

一个孟加拉湾低压水汽场的初步分析

丁一汇 张宝严 傅秀琴

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

根据1979年夏季季风试验时期较稠密的高空资料,本文对7月3—9日发生在孟加拉湾地区的一个季风低压进行了水汽场的分析,计算了可降水量、垂直加权的相对湿度、水汽通量散度和海面蒸发的分布,发现随着低压环流的发展,低压由一个干涡迅速地转变成为一个湿涡。在成熟期,各种湿度参数都达到低压生命期的最大值。总的来说,这个低压湿度场的演变似乎是低压环流场发展的一种结果。可降水量与低压环流很相似;平均相对湿度与 ω 分布有更密切的关系;水汽辐合场很不对称(主要在低压以西和以南),它与实际云区和降水区一致。研究还发现,低压的发展和维持与边界层(约900 hPa)中水汽辐合有更密切的关系。

一、引 言

1979年夏季季风试验期间(Summer MONEX),对7月3—9日发生在孟加拉湾地区的一个季风低压曾进行了详细的野外观测,得到了比较稠密的高空资料,因而有可能对低压的结构及其演变进行细致的分析。作者在另两篇文章中^[1,2]曾讨论了这个低压的风场结构和凝结加热场分布,发现两者都具有明显的不对称性。主要强风区、大尺度上升区、稳定和对流加热区等都位于低压的西部和南部,并且它们的强度变化与低压的发展有密切关系。卫星云图和降水资料表明,这个低压的主要云区和雨区也都位于低压中心以西和以南。这与其它个例和综合的低压结构分布^[3]类似。本文的目的是利用比较稠密的低压内部实测资料,研究低压湿度场和水汽辐合场的特征及其与云区分布的关系。过去由于资料限制,很少有人研究过海上孟加拉湾低压水汽场的特征,本文是第一次利用特别的观测资料提供这方面的结果。

二、资料和计算方法

在1979年7月3—9日6天¹⁾的试验期间,两架研究飞机(Electra和P-3)在孟加拉湾地区共投掷了91个下落式探空仪。这种探空仪主要测量飞行高度(大约500hPa)以下的风、温度和露点(或相对湿度)。本文所用的是经美国大汽研究中心(NCAR)重新处理

1984年4月3日收到,6月8日收到修改稿。

1) 7月4日缺飞机资料,本文没有进行计算。

和校正过的飞机资料。对于 500hPa 以上的层次,主要利用商业飞机在 300—200hPa 层中测量的风和温度资料,这取自 Astling 等人^[4]的结果。把上述不同来源的资料与孟加拉湾周围常规的陆地测站探空资料、卫星测风资料、船舶资料和特别探空资料组合在一起,可以给出相当稠密的资料覆盖区。

对上述不同来源的资料进行仔细的相互校正和比较之后,用主观方法对 u , v , T , T_d 和 H (高度)场进行了分析。在垂直方向上共分 12 层(地面、950、900、850、800、700、600、500、400、300、200、100hPa),水平网格距经度和纬度均为 1° 。这种分辨率大致与飞机下掷探空的距离相当,因而可描述天气尺度或某些次天气尺度低压的结构特征。计算海面蒸发的海温资料是 7 月的多年平均值。原始的湿度资料一般只到 300hPa 或 400hPa,而我们采用内插法得到了对流层上层(300—100hPa 层)的湿度场。假定 100hPa 处相对湿度为 1%,插出 300 到 100hPa 的相对湿度,然后再求出比湿和露点。

我们计算了地面到 500hPa 层的可降水量和对气压加权的相对湿度,其公式分别为:

$$\frac{1}{g} \int_{500}^{P_s} q dP \text{ 和 } \frac{1}{P_s - 500} \int_{500}^{P_s} RH dP$$

式中 q 是比湿 (g/g), RH 是相对湿度, P_s 是地面气压。

整个空气柱的水汽通量散度和海面蒸发分别由下式计算:

$$I = -\frac{1}{g} \int_{100}^{P_s} (\nabla \cdot q \vec{V}) dP$$

$$E_s = \rho_s C_D |\vec{V}_s| (q_s - q_r)$$

式中 $\vec{V}$ 是水平风向量; ρ_s 是地面空气密度; C_D 是阻力系数,取 3.0×10^{-3} ; $|\vec{V}_s| = \sqrt{u_s^2 + v_s^2}$, 是地面风速值; u_s 和 v_s 是地面风向量的东西和南北分量; q_r 是海面空气的比湿; q_s 是在海温条件下的饱和比湿。

三、可降水量和平均相对湿度的分布

如文[1]中所述,本文分析的这个孟加拉湾低压主要在地面到 500hPa 层中发生发展。又由于大气的水汽含量一般集中在对流层中下部,因而可以用地面到 500hPa 可降水量和对气压加权平均的相对湿度分布来研究湿度场与低压演变的关系。这两个量实际上分别代表对流层中下部水汽的绝对含量和相对含量。

图 1 是 7 月 5—8 日降水量的分布。7 月 3 日低压扰动最早在 600—400hPa 层出现^[4],此时可降水量最大值区位于此中层气旋性涡旋以西,而在低压扰动区是一个相对干区(图略)。7 月 5 日(图 1a),低压环流向下降展到 850hPa。这时水汽含量的最大值区仍位于低压中心以西,范围比 7 月 3 日显著减小。低压区仍主要位于相对干区内,但水汽含量值比 7 月 3 日增加很多。这说明这个低压的初期扰动是比较干燥的。以后在低压闭合环流从上到下的伸展过程中,低压区的水汽含量逐渐增加。7 月 6 日(图 1b),低压环流已伸到地面,成为对流层中下层一个较深厚的气旋性环流。这时可降水量分布的形式发生了显著变化。在低压中心区出现水汽含量最大值,并且整个高水汽含量区与低压环流区完全一致。这表明低压环流对其湿度场的分布和结构有密切关系。7 月 7 日(图 1c),当

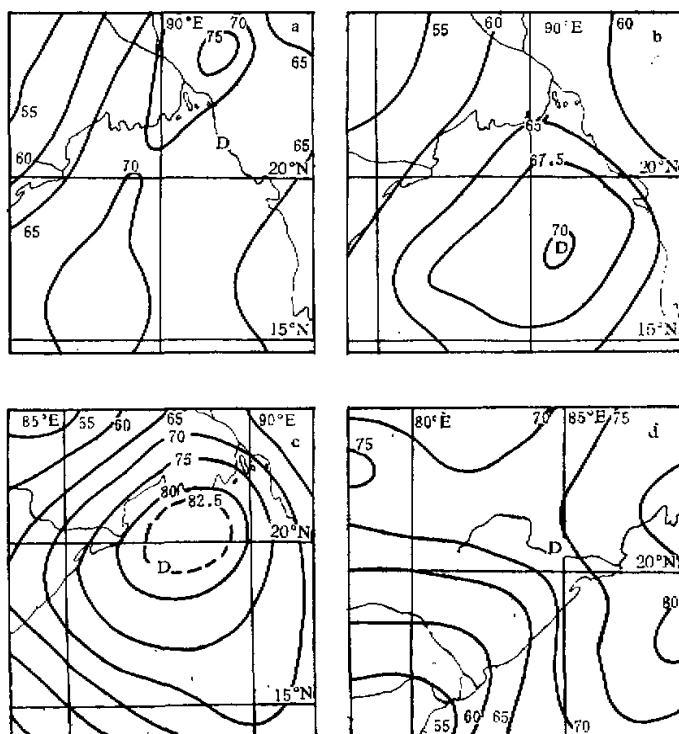


图1 1979年7月5—8日(大致代表世界时00点)
逐日可降水量(500hPa—地面)分布

(a)7月5日, (b)7月6日, (c)7月7日, (d)7月8日.

单位: mm

低压达到成熟期时,可降水量大值区明显扩大,并且其量值在低压区内急剧增加,其平均值由7月5日的70mm增加到85mm。7月8日(图1d),低压位于印度大陆东部,低压区的可降水量显著减小,干舌分别位于低压西北和西南地区,大值区位于孟加拉湾西部海区。由上可见,大气中可降水量的分布与低压的发展有非常密切的关系,可降水量的增加主要反映了湿层的增厚和各层水汽绝对含量的增加。在扰动初期(7月5日),低压区内可降水量最大值为68mm,到成熟期(7月7日)达85mm,增加了25%,这是相当显著的。

垂直加权的相对湿度分布如图2所示。7月3日(图略),中层气旋性涡旋基本上位于较干的环境中,相对湿度平均为70%,主要饱和区和近饱和区位于涡旋以南。7月5日(图2a)饱和区(这里取相对湿度大于90%的地区)向北移动,接近低压中心区,但主要湿区仍位于低压中心以南。低压中心以西是干区。这与该地区较强的下沉运动一致。7月6日(图2b),如可降水量场一样,相对湿度场分布也发生了显著变化,低压环流区和高湿区十分一致。在低压中心220km,半径内都为饱和区。如果比较一下与垂直速度分布的关系,可以看到,这里也是中低层上升运动最强的地区。7月7日(图2c),饱和区

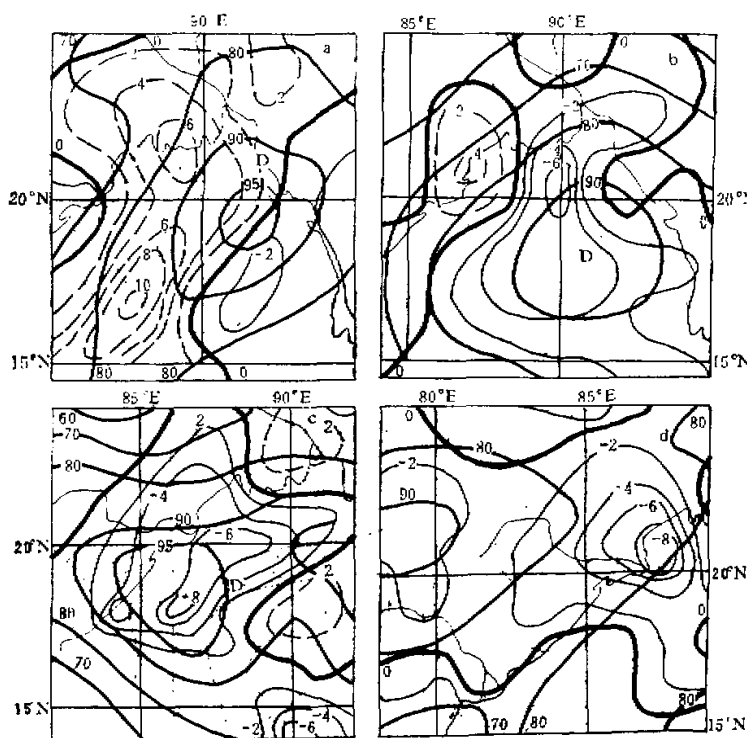


图2 1979年7月5—8日逐日垂直加权的相对湿度
(较粗实线)(地面—500hPa)

(a) 7月5日, (b) 7月6日, (c) 7月7日, (d) 7月8日,

单位: %。图中还给出了600hPa垂直运动($\omega = \frac{dp}{dt}$)分布。

细实线代表上升, 细虚线代表下沉, 粗实线为零线,
单位 10^{-3}hPa/s 。

明显扩大, 形成两个中心 (东面中心只给出一部分)。注意西面的一个中心并不与低压的环境中心一致, 而是位于低压中心以西, 与最强的上升运动区一致。两个高湿中心之间的相对低值区正好与下沉运动区一致。因而整个看来, 相对湿度的分布与垂直运动分布有更密切的关系。Vincent 等人^[4]也得到类似的结果。这一天低压的主要云区和降水区位于低压之西侧^[2], 与上述高湿区位置一致。7月8日(图2d), 低压登陆减弱, 相对湿度明显减小, 在低压周围变成相对干区。主要的湿区在低压以西, 这与云和降水区也一致。这里也是上升运动较大的地区。

由上面的分析可见, 平均相对湿度的分布比可降水量分布与低压的云区和降水区有更密切的关系。这是由于平均相对湿度高值区主要是由上升运动引起的缘故。也可以得到, 低涡由干变湿的过程主要是环流系统发展的结果。

四、水汽辐合的分布

图3是7月5—8日整层水汽通量散度(I)和海面蒸发(E_s)之和的分布。它代表进入(或由气柱输出)单位面积垂直气柱的净水汽量。 E_s 与 I 相比,一般为 I 的10%—30%,因而对气柱的净水汽收支有一定的贡献。 I 实际上包括两项,一是水汽质量辐合($-q\nabla \cdot \vec{v}$);一是水汽平流($-\vec{v} \cdot \nabla q$)。一般以第一项的贡献为主。7月5日(图3a),低压主要位于水汽辐散区,只在南部和东部有较弱的水汽辐合。这表明当低压没有伸

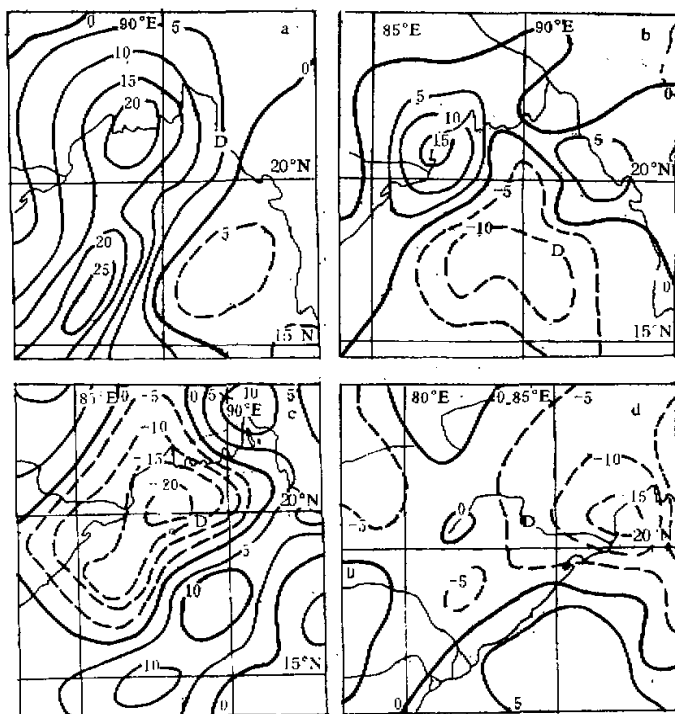


图3 1979年7月5—8日整层水汽通量散度(I)和海面蒸发(E_s)之和的分布

(a)7月5日, (b)7月6日, (c)7月7日, (d)7月8日。

实线代表辐散,虚线代表辐合,单位: $10^{-2} \text{g/s} \cdot \text{cm}^2$

展到地面时,还得不到环境的水汽供应。7月6日(图3b),水汽辐合场发生显著变化,在低压环流区,出现大范围的水汽辐合。但与平均相对湿度和可降水量分布不同,主要的水汽辐合区位于低压中心以西。这种情况与实际云区和降水区分布更一致^[4]。7月7日(图3c),水汽辐合分布很不对称,与图1c和图2c上分布有显著差异。主要水汽辐合区位于低压西部,而在低压东南和东部是水汽辐散区。这与低压云区和雨区的分布十分一致。水

汽辐合的量值也比7月6日增加一倍以上。7月8日(图3d),云和降水区也主要在低压以西,这可能与该处一片弱水汽辐合区相对应。但是最大的水汽辐合区出现在低压以东,比较图2d,这里也是上升运动大值区。现在还不清楚为什么没有相应的云雨区与这片强上升运动和水汽辐合区对应。总的来说,上面的分析表明,水汽的净辐合(包括海面蒸发)比可降水量和平均相对湿度分布与低压的实际云雨区有更好的对应关系。但这三个量从7月5日到7月6日在分布上都出现显著变化,从7月6日到7月7日在量值上都有迅速的增加,因而都与系统的环流演变有密切关系。

7月5—8日通过低压中心东西方向的水汽辐合垂直剖面图表明(图4),主要水汽辐合层的位置对低压中心很不对称。7月5日(图4a),在低压中心以东有一较弱的水汽辐合层,以西是强辐散区。7月6日(图4b),强水汽辐合层位于低压以西220km处,最大值在900hPa高度。还可以看到,主要水汽辐合层在600hPa以下。7月7日(图4c)西面

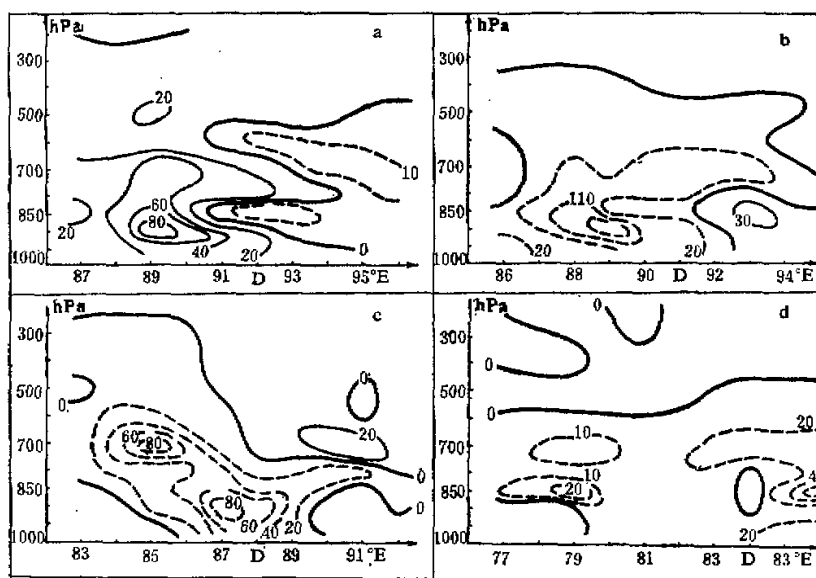


图4 1979年7月5—8日通过低压中心的东向西水汽通量散度的垂直剖面图

(a)7月5日, (b)7月6日, (c)7月7日, (d)7月8日。
实线代表辐散,虚线代表辐合。单位: $10^{-1} \text{g/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}$

辐合最大值移近低压中心,约在110km附近。在低压中心以西300—500km范围内,水汽辐合层很深厚,高达300hPa,并且在440km的700hPa高度还有一个最大值。这种西侧深厚的强辐合层可能是形成低压西部大范围云区和强降水区的一个原因。从图4d上也可以看到低压西部大范围的水汽辐合层,但强度比成熟期明显减弱。

最后我们给出低压内区(半径150km范围内)平均的水汽辐合垂直廓线(图5)。7月5日,几乎整层是水汽辐散,只在对流层中层和850hPa有很弱的水汽辐合。但是在7月

6 日, 分布完全相反, 400hPa 以下各层几乎都为水汽辐合, 最大值在 700hPa, 也即在边界层以上。在低压成熟期, 水汽辐合最大值高度显著降低, 在 900hPa, 量值迅速增大, 由 7 月 6 日的 $2 \times 10^{-7} \text{g/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}$ 增加到 $5.5 \times 10^{-7} \text{g/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}$ 。水汽辐合几乎全部在 700hPa 以下, 700hPa 以上水汽辐合为零。因而进入低压的水汽辐合或水汽供应在成熟期大部份来自边界层。7 月 8 日当低压减弱时, 最大水汽辐合层的高度又上升到 700hPa, 边界层中的水汽辐合明显减小。由上面的分析可见, 水汽辐合的最大值与低压演变有密切关系。当低压加强时, 辐合最大值有降低的趋势。当最大值位于边界层时, 正是低压最强的时候。这个事实清楚地表明边界层产生的爱克曼抽吸对低压的发展和维持具有非常重要的意义。当低压减弱时, 水汽辐合最大值高度又增高到 700hPa。这种现象在一些中尺度对流风暴的发展过程中也曾被注意过^[4]。低压区 300km 半径内的平均水汽辐合廓线也具有类似的变化特征。

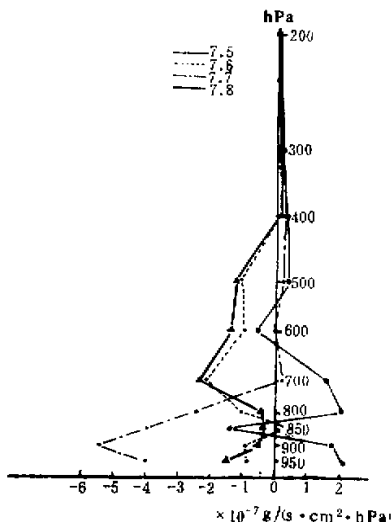


图 5 1979 年 7 月 5—8 日低压内区
(半径 150km 范围内) 平均的
水汽通量散度廓线
单位: $10^{-7} \text{g/s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{hPa}$

五、结 论

根据低压发展过程中一些湿度参数分布的分析可以得到以下几点主要结果:

(1) 低压的初始中层扰动处于相对干燥的大气中。但随着低压环流的向下伸展, 低压区出现缓慢的增湿现象。一旦低压环流到达地面, 低压的湿度场就会发生很大变化, 由一个干涡迅速转变为一个湿涡。低层水汽辐合的显著加强可能是导致这种转变的一个原因。当低压达到成熟阶段时, 各种湿度参数的量值迅速增加。可降水量增加 25%; 水汽辐合总量增加一倍多; 平均相对湿度高值区 (饱和区和近饱和区) 显著扩大。当低压减弱时, 各种湿度参数则显著减小。因而湿度场的变化与低压的发展有很密切的关系。并且, 这个低压湿度场的演变似乎是低压环流场发展的一种结果。

(2) 可降水量、平均相对湿度和水汽净辐合 (包括海面蒸发) 的分布并不完全一致。可降水量分布与低压环流场很相似: 低压中心最潮湿, 向外逐渐减小。平均相对湿度和 ω 分布有更密切的关系, 表现出一定的不对称性。水汽辐合场的分布更不对称, 最强的辐合区位于低压西部和南部。这与低压的实际云区和降水区十分一致。实际上这种对应关系正是郭晓岚积云参数化的物理依据之一。

(3) 低压平均水汽辐合廓线最大值的高度与低压发展有密切关系。在低压发展时期 (7 月 6 日), 最大辐合值高度较高, 在 700hPa; 在低压成熟期 (7 月 7 日), 下降到 900hPa 附近; 低压减弱时又上升到 700hPa。因而低压的发展和维持与边界层中水汽辐合有更密切的关系。这个事实也许可以用来判断低压的发展过程。另外, 它也说明, 要使低压显著

加强和维持,一种有利的强迫机制是使水汽辐合最大值与边界层耦合起来。

参 考 文 献

- [1] 丁一汇、傅秀琴、张宝严, 1984, 1979 年夏季季风试验时期一个孟加拉湾低压结构的分析, *Advances in Atmospheric Sciences*, Vol. 1(1), 62—75.
- [2] 丁一汇、傅秀琴、张宝严, 1979 年夏季季风试验时期一个孟加拉湾低压中凝结加热的分布(即将发表)
- [3] Godbole, R. V., 1977, The Composite structure of the monsoon depression, *Tellus* Vol. 29, 25—40.
- [4] Astling, E. G., H. G. McRandal and D. G. Deitch, 1981, Upper tropospheric features of convective Cloud complex systems associated with a monsoon depression. International Conference of early results of FGGE and large-scale aspects of its monsoon experiments, Tallahassee, Florida, U. S. A., 12—17, Jan.
- [5] Vincent, D. G., and R. G. Waterman, 1979, Large-scale atmospheric Conditions during the intensification of Hurricane Carmen (1974), I. Temperature, moisture and kinetics, *Mon. Wea. Rev.* Vol. 107(3), 283—294.
- [6] Krishnamurti, T. N., et al., 1983, Precipitation estimates from rainguage and satellite Observations Summer MONEX, Department of Meteorology, FSU.
- [7] Krutzberg, C. W., and D. J. Perkey, 1976, Release of potential instability: Part I: A sequential plume model within a hydrostatic primitive equation model. *Jour. of Atmos. Sci.* vol. 33(3), 456—475.

THE PRELIMINARY STUDY OF THE MOISTURE FIELD OF A DEPRESSION OVER THE BAY OF BENGAL DURING 1979 SUMMER MONEX

Ding Yihui Zhang Baoyan Fu Xiuqin
(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

Based on the data sets of the denser special upper-air observation acquired in 1979 Summer MONEX, the moisture fields (the probable maximum precipitation, the vertically integrated relative humidity and the divergence of the moisture flux) of a depression over the Bay of Bengal which occurred during 3—9 July are estimated. It has been found that as the depression developed, it turned into a deep moist cyclonic vortex from a vortex embedded in the relatively dry atmospheric environment at the initial stage. At the mature stage, all of the estimated moisture parameters had their respective maximum during the life cycle of the depression. Generally, the evolution of the moisture field of the depression is the consequence of the evolutive circulation patterns. The distribution of the probable maximum precipitation resembles that of the flow patterns of the depression, the distribution of the average relative humidity is closely related to the patterns of the vertical velocity ($\omega = \frac{dP}{dt}$), and the distribution of the moisture flux convergence, highly asymmetrical, is in good agreement with the positions of the cloud and precipitation areas. In addition, the growth and maintenance of the depression are strongly dependent on the moisture flux convergence (at 900 hPa) in the planetary boundary layer.