

文章编号:1673-8411 (2017) 03-0001-07

台风“凡亚比”的诊断分析和数值模拟研究

李妍君¹, 陈耀登²(1.英国布里斯托大学地理科学学院, 英国 布里斯托 BS8 1SS; 2.南京信息工程大学
大气科学学院, 江苏 南京 210044)

摘要:运用 WRF 模式对 2010 年 11 号台风“凡亚比”进行数值模拟和诊断分析,将模式模拟的结果与观测资料进行对比表明,模式对台风“凡亚比”的登陆过程模拟效果还是比较好的,基本表现出了台风的演变过程的特征;模式较好地模拟出了台风的几次转向,除了后期路径整体偏北以外,模拟路径与观测路径较为接近;经过一段时间的运转后,模式模拟效果逐渐改善,虽然降水强度与实况还存在着一定差距,但是基本模拟出了降水落区和降水中心。

关键词:数值模拟;台风;WRF 模式;降水

中图分类号:P456.7

文献标志码:A

Typhoon " Fanapi" diagnostic analysis and numerical simulation research

Li Yan-jun¹, Chen Yao-deng²(1.School of Geographical Sciences ,University of Bristol, University Road, Bristol, The United Kingdom
BS8 1SS; 2.School of Atmospheric Sciences, NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: Numerical simulation and a diagnostic analysis of the No.11 typhoon " Fanapi" in 2010 were made by using WRF model and the results of the model simulation were compared and verified with the observed data. It is shown that the result of the model of typhoon " Fanapi" simulation is good, which basically shows the characteristics of the typhoon evolution. And the model well simulated the several direction changes of typhoon, besides the overall route deviating to north; the path of simulation and observation are similar to each other. After a period of model running, the stimulation results gradually improved. Although there are some differences between the forecast precipitation intensity and the actual intensity, the precipitation area and precipitation center have forecasted by the model.

Key words: numerical simulation; typhoon; WRF model; precipitation

1 引言

台风是产生在热带洋面上的强烈气旋性涡旋,频繁发生于夏季和秋季之间,即五月到十一月之间。由于西北太平洋为台风生成频率最高的地区,所以我国经常受到台风灾害的威胁。台风过境往往会给受影响地区带来大风、暴雨甚至引发海啸,导致房屋

损坏或者建筑物倒塌、农作物破坏、洪涝,对民众的生命和财产安全造成巨大的威胁。因此一直以来,台风作为一种破坏力极大的自然灾害,是气象研究者非常关注和希望解决的问题。近几年来,针对台风,专家学者们开展了大量细致的研究工作,重点主要集中在对台风路径的预报、台风强度的预测和台风降水的诊断等方面。凭借着对理论深入地研究

收稿日期:2017-01-23

基金项目:国家自然科学基金;华南西部中尺度对流系统发生发展的中尺度环境场研究(41365002)

作者简介:李妍君(1994-),女,现在英国布里斯托大学气候变化与科学政策硕士专业学习

通讯作者:陈耀登,男,南京信息工程大学大气科学学院教授

和预报工作方面实践的经验,我们对台风有了更深刻的认识,台风的预报和预测水平也有了较大的提高,在预防台风灾害方面也有了更丰富的经验。

台风的形成须有相当宽广的热带海洋面,同时,在洋面之下 60 米深度范围之内,水温需大于 26.5°C 。除此之外,还需要一定的地转偏向力作用和一个初始的扰动。夏季,海岛上的温度高于海洋面,地面的空气比较热,膨胀上升,地表面形成低气压;空气从高压流向低压,在科氏力的作用下,气流在北半球向右偏转,形成逆时针方向旋转的热带涡旋,在南半球则形成顺时针旋转的热带旋涡。在一些特定的环境条件下,热带涡旋得到发展,从而形成台风。因此,台风多形成于纬度 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的热带海洋上。影响台风强度的因素主要有三个:台风本身的结构和变化;环境流场对台风的影响;下垫面(海洋、地形)与台风环流的相互作用^[1]。

陈联寿和丁一汇提出,对于台风的移动,中纬度环流系统可以起到明显的作用。雷小途与陈联寿则认为,青藏高原流型与在夏季风时期发生在西北太平洋西部的台风的活动有十分密切的关系。陈联寿等还提出了,使台风路径异常的因素包括台风的非对称结构;在与中纬度的相互作用之下,台风在登上大陆之后,它的结构经常表现为明显的非对称结构;台风内部结构和它的强度两者之间的变化是相互作用、相互影响的;在中纬度地区,有一股强度不大的冷空气吹入,并且这股冷空气主要对台风外围环流起作用时,往极地移动的台风的强度会增加,甚至突然增加;但如果是强冷空气侵入,台风将迅速填塞^[2-6]。台风登陆以后,会引发多方面的灾害,例如暴雨灾害、大风灾害、洪涝灾害,在这之中,暴雨洪涝灾害的影响最大,尤其受到大家的关注^[7-9]。台风登陆是一个非常复杂的过程,涉及海陆气相互作用、多尺度相互作用,再加上降水这一物理过程本身所具有的复杂性和难预报性,使得我们对台风降水过程的了解和认识仍难以达到期望的水平,这是有关方面预报水平有限的直接因素^[10]。

目前,在发达国家,全球模式分辨率基本上都提升到了 $10\sim 25\text{km}$,实现了提升到全球中尺度模式的水平,大幅提高了台风预报的精度。三维变分同化系统也被法国和韩国创立出来,欧洲中期数值预报中心、英国气象局、日本气象厅和澳大利亚气象局等国也创立出气象资料四维变分同化系统。我国经过自主研发、引进和消化吸收、创新发展几个历程形成了

全球、区域各有侧重、引进和自主研发协调发展、确定性预报与集合预报互为补充的模式发展局面^[11-12]。

2 台风“凡亚比”及环流形势诊断分析

2.1 台风“凡亚比”概况

台风“凡亚比”于 2010 年 9 月 14 日于太平洋生成,在 16 日 11 时升级为强热带风暴,15 时变为台风,19 日 01 时左右在中国台湾省花莲附近登陆,此时中心气压是 940hPa ,风速为 $50\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,于 19 日减弱并移经台湾海峡,紧接着在福建漳浦沿海进行二次登陆,此时最低气压为 970hPa ,最大风速是 $35\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，“凡亚比”在 20 日 21 时停止编号^[13]。“凡亚比”台风的发展,从热带风暴、台风增强为强台风甚至于超强台风,这整个过程只用了不足三天的时间。根据观测资料,“凡亚比”的最大强度是在 9 月 18 日 18 时,中心气压达到 935hPa ,最大风速是 $52\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[14]。“凡亚比”登陆台湾后强度很快减弱,到福建二次登陆时则进一步填塞减弱,直至消亡。

此次过程给中国台湾、广东、广西、福建、浙江、山西等地都造成了不同程度的影响,各地都发生了不同程度的暴雨或者降水,也引发了巨大的灾害。在这之中,台湾南部受到的影响最为巨大,高雄遇到了 50 年来最严重的灾情;广东的特大暴雨使得 51.7 万人民生活受到影响,造成了巨大的经济损失;广西也有一些居民被洪水围困。

从卫星云图(图 1)来看,“凡亚比”台风增强到超强台风量级之前,从图中并不能清楚地看典型的台风眼结构,到了 18 日 06 时左右,即将在台湾登陆的时候,清晰的台风眼和眼壁云系结构才能被清楚地从云图中观察到,这个时候,“凡亚比”已经即将变为超强台风。在台风登上台湾岛后,由于地形因素的作用,“凡亚比”台风眼壁结构变得不再那么紧凑,从超强台风减弱为台风。在福建二次登陆后,云系结构变得更为疏松,但是依然具有涡旋状结构。

2.2 环流形势分析

从环流形势(图 2,见彩页)来看,从 19 日 00 时到 20 日 12 时,中低纬度地区主要是被环状的副热带高压所控制,且副高的位置稳定少动,“凡亚比”随着副高南部的引导气流向西移动,期间受到地形影响,路径随之发生偏折,下节将进行详细讨论。而强大的大陆高压使得台风无法北上,大陆高压还为暴雨区提供了良好的高空辐散条件,同时让中低层大

气下沉增温,使得华南一带地面温度增高,为降水提供有利的能量条件,使得对流状况良好。而偏南气流位于台风的东部,供应并输送大量的水汽,让暴雨区具有良好的水汽条件。

台风需要大量的能量来维持其发展,观测资料表明,从 18 日 08 时到 19 日 08 时,台风“凡亚比”所在的地区,对流层的垂直风切变基本上都不大于 $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,这对于凝结潜热大量释放是相当好的条件,使得能量基本汇集在扰动区,为台风的发展积聚能量,是“凡亚比”从强台风发展成超强台风的决定性因素。若台风要维持其强度,则强盛的低层辐合和高层辐散作用是必不可少的,若是高层辐散的值要大于低层辐合的值,则会更为有利。由图 3 (见彩页),在 19 日 00 时到 21 日 00 时,强盛的辐散区分布在台风中心附近上空整个 200hPa 层,而明显的辐合区也出现在低层 850hPa 上(图 4,见彩页),而低层辐合的数值低于高层辐散的数值,这说明辐散作用相比于辐合作用更为强烈,这样一来,高空辐散对低层产生抽吸作用,使得上升运动继续维持和发展,“凡亚比”得到进一步加强,而强烈的上升运动也是导致相关受台风影响地区产生大量的降水的原因。

总的来说,“凡亚比”台风的发展过程十分迅速、强度猛烈、伴随狂风暴雨,且它的移动路径十分曲折。它具有大于千米的云系范围,水汽的供给十分充足,产生了一次大暴雨过程,尤其是 9 月 20 日的降雨相比前几天,无论是在降水范围还是降水量上,有一个巨大的增幅,给相关地区带来了很严重的暴雨灾害。“凡亚比”是一个十分经典的台风个例,它为我们日后研究台风的强度、路径、降水等各类物理量

演变规律提供了很多宝贵的资料和经验。

3 数值模拟方案设置

本文采用 WRFV3.6.1 模式,利用观测资料和模拟结果对比来考察模拟效果。模拟时间从 2010 年 9 月 19 日 00 时到 21 日 00 时(世界时,后文相同),囊括了“凡亚比”变为超强台风的最猛烈的时刻到登陆中国大陆后停止编号的时刻。模拟区域采取的是双重嵌套区域(图 5,见彩页),区域中心(24°N , 117.5°E),水平分辨率分别为 30km 和 10km,垂直层为 19 层。模式的初始条件和边界条件均来自 GFS 资料。输出时间间隔为 3h,时间积分步长为 180s。模拟过程选用的微物理方案为 WSM3 类简单冰方案,长波辐射方案是 rrtm 方案,短波辐射方案是 Dudhia 方案,近地面层的方案则为 Monin-Obukhov 方案,陆面过程方案是 Noah 陆面过程方案,边界层方案是 YSU 方案,积云参数化方案是浅对流 Kain-Fritsch (new Eta)方案。

4 数值模拟结果对比分析

4.1 模拟路径

路径图(图 6,见彩页)显示,模拟路径较观测路径整体偏北。在 20 日 06 时之前,模拟路径与实况路径误差较小,即在台风登陆台湾到穿过台湾海峡在福建二次登陆的这段时间内,模拟效果是比较好的。台风在这段时间内的两次转向也很好的模拟了出来,第一次转向在 19 日 12 时,由东南向转为朝西北向;第二次转向在 20 日 00 时,靠近福建时由西北向再转为东南向。第三次转向发生在台风登陆福建

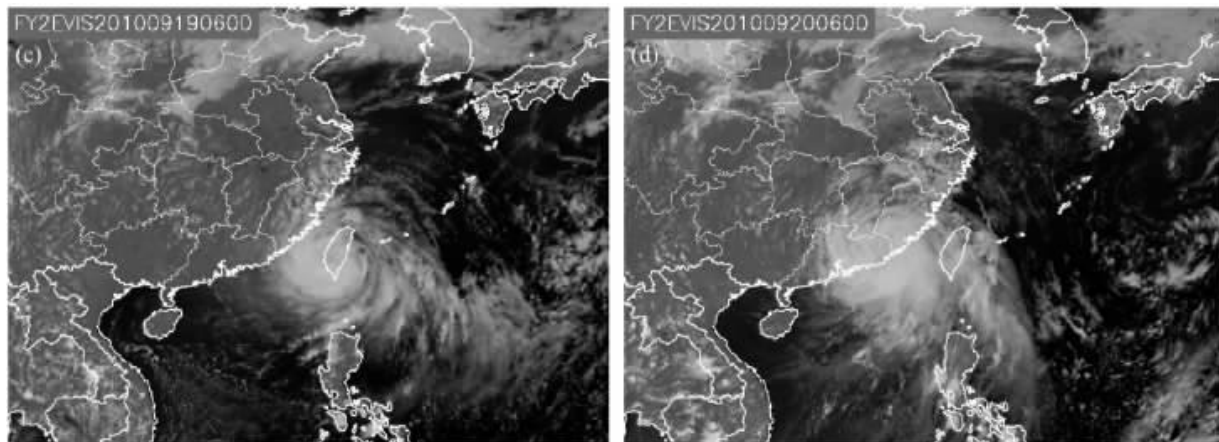


图 1 FY2 卫星云图

(a)2010 年 9 月 19 日 06 时

(b)2010 年 9 月 20 日 06 时

之后,再次变为西北向,往广东方向移去,而WRF也将转向模拟了出来,转向的方向也大致正确,不过在20日12时之后路径相较于真实情况偏北的误差较大,往江西方向移去。移速方面,模拟场整体移速偏快,模拟场台风较观测场登陆台湾的时间稍有提前,台风过境台湾时,即19日00时到19日12时之间,模拟场移速较观测场移速稍慢;台风经过台湾海峡即将二次登陆时,模拟场的移速则偏快;登陆中国大陆之后,模拟场和观测场台风均有一个明显减速后,再加速往内陆移去。

结合实际资料来看,500hPa环流和其周围系统对“凡亚比”移动路径的形成起主导作用。这其中,副热带高压对台风的移动产生了巨大的影响。资料表明,从17日到20日,副高逐步加强,副高脊部逐渐往西伸去,在我国大陆形成一条强的高压带,20日08时副高脊线才稍微北抬。这期间,“凡亚比”一直被副高南边的偏东气流引导向西移动。根据资料,16日副热带高压受西风槽影响断裂,“凡亚比”位处大陆高压和副高中间,在这之后“凡亚比”强度开始增大,受到东南引导气流的影响,“凡亚比”向西北方运动,接着大陆高压向东移,“凡亚比”此时又被东北气流引导,朝着西南边移动。除此之外,由于台湾岛的地形作用,“凡亚比”登陆后路径发生转向,是在地形、环境流场、台风自身涡旋三者之间的相互作用下发生的。在摩擦力的作用之下,台风位于台湾的时候,路径向左偏移。

4.2 500hPa 风场模拟

从500hPa的风场模拟(图7)来看,19日引导气流偏东,台风在登陆台湾时,受到台湾岛地形的影响,在台湾地区移速减慢并绕岛顺时针盘旋了一段时间,在20日12时后向西北移去。由此来看,模拟

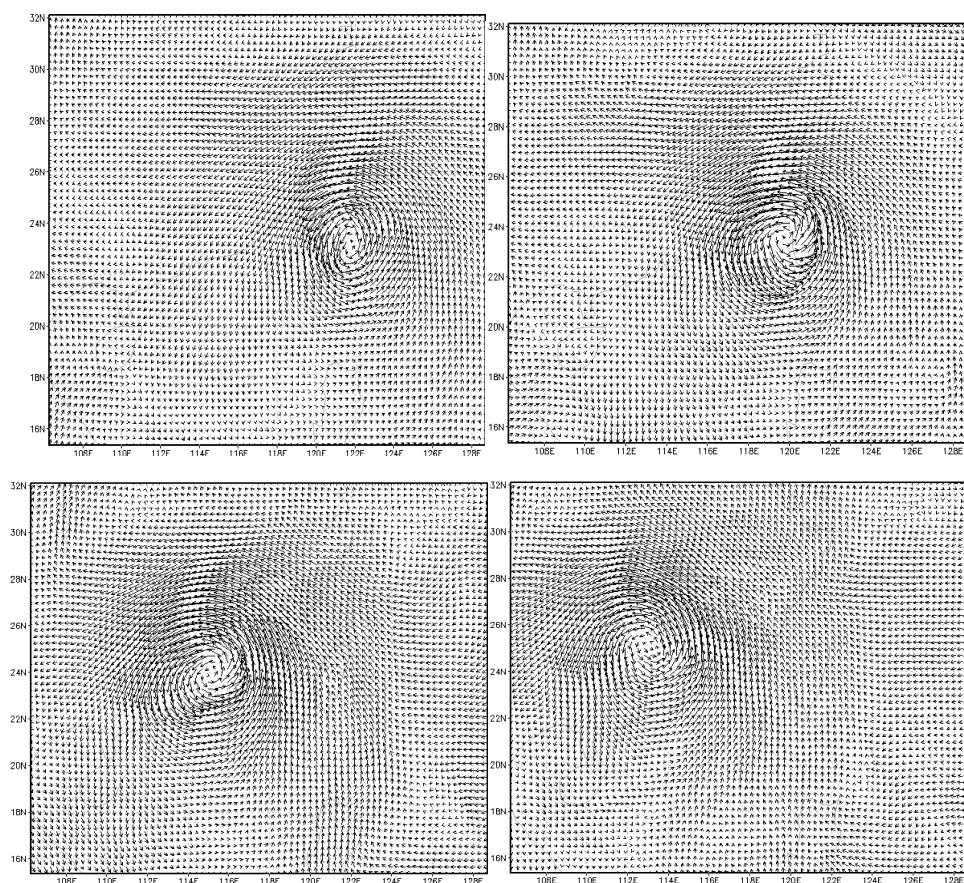


图7 WRF模拟500hPa的uv风场

(a)19日00时 (b)19日12时

(c)20日12时 (d)21日00时

风场的情况与模拟路径的情况是基本相配合的。

模式刚开始运行时前几个小时台风移动速度比较慢,这可能是由于模式本身就存在缺陷。登陆台湾之后出现了一些偏差,可能是由于模式无法很好的模拟这一强度的强台风。通过比较使用其他资料来模拟台风的案例发现,对“凡亚比”登陆大陆后的路径模拟,无论是使用NCEP/NCAR分析资料还是gfs资料做初始场,许多都存在着偏北的问题,这可能是由于模式无法考虑到地形作用、摩擦作用等的影响,使得积分过程中整个流场的模拟都出现了偏差。

4.3 500hPa 高度场模拟

总体比较而言,大陆高压稳定少变的特征基本表现出来了,模拟场高度场未经过平滑,所以在大陆高压的区域等高线凌乱、杂碎,并未能表现出大陆高压的特征。大陆右边的高空槽比较清晰明显的表现出来了,而大陆左边的高度槽特征在模拟场的高纬地区则不是很明显,可能是模拟过程中产生了误差和一些不合理的数据但是没有平滑掉的原因。模拟场的气旋中心强度大于真实场,等高线也要密集

的多,模拟场中气旋移动较真实场偏快、偏北。

从模拟场(图8,见彩页)每张图对比 NCEP/NCAR 再分析资料(图2,见彩页)来看,19日00时模拟场气旋位置略偏西北,大陆高压位置偏西偏北。到了19日12时,模拟场气旋中心已经越过台湾进入台湾海峡,而观测场则在台湾底部。20日00时模拟场气旋已经到达广东东部,而观测场方面气旋此时才即将进入大陆地区,此时模拟场气旋强度大大减弱,观测场由于气旋仍为进入大陆强度未发生改变;20日12时,模拟场气旋强度继续减弱往内陆移去,等高线变得更稀疏,而观测场气旋刚刚登陆广东西部,强度略有减弱。

总的来说,模式把整个环流演变的特征基本表现出来了,尤其是大陆高压的演变情况,这也是为什么模拟路径和观测路径比较吻合的原因。在20日12时 WRF 模拟的大陆高压位置相较于实况而言偏东一些,这可能是在20日12时至21日00时模拟路径偏北的原因。

4.4 垂直速度场模拟

图9(见彩页)和图10(见彩页)分别是再分析资料和模拟场的垂直速度的垂直剖面图,是不同时刻固定在不同纬度上的,固定纬度以实况台风中心纬度为准。

先来看再分析资料场的垂直速度剖面图,可以清晰的看到,从19日06时到20日12时,台风中心都以上升运动为主,上升运动最大值达 $0.45\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,随着台风的减弱,上升运动在这段时间内也逐渐减弱,到20日12时上升运动变得比较微弱,台风的强度大大减小。

再看模拟的垂直速度场,首先模拟的垂直运动速度值整体大于再分析资料场的速度值,上升运动最大值达 $0.6\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,下沉运动更是高达 $1.8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,而再分析资料下沉运动最大值仅有 $0.1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$;其次,模拟场中上升运动区分布的比较散乱,下沉运动区则相对比较集中,这是模式误差比较大的两个地方。19日06时, 23.2°N , $119^{\circ}\sim 121^{\circ}\text{E}$ 附近从低层到高层有下沉运动,是台风两侧的下沉气流,伴随着附近有几个零散的上升运动区。到了19日12时, 23.3°N , $118^{\circ}\sim 121^{\circ}\text{E}$, 整层有明显下沉运动,且值比较大,可以看出此时台风发展已经到达鼎盛时期,下沉气流旺盛;伴随着下沉气流, 122°E 附近有一上升运动高值区,但是值明显小于下沉运动,对比上升下沉气流情况,可以看出接下来台风有要减弱的趋势。20日

00时,在平均层以下, $118^{\circ}\sim 119^{\circ}\text{E}$ 有下沉运动, $120^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$ 有明显的上升运动区,可看出此时台风已经开始减弱,下沉运动也开始减弱。到了20日12时, $115^{\circ}\sim 116^{\circ}\text{E}$ 处从 $850\sim 100\text{hPa}$ 有一下沉运动区,上升运动也大大减弱。

4.5 高低空散度场和涡度场模拟

由图11(见彩页),模拟场的低层散度场19日到20日06时台风区基本以辐合运动为主,配合较好的水汽条件和地形动力作用可以带来大量的降水。“凡亚比”在19日00时变成超强台风,对应低层强烈的辐合,和高层辐散(图12,见彩页),此时对应垂直速度场上升下沉运动达到最强,于此相对应的,高低层的中心涡度值也增加,这样猛烈的垂直运动带来大量的能量交换使得相关地区产生狂风暴雨。到了20日00时之后,此时台风已经在福建二次的登陆,对应台风的西移,上升运动区也相应的往大陆方向移去,由于经过了两次登陆,受到摩擦作用和地形的影响,台风的强度已经有了很大程度的减弱,低层辐合区和高层辐散区的值大大减弱,同时高低空上升下沉运动强度也减弱,并且上升区和下沉区分布变得散乱,涡度场中心数值也变得很小,降水由此大大减弱。从 850hPa 散度场来看,辐合上升运动区与24小时累计降水地区吻合的比较好,基本上集中在台湾附近和广州一带,说明模式的效果比较好。

下面总体比较模拟场与观测场(图3、4,见彩页)。从数值的量级来看,无论是涡度还是散度,模拟场的数值比观测场数据要大一个量级,这个是模式结果误差比较大的地方。从散度场方面来看, 850hPa 模拟散度场辐合运动区位置相较于观测场偏东南,辐合强度也比观测场要大,观测场的辐散区与涡度中心有一定的偏差,出现在涡度大值区以南,而模拟场这两个区域几乎重合。观测场辐合最大值出现在19日06时,比模拟场推后了6小时。在19日00时在大陆沿海地区有辐合区,而模式仅在台湾地区有辐合区,这就导致为什么模式不能预测出19日大陆沿海地区的降水。 200hPa 模拟散度场与 850hPa 模拟散度场配合的比较好,低层辐合对应高层辐散,而观测场高层辐散区也与低层辐合区配合,基本在台湾南部地区,正是由于由此导致了台湾的巨大降水量。与模拟场不同的是,观测场的辐合区没有配合台风的路径移动,在19日12时后基本出停滞在台湾岛南部,这可能就导致了模式和观测场在台湾地区降水量上的差距。

就涡度来看,850hPa 模拟场涡度值较观测场不仅数值要大一个量级,模拟过程中数值变化程度也比观测场要大,观测场的中心涡度值在台风减弱之前基本变化不大。而且观测场气旋性涡度范围则较观测场小得多,涡度结构更集中,具有非对称性。观测场的气旋性涡度周围有反气旋性涡度,而模拟场则无法模拟出反气旋性涡度,除了明显的气旋性涡度之外,其他区域的值基本上为零,这可能是由于模式本身的缺陷造成的,使得涡度场的特性无法完整的表现出来。

总的来说,模式基本上把台风的涡度场散度场特征表现了出来,但是与观测场相比无论是在数值还是范围以及位置上都具有一定的误差,这是模拟降水产生误差的主要原因。

5 台风降水模拟

先看实况累计降水图(图 13,见彩页),19 日,此时台风马上要登陆中国大陆,降水主要是在台湾地区、福建、广东这些沿海地区,广东地区最高累计降水量达到 150mm 以上,根据资料,台湾省超过 500mm 的测站有 16 个以上,最高值甚至达到了 999mm。到了 20 日,由于台风已经登陆大陆地区,大陆降水量和降水范围进一步扩大,广东、福建、浙江等沿海地区都产生了降水,累计降水最高值达到 250mm 以上,其中广东省大部分地区产生了暴雨和特大暴雨,最强的降水超过了 300mm。

再看模式模拟得出的累计降水图(图 14,见彩页)。可以看出,在 19 日 00 时到 20 日 00 时之间,WRF 模式预报降水主要集中在台湾及台湾海峡地区,24h 累计降水量最高达到 380mm 以上,到了 21 日 00 时,台湾及台湾海峡附近广大地区降水继续增强,同时降水范围也进一步扩大,大陆沿海一带都产生了降水,台湾地区 2 日累计降水达到了 490mm 以上,广东及其附近沿海地区累计降水也达到了 350mm 以上,福建部分地区也有降水。

模式对 19 日 00 时到 20 日 00 时的降水主要模拟出了台湾地区的部分,福建地区只有少量的降水,大陆地区模拟的累计降水强度相对于实况没有那么大,这可能是模式刚开始模拟没有考虑到前几日的降水条件和该地区充足的水汽供应的原因,也有可能是地形作用的原因。21 日 48h 的累计降水模拟的比较好,降水区域基本吻合,数据之间的差异也比较小。可以发现,因为台风降水过程需要考虑复杂的云

物理过程,模式对于这方面还有待提高,比较观测结果和模拟结果,模式刚开始无法很好地准确模拟出降水落区,但是经过一段时间的模拟之后预报的准确率相较于开始而言大大提高了,虽然降水量相比实况仍存在较大差距,但是降水的趋势基本被模拟出来了。

6 结语与讨论

6.1 结论

本文运用 WRF 模式对 2010 年第 11 号台风“凡亚比”两次登陆过程进行模拟和研究,同时运用各种观测资料与模拟结果进行对比,检验模拟的效果。大体上来说,本次模拟的效果还是比较好的,基本上把“凡亚比”两次登陆的过程以及演变特征表现了出来,与实况的误差也都在合理的范围之内。本次模拟主要表现出了“凡亚比”如下几个特征:

(1)移动路径。“凡亚比”台风从 2010 年 9 月 19 日 00 时到 21 日 00 时移动路径台风“凡亚比”移动路径主要分 3 个阶段:19 日 00 时到 19 日 12 时,“凡亚比”登陆台湾,向西南方向移动;19 日 12 时到 20 日 00 时,台风穿越台湾海峡,移动方向由西南转为东北;20 日 00 时到 21 日 00 时,台风在中国大陆登陆,登陆过程中转向为西南向,后又转为东北向向内陆移去。“凡亚比”频繁转向的移动路径主要是由于受到 500hPa 高度场环流形势的影响以及地形的作用。

模拟路径前半段与真实路径相差较小,除了移速有略微误差之外基本吻合;后半段则与真实情况相差较大,进入中国大陆之后模拟路径偏北。

(2)降水特征。模式对 20 日 24h 累计降水的模拟存在较多不足,降雨落区和实况降水场相差较大;对 21 日 24 小时累计降水模拟的比较好,降水落区基本与实况大体一致。就降水强度而言,20 日模式虽然也预报出了降水,但是降水强度相对实况而言差距较大,未能模拟出台湾的强降水;21 日的降水量则与实际情况比较贴合,降水中心也模拟正确,模拟效果较好。

6.2 讨论

首先,对于台风路径和台风降水的精确预报一直以来都是亟待解决的问题。这需要模式能够分析环境流场的配置和地形因子对台风发生发展的综合影响,对模式的预报能力要求很高。其次,降水的模拟一直是难度比较大的,因为影响降水的因子的多

样性和它们相互之间关系的复杂性,使得模式的预报很难以准确。而台风所引发的降水预报难度相较于普通降水更加大,因为存在的不可预测因子更多。所以如何减小路径模拟和降水模拟的误差,提高台风预报的准确性、及时性,有效预防台风灾害,需要更进一步的深入细致的研究和讨论。

参考文献:

- [1] 端义宏, 余晖, 伍荣生. 热带气旋强度变化研究进展 [J]. 气象学报, 2005, 63 (5): 636-645.
- [2] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1979: 491.
- [3] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展 [J]. 大气科学, 2001, 25 (3): 420-431.
- [4] 陈联寿, 徐祥德, 解以扬. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. 大气科学, 1997, 21 (1): 83-90.
- [5] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋的登陆及其与中纬度环流系统相互作用的研究 [J]. 气象学报, 2001, 59 (5): 602-615.
- [6] Demaria M. The effect of vertical shear on tropical cyclone intensity change [J]. J. Atmos. Sci., 1996, 53: 2076-2087.
- [7] 孙建华, 张小玲, 卫捷. 20 世纪 90 年代华北大暴雨过程特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 2005, 10 (3): 492-506.
- [8] 孟庆涛, 孙建华, 乔枫雪. 20 世纪 90 年代以来东北暴雨过程特征分析 [J]. 气候与环境研究, 2009, 14 (6): 596-612.
- [9] 王黎娟, 卢珊, 管兆勇等. 台风“榴莲”陆上维持及暴雨增幅的大尺度环流特征 [J]. 气候与环境研究, 2010, 15 (4): 511-521.
- [10] 刘海军, 沈新勇, 许变. 1011 号台风“凡亚比”登陆过程数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 2013, 18 (5): 583-594.
- [11] 马鹏辉, 杨燕军, 刘铁军. 台风数值预报技术研究进展 [J]. 山东气象, 2015, 35 (1): 12-17.
- [12] 马雷鸣. 国内台风数值预报模式及其关键技术研究进展 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (3): 1013-1022.
- [13] 贺佳佳, 罗聪, 王明洁. 1011 号台风“凡亚比”路径、强度特点及造成粤西特大暴雨的成因分析 [R]. 厦门: 中国学术期刊电子出版社, 2011: 444.
- [14] 刘海军. 登陆台风“凡亚比”高分辨率数值模拟及降水的诊断分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [15] 吕思思. WRF 数值模拟超强台风“凡亚比”路径强度及降水特征分析 [J]. 环境保护与循环经济, 2013, 12 (9): 674-1021.
- [16] 许变. 2010 年西北太平洋超强台风“凡亚比”和“鲛鱼”的诊断与模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [17] 段丽, 陈联寿. 热带风暴“菲特”(0114)特大暴雨的诊断研究 [J]. 大气科学, 2005, 29 (3): 343-353.
- [18] Gao S T, Fan P, Li X F, et al. A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study [J]. J. Geophys. Res., 109: D14106, doi: 10.1029/2004JD004807.
- [19] 康志明, 陈涛, 钱传海等. 0604 号强热带风暴“碧利斯”特大暴雨的诊断研究 [J]. 高原气象, 2008, 27 (3): 596-607.
- [20] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验 [J]. 大气科学, 2005, 29 (1): 91-98.
- [21] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验 [J]. 气象学报, 2005, 63 (1): 57-68.
- [22] 陈联寿, 徐祥德, 解以扬. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应 [J]. 大气科学, 1997, 21 (1): 83-90.
- [23] 程正泉, 陈联寿, 李英. 登陆台风降水的大尺度环流诊断分析 [J]. 气象学报, 2009, 67 (5): 840-850.
- [24] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展 [J]. 气象学报, 2004, 62 (5): 541-549.
- [25] 祁旭. “凡亚比”台风暴雨及数值模拟的检验分析 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [26] Kasahara A. A numerical experiment on the development of a tropical cyclone [J]. Journal of Meteorology, 1961, 18 (3): 259-282.
- [27] Ooyama Katsuyuki. Numerical simulation of the life cycle of tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 1969, 35 (2): 242-257.