

2004 年 7 月广西汛期暴雨过程水汽特征

罗建英¹ 廖胜石² 黄归兰² 王庆国² 张 薇²

(1. 广西壮族自治区气象台, 南宁 530022; 2. 广西南宁市气象局)

提 要: 运用 NCEP/NCAR 每日 4 次全球再分析 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格资料, 分析了 2004 年 7 月广西汛期暴雨过程中的水汽和风场变化情况。结果表明, 在暴雨过程中暴雨发生发展与广西区域水汽的变化有很好的对应关系, 水汽含量的增强一般出现在暴雨发生之前。广西区域暴雨发生和间歇与夏季风的加强及中断关系密切。广西区域暴雨期与非暴雨期水汽收支情况及其输送路径的差异明显。暴雨期, 广西区域的水汽源主要为孟加拉湾、南海、西太平洋; 非暴雨期, 水汽的主要来源是南海。暴雨期的水汽收入远远大于非暴雨期。

关键词: 暴雨 季风 水汽输送 水汽收支

Water Vapor Analysis of Heavy Rain Events in Guangxi in July 2004

Luo Jianying¹ Liao Shengshi² Huang Guilan² Wang Qingguo² Zhang Wei²

(1. Guangxi Meteorological Observatory, Nanning 530022; 2. Nanning Meteorological Office)

Abstract: Based on NCEP/NCAR daily reanalysis data in July 2004, the moisture and wind fields of heavy rain events in Guangxi are analyzed. Results show that the evaluation of heavy rain has a good correspondence to the variety of moisture and water-vapor content increased before the heavy rain happened. The occurrence and break of heavy rain is closely associated with the strengthening and break of summer monsoon. There is a remarkable difference of the vapor inflow and outflow between heavy rain period and non-heavy rain period. South China Sea is the main water vapor source, while the Bengal and the West Pacific Ocean also play the important roles in heavy rain period besides South China Sea. And the water vapor income of heavy rain period is much more than that of non-heavy rain period.

Key Words: heavy rain monsoon water vapor transport vapor inflow and outflow

引言

降水与大气的各种物理条件密切相关,充分的水汽供应是暴雨形成的基础,暴雨很大程度上依赖于水汽输送结构的变化,如水汽的源汇、水汽输送的通道以及输送率等。一般认为,我国南方降水的水汽主要依靠热带和副热带季风的输送^[1-5]。史学丽等^[6]认为来自孟加拉湾和南海的西南风水汽输送是中国夏季强降水发生的重要条件。周军等^[7]指出南海海域是水汽汇区,是华南降水的水汽通道。汪钟兴^[8]分析了扰动风场对水汽输送过程的作用,从而揭示梅雨期间暴雨过程水汽输送的内在物理过程。陈晓红等^[9]和康志明^[10]研究淮河连续性暴雨时也发现南海是淮河暴雨区最重要的水汽源。

2004 年华南是旱年,广西大部地区降水量比常年同期偏少 4~6 成,偏少程度居 1951 年以来第 2 位,该年暴雨以上强度的降水集中出现在 7 月^[11]。为什么会造成上述异常的降水状况,这除了与降水系统活动受到大尺度环流乃至行星尺度环流的制约有关,也与此期间华南地区的水汽循环及收支状态异常有密切关系。因此,本文从多角度对 2004 年 7 月广西区域的水汽场和风场进行研究,对 2004 年 7 月暴雨期与非暴雨期水汽输送路径的变化进行分析和比较,探讨 2004 年 7 月华南汛期水汽条件与暴雨的内在联系。

1 天气形势

2004 年 7 月上旬前期,东亚大槽稳定维持,我国大部地区受西北气流控制,0407 号热带气旋蒲公英沿华东海岸线北上;上旬中后期,中高纬地区转为两槽一脊,高压脊位于贝加尔湖附近,同时西太平洋副高加强西伸,两高之间是华北槽和江淮低压槽,槽线穿越湖南

和广西,槽底伸至中南半岛,低纬地区有西南季风北涌,华南地区受西南气流控制。7 月中旬前期,东亚大槽东移北收,西太平洋副高西伸至南海中部,华南地区处于副高边缘;中后期,副高北抬,脊线到达 25°N 附近,青藏高原东南部有高原槽缓慢东移,华南地区处于副高西南侧的东南气流与槽前西南气流的汇合区。7 月下旬前期,副高西伸控制到华东、华南地区,热带辐合带南落到 15°N 附近;中后期,副高减弱东撤,热带辐合带略北抬。

2004 年 7 月广西出现 ≥ 5 站暴雨的天数为 13 天,取某日广西 90 站的区域平均降水量代表该日的降水强度。对照逐日降水强度和逐日暴雨站数,可以发现它们之间有很好的对应关系(图 1)。依逐日的降水强度和暴

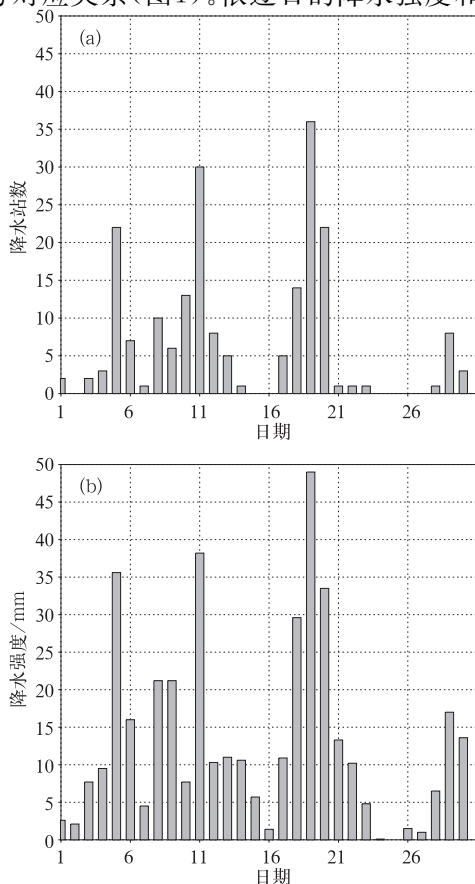


图 1 2004 年 7 月逐日暴雨站数(a)及降水强度(b)

雨站数将整个降水期划分为 4 个降水过程:第 1 次过程:7 月 5—6 日。主要受槽前西南急流北抬的影响,降雨时段比较短,其中 5 日有 22 站暴雨;低槽东移后,强降雨结束。第 2 次过程:7 月 8—12 日。持续时间长,日暴雨站数最多为 11 日的 30 站,广西境内部分河流水位第一次超过警戒水位,其中 10 日钦州站 24 小时降雨量为 314mm,接近建站以来历史最大值记录。第 3 次过程:7 月 18—21 日。日暴雨站数最多为 19 日的 36 站,是自 1986 年以来同期最强的一次降雨过程。第 4 次过程:7 月 29—30 日。受北抬的热带辐合带影响,广西出现了一次比较小范围的强降雨过程,持续时间短,过程最多暴雨站数为 8 站。

2 资料及计算方法

本文所用降水资料为广西 90 个气象站的日降雨量和 NCEP/NCAR 全球再分析风场和湿度场网格资料,时段为 2004 年 7 月 1—31 日,每日 4 次,水平分辨率 $1^\circ \times 1^\circ$ 经纬度。

气柱水汽含量^[12] $p_w = \frac{1}{g} \int_{1000}^{100} q dp$ 表示垂直气柱中的总水汽量,并换算成水深,代表单位气柱中的水汽凝结后在单位气柱地面上液态水的深度,单位为 cm, q 其中为比湿,单位为 $g \cdot kg^{-1}$ 。

垂直方向上的每一层水汽通量由该层各格点的纬向水汽通量与经向水汽通量矢量求和而得,用 1000hPa 到 100hPa 的水汽通量积分代表整层水汽通量。在讨论各个边界的水汽收支时:

$$\text{东、西边界水汽通量: } \frac{1}{g\sigma_w} \iint q u dl dp$$

$$\text{南、北边界水汽通量: } \frac{1}{g\sigma_w} \iint q v dl dp$$

其中 σ 为区域面积,对西边界和南边界正值表示流入,负值表示流出;对于东边界和北边界则正值表示流出,负值表示流入。

将 2004 年 7 月日暴雨站数 ≥ 5 站的日期定义为暴雨日(包括 5、6、8—13、17—20、29 日共 13 天),日暴雨站数 < 5 站的日期定义为非暴雨日(包括 1—4、7、14—16、21—28、30、31 日共 18 天),分别求取暴雨日和非暴雨日时间平均的物理量,以比较暴雨期和非暴雨期的水汽源地和输送的差异。

3 广西上空气柱水汽含量变化特征

图 2 反映了 2004 年 7 月广西区域($22^\circ \sim 27^\circ N, 104^\circ \sim 113^\circ E$)的气柱水汽含量的变化特征。从图 2 可以发现,7 月份气柱水汽含量日平均值为 6.45cm,峰值分别出现在 7 月 4、9—10、18—19 和 29 日,谷值出现在 7 日、12 日和 25 日。与 4 次暴雨过程相联系的气柱水汽含量都维持在 6.6cm 以上。水汽含量的增强先于暴雨发生,并在暴雨过程中维持较大水汽含量。在广西区域上空相对湿度的高度—时间图(图略)上可以看出,整个 7 月广西区域水汽充沛,低层相对湿度均达到 70% 以上。暴雨期间湿层更为深厚,从地面到对流层中层,相对湿度能达到 80% 以上,与暴雨发生有很好的对应关系。但在非暴雨期间,相对湿度迅速下降,出现显著的低谷,随高度也迅速降低,在对流层中层,相对湿度仅为 30%~40%,空气极为干燥。但最大水汽含量日(7 月 4 日)并非对应着最多暴雨日,说明有时空气中的水汽并没有全都凝结成雨水降到地面,而水汽含量最低的 7 月 25 日和无暴雨日有很好的对应关系,这些特征有助于对华南暴雨的研究和预测。水汽含量增大而且高,相对湿度层变厚,是 2004 年 7 月广西区域强降水发生过程中的主要特点。

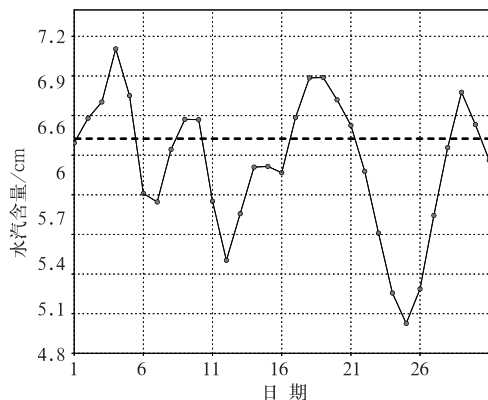


图2 2004年7月广西区域气柱水汽含量的逐日变化(单位:cm)

4 风场的变化

4.1 低层经向风的变化

从广西区域($104^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$)南、北两侧(22°N 和 28°N)的850hPa经向风和二者的差值随时间的变化图(图3)上发现,2004年7月暴雨过程期间,广西低层至少有4次以上的南风加强过程,每次过程均与暴雨相伴。在广西南侧 22°N 的4次南风的加强过程对应了广西的4次强降水过程(即图中粗横线

处)。广西北侧 28°N 的南风增强过程和暴雨过程的对应关系不如南侧的经向风对应得好。同时可以发现,广西低层南北侧经向风的差值与暴雨过程的对应关系比南、北侧的更好,4次降雨过程都出现在经向风差值的峰值区中。这反映出2004年7月,广西南侧的南风增强给广西区域带来了充沛的水汽,有利于广西出现降水,但如果广西北侧的南风大于南侧的南风,则水汽向北输送,广西为水汽的辐散区域,不利于广西出现强降水;另外,如果南侧南风增强,北侧南风很弱或者转为北风,则最有利于广西水汽的辐合和产生强降水。从图3还可以看出,南侧的南风在7月初和7月23—27日为两个明显的低值区,对应于季风活动的减弱,这也是暴雨中断期。因此,2004年的夏季风有持续时间长、中断次数少和强度大等特点,这为华南暴雨过程提供了十分有利的大尺度风场和水汽条件。可见,在水汽充分的条件下,影响降水强弱的环境因子主要是风场,降水强度变化主要受到南北风差值大小的影响,但各暴雨过程的南北风差值并不相同,并非都在南北风差值最大时,降水强度达到最大。

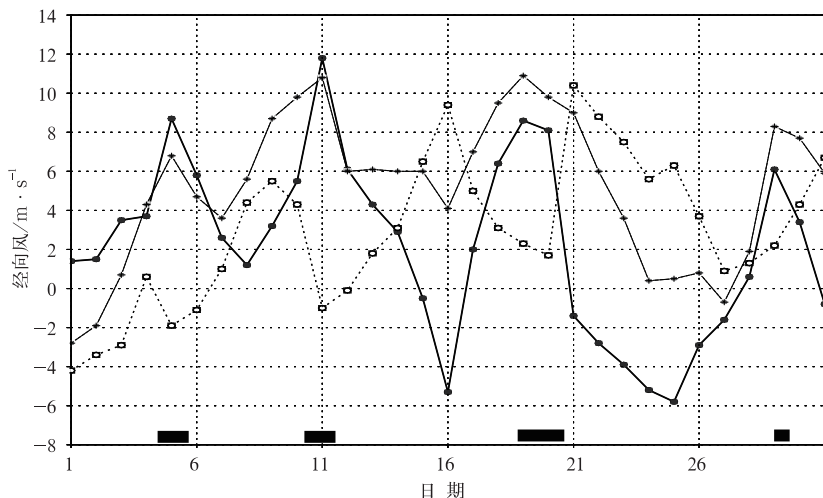


图3 广西区域 22°N 、 28°N 850hPa 经向风及其差值
虚线: 28°N ; 细实线: 22°N ; 粗实线: 22°N 与 28°N 的经向风差值

4.2 风场的垂直分布

图4a反映了纬向风速的高度—时间演变特征。对流层中低层的西风与高层的东风自7月初建立,300hPa以上主要为东风气流,800hPa以下主要为西风气流,并且在7月21日后向下延伸至850hPa。对流层中低层的西风7月下旬前始终很强,在850hPa高度上,7月上旬和中旬都有 $\geq 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的强西风(图中阴影区域),前3次广西区域性暴雨都出现在西风强盛期。强西风仅在7月下旬开始中断,而广西区域暴雨的间歇期也恰与此时期相对应。经向风场的高度—时间演变图(图4b)中,高层为北风与低层为南风的分布形势持续很长,除了7月下旬的一次中

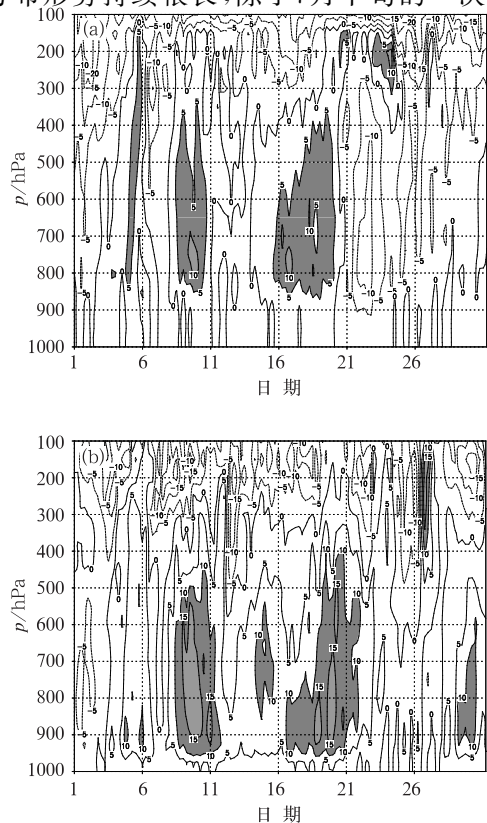


图4 广西区域纬向风(a)和经向风(b)
时间—高度剖面图
(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,阴影区风速 $\geq 10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

断外,一直维持比较稳定的分布,最强降水发生在7月两次最稳定的南风盛行期,降水的中断则恰好发生在南风减弱期。

可见,在汛期广西处于季风场中,季风峰值区在广西的时间演变与广西区域性的降水期有很好的对应关系。夏季风的脉动或加强期预示着广西区域性暴雨发生,它的中断期则对应暴雨过程之间的短暂间歇期。

4.3 水汽输送的响应

以上分析表明,2004年7月广西上空的水汽含量和风场都具有4个峰值,它们通过水汽通量有机地结合在一起,指示了广西区域水汽的来源和输送,成为影响降水强度的关键。图5和图6分别给出了整层水汽通量

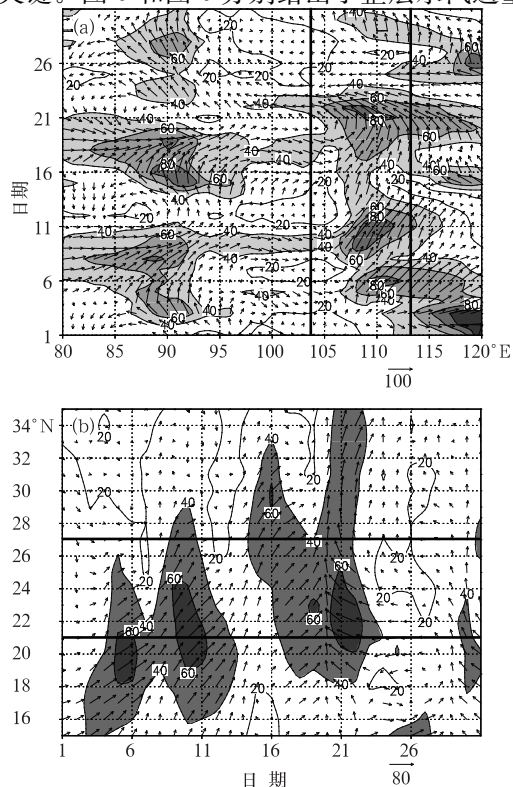


图5 整层水汽通量散(单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
沿 $22^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 平均的经度—时间剖面图(a)和
沿 $104^{\circ}\sim 113^{\circ}\text{E}$ 平均的纬度—时间剖面图(b)
(阴影区:水汽通量 $\geq 40\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,
两条粗实线之间为广西区域)

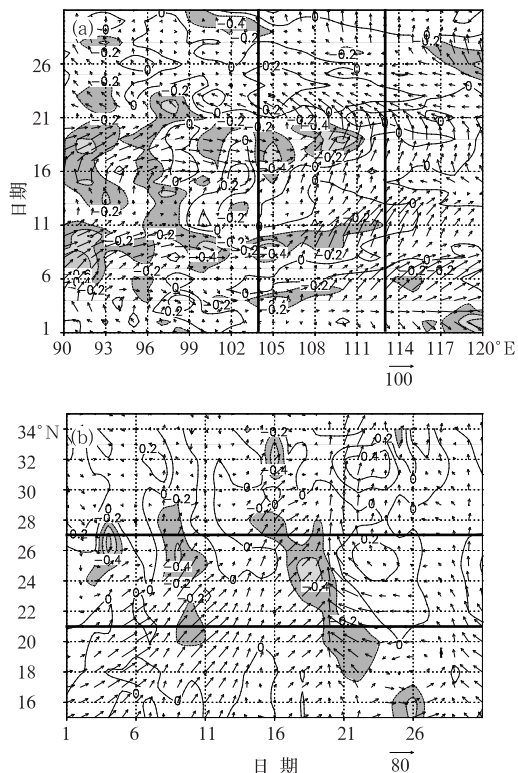


图6 整层水汽通量散度(单位: $10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

沿 $22^{\circ} \sim 27^{\circ} \text{N}$ 平均的经度—时间剖面图(a)

和沿 $104^{\circ} \sim 113^{\circ} \text{E}$ 平均的纬度—时间剖面图(b)

(阴影区:水汽通量散度 $\leq -0.2 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,

两条粗实线之间为广西区域)

及其散度的沿 $22^{\circ} \sim 27^{\circ} \text{N}$ 空间平均后的经度—时间剖面图和沿 $104^{\circ} \sim 113^{\circ} \text{E}$ 空间平均后的纬度—时间剖面图。它们反映了两个特征:一是广西区域有4次与西南风相伴的水汽通量大值区存在;二是,2004年7月广西总体上为水汽汇合区,但强的水汽辐合是间断性出现的,在广西有4次水汽的强辐合出现。从经度时序图上还可以看到,华南以西地区在广西暴雨发生前是正的水汽通量大值并且有相当强的水汽通量辐合,流经广西的水汽通量与 90°E 附近的水汽通量“一脉相承”或者说流经广西的水汽通量大值一部分与 90°E 的水汽通量相联,在7月21日前后,流经广西的水汽通量还有来自东部和南部成分。

5 暴雨期与非暴雨期的水汽循环比较

5.1 整层积分的水汽通量

图7给出了1000hPa到100hPa垂直积

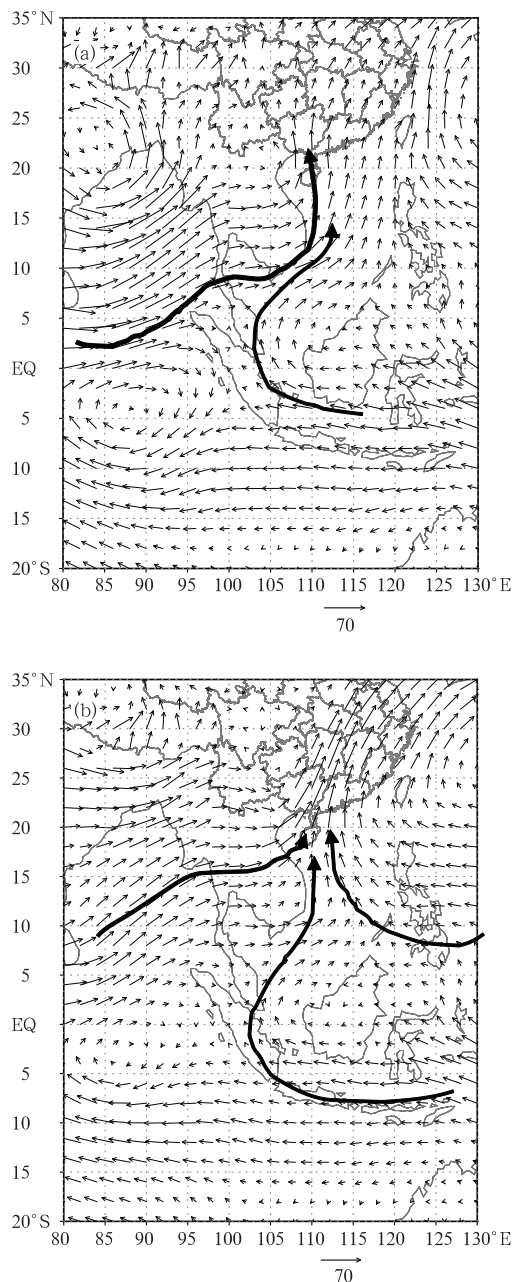


图7 非暴雨期(a)和暴雨期(b)平均的从1000hPa到100hPa垂直积分的水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

分的水汽通量及其输送方向。其中图 7a 是 2004 年 7 月非暴雨期间平均水汽输送分布, 图 7b 是 2004 年 7 月暴雨期间平均水汽输送分布。可以看到, 水汽通量的分布在暴雨期与非暴雨期差异明显。

在非暴雨期, $85^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 之间赤道以北 22°N 地区的孟加拉湾有一个气旋, 其南部 15°N 附近较强的西南气流将一部分水汽向北输送, 赤道以南 5°S 附近则有一个反气旋, 其北部以偏西气流为主, 将印度洋的水汽向东输送。这两支水汽在南海南部 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$ 地区汇合, 并随西南风继续向北进入华南, 华南水汽的主要来源是南海, 提供华南地区一般性降水的水汽。在华南暴雨期, 孟加拉湾地区不再是气旋, 明显的气旋性环流出现在我国青藏高原附近, 25°N 到赤道附近为强的西南气流, 从南亚将水汽自西向东输送, 这支输送带除了直接经中南半岛进入我国西南和华南, 向华南输送水汽外, 还向南海输送水汽, 并通过南海向华南输送水汽。另一支是自赤道地区 (105°E 附近) 从东南向西南的越赤道气流, 它先汇入孟加拉湾地区的季风气流中, 经中南半岛南部、南海南部向北汇入北部的大尺度水汽输送带, 经北部湾向华南输送水汽。水汽通道一直穿越整个华南到达长江中下游, 另外还有一条沿着副高南侧的东风带进入南海的水汽输送路径。图 7b 中的箭头表示三支向北的水气流从热带、副热带地区北上影响华南的主要路径。可见, 影响 2004 年夏季暴雨过程的水汽来源主要有 3 个: 孟加拉湾、南海、西太平洋。

5.2 广西区域各边界的水汽输送情况

取 $20^{\circ}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$ 为研究的暴雨区域, 分别对它的 4 个边界求时段平均的整层积分水汽输送, 以得到暴雨区水汽收支的大致情况, 其结果如图 8 所示。

由图 8 可见, 就整层积分的水汽而言,

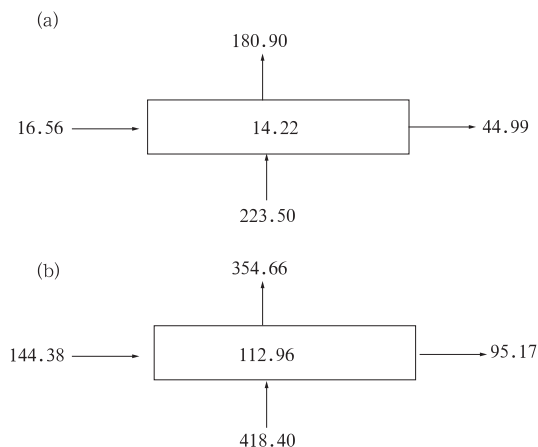


图 8 2004 年广西区域非暴雨期(a)和暴雨期(b)平均的水汽收支
(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

2004 年 7 月通过上述区域各边界的水汽通量的贡献是不尽相同的。暴雨期, 广西区域 4 个边界的水汽收支都远远大于非暴雨期间的收支。暴雨期南边界的输送值最大, 为 $418.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 北边界是最大的水汽输出区 ($354.66 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 西边界为较小的水汽输入区, 广西区域净得的水汽为 $112.96 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在非暴雨期, 西、南边界也还是水汽输入区, 北边界和东边界为水汽输出区, 南边界仍为最大的水汽输送区, 北边界为主要的水汽输出区, 但是西边界的水汽输入不足东边界输出的一半, 而北边界的输出几乎占了南边界输入的 80% 以上, 这使得非暴雨期广西区域净得水汽仅为 $14.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在两个阶段, 南边界的输入作用都最大; 西边界虽然也都是水汽源区, 但数值上比南边界小; 东边界都为水汽输出区; 北边界的输出值比东边界的输出值大得多。无论在暴雨期还是在非暴雨期, 南边界的收入都比北边界的输出要多, 南、北差值都为正值; 在非暴雨期间, 西边界的水汽收入比东边界的输出要小得多, 西、东差值为负值, 但是在暴雨期间, 西边界的水汽收入大幅上升, 远

大于东边界的水汽输出,西、东边界差值变为了正值。说明西边界的水汽收入对广西区域暴雨的发生发展有重要影响。

5.3 对流层的水汽输送情况

为了得到 2004 年 7 月广西暴雨期间水汽通量在空间上的三维图像,进一步分析了暴雨区上空对流层高层、中层和低层东、西、南、北 4 个界面的水汽通量。为讨论方便,文中将垂直方向分为 3 层,100~400hPa 视为高层,400~700hPa 视为中层,700~1000hPa 视为低层,并据此对 4 个边界面的水汽通量分别积分。

表 1 是暴雨期和非暴雨期各层通过各个面的水汽通量。从表中可以看到,无论对暴雨期还是非暴雨期,水汽主要是从南边界和西边界流入,东边界和北边界流出,并且水汽的流入、流出主要在中低层进行,约占整层水汽辐合的 80%~90%。在暴雨期,高层除了从西边界有较少的水汽输入,其余 3 个边界均为水汽输出。南边界中低层是水汽流入,高层为水汽流出,实际上是来自孟加拉湾和南海的水汽在低层由南往北输送,在有利的环流形势下在华南凝结降雨,同时还有另一部分水汽在高层由北向南输送,实现水汽循环的一种表现。

表 1 暴雨期和非暴雨期通过各层的水汽通量(单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

	东		南		西		北	
	暴雨期	非暴雨期	暴雨期	非暴雨期	暴雨期	非暴雨期	暴雨期	非暴雨期
高层	0.83	-1.36	-4.05	-0.57	3.03	-3.03	1.19	-0.8
中层	30.83	15.44	90.74	50.63	53.56	0.73	100.12	44.62
低层	63.5	30.91	331.71	173.49	87.79	18.86	253.36	137.08

6 结 语

从雨情分析入手,将 2004 年 7 月广西暴雨期划分为 4 个阶段,对其水汽来源与水汽收支作了诊断分析,研究了在 2004 年早年背景之下广西暴雨过程的水汽特征,得到广西暴雨时期水汽收支图像,揭示了水汽循环的一些规律,主要结果如下。

(1) 2004 年 7 月广西强降水过程与水汽含量的极大值密切相关。降水的强弱与水汽含量的增减变化一致,这表明后者是前者的一个必要条件。

(2) 夏季风的脉动与广西暴雨的发生发展关系密切。夏季风加强时,由西边界经中南半岛输入南海地区的水汽明显增加,成为主要的水汽来源,并在南海地区形成一个明显的水汽源区,在此积累的大量水汽进一步

向北输送到华南和长江流域,为那里的强降水提供必要的水汽供应条件。

(3) 广西区域暴雨期与非暴雨期水汽收支情况及其输送路径的差异明显。在暴雨期,广西区域的水汽源主要为孟加拉湾、南海、西太平洋;在非暴雨期,水汽的主要来源是南海。

(4) 水汽主要是从南边界和西边界流入的,东边界和北边界则流出,并且水汽的流入、流出主要在中低层进行。在暴雨期广西区域 4 个边界的水汽收支都比非暴雨期的强。西边界水汽收入的大幅增加对广西区域暴雨的发生发展有重要影响。

参考文献

- [1] 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会技术组. 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集[M]. 北京:

- 气象出版社,1996:282.
- [2] 唐东升,王建德,刘文泉. 夏季华南降水与水汽输送气流及大气加热场的关系[J]. 南京气象学院学报, 1994,17(2):148-152.
- [3] 田红,郭品文,陆维松. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系[J]. 南京气象学院学报,2002,25(4):496-502.
- [4] 黄忠,吴乃庚,冯业荣,等. 2007年6月粤东持续性暴雨的成因分析[J]. 气象,2008,34(4):53-60.
- [5] 康志明,鲍媛媛,陈晓红. 2005年6月我国南方雨带异常偏南的分析. 气象,2006,32(4):91-96.
- [6] 史学丽,丁一汇. 1994年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的研究[J]. 气象学报,2000,58(6): 666-678.
- [7] 周军. 华南暴雨区边界层急流的特征和成因[J]. 南京气象学院学报,1986,9(2):348-356.
- [8] 汪钟兴. 扰动风场对水汽输送过程的作用[J]. 气象, 1993,19(10):3-6.
- [9] 陈晓红,余金龙,邱学兴,等. 2005年7月4—11日淮河流域强降水过程的水汽收支分析[J]. 气象, 2007,33(4):47-52.
- [10] 康志明. 2003年淮河流域持续性大暴雨的水汽输送分析[J]. 气象,2004,30(2):20-24.
- [11] 李艳兰,罗莹,黄雪松. 广西2004年气候特点及其影响评价[J]. 广西气象,2005,26(1):24-27.
- [12] 刘健文,郭虎,李耀东,等. 天气分析预报物理量计算基础[M]. 北京:气象出版社,2005:28.