

文章编号:1004-9045(2008)01-0037-05

“碧利斯”引发强降水过程的湿位涡诊断分析

陈德花^{1,2}, 寿绍文¹, 张玲², 吴陈锋², 黄保云²

(1.南京信息工程大学大气科学系, 南京 361012; 2.厦门市气象局, 厦门 361012)

摘要: 利用 NCEP 1°×1°再分析资料, 计算了 2006 年第 4 号强热带风暴“碧利斯”过境引发强降水过程的湿位涡(MPV)和假相当位温(θ_e), 分析了其湿位涡中尺度时空分布特征, 探讨了湿位涡发展、减弱与暴雨增幅、减弱的相关性, 并结合假相当位温分布对此次强降水发生发展机制进行了分析。结果表明, 700 hPa 和 850 hPa 层湿位涡负值中心与强降水区域均有较好的对应关系, 强的降水区域在 850 hPa 层位于湿位涡负中心的暖湿气流一侧, 与负中心相距 1 个纬距左右, MPV 负值中心大小可反映降水强度; 在低纬地区, MPV 的湿正压项 MPV1 负值区、MPV 的湿斜压项 MPV2 正值中心北部以及 θ_e 等值面陡然向地面转折处是预报强降水中心落区的一个判据; MPV1 负值增长期, MPV2 由负值向正值过渡期, 对应降水增幅期; MPV1 向正值过渡期, 降水逐渐减弱; 降水区完全由 MPV2 负值区控制时, 该区域降水结束。

关键词: 暴雨; 台风低压; 湿位涡; 假相当位温

中图分类号: P458.1*21.1 文献标识码: A

1 引言

暴雨、大暴雨天气的发生发展往往与强的垂直上升运动和充沛的水汽输送密切相关, 单一物理量难以全面描述和诊断暴雨发生的物理机制, 从而使暴雨落区问题一直成为天气预报中的一大难点。为了寻找能充分反映大气动力、热力和水汽性质的物理量, 以便解决强暴雨落区问题, 许多预报员进行了大量有益的探索和研究。特别是 20 世纪 90 年代以来, 位涡理论被广泛应用于天气动力学研究, 尤其是用于研究中尺度暴雨、台风暴雨、爆发性气旋, 并在暴雨形成物理机制以及暴雨强度和落区方面得到一些有意义的结论。如 Hoskins 等^[1]、吴国雄等^[2]验证了绝热无摩擦饱和湿空气具有湿位涡守恒特性, 并推导出湿位涡方程, 在此基础上, 对湿斜压过程中涡旋垂直涡度发展进行了研究; 邓华军等^[3]通过对江苏地区三次强对流天气过程的湿位涡分析, 探讨了强对流天气发生发展物理机制, 并发现湿位涡能很好地反映强对流天气的热力学和动力学成因; 赵宇等^[4]利用位涡理论对“9711”号北上台风演变及其暴雨过程作了位涡诊断分析, 同时揭示了局地位涡变化在暴雨和台风演变中的重要作用。

然而, 上述湿位涡理论应用研究针对的都是中高纬地区的强对流天气系统或天气个例, 针对低纬度地区暴雨落区问题所作的研究探讨较少。为此, 本文对 2006 年第 4 号强热带风暴“碧利斯”登陆后引发的华

东、华南地区大暴雨过程进行湿位涡时空分布特征分析, 在此基础上, 探讨湿位涡发展、减弱与暴雨增幅、减弱的相关性, 并结合假相当位温的分布, 对此次强降水的发生发展机制与暴雨落区问题进行研究, 为今后开展此类暴雨落区诊断预报提供参考判据。

2 暴雨天气实况与大尺度环流背景

2006 年第 4 号热带风暴 7 月 9 日下午在菲律宾南部棉兰老岛以东西北太平洋洋面生成, 11 日下午加强为强热带风暴, 13 日 23 时前后在我国台湾省宜兰县沿海登陆。14 日 12 时 50 分, “碧利斯”在福建省霞浦县一带沿海再次登陆, 登陆时中心附近最大风力仍有 11 级, 登陆后向偏西方向移动并于 14 日 14 时在该省闽侯县境内减弱为热带风暴, 15 日凌晨进入江西省境内减弱为热带低压。受其影响, 华南沿海地区 13 日下午始降阵雨, 18 日强降水结束, 过程降雨带呈东北-西南向。雨量统计结果表明, 13 日 20 时至 14 日 20 时 24 h 强降水(>100 mm)主要分布在闽东北和浙南沿海地区, 其主要为热带风暴本身带来; 14 日 20 时至 15 日 20 时 24 h 强降水范围逐渐扩大, 其区域空间分布具有明显中尺度特征(图 1a), 并主要分布在闽浙交界、闽粤交界的沿海地区以及粤北与湘南交界地带, 最大水平尺度约 400 km, 经向度约 3~4 个纬距; 15 日 20 时至 16 日 20 时 24 h 强降水带继续向西南方向延伸(图 1b), 闽粤沿海地区日降水大于 300 mm 区域增大, 降水出现明显增幅; 16 日 20 时后, 强降水

收稿日期: 2007-12-14; 定稿日期: 2008-03-06

基金项目: 福建省自然科学基金计划项目(W0650004)、厦门市科技局科技计划项目(3502Z20064022)共同资助

作者简介: 陈德花, 女, 1977 年生, 工程师, 主要从事短期天气预报技术和方法研究。E-mail: dehua_chen@163.com

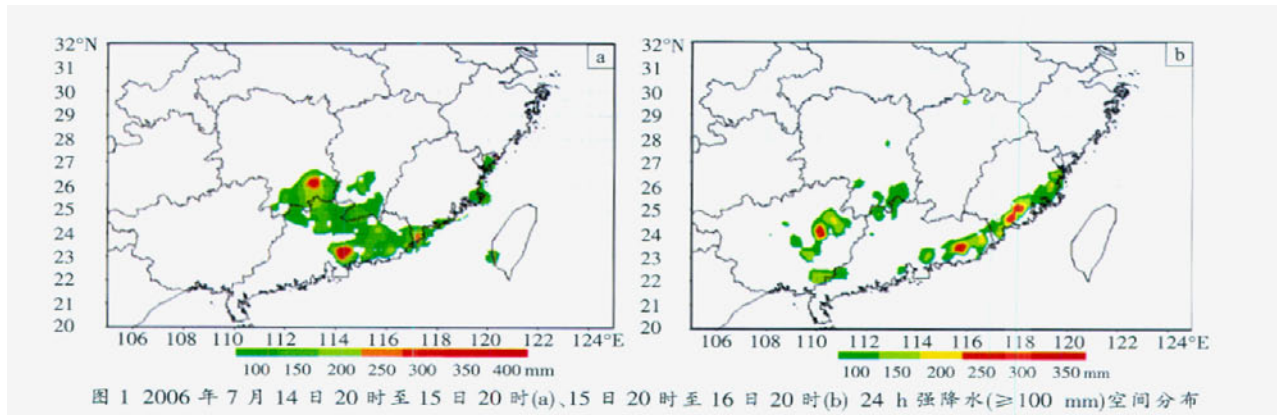


图 1 2006 年 7 月 14 日 20 时至 15 日 20 时(a)、15 日 20 时至 16 日 20 时(b) 24 h 强降水(≥100 mm)空间分布

中心继续西移南落，闽粤沿海大于 100 mm 强降水范围缩小，直到 18 日此次强降水结束。

从暴雨期间 500 hPa 平均位势高度场(7 月 14 ~16 日每天 08 时、20 时以及 17 日 08 时共 7 个时次，下同)可见(图 2a)，西太平洋副热带高压较强，中心强度达 592 dagpm，588 dagpm 线稳定在东海附近。由于热带风暴“碧利斯”登陆后西进减弱为热带低压，低压环流稳定少动，导致华南上空持续处于低压环流下。这

次暴雨过程主要由该低压环流稳定和副高强大造成。另外，从暴雨期间 850 hPa 平均流场可见(图 2b)，暴雨区位于热带低压倒槽南侧和副高东侧偏南气流中，且在台湾海峡南部和东海附近存在平均风速为 16 m·s⁻¹ 的急流区，孟加拉湾存在明显西南季风水汽输送带，这一强急流带的维持成为暴雨发生发展的水汽来源，同时不断向低压倒槽输送能量和动量，十分有利暴雨发生发展与维持。

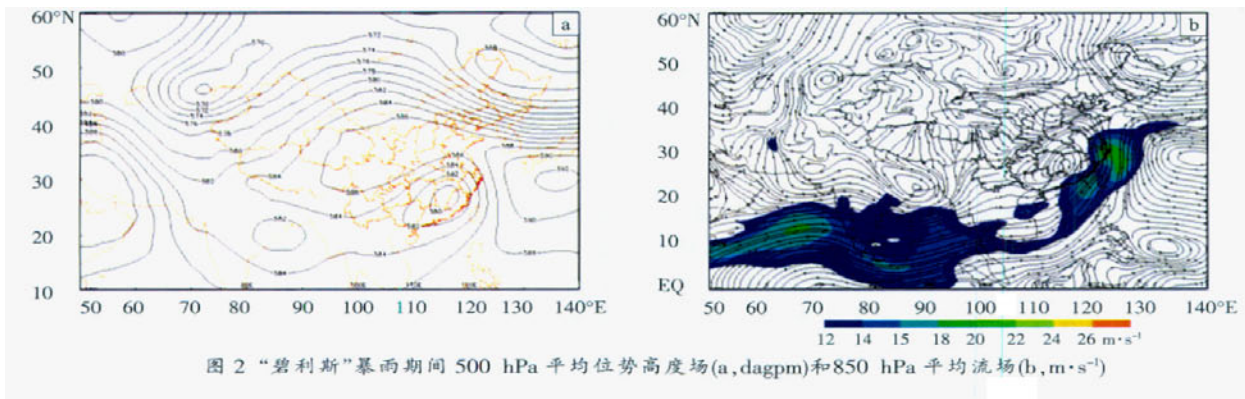


图 2 “碧利斯”暴雨期间 500 hPa 平均位势高度场(a,dagpm)和 850 hPa 平均流场(b,m·s⁻¹)

3 资料与计算方法

根据此次暴雨过程的发生时间(主要集中在 7 月 14 ~17 日)，利用 NCEP 1°×1° 再分析资料，计算 1000、900、800、700、600、500、400、300、200、100 hPa 共 10 层各层的湿位涡 MPV 及其正压项(MPV1)、斜压项(MPV2)和假相当位温(θ_{se})。

根据文献[1]，P 坐标下湿位涡(MPV)的表达式为

$$MPV = -g(\vec{k} + \nabla_p \cdot \vec{V}) \cdot \nabla_p \theta_{se} \quad (1)$$

假定垂直速度的水平变化比水平速度的垂直切变小得多，则式(1)可简化为

$$MPV = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \quad (2)$$

文献[2]中将 MPV 分解为 MPV1 与 MPV2 两部分：

$$MPV1 = -g(\xi_p + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (3)$$

$$MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \quad (4)$$

式(1)~(4)中，f 为科氏参数， ∇_p 是 xyp 空间三维梯度算子， ξ_p 为 P 坐标系中的垂直涡度， θ_{se} 为假相当位温；MPV1 是湿位涡的正压项，表示惯性稳定性($\xi_p + f$)和对流稳定性[-g($\partial \theta_{se} / \partial p$)]的作用，因为绝对涡度是正值，当大气对流不稳定时，($\partial \theta_{se} / \partial p$)>0，则 MPV1<0，反之，则对应($\partial \theta_{se} / \partial p$)<0，MPV1>0；MPV2 是湿位涡的斜压项，它包含了湿斜压性($\nabla_p \theta_{se}$)和水平风切变的贡献；湿位涡的单位(PVU)是 10⁻⁶ m²·s⁻¹·K·kg。

4 湿位涡与强降水落区的相关性

4.1 湿位涡时空分布特征

为了探讨此次暴雨过程中湿位涡的时空演变特征，分析了多个层次强降水过程的湿位涡和假相当位

温分布情况,结果发现,对流层中低层的 MPV 分布和强降水区域有较好的对应关系。因此,选取 850、700 hPa 对其关系进行分析。

7 月 14 日 14 时,随着“碧利斯”逐渐靠近福建沿海,700 hPa 层 MPV 负值中心(-0.3 PVU)位于台湾岛以东洋面,南海北部为正的 MPV 中心(0.5 PVU),850

hPa 层在台湾岛东侧对应一 MPV 负值中心;14 日 20 时,700、850 hPa 的 MPV 负值区逐渐向台湾海峡扩展,台湾海峡南部存在一 MPV 负值中心(图略)。由于 15 日 20 时至 16 日 20 时 24 h 降水相对前一 24 h 降水增幅明显,这里重点分析 15 日 20 时 700、850 hPa MPV 与 θ_w 叠加后的分布特征(图 3)。

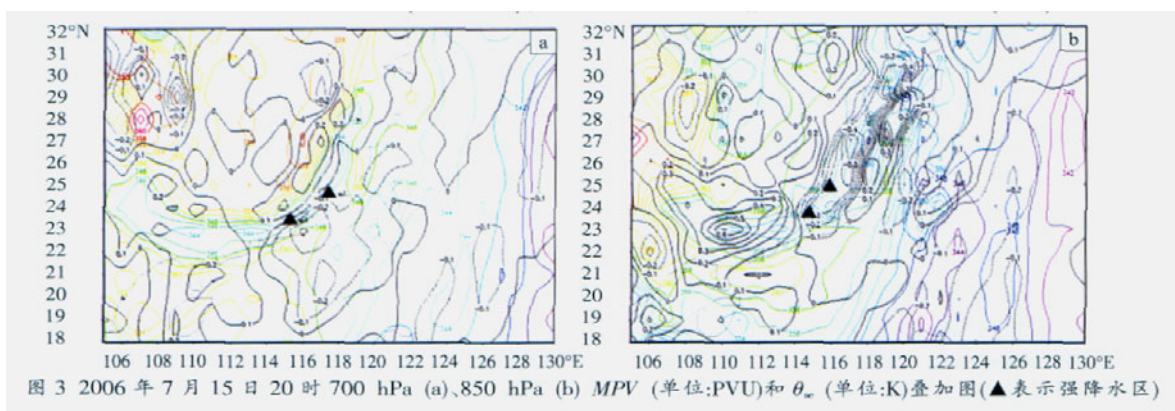


图 3 2006 年 7 月 15 日 20 时 700 hPa (a)、850 hPa (b) MPV (单位:PVU)和 θ_w (单位:K)叠加图(▲表示强降水区)

从图 3a 中可见,MPV 负值区已移到闽粤沿海地区、整个台湾海峡及南海北部,其负值中心有 2 个,分别位于闽南与粤东交界处(中心值-0.2 PVU)和台湾海峡北部(中心值-0.1 PVU),与这 2 个负值中心对应,14 日 20 时至 15 日 20 时 24 h 雨量大于 100 mm 的强降水带位于闽南到粤东地区以及闽浙交界的沿海地区,其中特大暴雨中心(> 200 mm)位于 700 hPa MPV 负值中心偏西 100-200 km 处,同时位于高 θ_w 舌顶部以及 θ_w 梯度密集区内。

再从 15 日 20 时对流层低层 850 hPa MPV 与 θ_w 叠加后的分布图上可见(图 3b),MPV 负值中心绝对值相对 15 日 14 时明显增大,达到-0.5 PVU,MPV 负极大值中心刚好对应低涡所在位置;MPV 正值区始终位于 θ_w 密集锋区偏向 θ_w 高值区,相反 MPV 负值中心区位于 θ_w 密集锋区偏向 θ_w 相对低值区。由 14 日 20 时至 15 日 20 时 24 h 降水分布可知,强降水区位于由 MPV 负值区向正低值区过渡带的南侧,配合 θ_w 分布可看出,

强降水区域位于 MPV 负中心的暖湿气流区(即 θ_w 高值区),与其负中心相距 1 个纬距左右。这一方面说明 MPV 负值区可反映强降水落区,且对强降水带走向具有指示意义;另一方面由其水平尺度(400 km 左右)说明 MPV 分布具有中尺度天气特征,这可能与湿位涡负中心强的上升气流倾斜程度和最大锋生强迫项有关;同时,强降水持续期间,降水强度与 MPV 负值中心强度存在相关性,即负值中心绝对值越大,降水增强越明显,反之则减弱。可见,700、850 hPa 的 MPV 负值中心和强降水区域有较好的对应关系。这与林毅等^[9]在分析台风“龙王”中尺度暴雨时得出的“湿位涡的分布与台风大暴雨的发生发展有很好的对应关系,对流发展区湿位涡表现为下负上正的垂直分布,湿位涡对暴雨落区的预报具有指示意义”的结论一致。

4.2 湿位涡(MPV)的垂直结构

为了揭示湿位涡(MPV)的垂直分布与暴雨区的对应关系,给出 7 月 15 日 20 时沿 24°N、27°N 的 850

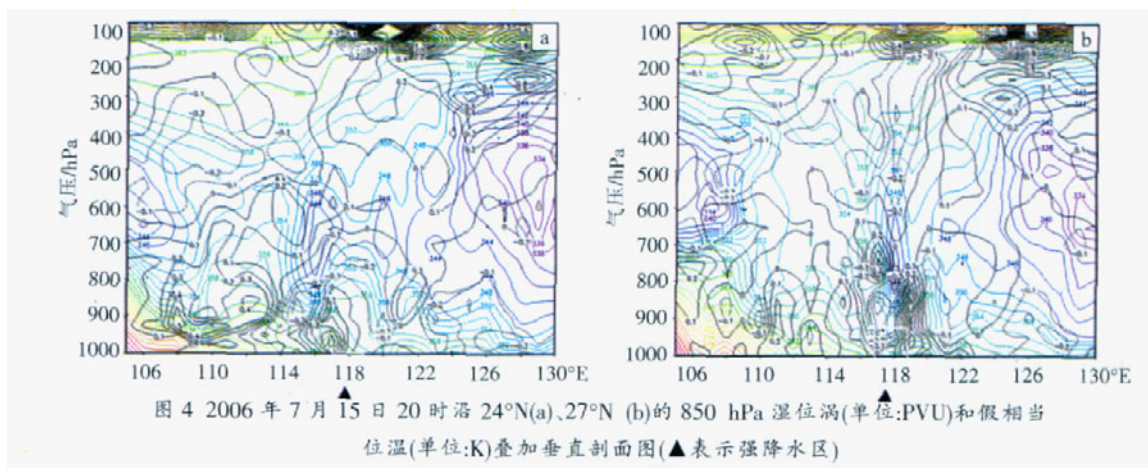


图 4 2006 年 7 月 15 日 20 时沿 24°N(a)、27°N (b) 的 850 hPa 湿位涡(单位:PVU)和假相当位温(单位:K)叠加垂直剖面图(▲表示强降水区)

hPa 湿位涡与假相当位温叠加垂直剖面图(图 4)。

从图 4 中可见, 对流层低层存在 ω 高能区, 这一高能区在此次暴雨过程中一直都存在, 有利于大气内能向动能转化, 促使对流发展; 分析其垂直结构可知, 850 hPa 层以下表现为明显热力湿对流不稳定, 反映在暴雨区内则存在高温高湿的 ω 高中心, 在低层表现为湿对流不稳定层, 即 $(\partial \omega / \partial P) > 0$; 在 850~600 hPa 层出现湿中性层, 即 $(\partial \omega / \partial P) = 0$; 在 600 hPa 层以上, 气层相对稳定, 即 $(\partial \omega / \partial P) < 0$ 。该结论也与林毅等^[9]在分析台风“龙王”中尺度暴雨成因时得到的强降水区中 ω 垂直分布结构特征一致。

从图 4 中还可看到, 湿位涡在垂直方向也具有明显中尺度特征, 其水平最大范围 200~300 km 左右; 在 27°N 上空, 湿位涡柱状结构更明显, MPV 负值中心位于 ω 线陡立区左下方。分析 15 日 08 时至 16 日 08 时降水实况可知, 在 27°N、117°~118°E 区域, 降水并不强, 强降水区位于 MPV 负值中心偏东 1~2 个经度处; 15 日 20 时, MPV 垂直分布显示(图 4b), 该区域从对流层低层至 800 hPa MPV 均为负值, 而 600~800 hPa 层出现 MPV 正值区, 600 hPa 层以上又出现 MPV 负值区, 且这种 MPV 正负区交替的中心轴线向西倾斜。强降水区位于 ω 等值面陡然向地面的转折处, 也就是

位于强斜压区内, 导致倾斜湿位涡增长, 使垂直上升运动增强。同时, 从图 4a 中也发现, 强降水区出现在距离 MPV 负值中心偏东 1~2 个经度处。这与文献[6]中研究结果“湿位涡中心位置一般在暴雨东部并随雨团东移”有所不同。文献[6]对 1998 年 7 月 19~22 日武汉地区一次持续性特大暴雨过程的研究表明, 暴雨区随着低涡逐渐向南向东移动; 而本文研究发现, 低涡是向西偏北方向移动。这说明湿位涡和强降水区的对应关系可能与低涡的移动方向有关。

4.3 湿位涡正压项(MPV1)和斜压项(MPV2)的分布和强降水区的对应关系

图 5a 给出了 7 月 15 日 20 时 850 hPa MPV1 的分布情况。对比图 3b 发现, MPV1 的分布和 MPV 的分布较为相似, 两者负值中心对应较好, 且在量级上较为一致, 只是负值中心量值相对于 MPV 的小。王淑静等^[7]在应用位涡理论对台风暴雨落区判据的探讨中发现, 暴雨区位于 MPV1 负值中心以及包围它的等值线密集区内。事实上, 15 日 20 时至 16 日 20 时强降水区就落在 MPV1 的负值区内, 同时两个大于 250 mm 的强降水中心对应 MPV1 的负值中心, 这说明在低纬地区 MPV1 负值区可作为强降水区的警戒区, 同时负值中心可作为强降水中心落区的一个判据。

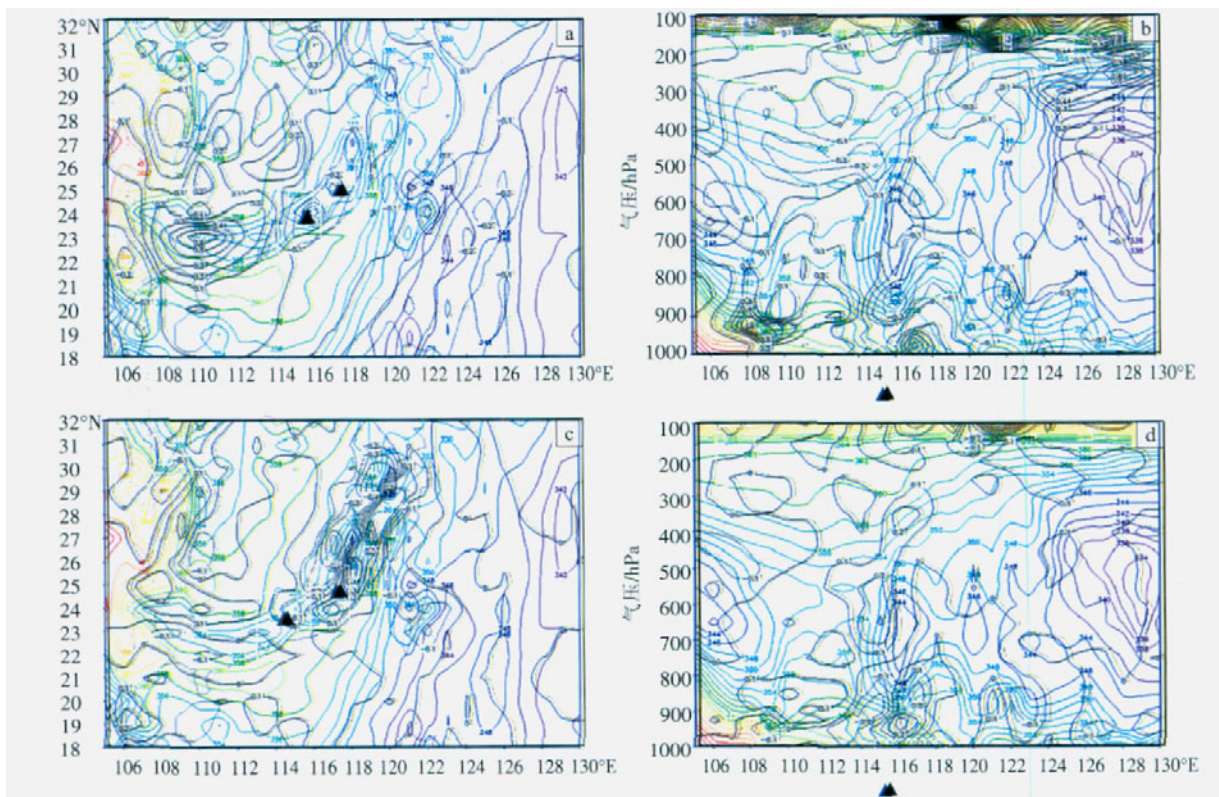


图 5 2006 年 7 月 15 日 20 时 850 hPa MPV1 和假相当位温叠加图(a), 沿 24°N 的 850 hPa MPV1 和假相当位温垂直剖面叠加图(b), 850 hPa MPV2 和假相当位温叠加图(c), 沿 24°N 的 850 hPa MPV2 和假相当位温垂直剖面叠加图(d) (MPV 单位: PVU; θ_e 单位: K; ▲表示强降水区)

从 7 月 15 日 20 时沿 24°N 的 850 hPa MPV1 和假相当位温垂直剖面叠加图上可见(图 5b), 强降水区上空 MPV1 负值中心和 MPV 负值中心在垂直方向上的分布基本类似;不同的是, 500~850 hPa 和近地层在 MPV 图上存在正值中心, 而在 MPV1 图上却是负值区, 这说明低层大气非常不稳定。强降水期间 MPV1 负值增长期, 对应降水增幅期; MPV1 向正值过渡时, 降水逐渐减弱; MPV1 为正值时, 降水结束。

再从 7 月 15 日 20 时 850 hPa MPV2 和假相当位温叠加图上可见(图 5c), 随着强降水区逐渐向西北方向移动, MPV2 正值区也逐渐随之西北移, 且 MPV2 正值区与 MPV1 负值区相对应, 强降水区位于 MPV2 正中心北部、负中心南部。

另外, 从 7 月 15 日 20 时 850 hPa MPV2 和假相当位温沿 24°N 的垂直剖面叠加图上可见(图 5d), 与 MPV1 负值区对应的是 MPV2 正值区, MPV2 由负值向正值过渡期对应降水增幅期; MPV1 负值区和 MPV2 正值区对应 σ_{θ} 等值面陡然向地面转折处, 且 $(\partial \sigma_{\theta} / \partial P) > 0$, 正好与强降水中心相对应。

5 结论

本研究分析了 2006 年第 4 号强热带风暴“碧利斯”登陆后引发的华东、华南地区大暴雨过程的湿位涡中尺度时空分布特征, 重点探讨了湿位涡发展、减弱与暴雨增幅、减弱的相关性, 同时结合假相当位温分布分析了此次强降水的发生发展机制, 得出以下结论。

(1) 700 hPa、850 hPa 层湿位涡负值中心与强降水区域均有较好的对应关系。负湿位涡区水平尺度为 200~300 km, 具有明显中尺度特征, 其负值中心 MPV 的大小可以反映降水强度; 强降水区位于 700 hPa 层

MPV 负值中心偏西 100~200 km 处, 而在 850 hPa 层位于 MPV 负中心暖湿气流一侧并与负中心相距 1 个纬距左右; MPV 最大负值中心的出现预示着降水将进入强盛期, 反之降水趋于减弱。

(2) 湿位涡在垂直方向上也具有明显的中尺度特征, 其水平最大范围 200~300 km 左右。此次强降水过程中, 湿位涡负值中心位于强降水区偏西 1~2 个经度处, 且其负值区由东南向西北方向扩展。

(3) 在低纬地区, 湿位涡正压项(MPV1)和斜压项(MPV2) 的分布与强降水区存在较好的对应关系。MPV1 负值区、MPV2 正中心北部以及 σ_{θ} 等值面陡然向地面转折处可作为强降水中心落区的一个判据。MPV1 负值增长期, MPV2 由负值向正值过渡期, 对应降水增幅期; MPV1 向正值过渡时, 降水逐渐减弱; 降水区完全由 MPV2 负值区所控制时, 则该区域降水即告结束。

参考文献:

- [1] Rossby C G. Planetary Flow Patterns In the atmosphere [J]. Q J R M S 1940, 66 (supple):68- 87.
- [2] 吴国雄, 蔡雅萍, 唐晓. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53 (4):390- 404.
- [3] 邓华军, 唐润昌, 张欣, 等. 三次强对流天气过程的湿位涡分析[J]. 气象科学, 1999, 19(2):151- 154.
- [4] 赵宇, 吴增茂. 9711 号北上台风演变及暴雨过程的位涡诊断分析[J]. 中国海洋大学学报, 2004, 34(1):13- 16.
- [5] 林毅, 刘铭, 刘爱鸣, 等. 台风龙王中尺度暴雨成因分析[J]. 气象, 2007, 33 (2):27- 28.
- [6] 安洁, 张立凤. 暴雨过程中湿位涡的中尺度时空特征[J]. 气象科学, 2004, 24(1):75- 77.
- [7] 王淑静, 周国兴. 解释台风暴雨落区判据探讨[J]. 应用气象学报, 1997, 8 (2):167- 174.

Diagnostic Analysis of Moist Potential Vorticity for Heavy Rain Caused by “BILLIS” Typhoon

CHEN De-hua^{1,2}, SHOU Shao-wen¹, ZHANG Ling², WU Chen-feng², HUANG Bao-yun²

(1. Institute of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044; 2. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012)

Abstract: Based on the NCEP 1°×1° reanalysis data, the mesoscale spatio-temporal distributed characteristics of moist potential vorticity of the heavy rain triggered by the 4th strong tropical storm “Billis” in 2006 are analyzed. As a result, the negative MPV center at 700 and 850 hPa agrees well with the severe precipitation region in 850 hPa located the side of warm and moist airflow 110 kilometers away from the negative MPV center whose size can reflect the precipitation intensity. In the low latitude area, negative MPV1 region, north of the positive MPV2 centre and the turning point of σ_{θ} equivalent surface are indexes for predicting the strong precipitation center. Negative MPV1 rise period and the transition period from negative MPV2 to positive MPV2 correspond with precipitation rise period. When precipitation area is covered completely by negative MPV2 region, the precipitation in this region will end.

Key words: Heavy rain; Typhoon; MPV; Pseudo-equivalent potential temperature