

2004年梅雨期武汉上空水汽的演变及其 与暴雨的关系

李武阶^{1,2} 李 俊² 公 颖² 王 娟³

(1. 南京大学大气科学系, 南京 210093; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所;
3. 黑龙江省嫩江县气象局)

提 要: 利用2004年6—7月武汉每天两个时次探空资料计算出的可降水量以及各层的比湿和相对湿度, 对比分析各种水汽量的垂直分布以及逐日演变特征, 探讨了2004年梅雨期武汉上空水汽的演变及其与暴雨的关系。结果表明, 武汉上空大气中水汽含量随高度递减, 90%以上的水汽集中在700hPa以下; 7月的水汽含量高于6月; 武汉上空出现整层比湿增长或中高层比湿增长可导致整层相对湿度明显增长, 而且增长的幅度随高度递增; 在暴雨分析预报中, 分析中高层水汽演变好于分析低层水汽演变; 采用整层平均相对湿度和可降水量结合分析整层水汽演变以及将中高层平均的比湿和相对湿度结合分析中高层水汽演变时, 对暴雨预报均有很好的指示意义。

关键词: 梅雨期 水汽 演变特征 暴雨

Evolution Characteristics of Vapor over Wuhan in Meiyu Period in 2004 and Its Relationship with Heavy Rainfall

Li Wujie^{1,2} Li Jun² Gong Ying² Wang Juan³

(1. Department of Atmosphere Science, Nanjing University, 210093; 2. Institute of Heavy Rain, CMA, Wuhan;
3. Nenjiang Meteorological Office, Heilongjiang Province)

Abstract: Using Wuhan twice daily radiosounding data from June to July in 2004, the precipitable water, specific humidity and relative humidity are calculated. By contrasting and analyzing the characteristics of the vertical distribution and the daily variation of those vapor parameters, the evolution characteristics of the vapor over Wuhan in Meiyu period in 2004 and its relationship with heavy rainfall are discussed. The result shows that the vapor content in the air over Wuhan decreases with the height and 90 percent of vapor concentrates below 700hPa.

资助课题: 湖北省科技攻关计划“基于中尺度数值模式的暴雨分析预报技术研究”科技部社会公益研究专项“我国南方致洪暴雨预测预警系统研究”

收稿日期: 2006年5月26日; 修定稿日期: 2006年12月25日

The vapor content in July is more than that in June. The specific humidity increase in the whole layer or in the middle-and upper-level can lead to the evident increase of the whole layer relative humidity over Wuhan, and the increasing degree increases with the height. In the course of analyzing and forecasting heavy rain, it is better to analyze the vapor evolution in the middle-and upper-level than that in the low-level. They are all very meaningful indicators for heavy rain forecast to analyze the total layer vapor evolution combining the total layer mean relative humidity with precipitable water, and to analyze the middle- and upper- level vapor evolution combining average specific humidity with relative humidity of the middle- and upper- level.

Key Words: Meiyu period water vapor evolution character heavy rain

引 言

充足的水汽是形成暴雨的必要条件之一,因此,水汽历来都是气象工作者在暴雨分析和预报中关注的焦点。在以往的分析研究中,人们对某一场暴雨或者某一段降水集中期的水汽来源、水汽输送以及水汽收支分析较多^[1-3],而且在暴雨分析中,较注重分析对流层低层的水汽辐合情况^[4,5],而对对流层中高层的水汽状况分析不多^[6],而且常常是借助水汽图像来加以分析^[7,8]。表征水汽的物理量很多,如可降水量、比湿、相对湿度等,在分析某一地区上空的水汽演变时,这些物理量的演变特征是否一致?低层和中高层的水汽如何变化?以前很少有人做过对比分析。因此,本文试图利用 2004 年 6—7 月武汉逐日探空资料(每天两个时次,共 122 个时次),通过可降水量、比湿、相对湿度的演变特征的对比分析,来了解 2004 年梅雨期武汉上空的水汽演变特征及其与暴雨的关系,从而为单站暴雨的分析与预报提供思路。

1 水汽的垂直分布特征

图 1 是 2004 年 6、7 月武汉上空平均的比湿和相对湿度的垂直廓线,其中实线代表 6 月,虚线代表 7 月。从平均比湿廓线图中

可以看出,无论是 6 月还是 7 月,武汉上空水汽含量随高度递减。比湿在 1000hPa 为 $15 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,到 850hPa 下降到 $10 \sim 13 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,850hPa 以上各层比湿均在 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,700hPa 比湿仅为 925hPa 的一半,只有 $6 \sim 8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。400hPa 以上各层水汽含量更少,比湿均在 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。由此可知,水汽

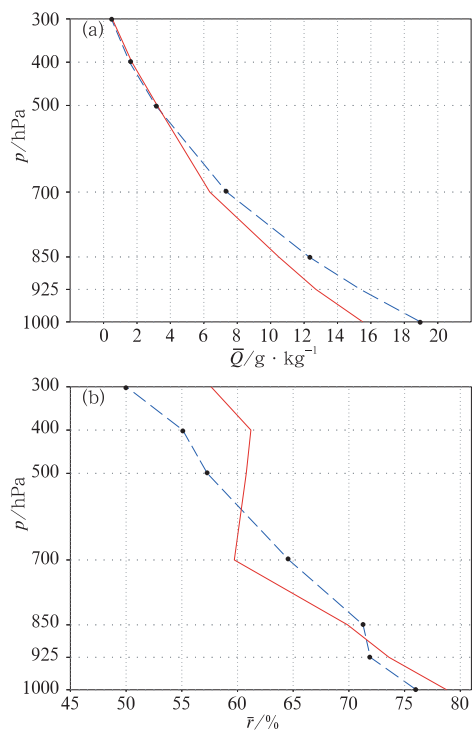


图 1 2004 年 6、7 月武汉平均比湿($\bar{Q}$)和平均相对湿度(r)的垂直廓线

主要集中在中低层 700hPa 以下,占水汽总量的 90% 以上。对比 6 月和 7 月的比湿廓线,不难看出,7 月 500hPa 以下各层的比湿均高于 6 月,而 500hPa 及以上各层的比湿几乎相同。由于大气中的水汽主要集中在中低层,因此,2004 年 7 月武汉上空总的水汽含量高于 6 月。上述分布特征与武汉市多年(1990—1999 年共 10 年,下同)6、7 月平均比湿廓线(图略)基本一致。

从图 1 中平均相对湿度的垂直廓线图上可以看出,平均相对湿度和比湿的垂直分布特征明显不同。6 月平均相对湿度在 700hPa 以下随高度降低,由 1000hPa 的 79% 降到 700hPa 仅为 60%。从 700hPa 到 400hPa,平均相对湿度略有增加,400hPa 以上再随高度降低。7 月平均相对湿度随高度减少,但在 850hPa 以下随高度下降的幅度小,各层平均相对湿度维持在 70%~76% 左右,850hPa 以上层下降幅度增大。对比 6 月和 7 月的平均相对湿度廓线发现,除 850hPa 到 700hPa 外,其它各层平均相对湿度均是 6 月高于 7 月,这与武汉市多年 6、7 月平均相对湿度廓线(图略)中反映的各层平均相对湿度均是 7 月高于 6 月的特征略有不同,这可能是因为 2004 年 6 月的降水过程多于 7 月造成的。

2 整层水汽的演变特征

图 2 是 2004 年 6—7 月武汉整层水汽的逐日演变曲线。从图中可以看出,第 61 个时次前,即整个 6 月,3 条曲线的变化趋势一致,位相基本相同。可降水量 W_p 和 $\bar{Q}$ 的变化曲线同时出现 5 个波峰,表明 6 月武汉上空共有 5 次水汽增长过程。在每次水汽增长过程中, W_p 的峰值均超过 63mm,其中有两个峰值超过 72mm。整层平均比湿的峰值除一次只有 $9.7\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外,其他 4 次峰值均超过 $10.5\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高峰值达 $12\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而 $\bar{r}$

曲线只出现了 4 个波峰,与 W_p 和 $\bar{Q}$ 两条曲线的前 4 个波峰相对应,每个峰值均超过 96%。在上述两条曲线的第 5 个波峰出现的时段内, $\bar{r}$ 除第 61 个时次为 84% 外,其他时次均在 80% 以下,这表明整层水汽含量高时,并不能表示整层大气都能达到饱和。

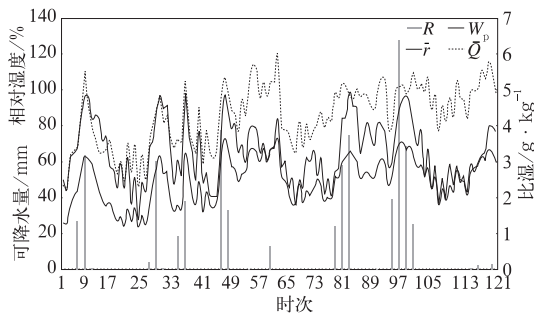


图 2 2004 年 6—7 月武汉整层水汽的逐日演变曲线

从图中还可以看出,第 61 个时次后,即整个 7 月, W_p 与 $\bar{r}$ 的变化与 6 月极其相似,位相也基本相同。 W_p 变化曲线上共有 3 个时段出现明显增长,其峰值均超过 66mm。与 W_p 前两个增长时段相对应, $\bar{r}$ 也同时出现明显增加,其峰值均超过 96%。而在 W_p 的第三个增长时段, $\bar{r}$ 虽然也有所增加,但增加幅度不如前两次,峰值只有 79%。 $\bar{Q}$ 的变化不同于 6 月,没有明显的波峰波谷出现,变化幅度较小。另外,从 6、7 月 $\bar{Q}$ 的连续演变来看,除第 62~71 个时次之间(即 7 月 6 日前)一般在 $8\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下外,7 月其他时间 $\bar{Q}$ 基本上均在 $8\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上。因此,就平均状况而言,7 月武汉上空的水汽含量明显高于 6 月,这与图 1 中比湿廓线的结论一致。

3 各层水汽的分布特征

从上述整层水汽演变特征的分析中可知,2004 年 6—7 月武汉上空整层的水汽含量共出现了 8 次明显的增长过程,其中 6 月 5 次,7 月 3 次。以下通过进一步分析了解这 8 次过程水气来源的主要层次。

图 3 是 2004 年 6 月(a)、7 月(b)武汉上空比湿距平的时-空分布图。由图 3 可见,对应 6—7 月武汉上空整层水汽 8 次明显增长

的时段内,均出现了明显的比湿正距平区,其他时段则以比湿负距平占优。从正距平区分布的特点来看,可以分为 3 种类型:

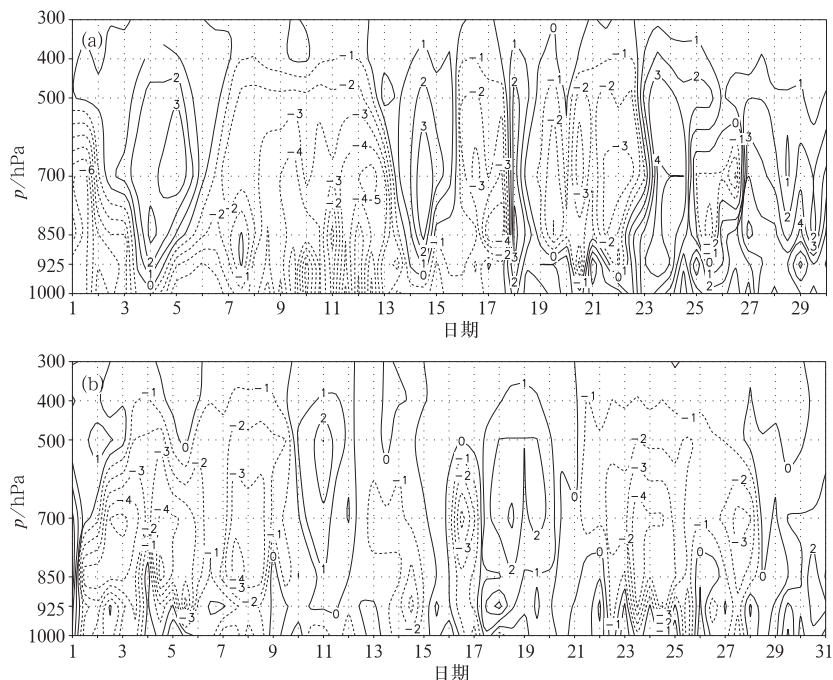


图 3 2004 年 6 月(a)、7 月(b)武汉上空比湿距平的时-空分布图

(1) 整层比湿增长型。如图 3a 中 6 月 18 日和 6 月 23—25 日的比湿距平分布。其特征是:各层比湿均为正距平,最大正距平中心一般位于 850hPa 及以下,有时也可向上扩展到 700hPa,中心值超过 $3\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(2) 中高层比湿增长型。如图 3a 中 6 月 3—5 日、6 月 14—15 日以及如图 3b 中 7 月 10—11 日和 7 月 17—20 日的比湿距平分布。表现为:925hPa 以下层水汽增量较少,比湿距平一般在 $1\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下,有时还出现负增长。水汽的增加主要来源于 700hPa 到 500hPa,最大正距平中心值超过 $3\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。500hPa 以上层水汽增长也较明显,400hPa 的比湿距平也超过 $1\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 低层比湿增长型。如图 3a 中 6 月 27—30 日和图 3b 中 7 月 29—31 日的比湿距平分布。其特征与第二种类型相反,一般

表现为:700hPa 以上层水汽增量较少,比湿距平一般小于 $2\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水汽的增长主要来自低层,最大正距平中心出现在 850hPa 以下,6 月的最大距平中心值超过 $7\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,7 月的最大距平中心值只有 $3\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。产生上述差别的原因主要是 6、7 月低层比湿的气候平均值相差较大,7 月的气候值高出 6 月 $3\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右。

在 2004 年 6—7 月武汉上空整层水汽 8 次明显增长的时段内,武汉上空相对湿度距平的时-空分布(如图 4 所示)与比湿距平的时-空分布明显不同。对应第一、二类型的比湿距平的分布,相对湿度距平的分布基本一致,表现为从低层到高层相对湿度距平逐渐增大,925hPa 以下相对湿度正距平一般在 $10\% \sim 20\%$ 之间,925hPa 到 700hPa 为 $20\% \sim 30\%$ 之间,700hPa 以上层正距平一般超过 30% ,最大正距平中心值超过 40% 。对应第

三种类型的比湿距平的分布,无论是低层还 是中高层,相对湿度增加均不显著。

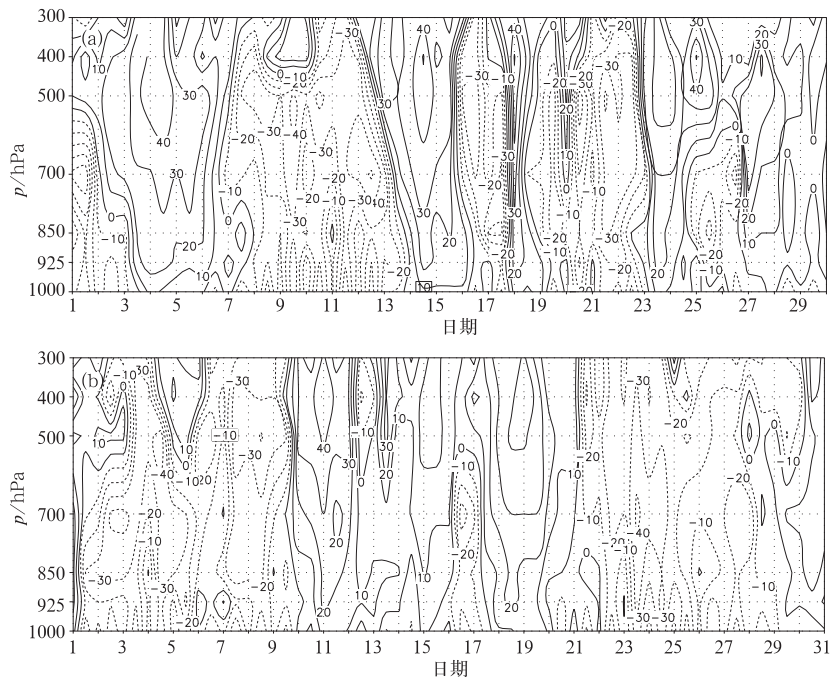


图 4 2004 年 6(a)、7 月(b)武汉上空比湿距平的时-空分布图

上述分析表明,在整层水汽明显增长的条件下,只有当整层或者中高层比湿显著增加时,整层相对湿度才会出现明显增长,而且越往高层,相对湿度增加的幅度越大。如果水汽的增长仅局限在低层(850hPa 以下),则整层相对湿度一般不会出现明显增长。

暴雨过程频繁(如表 1 所示)。其间共出现了 6 次暴雨过程,其中 6 月 4 次,7 月 2 次。7 月份降水过程虽少,但强度大,持续时间长,两次过程均出现了连续性的强降水,造成城区主要交通干道严重积水,郊区部分农田受淹,经济损失惨重。

4 水汽演变与暴雨的关系

4.1 整层水汽演变与暴雨

整层水汽演变与暴雨的关系可以从图 2 2004 年 6—7 月,武汉市降水明显偏多, 中清楚地反映出来。从图 2 中发现,武汉市

表 1 武汉市 2004 年 6—7 月主要降水过程

	降雨量/mm	前 12 小时降雨量/mm	后 12 小时降雨量/mm
6 月 03 日 20 时—4 日 20 时	86.3	23.6	62.7
6 月 14 日 08 时—15 日 08 时	60.5	33.1	27.4
6 月 17 日 20 时—18 日 20 时	55.9	18.2	37.7
6 月 23 日 08 时—24 日 08 时	74.6	29.5	45.1
6 月 24 日 08 时—25 日 08 时	33.2	33.2	0
7 月 9 日 20 时—10 日 20 时	35.1	24.2	10.9
7 月 10 日 20 时—11 日 20 时	121.3	48	73.3
7 月 17 日 20 时—18 日 20 时	77.5	39	38.5
7 月 18 日 20 时—19 日 20 时	157.4	89	68.4

6—7 月 6 次暴雨过程全部发生在整层水汽增长的时段内,只有在第 53~60 个时次之间(即 6 月 27—30 日)以及第 117~122 个时次之间(即 7 月 29—31 日)的两个水汽增长时段内没有产生暴雨,这与两个时段内 $\bar{r}$ 基本上在 80% 以下,即整层空气没有完全达到饱和有关。从图 2 中对比分析还可以看出,当 W_p 和 $\bar{r}$ 同时增大到 $W_p > 56\text{mm}$, $\bar{r} > 84\%$ 时,武汉市一般会出现暴雨。进一步分析发现,每次暴雨过程发生前, W_p 和 $\bar{r}$ 均出现显著性增长,24 小时内 W_p 增加 15mm 以上, $\bar{r}$ 增加 20% 以上(图略)。而且当 24 小时内 W_p 的增量超过 18mm,或者 $\bar{r}$ 增量超过 28% 时,未来 24 小时内武汉市一般会出现大暴雨。当暴雨过程开始后,由于降雨的关系,整层大气非常潮湿,因此, W_p 和 $\bar{r}$ 可能依然很大,如何判断暴雨是继续维持还是即将结束? 分析发现,需要判断 $\bar{r}$ 前 12 小时内的变化。如果前 12 小时内 $\bar{r}$ 维持或者继续增大,则暴雨过程仍将持续,否则暴雨过程一般会在 12 小时内结束。从图 2 中还可以看出,整层平均比湿的演变与暴雨的关系,明显不如 $\bar{r}$ 和 W_p 与暴雨的关系好。只是在 6 月 $\bar{Q}$ 逐渐增大,出现峰值时,与武汉市的暴雨有一定的对应关系,而在 7 月这种关系完全不成立。因此,在暴雨分析预报中,采用 $\bar{r}$ 和 W_p 结合分析水汽演变时,对暴雨预报有很好的指示意义,同时要关注两者在过去 12 小时和 24 小时的变化。

4.2 分层水汽演变与暴雨

根据第三节分析的各层水汽演变的分布特征,将 1000hPa、925hPa、850hPa 三层平均的比湿和相对湿度来表征低层水汽的特征,分别用 Q_{198} 和 r_{198} 表示低层平均的比湿和相对湿度;将 700hPa、500hPa、400hPa、300hPa 四层平均的比湿和相对湿度来表征中高层水汽的特征,分别用 Q_{7453} 和 r_{7453} 表示中高层平均的比湿和相对湿度,以此来分析低层和中

高层的水汽演变特征及其与暴雨的关系。

图 5 是 2004 年 6—7 月武汉低层(a)和中高层(b)水汽的逐日演变曲线。从图 5a 中可以看出, Q_{198} 和 r_{198} 的演变特征分别类似于 $\bar{Q}$ 和 $\bar{r}$ 的演变特征。因此,低层水汽的演变与暴雨的关系也与整层水汽的演变与暴雨的关系类似。进一步分析每一次暴雨过程发生前 r_{198} 的变化时发现,当 r_{198} 持续增加,达到或超过 80%,且 24 小时增量达到 18% 以上时,则武汉市一般在未来 12 小时内出现大雨以上降水或 24 小时内出现暴雨,只有第 61 个时次(即 7 月 1 日 08 时)条件满足(r_{198} 达 100%,24 小时增量为 18%)而没有出现强降水,这是由于西太平洋副热带高压突然加强西伸控制武汉上空,导致中高层大气较干燥, r_{7543} 仅为 68% (如图 5b)的结果造成的。当武汉市已经出现大雨以上降水后,上述关系不一定成立。

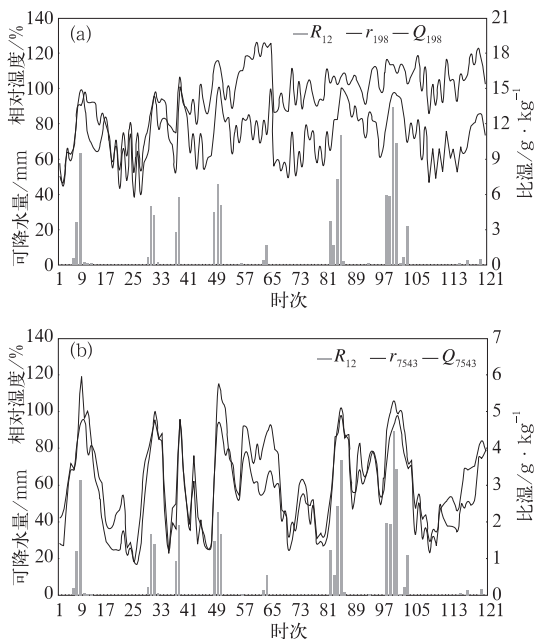


图 5 2004 年 6—7 月武汉低层(a)和中高层(b)水汽的逐日演变曲线

中高层水汽演变(如图 5b)表现出与低层水汽变化明显不同的特征,特别是 Q_{7543} 与 r_{7543} 具有相同的演变特征:位相基本相同,波

峰波谷同时出现,变化幅度大,而且两者同时出现峰值的时段与6次暴雨过程发生的时段一一对应。在暴雨发生前,当 Q_{7543} 和 r_{7543} 同时增加,分别达到 $4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和85%以上时,则武汉市一般在未来12小时内出现大雨以上降水或24小时内出现暴雨;在上述条件未满足之前,如果两者24小时的增量很大,增量值同时分别达到 $2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和20%以上(图略),且平均相对湿度超过70%时,武汉市一般在未来24小时或36小时内出现大-暴雨;强降水发生后,如果两者持续增加,即两者12小时增量同时为正值,则武汉市的强降水过程持续,而且当两者持续增加,其值分别达到 $5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和90%以上时,则武汉市一般在未来12小时内就可能出现暴雨;如果两者(或两者之一)12小时增量为负值,且增量值分别小于 $-0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 -8% 时,则武汉市的强降水过程在12小时内结束。

综合上述分析可以看出,在暴雨分析预报中,分析中高层水汽演变好于分析低层水汽演变,它对暴雨的预报有很强的指导意义。在分析过程中,要将中高层平均的比湿和相对湿度的结合起来分析,尤其要分析两者过去12小时和24小时的变化。

5 小 结

通过对2004年6—7月武汉上空水汽演变特征及其与暴雨发生的关系的分析,可以得出以下结论:

(1) 武汉上空水汽含量随高度递减,水汽主要集中在中低层700hPa以下,占水汽总量的90%以上。

(2) 7月武汉上空总的水汽含量高于6月,其中增加的水汽主要来自低层,中高层增加趋势不显著。

(3) 分析整层水汽的演变时发现,无论是6月还是7月,可降水量(W_p)和整层平均的相对湿度($\bar{r}$)的变化趋势一致,位相基本相同,且同时出现的峰值区与武汉市的暴雨有较好的

对应关系。而整层平均比湿的演变特征6月和7月不同,6月的演变与 W_p 和 $\bar{r}$ 基本相同,其峰值与武汉市的暴雨有一定的对应关系。而7月的变化幅度较小,没有明显的波峰波谷,其演变特征与暴雨的关系不明显。

(4) 分析各层水汽的演变特征表明,武汉上空整层水汽增长有3种类型,只有出现整层比湿增长型和中高层比湿增长型时,整层相对湿度才会出现明显增长,而且越往高层,相对湿度增加的幅度越大。如果出现低层比湿增长型时,则整层相对湿度一般不会出现明显增长。因此,分析中高层水汽演变非常重要。

(5) 在暴雨分析预报中,采用整层平均相对湿度和可降水量结合分析整层水汽演变以及将中高层平均比湿和相对湿度结合分析中高层水汽演变时,对暴雨预报均有很好的指示意义。在分析过程中,尤其要分析这些变量过去12小时和24小时的变化。

以上只是针对一年梅雨期武汉上空水汽的演变特征分析得到的认识,还有待今后做更多的分析并进一步加以验证和完善。

致谢:钱永甫教授对本文的工作给予了很多的指导和帮助,特此致谢。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 徐国强, 张迎新. “96.8”暴雨的水汽来源及对水汽敏感性的模拟分析[J]. 气象, 1999, 25(7): 12-16.
- [3] 冯伍虎, 程麟生. “98.7”特大暴雨中尺度系统发展的热量和水汽收支诊断[J]. 应用气象学报, 2001, 12(4): 419-432.
- [4] 曹晓岗. “0185”特大暴雨的诊断分析[J]. 气象, 2002, 28(1): 21-25.
- [5] 刘勇, 王川. 一次弱对流引发局地特大暴雨天气的诊断分析[J]. 气象, 2005, 31(8): 15-18.
- [6] 杨红梅, 葛润生, 徐宝祥. 用单站探空资料分析对流层气柱水汽总量[J]. 气象, 1998, 24(9): 8-11.
- [7] 熊延南. 长江三峡地区枯水期强降水过程的水汽图像[J]. 气象, 1998, 24(6): 44-47.
- [8] 李云川, 胡欣, 戴念军. 一次强暴雨过程的水汽图像分析[J]. 气象, 2001, 27(1): 43-47.