

一次热带风暴造成辽宁暴雨的数值模拟研究^①

马福全^{1,2} 沈桐立¹ 张子峰² 隋东²

(1. 南京信息工程大学, 210044; 2. 沈阳市气象台)

提 要

利用非静力平衡的中尺度模式 MM5V3, 对 1997 年 8 月 20 日 Winnie 台风减弱的热带风暴, 进行了 48h 数值模拟。结果表明: MM5 不仅比较好地模拟出高空形势场, 还成功地模拟出了强降水的时间和强度。应用模拟出的物理量对这次过程进行了诊断分析, 并对暴雨形成机制进行了讨论。

关键词: 热带风暴 大暴雨 数值模拟

引 言

我国是暴雨多发国家, 而台风暴雨因其雨势强、持续时间长、影响范围广, 成为暴雨灾害中常见和最严重的一种。虽然影响东北的热带气旋次数不多, 但是中心超过 25°N 登陆并继续西北上的热带气旋, 往往给辽宁带来暴雨天气。目前国内对华南及江淮流域的暴雨研究得多, 对东北暴雨的关注相对较少, 科研与预报工作之间有一定的距离^[1]。利用沈阳区域气象中心的中尺度数值预报业务模式, 对 1997 年 8 月 20 日 23 时 30 分在辽宁登陆, 并引发辽宁全省范围大暴雨灾害的 9711 号台风(名为 Winnie, 登陆时强度为热带风暴), 进行了数值模拟分析。

Winnie 对辽宁的影响有几个特点。①降水时间长: 辽宁的降水开始于 19 日 08 时, 20 日夜间降水强度达到最大, 总共持续了 57 小时。②降水强度大、范围广: 全省 14 个市地均出现了暴雨, 24 小时最大降水量为 228mm, 出现大暴雨的多达 12 个市地的 30 多个测站, 这种影响多年罕见。③大风持续

时间长: 从 20 日 08 时到 21 日 08 时, 辽宁的平原地区先后出现 6~7 级西南或东北大风。西南风主要在辽东地区, 阵风达 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (海洋岛); 东北风主要在辽西地区, 阵风达 $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (盘锦)。④受灾损失大: 辽宁境内共倒塌和毁坏房屋 2 万多间, 700 多公顷农田被淹, 50 多万株果树被刮倒, 冲毁公路、塘坝、桥梁 1200 多处, 冲毁水利和电力设施 350 多处, 死亡 6 人, 国家和人民生命财产损失极大。

1 模式和模拟检验

模式采用非静力平衡中尺度模式 MM5V3。模拟区域以 42°N、120°E 为中心, 由 2 层套网格组成, 粗细网格格距分别为 45km、15km。垂直为 23 层 σ 坐标, 粗细网格所用的地形分辨率分别为 10' (19km) 和 5' (9km)。模式处理范围和地形资料场见图 1。

模式的主要物理过程包括: Grell 积云参数化方案、Dudhia 云辐射方案、高分辨率 Blackadar 方案、陆面过程采用了 5 层土壤模

^① 资助项目: 国家自然科学基金项目 40075023 资助

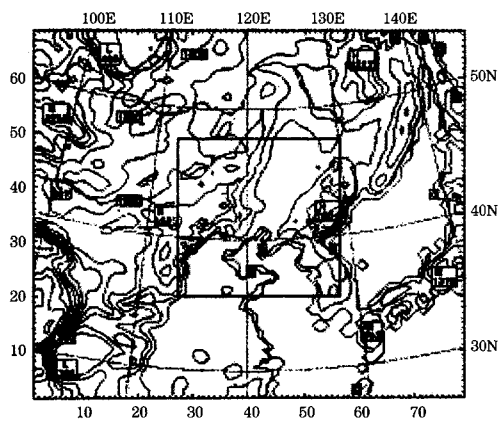


图1 模拟范围和地形高度(单位:m)

式。模拟时间以1997年8月19日20时为初始时刻,积分48小时,时间步长180s,预报场输出间隔3小时。各类产品的输出图形,均使用MM5的RIP绘图工具生成。

图2是24小时的降水模拟结果。模拟降水量与实况相比,不仅外形相似,量级也相当。辽宁最强的降水发生在渤海湾北部地区;细网格模拟的降水中心值为261.6mm,比实况位置略偏东,偏大34mm;粗网格降水中心偏小31mm,为196.5mm,但其大暴雨位置、范围甚至走向,都与实况基本吻合。另外,从细网格模拟的3小时降水量与实况对比看:在20日20时和23时都有3小时大于

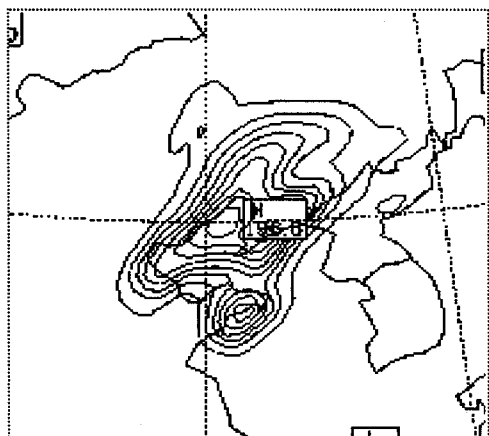


图2 模拟的1997年8月20~21日08时降水量(单位:mm)

50mm的降水中心,最强的20~23时渤海湾北部的新民和黑山站雨量超过70mm。而模拟的雨强中心位置与实况接近,两时段的中心雨量为分别为50mm和56mm。通过以上分析可见,无论从降水的总量还是从降水时间和强度上,整个模拟过程都是相当成功的。

图3为粗网格模拟的高空环流形势图。500hPa副高中心的位置及其演变、东亚阻塞形势和副高与Winnie之间的中低空偏南急流,位置和强度基本与实况一致。进一步细致分析:500hPa上,沈阳附近上空实况风速 $32\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,模拟强度为 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。850hPa上,沈阳站为东南风 $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 16°C ,高度为1460gpm;模拟结果为东南风 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,温度 16°C ,高度为1480gpm。地面图的低压位置和环流等模拟效果也很好。因此,从天气尺度的环流形势到天气系统的位置和强度等,模拟量场与实际情况都比较接近。以下用细网格模拟的各种物理量场,对此次过程进行分析。

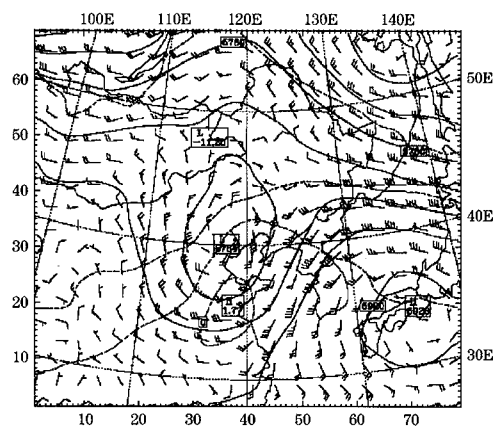


图3 模拟的1997年8月20日20时500hPa高空图

2 诊断分析

图4为模拟的相对湿度沿 42°N 的纬向垂直剖面图(沈阳位于该图水平坐标的中点处)。相对湿度大于80%的深厚湿层,从地面向上一直伸展到300hPa附近,且中层许多

地方的相对湿度已经达到 100%。实际上,从相对湿度的 3 小时连续演变看,从 20 日 08 时,辽宁全境的湿度就开始显著增大,直到暴雨过后的 21 日 14 时,600hPa 以下各层的相对湿度都维持在 80% 以上。这种湿度分布说明: Winnie 北上辽宁,其暖湿结构基本保留了热带天气系统的特征,致使辽宁全省不仅低层水汽接近饱和,而且湿层深厚稳定,这为暴雨天气的出现奠定了良好的水汽条件。

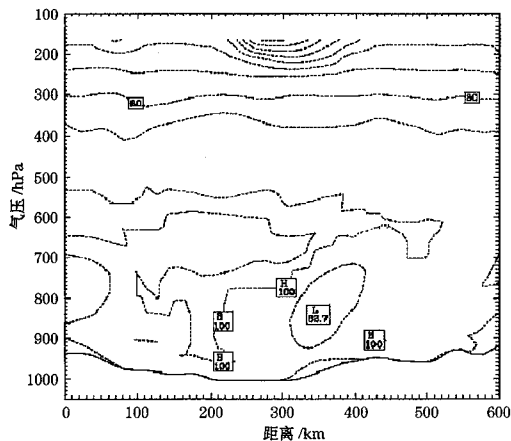


图 4 1997 年 8 月 20 日 20 时相对湿度纬向垂直剖面

从大暴雨过程中散度场分布看:低空辐合区主要分布在热带风暴中心的北侧,范围包括山东半岛和辽东半岛南端,辐合中心接近渤海南岸,中心强度为 $-13.4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,在辐合区的西侧和北侧,有两个辐散中心,这种辐合辐散中心的耦合,有利于系统的进一步发展。20 日午后, Winnie 中心进入渤海,并在北上过程中得到加强,20 日夜间, Winnie 再次在辽宁登陆,此时辐合区覆盖整个辽宁,辐合中心强度增大到 $-19.9 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$,位置在辽宁盘锦地区,而西北部的辐散中心合并后得到增强,此后的北上过程中,这对耦合中心一直保持到 21 日 20 时,使吉林和黑龙江也受到它的影响。

在散度的纬向垂直剖面图上(图 5):在

沈阳降水的强盛阶段 20 日 23 时,沈阳及其以西地区低层已经全部转为辐合区,沈阳上空的辐合层高度伸展到 600hPa,辐散中心位于 450hPa 左右,值为 $19.8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。由于低空辐合高空辐散,致使 900hPa 到 400hPa 产生较强烈的上升运动。另外,南北方向上的分布,也可以看出这种高低空的耦合系统以及由于耦合作用刺激产生的垂直环流。

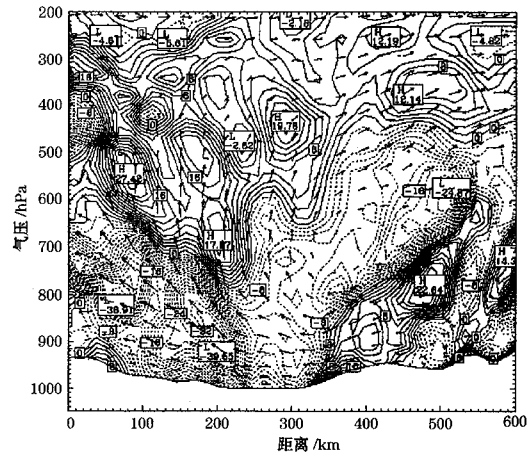


图 5 模拟的 1997 年 8 月 20 日 23 时散度纬向垂直剖面

为了进一步分析风暴到来前和风暴中的高层结状况,分析了沈阳测站各种量场的垂直分布廓线。对比 20 日 08 时和 23 时的图形发现:垂直速度初期呈多层分布,800hPa 以下为下沉区,向上上升区和下沉区相间,且上升速度和下沉速度都很小,而暴雨中几乎整层都是上升区,且上升速度随高度增加急剧增大,最大上升速度在 500hPa 附近,达到 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。950hPa 以下是较弱的下沉区,这可能是较强降水的下曳气流所致。从 u 场和 v 场演变看,初期 500hPa 以下的速度都很小,向上西南分量急剧增大,200hPa 的东西分量在 $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,强降水中,低层风速明显加大,地面由微弱偏西风变为 5 级以上东南大风,900hPa 东风最大值为 $22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,700hPa 南风高达 $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,低层急流非常明显,风速的垂直切变也很大。而温

度曲线变化较小,此次强降水地面温度只从 25℃ 下降到 23℃, 0℃ 层反而从 600hPa 抬高到 550hPa 以上,这说明了 Winnie 的暖性结构以及降水的潜热释放对中层的影响。涡度的变化主要在 800hPa 以下,从大值负涡度转变为大值正涡度。散度分布与相当位温的分布及演变,也显现出典型强降水特征^[2]。

3 暴雨产生的机制

降雨增强时,辽宁处于高空急流的南侧,正是急流入口区的风速加速地带。整个暴雨过程中,高空形势相当稳定,使高空辐散得以维持。在 500hPa 以下的中低空急流,最大风速中心伴随 Winnie 一起北移,急流在风暴中心东侧,沿海岸线向北几乎是一致的偏南风,辽宁处在风速中心的前方,因为在高空急流中心右后方最有利于形成强辐散场,故登陆北上热带气旋在北方地区造成的特大暴雨,总是出现在高空槽前西南急流右后方和低空东南急流的前端^[3]。此次辽宁大范围暴雨过程正是这种典型的配置。许多研究证明:沿低空急流存在的中尺度风速中心,沿急流轴向下游传播,相应位于其前方或左侧的暴雨区也向下游移动,且大风速中心前方是上升区,后面是下沉区,随着风速中心的移动,相应的热量、水汽和位势不稳定能量的最大中心也向下游传播^[4]。因此,低空急流不仅仅是水汽的输送通道,而且通过中尺度脉动形式,为降水区提供热量和动量。

登陆北上热带气旋造成北方特大暴雨,主要依赖于低空偏南急流源源不断地向北方地区输送热量和水汽,另一方面还与热带气旋影响前期控制降水地区的气团属性有关。20 日与 Winnie 一同向北移动的暖平流中心位于风暴中心的左前方,中心值达 $28 \times 10^{-5} \text{℃} \cdot \text{s}^{-1}$, 此时辽宁中部有一个 $-4 \times 10^{-5} \text{℃} \cdot \text{s}^{-1}$ 的冷平流中心,平流零线在 41°N 附近,辽宁正是冷暖平流交汇处,辽东半岛是温度平流梯度最大区。降水强盛阶段,暖

平流中心略有减弱,中心强度为 $20 \times 10^{-5} \text{℃} \cdot \text{s}^{-1}$, 位于辽宁中部地区,辽西的冷平流中心加强为 $-12 \times 10^{-5} \text{℃} \cdot \text{s}^{-1}$; 从流场中看,大陆高压环流已经与副高环流合并,大型东阻形势已经建立,与暖平流中心对应的暖切变也北移到辽宁中部,850hPa 的冷中心在辽西加强,中低空仍为弱冷空气控制。降水最强区在冷暖空气交界处。从 850hPa 到 600hPa 的干冷气层存在,一方面增加了斜压性,并通过斜压扰动激发垂直环流波动,另一方面也维持了位势不稳定,起到了能量积聚作用,为暴雨的爆发准备了充足的条件。Winnie 影响辽宁时最大降水区位于风暴中心的北偏西方向,与低纬台风的降水区常位于其中心东南侧有所不同。这同它受低空东南急流和高纬的东北风共同作用有关,显然西北方向冷空气的渗入,起了重要作用。

Winnie 登陆后北上,虽然强度减弱为热带风暴,但是其深厚的暖湿系统结构、中心周围强烈旋转的大风、前进方向上剧烈的辐合上升运动,以及所经之处的大片暴雨区等,均基本保持了系统在热带时的特征。并且, Winnie 北上在影响辽宁之前,在渤海上经过了下垫面的变化和水汽补充,曾在渤海上重新加强过程^[5]。风暴相对螺旋度(SRH)反映了风暴与环境间的相对气流和风垂直切变的强度。SRH 中心一直位于风暴中心北侧,并随中心移动(图 6)。20 日 08 时,其中心位于山东半岛北部,强度为 $1540 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 风暴入海后的 20 时,其中心已经移到渤海湾北部,强度增加到 $2224 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$, 地面风也从 $18 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $23 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着 Winnie 的继续北上,其外围环流与中纬度锋区产生相互作用,热带气旋西侧的偏北气流使冷空气入侵到气旋的西侧和西南侧,东侧的偏南气流向北输送暖湿空气。冷空气造成的斜压位能释放也是原因之一。

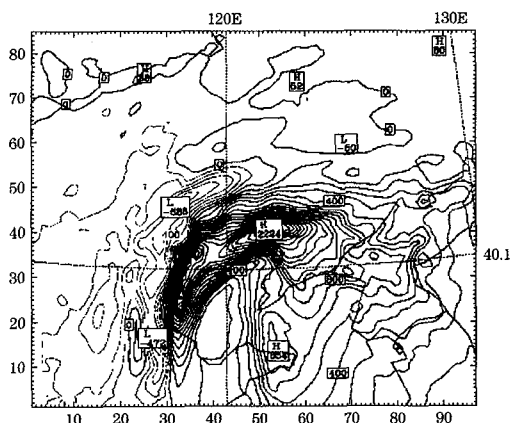


图6 模拟的1997年8月20日20时
风暴相对螺旋度(SRH)

4 结论

(1)应用 MM5V3 非静力模式,对 1997 年登陆北上的 11 号台风,8 月 20 日夜间在辽宁登陆前后,给辽宁带来的大范围大暴雨进行了数值模拟,并通过降水时间和强度以及天气形势对比分析,基本再现了这次过程。

(2)应用模式输出的物理量场,从湿度条件、动力条件和层结条件三方面进行了诊断。结果表明:①有准饱和且深厚的湿层。②低层强烈辐合与高空辐散互相配合,并且强降水区与散度和垂直上升中心有很好的对应关系。③中低层有不稳定层结。

(3)在此次大暴雨过程机制讨论中认为:

①高空急流和低空急流的配合为这次大暴雨过程出现提供有利的大尺度背景,强降水出现在高空急流入口右后方的辐散区和低空急流左前方的重合位置。低空急流的作用更明显,它不仅向雨区输送水汽,而且输送动量和热量,还通过风速脉动促使垂直运动发展,使降水增强。②弱冷空气一方面通过绝热下沉增温,使得不稳定能量积聚,另一方面通过阻挡偏南低空急流形成抬升,使暖切变和降水增强。同时,弱冷空气渗入热带风暴中,大气斜压性增强,热带气旋也变性加强,并因此产生大范围暴雨。

参考文献

- 1 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题. 气象学报, 1994, 52(3): 274~282.
- 2 孙建华, 赵思雄. 华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究. 大气科学, 2002, 26(4): 541~556.
- 3 郑秀雅, 张延治, 白人海. 东北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992: 129~151.
- 4 孙淑清. 低空急流及其与暴雨的关系. 暴雨文集. 长春: 吉林人民出版社, 1980: 40~46.
- 5 朱佩君, 陈敏, 陶祖钰等. 登陆台风 Winnie(1997)的数值模拟研究 I: 结果检验和云系的模拟. 气象学报, 2002, 60(5): 553~558. 登陆台风 Winnie(1997)的数值模拟研究 II: 结构演变特征分析. 气象学报, 2002, 60(5): 560~566.

Numerical Simulation of a Heavy Rainfall by a Landing Northward Tropical Cyclone

Ma Fuquan^{1,2} Shen Tongli¹ Zhang Zifeng² Sui Dong²

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;

2. Shenyang Meteorological Office)

Abstract

With the nonhydrostatic mesoscale model(MM5V3), the evolution of typhoon Winnie after landfall is simulated. Verified against observations, the synoptic-scale circulation, height field, temperature field and precipitation are successfully reappeared. The diagnostic analysis in three aspects (the vapor conditions, the dynamic conditions and the vertical layer condition) is made. Finally, the mechanism of Liaoning extremely heavy rain is discussed.

Key Words: tropical storm heavy rain numerical simulation