

文章编号:1004-9045(2007)01-0046-06

台风“云娜”降水云区中单站大暴雨诊断分析和预报

施望芝¹,毛以伟¹,谌伟¹,陈亮²,王晓玲¹

(1.武汉中心气象台,武汉 430074;2.湖北省宜昌市气象局,宜昌 443000)

摘要:在台风降水云区中,有的站点出现大暴雨,有的站点不出现大暴雨,这给单站预报带来难度。为了提高台风降水云区中单站大暴雨预报准确率,利用 T213 客观分析场和预报产品,采用多种物理量综合诊断分析方法,对 2004 年第 14 号强台风“云娜”在西进途中的多站点进行水汽来源、不稳定层结维持以及次生中尺度辐合等研究,并探讨单站大暴雨发生发展机制和不发生大暴雨的原因。研究表明:单站大暴雨发生的主要原因是次级环流出现;站点 200 hPa 为明显的负温度平流,850 hPa 为明显的正温度平流;站点高低层均为正涡度中心,且低层正值大于高层正值;站点散度场高低层都为负值中心,或高层为正值中心、低层为负值中心;站点垂直运动中心速度值要达 $-140 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。另外,站点有源源不断的水汽供给与辐合;台风中心西北部水汽通量大值区靠近台风中心西部干舌梯度最大处以及风向和风速辐合最大处。在台风降水云区中,当站点满足上述各要素值时大暴雨容易发生。

关键词:台风;降水云区;次级环流;单站;大暴雨

中图分类号:P458.1*21 **文献标识码:**A

1 引言

陈联寿等人(1979)^[1]在对台风大暴雨成因进行系统概述时指出,“台风登陆后维持并停滞、水汽源源不断输送、中低纬环流相互作用、中尺度系统影响及地形作用等,是造成台风大暴雨的基本成因”。陈联寿等人在随后的研究文献中指出^[2-3],“登陆华东的台风大范围暴雨区往往出现在台风中心以北、东风与南北走向海岸和山脉的辐合以及台风倒槽区”。文献[1]还证实,持续性台风大暴雨就发生在高空辐散和低空辐合的叠加区,因高空辐散的抽吸作用对登陆台风低压的垂直运动和低空的辐合运动将有加强^[2-4]。显然,台风暴雨研究在过去几年中取得了较大进展,然而不少问题仍需继续研究。陈联寿等认为,登陆后的台风暴雨机制仍是研究的重点^[2]。作者曾提出,单站是否出现强降水,特别是大到暴雨区中及其边缘的单站是否出现大到暴雨,必须通过诊断分析次级环流来判定;当次级环流满足一定条件时,单站大到暴雨才可能出现,否则就可能空报^[5]。

为了提高台风降水云区中单站大暴雨预报准确率,利用 T213 客观分析场和预报产品,采用多种物理量综合诊断分析方法,对 2004 年第 14 号强台风“云娜”在西进途中的多站点进行水汽来源、不稳定层结维持以及次生中尺度辐合等研究,旨在揭示单站大暴

雨发生发展机制和不发生大暴雨的原因。

2 天气实况和环流特征

2.1 降水实况

“云娜”于 2004 年 8 月 12 日 20 时在浙江的温岭登陆。登陆后在陆地维持了 3 天。从登陆西行到鄂东南西部后折向南移入湘北减弱消失,一路多站出现大暴雨。13 日 08 时,出现大暴雨的站点多达 20 个;14 日 08 时,有 29 个站点出现大暴雨;15 日 08 时,有 7 个站点出现大暴雨。从连续 3 天的雨量看,在台风降水云系中既存在有大暴雨的站点,也存在无大暴雨的站点。

2.2 500 hPa 环流特征

通过对“云娜”西行过程中 500 hPa 环流形势的分析可知(图略),从 8 月 12 日 08 时至 14 日 08 时,副热带高压始终维持在 35°N,呈东西向带状分布,西脊点从 110°E 西伸到 100°E,其南部吹 8~16 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏东风,由华东沿海逐步向西推进到四川中部。这种形势的维持,是导致“云娜”登陆西行的重要原因。

2.3 台风降水云系和强降水分布

从 12 日 16 时、13 日 12 时、14 日 10 时、15 日 08 时(世界时,下同)气象卫星云图上可见(图 1),台风整体外围降水云团很强,且有中尺度对流云团存在,其面积很大,整体台风云区东西向和南北向的宽度、长度均达 1000 km 左右,其范围内每一站点都有可能下大

收稿日期:2005-12-31;定稿日期:2006-04-24

基金项目:湖北省气象局青年基金项目“雷雨、大风、强降水落区预报中对流参数经验指标研究”(2005Q01)

作者简介:施望芝,女,1953 年生,正研级高级工程师,主要从事天气预报技术和方法研究.E-mail:shiwz168@126.com

暴雨,特别是台风中心以北台风倒槽或台风外围云系经过的地区都可能作出有大暴雨的预报。但实况是,

在该区域中有的站点出现大暴雨,有的站点降水很弱,从而出现大暴雨空报。

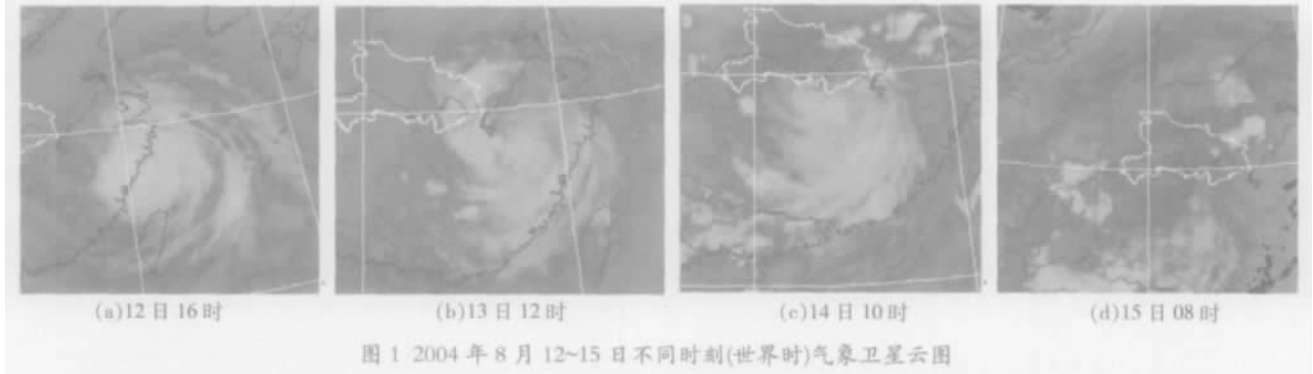


图 1 2004 年 8 月 12~15 日不同时刻(世界时)气象卫星云图

3 动力诊断分析与大暴雨落点预报

因平流导致的次级环流作用总与水平流场作用相反,从而恢复地转平衡,但当大气层结不稳定时,平流引起的次级环流并不能起到地转平衡恢复作用,因此将导致不稳定扰动发生^[6]。动力气象学理论表明^[7],边界层的垂直运动与自由大气的地转风涡度成正比。其表达式为:

$$\omega_b = 1/2h_E\zeta_g \quad (1)$$

式(1)中, h_E 是 Ekman 层顶的标高, ζ_g 是地转风涡度。根据 Ekman 抽吸作用,台风倒槽北端及台风降水云系中有扰动,对应辐合与强而不均匀的温度平流,有利大暴雨发生。

3.1 温度平流

对站点暴雨来说,低层正温度平流、高层负温度平流的分布表明,该站点存在由温度平流构成不稳定层结的机制,这种机制支持该站点产生不稳定,促使暴雨发生。若下一时次这种层结维持,将发生连续性暴雨。这种层结是发生暴雨的重要条件。对“云娜”的温度平流分析发现,12日20时,出现大暴雨的温岭(101 mm/6h)、临海(119 mm/6h)及周边地区 200 hPa 有明显的负温度平流(其值达 $-20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),而 850 hPa 则为明显的正温度平流(其值为 $50 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),这种由较强的温度平流构成的不稳定层结机制对站点及周边地区产生大暴雨极为有利。13日20时,温岭、临海及周边地区 200 hPa 出现明显的正温度平流(其值接近 $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),850 hPa 由较强正温度平流变为 0 线值,不稳定层结机制不再存在,显示本地大暴雨过程结束。13日20时,出现强降水的永修(90 mm/6h)、武穴(58 mm/6h)及周边地区高空 200 hPa 为明显负温度平流(其值接近 $-20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),850 hPa 为正温度平流(其值接近 $30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),同样出现了由温度平流构成的不稳定层结机制,这些站点及周边地区出现了大暴雨。14日20时,出现强降水的武汉(46 mm/6h)及周

边地区,高空 200 hPa 为明显负温度平流(其值高达 $-30 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$),但 850 hPa 在正温度平流区内的 0 线附近,同样构成了由温度平流产生的不稳定层结机制。

综上所述,当站点 200 hPa 为明显负温度平流、850 hPa 为明显正温度平流时,大暴雨过程达到最盛时,若随后这种温度场垂直结构再继续维持,大暴雨减弱;当 200 hPa 温度平流由负值转为正值,850 hPa 由正值转为负值时,大暴雨过程结束。

3.2 涡度和散度

大暴雨得以发生的初始动力条件是高层有明显辐散,低层有明显辐合。这种散度和涡度分布反映出原先稳定大气将会有扰动发生,这种扰动的动力作用会导致中尺度雨团产生。扰动动力作用与中尺度雨团的耦合关系长时间维持,就会带来持续强降水。对多个站点高低层散度和涡度进行对比分析如下。

由涡度场显示,8月12日20时,温岭、临海一带 200 hPa 高度可见有 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度中心向西移动,同时 850 hPa 有 $30 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度中心西移,可见高低层正涡度中心位置几乎重叠,表明“云娜”台风气旋性涡旋的深厚性(图 2a,b)。此时降水达到最强。13日08时,正涡度中心向偏西方向移动,此时温岭一带低层正涡度中心强度减小到 $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以下,高层仍维持在 $12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,该地大暴雨明显减弱,而最大正涡度中心西移到余江,次中心($56 \text{ mm}/12\text{h}$)在黄山一带,降水实况显示,大暴雨中心以余江($52 \text{ mm}/6\text{h}$)为中心、以黄山为次中心。13日20时,200、850 hPa 正涡度中心均西移至庐山、永修一带(图 2c,d),且各层正涡度中心强度有所加强(达 $18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 以上),降水实况显示,大暴雨中心正好西移到永修($90 \text{ mm}/6\text{h}$)、庐山($97 \text{ mm}/6\text{h}$)。当该站点各层正涡度中心移出时,强降水随之减弱。

分析涡度场可知,台风大暴雨与其他天气系统产生的大暴雨的不同之处,涡度在台风大暴雨中表现为从低层到高层都为正值,且低层正值大于高层

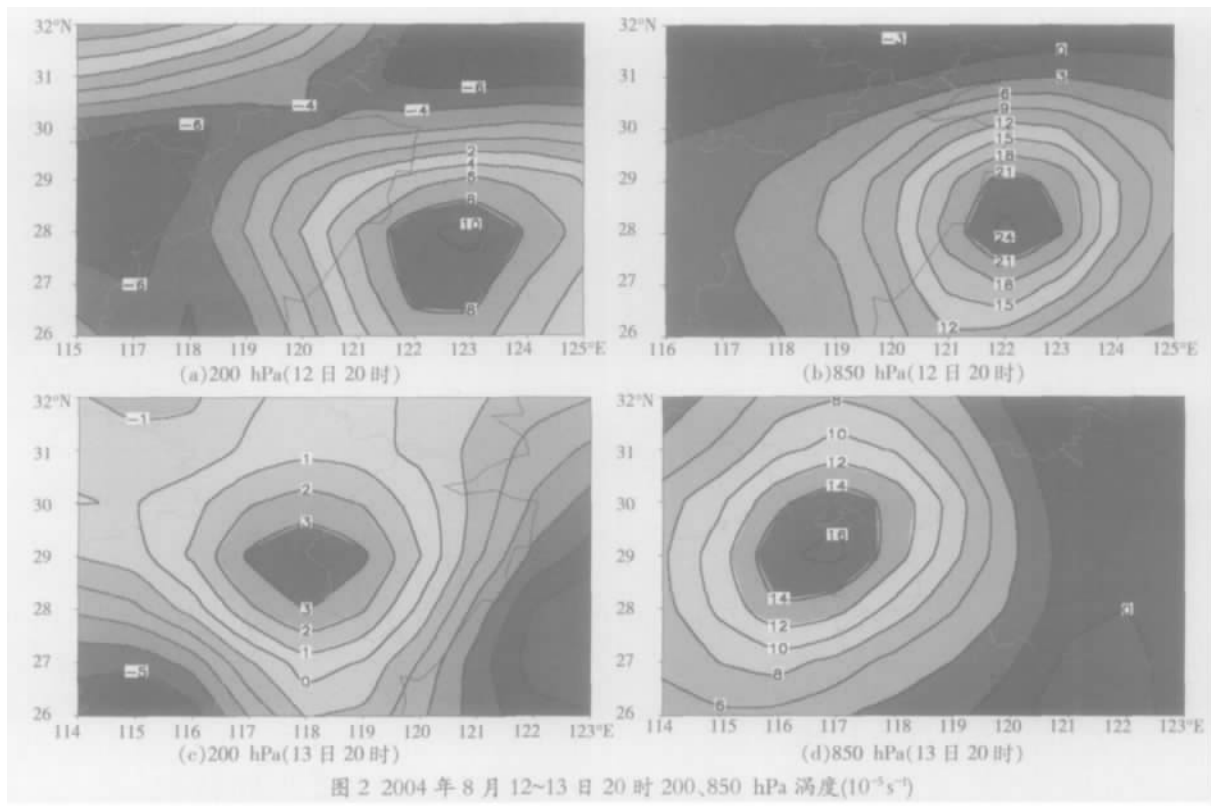


图 2 2004 年 8 月 12~13 日 20 时 200、850 hPa 涡度($10^{-5} s^{-1}$)

正值,这与台风是一深厚天气系统吻合,大暴雨中心随各层正涡度中心移动,位于正涡度区靠近中心处。

在散度场配合上,12 日 20 时,温岭、临海一带 200 hPa 为负值中心(强度达 $-20 \times 10^{-5} s^{-1}$),850 hPa 为负值中心(强度达 $-30 \times 10^{-5} s^{-1}$)时(图 3a、b),该处出现大

暴雨。散度场的这一垂直分布与涡度场吻合。13 日 20 时,散度场转变为低层辐合、高层辐散的形势,并西移至庐山到武夷山一带,表现出 200 hPa 为 $35 \times 10^{-5} s^{-1}$ 的正散度中心,850hPa 为 $-30 \times 10^{-5} s^{-1}$ 的负散度中心(图 3c、d)。实况显示,大暴雨西移至永修、庐山。

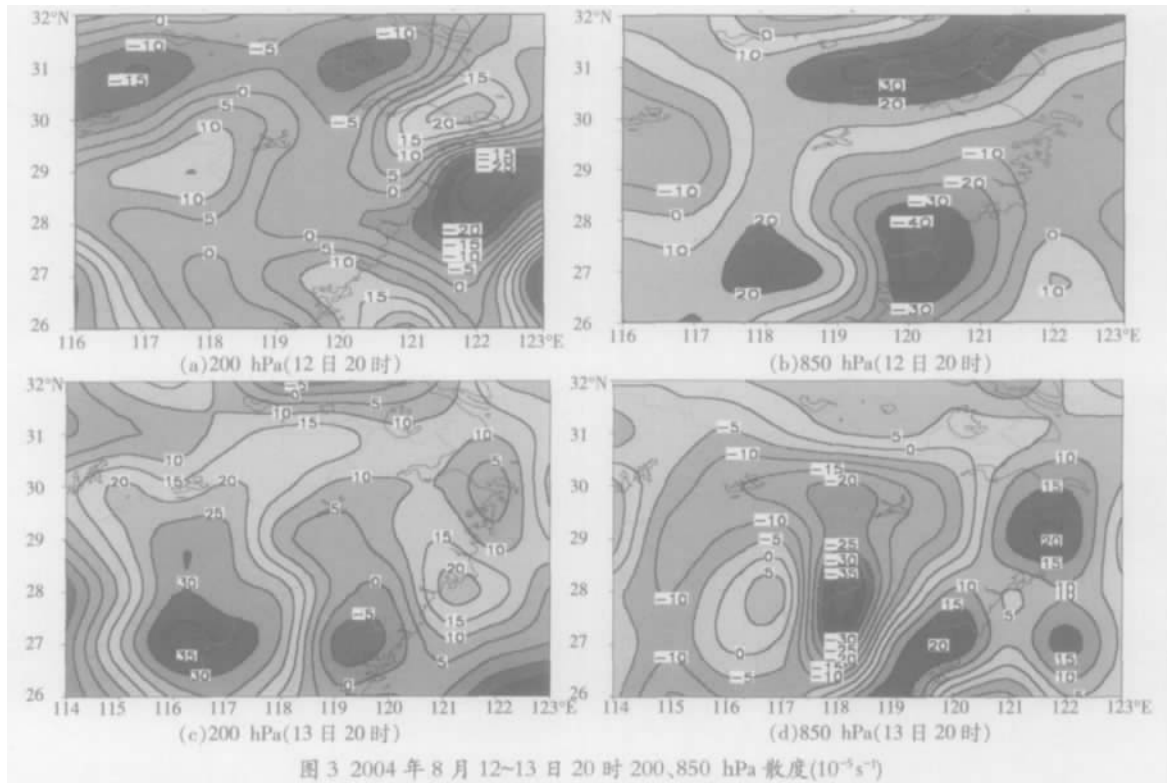


图 3 2004 年 8 月 12~13 日 20 时 200、850 hPa 散度($10^{-5} s^{-1}$)

对上述散度场的分析表明,12 日 20 时,温岭、临海一带表现为从低层到高层都为负值,且低层负值强

于高层负值,有利于不稳定气层发展;13 日 20 时,庐山到武夷山一带转变为低层为负值,高层为正值,它

符合暴雨过程中不稳定气层发展模式。因此,不论是前者还是后者,这一要素的演变都符合产生强降水的条件。

3.3 单站垂直速度

这里,分析了 8 月 12 日 20 时临海站垂直速度场,在沿其经向垂直速度剖面图中可见(图 4a),其站点上空垂直上升运动最为强烈,最大上升运动区处在 850~700 hPa 之间,其中心值在 $-140 \times 10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。在上升运动区北侧有一弱的下沉运动区,说明在

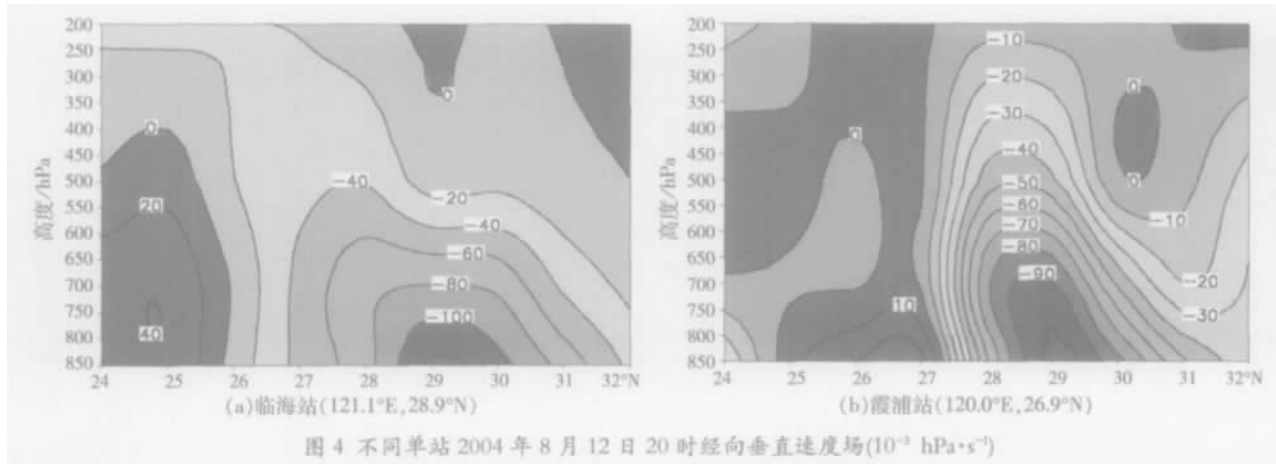


图 4 不同单站 2004 年 8 月 12 日 20 时经向垂直速度场 ($10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$)

3.4 地面风场

“云娜”登陆西进过程中,造成大暴雨连续不断的发生,这与地面风场中次生中尺度辐合和卫星云图中中尺度对流云团有关。这里,分析了地面每小时自动观测站资料,由风场反映出,次生中尺度风场辐合系统自 8 月 12 日 08 时在浙江东部沿海生成后一直维持到 15 日 08 时并一路西行,由于地面次生中尺度风场辐合的生成和维持,并不断输送高温高湿能量,中尺度雨团旺盛不衰,使多个站点发生大暴雨。由每小时降水实况图可看出(图略),次生中尺度风场辐合生成之地即大暴雨发生之地。地面次生中尺度风场辐合出现后约 10 h,台风低压中心移到风场辐合区,这一地区发生大暴雨。如武夷山、永修等站的大暴雨就是如此。

4 水汽和热力不稳定层结的诊断分析与大暴雨落点预报

4.1 单站水汽通量和水汽通量散度

大暴雨的发生不但要求有很好的局地水汽条件,还要有源源不断的水汽补充。大量水汽在降水区辐合,大暴雨才有可能发生。由 12 日 20 时 700 hPa(图 5a)和 14 日 20 时 700 hPa 水汽通量分析场(图 5b)可见,发生大暴雨的站点(如临海、武汉)都处在水汽通量大值区下风方(其中心值在 $200 \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上),即水汽通量大值区与小值区梯度密集区(间隔为 4,一个纬距内有 6 条等值线)。其他时次不同站点

这一站点从低层到高层气块极不稳定,易发生大暴雨,实况在 12 日 20 时临海站降水量达 119 mm。

与此同时,分析沿霞浦(58843)站点的经向垂直速度剖面图可见(图 4b),该站点上空从底层到高层均为明显的下沉运动,因此尽管有中尺度云团存在,总因无上升运动的配合,最后仍没导致大暴雨发生。上述两站点对比分析表明,即使单站处在台风降水云区中,也必定要有强的垂直上升运动的存在,才能导致大暴雨发生,否则将会出现对单站大暴雨的空报。

大暴雨的发生也如此(图略)。分析 12 日 08 时 12 h、14 日 08 时 12 h 的 700 hPa 水汽通量预报场(图 5c、d),大暴雨站点(临海、武汉)处在水汽通量大值区下风方,即水汽通量大值区与小值区梯度密集区。由此看出,按这一要素,提前 12 h 预报站点有大暴雨是可行的。

分析 12 日 20 时、14 日 20 时 850 hPa 水汽通量散度分析场发现(图略),大暴雨落点分别处在靠近水汽最大辐合中心边缘区,其值 $-200 \times 10^{-7} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。其他时次不同站点大暴雨的发生也如此(图略)。再分析 12 日 08 时 12 h、14 日 08 时 12 h 的 850 hPa 水汽通量散度预报场发现(图略),大暴雨分别发生在水汽通量最大辐合中心靠近边缘的负值区内。由此表明,按该要素可提前 12 h 对单站大暴雨作出预报。

4.2 水汽通量垂直分布

分析 12~14 日大暴雨发生站点 850~500 hPa 水汽通量垂直平均分布和 700 hPa 流场叠加图发现,对各自大暴雨站点而言,其水汽主要来源于台风中心东部(水汽源)。大暴雨站点大多数出现在台风西北部水汽通量较大区,其值在 $(120 \sim 240) \times 10^{-1} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间,且靠近干区一侧梯度大的地方。此外,分析 700 hPa 风场可知,夹带充足水汽的风暴东部西南气流,把充足水汽向西北部大暴雨区输送,这一地区不但有风速的辐合还有风向的辐合,形成水汽在该地区的辐合而产生大暴雨。12 日 20 时的分析场充分证实了这一点(图 6a),在温岭、临海及附近大暴雨站点,都处在台风

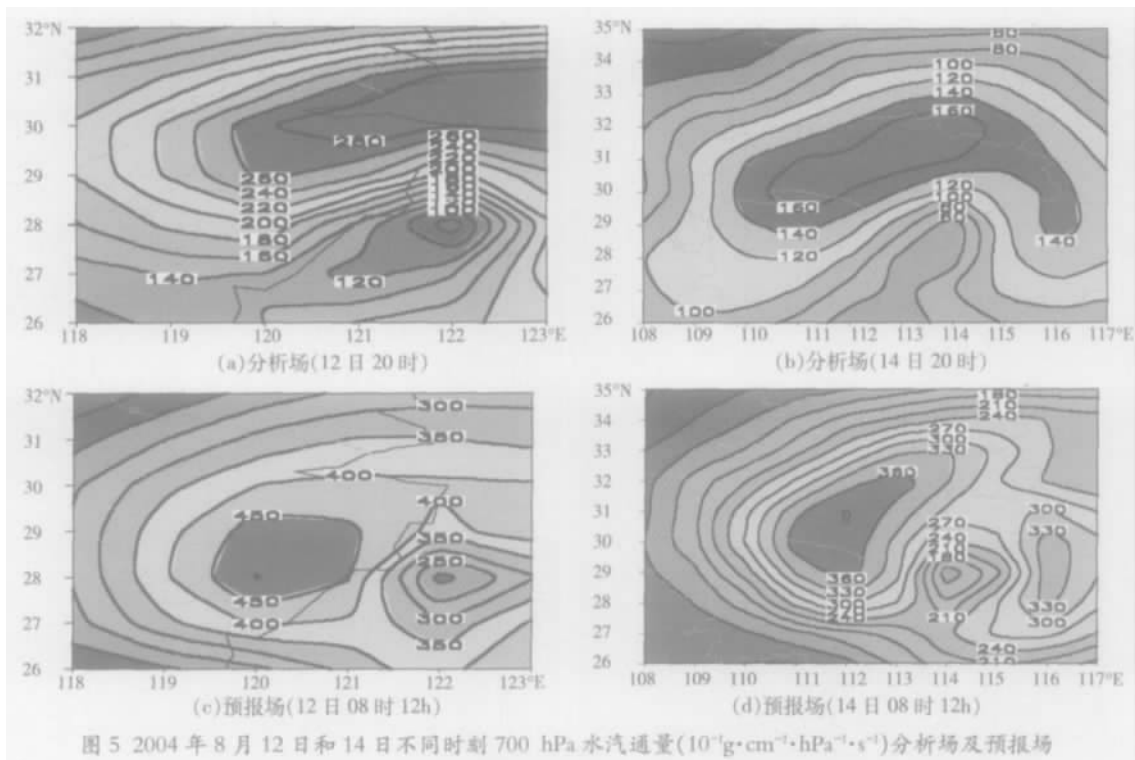


图 5 2004 年 8 月 12 日和 14 日不同时刻 700 hPa 水汽通量($10^{11} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)分析场及预报场

中心西北部水汽通量大值区靠干区中心一侧梯度较大地区,此处也是风向和风速辐合最大的地区。12 日 20 时,24h 预报场表现出(图 6b),台风中心西北部水汽通量大值区以及 700 hPa 风向和风速辐合最大区西移至鄂东南到赣西北,预示这一地区可能出现大暴

雨,结果 13 日 20 时这一地区的永修、光泽一带下了大暴雨;13 日 20 时分析场证实上述 24 h 预报场的正确性(图略)。又如 14 日 14 时至 15 日 02 时,武汉处在水汽通量大值区靠干区一侧梯度较大的地区,其 12 h 降水量达 84 mm。

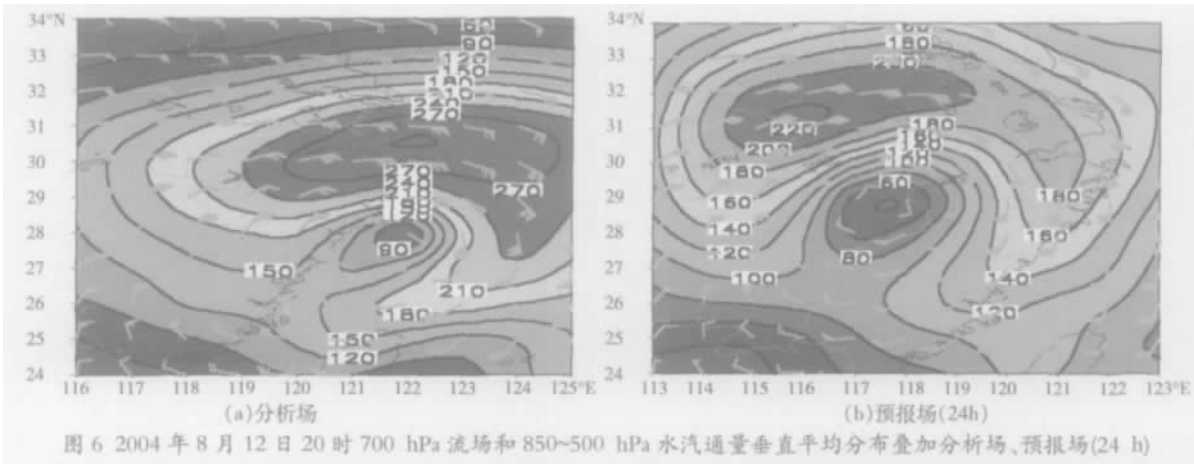


图 6 2004 年 8 月 12 日 20 时 700 hPa 流场和 850~500 hPa 水汽通量垂直平均分布叠加分析场、预报场(24 h)

以上分析结果表明,台风中心东北部水汽通量大值区仅是西北部水汽通量大值区的水汽源。大暴雨主要发生在台风中心西北部水汽通量大值区与台风中心西部干舌之间梯度较大的地方,同时具有可预报性。

4.3 单站 700 hPa 与 850 hPa 假相当位温差值分布

为了应用方便,可大致认为气层假相当位温(θ_{sc})随高度单调上升或下降。依据气层上界和下界假相当位温的相对大小,可判断气层稳定度。文献[8]给出:

$$\theta = \theta_{sc700} - \theta_{sc850} \quad (2)$$

式(2)中, θ_{sc700} 、 θ_{sc850} 分别为 700 hPa 和 850 hPa 的假相当位温。利用 T213 中 θ_{sc} 实况场,分析各站点 θ 值,若

站点 $\theta \leq 0$ °C,则说明该站点存在位势不稳定,有利大暴雨发生。分析“云娜”移动过程发现,大暴雨站点 θ 值都在 $-5 \sim 0$ °C 之间,存在明显位势不稳定。另外,对照每 6 h 一张的预报场与降水实况, $-5 \leq \theta \leq 0$ °C 区间逐步西移,同时大暴雨区也随之西移。这就是说, θ 值在 $-5 \sim 0$ °C 之间是预报有大暴雨发生的可用指标。

此外,分析 500、700、850 hPa 三层假相当位温之和发现,12 日 20 时和 13 日 20 时大暴雨站点所对应三层假相当位温之和都在 230 °C 线中心处(图略),只要站点该值达 230 °C 就有出现大暴雨的可能。同时,大暴雨站点随 230 °C 线中心西移而西移。另外,分析

12 日 20 时 24 h 预报场、13 日 20 时分析场、13 日 20 时 24 h 预报场及 14 日 20 时分析场发现(图略),大暴雨站点其值达到 230 °C,并处在其中心处。

3.4 K 指数

分析 12~14 日 K 指数发现,大暴雨区各站点 $K \geq 35$ °C(图略)。台风低压减弱西进到湖北时,鄂西 K 指数在 30~35 °C 之间,此时湖北西部出现暴雨而非大暴雨。

5 小结

通过对台风“云娜”降水云区中单站大暴雨的诊断分析,可得出以下结论。

(1)当单站 200 hPa 为明显的负温度平流(其值在 -20×10^{-6} °C·s⁻¹ 或以下),850 hPa 为明显的正温度平流(其值在 30×10^{-6} °C·s⁻¹ 以上)时,大暴雨过程达到高潮。若此种结构不能维持,大暴雨明显减弱;当 200 hPa 温度平流由负值转为正值,850 hPa 由正值转为负值时,大暴雨过程结束。

(2)当单站高低层均处在正涡度区并靠近中心,且低层正值大于高层正值;当散度场高低层均为负值中心(分别达 -20 s⁻¹、 -30 s⁻¹ 以下),或高层为正值中心(20 s⁻¹ 以上),低层为负值中心(-30 s⁻¹ 以下)易发生大暴雨。

(3)单站只有存在强的垂直上升运动,垂直运动中心速度值达 -140×10^{-3} hPa·s⁻¹ 以下(台风刚登陆时达 -200×10^{-3} hPa·s⁻¹)时,才产生大暴雨。该要素在 12 h 前有所反映,具有可预报性。

(4)台风中心东北部水汽通量大值区仅是西北部

水汽通量大值区的水汽源,发生大暴雨的站点主要在台风中心西北部水汽通量大值区,其值在 $(120 \sim 240) \times 10^{-1}$ g·cm⁻¹·hPa⁻¹·s⁻¹ 之间,且是靠近台风中心西部干舌梯度最大处(4~6 条线的梯度)以及风向风速辐合最大处。

(5)站点 700 hPa 与 850 hPa 假相当位温差值为 $-5 \sim 0$ °C,可提前 6~24 h 作出大暴雨预报。

上述分析只是个例分析,不足以说明其物理量场与值的诊断分析结果就是今后台风天气预报指标,但可作为预报参考指标。

参考文献:

- [1] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学出版社,1979:237-241.
- [2] 陈联寿,徐祥德,王继志,等.热带气旋动力学引论[M].北京:气象出版社,2002:155-178.
- [3] Chen L S. Tropical Cyclone Landfall Processes—Observing and Forecasting Rainfall. Topic Chairman and Rapporteur Reports of the Fifth WMO international Workshop on Tropical Cyclones WMO/TD [C], 2002: 201-217.
- [4] Chen L S. tropical Cyclone Structure and Structure Change. Proceedings of the Second WMO International Workshop WMO/TD [C], 2001: 45-56.
- [5] 施望芝,金琪,刘静,等.强降水落区中单站降水诊断分析和预报[M]. 气象科技, 2005, 33(1): 17-21.
- [6] 刘式适,刘式达.大气动力学[M].北京:北京大学出版社,1991:116-123.
- [7] J.R. 霍尔顿.动力气象学引论[M].中国人民解放军气象学院训练部,译.北京:中国科学院科学出版社,1972:58-60.
- [8] 戴淑芬,何于班.22 个雷暴预报因子及其应用[J].航空气象科技,1988 (3):23-31.

Diagnostic Analysis and Forecast on Heavy Rainstorm of Single Station in Typhoon Ranim Precipitation Cloud Area

SHI Wang-zhi¹, MAO Yi-wei¹, SHEN Wei¹, CHEN Liang², WANG Xiao-ling¹

(1. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074; 2. Yichang Meteorological Bureau of Hubei Province, Yichang 443000)

Abstract: In the precipitation cloud area of a typhoon, a heavy rainstorm may appear at some stations, while no rainstorm takes place at the other stations, which brings difficulty to single station forecast. In order to improve the accuracy of single station rainstorm forecast in this area, the means of multi-physical parameter synthesis diagnostic analysis is used to analyze the origin of vapor and the maintenance of instability stratification and secondary mid-scale convergence at the stations where typhoon Ranim passes westwards. Meanwhile, the occurrence and development mechanism of the heavy rainstorm at single station and the reason why no heavy rainstorm happens are also discussed. The result shows that the generation of the sub-circulation leads to the occurrence of the heavy rainstorm. The obviously negative thermal advection at 200 hPa over the station appears, but positive thermal advection at 850 hPa appears over the station. Both the high and low levels above the station are positive vorticity centers and the value at low level is more than the value at high level. Divergence takes on negative center at each level; Or it take on positive center at high level and negative center at low level. The value of the vertical velocity center should be less than -140×10^3 hPa·s⁻¹ at station. Incessant and enough vapor formation and convergence are also necessary. The strongest water vapor transport in the northwest of typhoon center lies near the maximal gradient of dry tongue in the west of the typhoon center as well as near the maximal convergence of the wind direction and wind speed. When these factors are entirely met with at some station in the precipitation cloud area of typhoon, the heavy rainstorm is very probable to occur.

Key words: Typhoon; Precipitation cloud area; Sub-circulation; Single station; Heavy rainstorm