布(单位: $10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) (a) 6 月 21~28 日平均 (b) 6 月 29 日~7 月 11 日平均。1 第一个区域, 2 第二个区域, 3 第三个区域, 空心圆: 散度项的和, 实线: 东边界, 点虚线: 西边界, 点点虚线: 南边界, 虚线: 北边界

Fig. 9 The distribution of divergent term for the three regions: (a) averaged from 21 to 28 June; (b) averaged from 29 June to 11 July. 1 means region 1, 2 means region 2, and 3 means region 3. Open circle: summary of the divergent term; solid line: the east boundary; dot dashed line: the west boundary; dot dot dashed line: the south boundary; dashed line: the north boundary

次是有区别的(图9点虚线所示)。具体地说,在第一个区域,水汽流入峰值在850~800 hPa附近,到了第二个区域,这个峰值高度就抬升到750~700 hPa附近,在第三区域,也就是梅雨锋所在的区域,从西边界流入的水汽峰值高度则到了600~500 hPa层次上,表明在西边界以西,即青藏高原上也有水汽输入江淮地区。这一计算结果验证了第3节中分析水汽输送流函数的分布时得到的结论,就是低纬海洋上的水汽流在途经青藏高原后,还会转为偏西气流从青藏高原的近地层进入江淮地区,而这一高度到了江淮平原上以后已经是中层了,中层水汽含量的增加对降水的形成应该也是有利的。

徐祥德等^[7]认为高原中部区域西边界与中国区域南边界的水汽输送对长江流域特大暴雨的形成均具有重要的作用。仪清菊等^[8]在研究1998年长江流域大暴雨时也指出:1998年7月500 hPa的月平均水汽通量场与平均涝年水汽通量场的偏差分析表明:来源于南海和阿拉伯海的偏东和偏西两支水汽输送带十分明显,其中来自阿拉伯海的水汽输送带爬越青藏高原后呈偏西气流,并与来自南海的水汽输送带汇合构成偏西南水汽输送带,于长江中下游异常特大暴雨区上空形成了与常年不同的一支强的偏西南水汽输送通道。由本文的分析也可得到类似的结论,即2003年江淮流域梅雨期的水汽输送也有类似的特征,来自低纬的水汽流经青藏高原转为偏西的水汽向东流入江淮地区可能是2003年江淮流域洪涝的原因之一。由于水汽输送主要集中在700 hPa以下,在此等压面以上的水汽随高度指数减小,与低层南边界输入的水汽相比,从西边界输入的水汽是个相对小的量,它在江淮流域强梅雨形成过程中的作用还需要更进一步的研究。

5 小结

通过对2003年6月21日~7月11日强梅雨期间水汽输送流函数及非辐散分量、势函数及辐散分量以及水汽收支的分析,证实了大气中的水汽输送和辐合对梅雨和梅雨锋系双锋结构的形成提供了必要的条件。对水汽输送和水汽的辐合辐散状况分析表明,江淮流域是该时期全球范围内水汽汇的一个高值中心,水汽输送大值区和水汽辐合区与降水区基本对应。从水汽的输送来看,夏季印度风环流和南海夏季风是向长江流域输送水汽的主要通道。计算分析还表明:与

大范围的水汽输送和辐合中心北移相对应,降水也从前期的长江流域移到后期的淮河流域。在降水的两个阶段,水汽输送的路径以及对应的水汽的辐合辐散在全球尺度没有明显的不同,表明较小空间范围的强暴雨洪涝的发生在大尺度条件满足的情况下,还与其他条件有关。

梅雨期内,中层大气中的水汽主要是垂直上升运动对低层水汽的抬升作用,除此之外,低纬大洋上的水汽也可能途经青藏高原后再向东流入江淮地区,它的输送对增大对流层中层大气的水汽含量有一定作用,对江淮地区强梅雨的发生可能也起到了相当的作用。

参考文献

- [1] 朱乾根,林锦瑞,寿绍文,等.天气学原理和方法.北京:气象出版社,1992,914pp
Zhu Qiangeng, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. *Principle and Approach of the Synoptic* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1992, 914pp
- [2] 丁一汇.暴雨和中尺度气象学问题.气象学报,1994,52:275~278
Ding Yihui. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, 52: 275~278
- [3] 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,2003,61:129~145
Ding Yihui, Hu Guoquan. A study on water on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese) 2003, 61: 129~145
- [4] 丁一汇.天气动力学中的诊断分析方法.北京:科学出版社,1989,293pp
Ding Yihui. *The Diagnostic and Analysis Method in Synoptic Dynamics* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1989, 293pp
- [5] 周玉淑.梅雨锋系的空间结构特征、形成机理及湿位涡异常的研究.中国科学院大气物理研究所博士学位论文,2002,189pp
Zhou Yushu. Study of the space structural features and its forming mechanism of the Meiyu front system and moist potential vorticity anomaly. Ph.D. dissertation (in Chinese). Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences 2002, 189pp
- [6] Gao Shouting, Zhou Yushu, Lei Ting. The structure features of the Meiyu front system. *Acta Meteorologica Sinica* 2002, 16: 195~204
- [7] Xu Xiangde, Miao Qiuju, Wang Jizhi, et al. Transport model at the regional boundary during the Meiyu period. *Advances in Atmospheric Sciences* 2003, 20: 333~342
- [8] 仪清菊,徐祥德.不同尺度云团系统上下游的传播与1998年长江流域大暴雨.气候与环境研究,2002,6:129~145
Yi Qingju, Xu Xiangde. The propagation and development of cloud cluster systems and severe precipitation event in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese) 2002, 6: 129~145