

“碧利斯”台风暴雨物理量场诊断分析

吴启树^{1,2}, 沈桐立², 沈新勇²

(1. 福州市气象局, 福建 福州 350014; 2. 南京信息工程大学大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 本文用 MM5 模式数值模拟了 0010 号“碧利斯”台风登陆福建的过程, 表明 MM5 模式能很好地模拟出主要雨带及其分布特征。物理量场分析指出, 本次福建沿海地区暴雨产生的物理机制主要有: 台风登陆福建前后福建沿海地区上空层结相当不稳定; 由于台风环流非对称性, 台风中心北侧中低层有很强的风速、相对湿度、正涡度、辐合、垂直速度; 暴雨区高低层存在正负螺旋柱; 暴雨区高层存在正湿位涡、低层负湿位涡中心。

关键词: 台风暴雨; MM5; 物理量场; 诊断分析

中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1003 - 0239 (2005)02 - 0059 - 08

1 引言

2000 年第 10 号台风“碧利斯”于 8 月 23 日 10 时 30 分在福建省晋江市沿海登陆, 台风登陆前后福建省各县(市)普降暴雨, 直接造成福建省重大的经济损失。

此次福建的台风暴雨过程以 23 日 08 时~24 日 08 时日雨量为最强(见图 1), 全省沿海地区各县(市)都在大雨以上, 日雨量大于 100mm 共有 13 个县(市), 主要分布在福建中北部沿海地区, 以闽东地区的周宁、柘荣两县为最大, 分别为 230、212mm, 强降水区大都处于台风中心的偏北或东北侧。本文选取台风登陆前后 23 日 08 时~24 日 08 时作为数值模拟与物理量场分析时段。

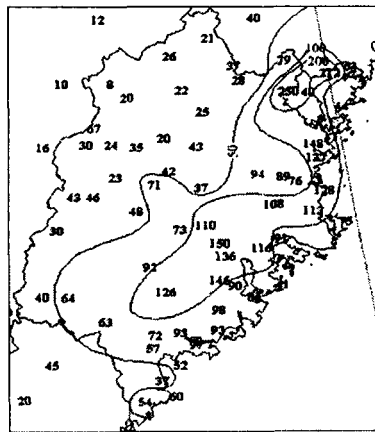


图 1 2000 年 8 月 23 日 08 时~24 日 08 时福建省降雨量 (mm)

2 资料和模拟方案

本文用中尺度 MM5 模式^[1], 采用 NCEP 逐日 4 次再分析资料作为初始场, 其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 通过 Cressman 客观分析方法进行再分析后形成模式的初始场和侧边界条件; 拟主要针对台风登陆前后时段, 即 23 日 08 时~24 日 08 时, 故初始时间选为 23 日 08 时, 积分 24h; 模式顶 $P_t=10\text{hPa}$, σ 面垂直分层共 26 层。地形和下垫面特征: 分别将 NCAR 的 30' 的地形资料和 13 类地面特征插值到网格点上; 时间差分方案采用的

收稿日期: 2004-05-10; 修订日期: 2005-02-19

基金资助: 国家自然科学基金项目 (40075023); 上海台风研究基金课题 (2004) 资助。

作者简介: 吴启树 (1973-), 男, 工程师, 在职研究生, 主要从事数值预报应用的研究。

是时间分裂方案,增加计算效率;侧边界条件采用时变松弛边界条件;RAWIS 模块采用一天 4 次的地面资料和一天两次探空资料。本文采用一层嵌套,中心点定位于(30°N、115°E),格距 39.3km,南北、东西格数均为 61;行星边界层物理过程参数化类型为高分辨率 Blackadar 行星边界层模式;积云对流为 Grell 方案。

3 数值模拟结果及物理量分析

3.1 模拟降水与实况比较

从 23 日 08 时~24 日 08 时的实况雨量来看(见图 1),强降水主要分布在福建沿海地区,强降水带分布呈东北—西南走向。用 MM5 模拟的降水结果(见图 2),降水强度总体比实况略小,强降水中心在福建宁德地区及闽南地区,强降水带呈东北—西南走向。这与实况相同,这表明用 MM5 模式数值模拟本次台风暴雨过程是成功的。

从环流形势来看,模拟结果的副高、台风中心等位置与强度,MM5 都给出了非常令人满意的高低空位势场的演变模拟。从其它气象要素来看,无论是流场、温度场、温度露点、湿度场等,模拟结果都与实况图上的对应要素场相吻合。

本次台风登陆前后地面等压线、中低层等高线是非对称性结构的。台风中心偏北侧等压线和等高线比较密集,而台风中心附近及偏南侧的等压线和等高线较稀疏。这种地面气压、中低层位势高度梯度的分布,使得台风中心偏北侧即福建中北部沿海地区中低层为风速大值区,而在台风中心及偏南侧附近为风速小值区,表明台风结构是非对称的。台风流场的非对称结构使涡度、散度、垂直速度、位涡等物理量分布也是非对称的,加上福建沿海地形分布特征,直接影响了雨带分布的非对称性。

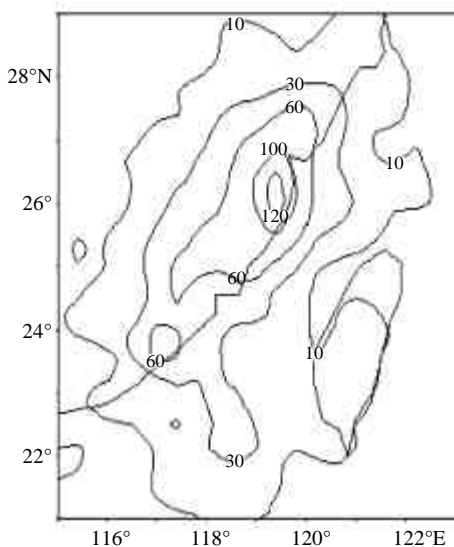


图 2 模拟 24h 降雨量(mm)

3.2 物理量场分析

3.2.1 水汽条件

23 日 08 时开始,福建沿海地区及台湾海峡中低层相对湿度达 95% 以上,且面积相当大,表明空气水汽含量已接近饱和。在台风登陆前后,福建沿海中低层空气饱和区面积达到最大。从经过福州相对湿度东西—高度剖面图(图略)可以看出,23 日 12 时福建中部沿海地区湿舌升到 400hPa 高度。福建沿海地区中低层相对湿度高值状态一直保持到模拟最后时段。

水汽通量散度是指在单位时间里,单位体积内汇合进来或辐散出去的水汽质量。水平方向的水汽通量散度 A 的表达式为: $A=\nabla \cdot (\frac{1}{g}\vec{V}q)$ 。

分析 850hPa 上水汽通量散度,23 日 08 时(初始时段),水汽辐合强中心在福建南部沿海地区,强中心为 $-12\times10^{-7}\text{g}/\text{cm}^2/\text{hPa}^1/\text{s}^{-1}$,这时福建南部沿海地区降水强度是最强的。此后台风中心向西北方向移动,逐渐向福建南部沿海地区靠近,水汽通量中心位置开始调整并增强,在模拟第 3、4 两个时段达到最大(见图 3),强中心位于台风中心北侧的福州地区,最强达到 $30\times10^{-7}\text{g}/\text{cm}^2/\text{hPa}^1/\text{s}^{-1}$,强水汽辐合带与强降雨带一样,也呈东北-西南走向(见图 3a)。而从过福州东-西向垂直水汽通量散度图(见图 3b)可以看出,23 日 12 时福州市低层有强烈的水汽辐合,达 $-40\times10^{-7}\text{g}/\text{cm}^2/\text{hPa}^1/\text{s}^{-1}$,而中高层有较强的水汽辐散。这种高低层水汽通量散度场配置,有利于低层空气上升凝结释放潜热,产生了降水的正反馈作用。

积分时段福建沿海地区大气较饱和的水汽、强烈的水汽输送及水汽通量高层辐散、低层辐合的配置,为本次福建的强降雨提供了充足水汽条件。

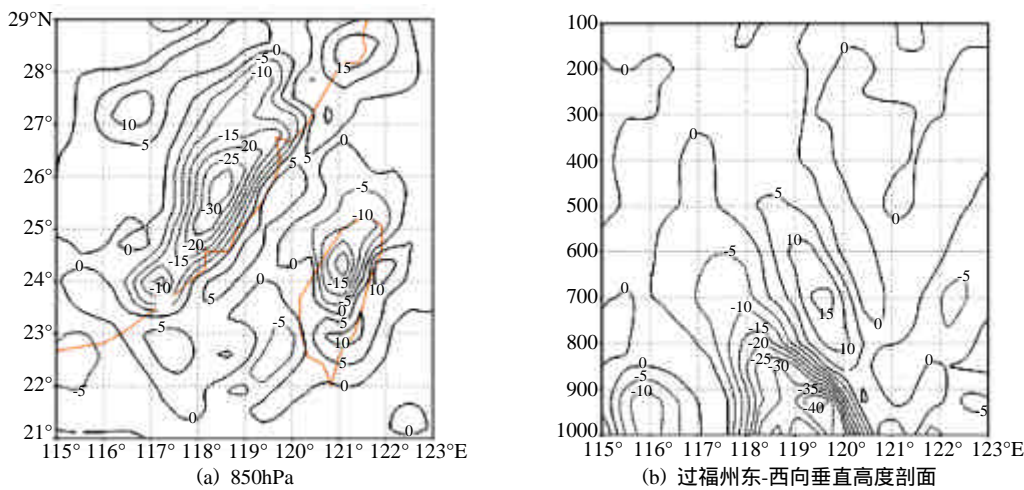


图3 模拟第4时段(23日12时)水汽通量散度($10^{-7}\text{g}/\text{cm}^2/\text{hPa}^1/\text{s}^{-1}$)

3.2.2 稳定度

相当位温 θ_e 能综合表征大气的温度、湿度条件的物理参数。除水汽外,本次暴雨过程有相当好的温度条件。模拟初始时段,在福建沿海中低层有较高的相当位温,这表明台风登陆前这一地区的温度、湿度条件就相当好,易发生较强降水。从23日12时850hPa上 θ_e (图略)分布可以看出,强中心在宁德地区,强度达353K。从该时段过福州东-西向垂直剖面图(图略)可见,在119°E附近的中低层有较高的 θ_e ,近地面最高达368K,而同一位置的500hPa上的 θ_e 才352K。由于高层低 θ_e ,低层高 θ_e , $\frac{\partial \theta_e}{\partial z} < 0$,且绝对值在中低值119°E附近较大,表明这地区层结相当不稳定。

K指数 = $(T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T - T_d)_{700}$ 。K值越大,层结越不稳定,在计算模拟各

时段 K 指数分布可以看到,福建沿海地区 K 指数从 23 日 08 时~24 日 08 时始终大于 36,最强时达到 40,主要在台风登陆前后。这也表明,本次台风登陆前后福建沿海大气热力稳定度是非常不稳定的。

3.2.3 涡度分析

台风是一个非常深厚的低压涡旋系统,本次台风登陆前后,台风中心偏北侧 1 个纬距附近有强气旋性涡度中心。从垂直分布来看,涡度最强在 23 日 12 时前后,气旋性涡度从地面一直升到 100hPa 高空,最大值在 850hPa 附近;在中低层,涡度中心强度大于 $20 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,且气旋性涡旋范围很大,直径超过 6 个经纬距,强涡度分布与强降雨区有很好的对应关系。850hPa 以上,涡度也在 23 日 12 时左右达到最强(图略),其中心位于莆田附近,强度达到了 $55 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,强涡度区分布呈东北-西南走向,这与雨量分布特征相似。台风中心偏北方中低层的较强气旋性涡度,配合其高空(高于 100hPa)为负涡度,有利于高层反气旋气流出通道的维持^[2],使得低空维持辐合流场,有利于本次暴雨的形成和加强。

3.2.4 散度分析

本次台风登陆前后,在台风中心偏北侧 1 个纬距附近,低层有较强的辐合中心,此位置与涡度中心相近,且对应中高层上有较强的辐散中心。低层辐合中心最强在 925hPa,达到 $-25 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,时间为 23 日 12 时前后,位置在莆田附近,对应 600hPa 上则有辐散中心,强度达 $10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (图略)。23 日 12 时辐合中心比强降水中心略为偏南,但强降雨带与强辐合带呈较为一致的分布特征。这种低层强辐合、高层强辐散的配置,能促进中低层空气强烈垂直上升运动,加大降水强度。

3.2.5 垂直速度

由于登陆前后台风中心偏北附近中低层有较强的气旋性涡度,及辐散场高低空有利的配置,加上风场在沿海地形强迫抬升作用下,使得该地区中低层有强烈的上升运动。从模拟初始时段开始,福建沿海就有较强的垂直速度,开始时强中心位于台风中心东北侧的泉州地区,后中心位置开始向北移动且不断加强,到 23 日 11 时达到最强。此时垂直上升运动最强是在 700hPa 附近,强度大于 0.5 m/s^{-1} (见图 4a),可见,台风登陆前后福建沿海地区大气对流很强烈。此时的垂直速度中心附近上升运动区可达 200hPa 以上(见图 4b)。闽东太姥山脉及闽中戴云山山脉为东北-西南走向,由于 11 时前后台风风场明显的不对称结构,福建中北部沿海中低层有风速大于 36 m/s^{-1} 的水平风速中心,其风向为东南,与山脉东侧地形正交,中低层急流在迎风坡地形作用下,加剧该地区中低层的辐合上升。在模拟时段内,福建上空大气相对湿度大,湿层高度高,深厚的台风环流带动水汽强烈辐合上升运动是造成积分时段暴雨的直接原因。

3.2.6 螺旋度分析

Lilly^[3]对螺旋度 H 定义为速度矢量和涡度矢量的协方差,在数学上的表示式如下:

$$H = \vec{V} \cdot \nabla \times \vec{V} = (\vec{i}u + \vec{j}v + \vec{k}w) \cdot (\vec{i}\xi + \vec{j}\eta + \vec{k}\zeta)$$

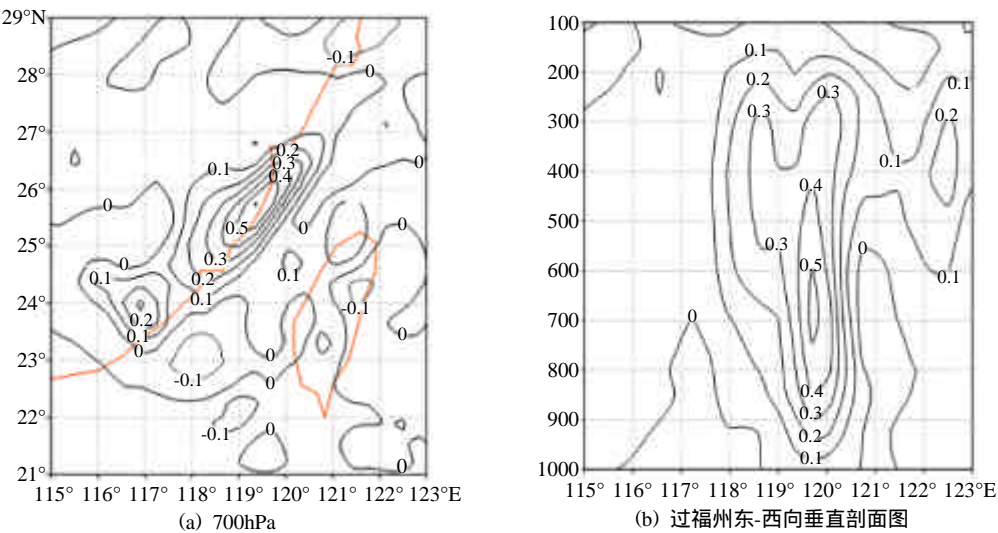


图4 积分第3时段(23日11时)垂直速度(m/s⁻¹)

其中 u 、 v 、 w 、 ξ 、 η 、 ζ 分别为速度矢量 \vec{V} 和全涡度矢量的在 (x,y,z) 坐标系中 i 、 j 、 k 三个方向的分量,其余符号通用。由螺旋度 H 的定义式可见,螺旋度 H 是速度矢量和涡度矢量的点积,也可以理解是速度矢量在涡度矢量上的投影大小与涡度矢量模的乘积。

分析积分时段的螺旋度时空分布,可以发现,在积分初期,福建北部沿海就有较强的正、负 H 中心。强度相当强,量级达到 10^{-3}m/s^2 。螺旋度在23日12时前后达到最强(见图5),此时低层负值强中心达 $-5\times 10^{-3}\text{m/s}^2$,位于福建北部沿海,其西侧有 $3\times 10^{-3}\text{m/s}^2$ 的正中心。从垂直分布来看,低层负值中心对应高层(500hPa附近)为正中心区域,但绝对值明显小于低层的负中心,形成在该点高低空的正、负螺旋柱。侯瑞钦^[4]指出,高低层的正、负螺旋度柱的下方正是暴雨发生的区域。本次暴雨过程,福建沿海的螺旋度分布正是呈现这个特征。

3.2.7 湿位涡分析

位势涡度^[2]是综合表征流场和大气热力结构的物理量。本文采用湿位涡 $MPV=-g(\zeta+f)\frac{\partial\theta_e}{\partial p}+g(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial y})$,湿位涡分为湿正压项(MPV1)和湿斜压项(MPV2): $MPV1=-g(\zeta+f)\frac{\partial\theta_e}{\partial p}$ 表示惯性稳定性与对流稳定性的作用, $MPV2=g(\frac{\partial v}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial x}-\frac{\partial u}{\partial p}\frac{\partial\theta_e}{\partial y})$ 包含了湿斜压性和水平风垂直切变的贡献。 $1\text{MPU}=10^{-6}/\text{hPa}^{-1}/\text{s}^{-1}$ 。湿位涡不仅表征了大气动力、热力属性,而且还考虑了水汽的作用。

暴雨过程期间,暴雨区低层有负MPV中心,925hPa上中心强度达到-4MPU(见图6a),距离台风中心偏北2个纬距,位于强降水的左侧,在200hPa上,正湿位涡中心达到1.6MPU(见图6b),位于低层负中心略偏南。随着台风中心继续向西北方向移动并减弱时,湿位涡中心也有所减弱,中心略向东偏南移动,而此时强降水仍在福建省中北部沿海,位置与湿

位涡中心相近。当 24 日 08 时台风中心位于长汀县境内，强度减弱为热带低压，此时低层负湿位涡、高层正湿位涡中心值明显减弱，降水强度也相应减弱。

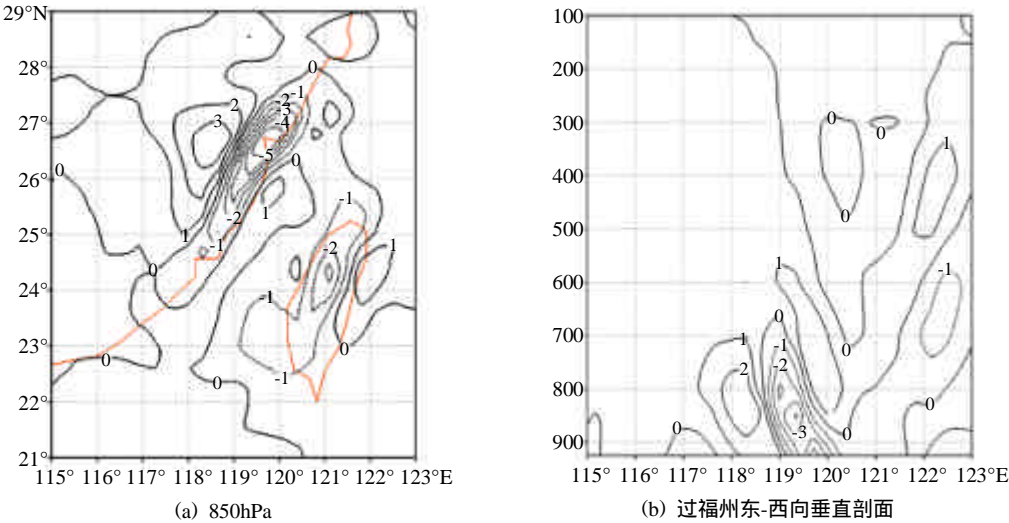


图 5 积分第 4 时段 (23 日 12 时) 螺旋度 (m/s²)

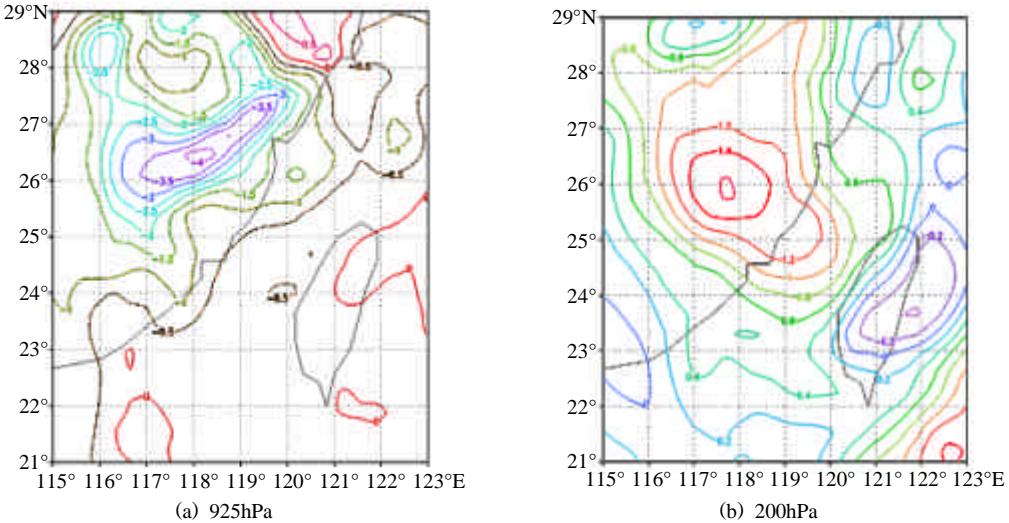


图 6 模拟第 4 段 (23 日 12 时) 位涡 (/hPa⁻¹/s⁻¹)

台风中心偏北侧 $\xi > 0$ ，故 $(\xi + f) > 0$ ，而在低层，由于暴雨区湿对称不稳定，即条件性不稳定，使得 $(-\frac{\partial \theta_e}{\partial p}) < 0$ ，从而 $MPV1 < 0$ 。同时，积分时段福建沿海 K 指数比较大。由于台风中心等熵面的倾斜结构，使得 MPV2 也为 MPV 做出贡献。但强度值比 MPV1 小一个量级。不稳定条件性有利于倾斜对流的发生发展，由于台风登陆前后中心偏北侧低层 MPV1 一直为负值，且随台风的逼近负值增大，这种不稳定在高层 MPV 的扰动下，加上等熵面的倾斜，导致垂直涡度发展，配合中低层的垂直上升运动，有利于强对流的

发生和维持,使得暴雨发展和维持。

4 结论

通过中尺度模式 MM5 对 0010 号“碧利斯”台风影响福建暴雨过程模拟试验,再分析物理量场,得出以下结论:

(1) MM5 模式能很好的数值模拟本次台风登陆前后的降水量、台风结构与强度、流场等特征。

(2) 模拟时段福建沿海中低层有较高的相对湿度条件、稳定度条件,在台风中心北侧有较强的水汽通量及水汽通量辐合。

(3) 涡度、散度、垂直速度分析表明,台风登陆前后台风中心北侧有比台风中心更强的中低层涡度、散度、垂直速度,且强中心位于福建沿海中北部地区,与降水中心较为吻合。

(4) 本次台风过程有较好的螺旋度高低空配置。高低层的正、负螺旋度柱的下方正是暴雨发生的区域。

(5) 湿位涡分析表明,降水中心附近中低层存在负湿位涡中心,对应高层为正湿位涡。由等熵面的倾斜引起的斜压不稳定,有利于垂直上升运动的加强。

参考文献:

- [1] 沈桐立,田永祥,葛孝贞,等. 数值天气预报[M]. 北京: 气象出版社, 2003, 383~420.
- [2] 寿绍文, 励申申, 姚秀萍. 中尺度气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2003, 253~315.
- [3] Lilly D. The structure, energetics and propagation of rotating convective storms. Part 1: Helicity and storm stabilization [J]. J Atmos Sci, 1986,43 :126~140.
- [4] 侯瑞钦, 程麟生, 冯伍虎. “98.7”特大暴雨的低涡螺旋度和动能诊断[J]. 高原气象. 2003 ,22(2) :202~208.

ANALYSIS OF PHYSICAL VARIABLES OF THE RAINSTORM OF 0010 TYPHOON “ Bylis ”

Wu Qi-shu^{1,2}, Shen Tong-li², Shen Xin-yong²

(1. Fuzhou Meteorological bureau, Fuzhou 350014, China; 2. Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract : This paper used MM5 to simulate the process of landing of 0010 Typhoon “ Bylis ”. It showed that MM5 can simulated main rainstorm belt and its ' distribution characteristic very well. The analysis of physical variables indicated that this main mechanisms of rainstorm happened in the coastland of Fujian Province were :the layer above the Fujian coastland quite unsteady before and after typhoon landing ;because of typhoon 's unsymmetrical circumfluence, strong wind speed, relative humidity, positive vorticity、convergence and vertical velocity appeared at the north of typhoon 's center , between the higher and lower layers of rainstorm positive and negative helicity column exists , between positive moist potential vorticity center exists at high layer, and negative moist potential vorticity center exists at the low layers.

Key words : Typhoon rainstorm ;MM5 ;Physical variables ;Diagnostic analysis