

强热带风暴“莲花”(0903)非对称降水结构分析

石顺吉¹, 林秀斌¹, 吴陈锋¹, 陈德花¹, 郑礼新¹, 李金建²

(1.厦门市气象局,福建 厦门 361012; 2.四川省气候中心,四川 成都 610072)

摘 要:利用雷达回波和NCEP分析资料,本文从水汽条件、环境风垂直切变和风暴移动状态等方面诊断分析了0903号强热带风暴“莲花”非对称降水结构形成的可能机制。结果表明:“莲花”南侧充足的水汽输送为强降水的发生提供了基本的水汽条件,同时水汽通量在水平空间上的非对称分布也在一定程度上导致了降水的非对称分布。环境风垂直切变是导致“莲花”降水结构改变并最终形成一波非对称降水结构的主要动力因子。随着垂直切变的增强,同时配合风暴南侧充足的水汽条件,一波非对称降水结构逐渐形成,在较强垂直切变长时间的的作用下,强降水最终集中于顺切变方向左侧。在较强垂直切变的作用下,逆切变一侧的下沉运动抑制了陆地摩擦和地形抬升所形成的对流的发展。相对于较强的垂直切变而言,“莲花”相对稳定的移速和移向条件难以主导强热带风暴降水的空间分布。

关键词:强热带风暴“莲花”;非对称降水;水汽条件;环境风垂直切变;地形;风暴的移动

中图分类号:P444 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-0239(2010)05-0064-08

1 引言

热带气旋降水在水平空间上的非对称分布往往造成局地强降水的发生,这种降水的非对称结构给热带气旋降水的落区和强度预报带来极大的挑战。0903号强热带风暴“莲花”降水的结构就具有明显的非对称特征。对于热带气旋降水的非对称结构特征的研究,岳彩军等^[1-2]的研究指出“海棠”台风降水分布的南北非对称性,主要由动力因子(改进的湿Q矢量、地形抬升与地表摩擦以及垂直上升运动场)引起的,而热力条件(包括相对湿度)是不重要的。吕梅等^[3]研究发现水汽通量和垂直运动的非均匀分布造成2004年“艾利”台风降水的非对称分布。石顺吉等^[4]通过数值模拟分析0604号强热带风暴“碧利斯”一波非对称降水的成因,认为这种非对称降水结构可能是冷空气和垂直切变的相互配合所致。国外大量的研究表明^[5-10],对于登陆的热带气旋而言,影响其降水分布的主要

因素有下垫面地形摩擦、环境场水汽的非对称分布、热带气旋的移动状态以及环境风垂直切变的作用等。热带气旋内部垂直运动在水平空间上的一波非对称性分布通常是由于热带气旋的移动和垂直切变所致^[11]。Chen等^[10]的统计分析结果表明,对于北半球的热带气旋,当垂直切变较强时($>7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),垂直切变对热带气旋降水的分布起着决定性作用,强降水主要位于顺切变方向的左侧,尤其是对于内雨带($<100 \text{ km}$)的降水分布。当垂直切变较小时($<5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),热带气旋移动速度和方向对降水的非对称性也有重要影响,外围雨带($>100 \text{ km}$)降水主要集中在移动方向的前部,但是内雨带($<100 \text{ km}$)上的降水仍然是集中在顺切变左侧。

2 “莲花”概况和资料说明

2009年第3号强热带风暴“莲花”(Linfa)于6月18日14时在南海中部海面生成,生成后向北偏东

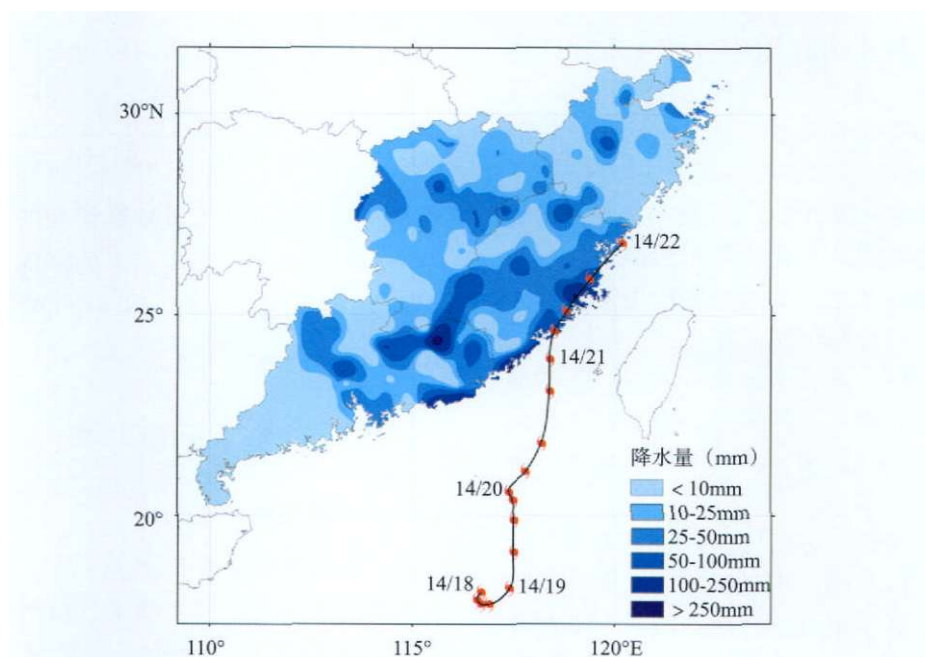
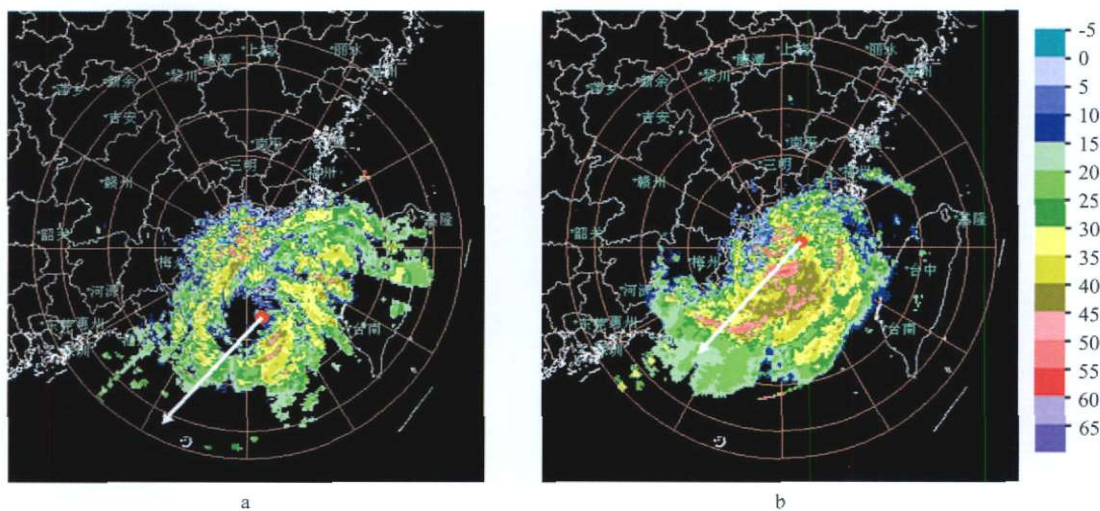


图1 6月21日08时~23日08时48h累积降水量(单位:mm)和“莲花”路径图

方向移动,于20日11时加强为强热带风暴,风暴中心最强时段在20日20时~21日06时,中心最大风力10级,风速28 m/s。21日07时减弱为热带风暴,中心最大风力9级,风速23 m/s。热带风暴于21日20时30分前后在福建省晋江市石镇登陆,登陆时中心最低气压985 hPa,近中心最大风速 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。登陆后风暴中心继续沿着海岸线向北偏东方向移动,于22日下午减弱为热带低压,之后在东海西部海域消失。这次强热带风暴过程的降

水主要位于广东、福建、江西、浙江和台湾5个省份,主要的降水时段从6月21日08时~23日08时。从图1上看,过程强降水主要位于广东东部和福建沿海一带,在这沿海一线上绝大多数地方的累积降水量都在50 mm以上,并且有多处达到250 mm以上。往内陆深入,除了有个别站点降水较强外,总体变化趋势是降水强度逐渐减弱。

从厦门雷达站探测到的组合反射率可以看到(见图2),“莲花”瞬时降水的水平空间结构从6月



a~b的时间分别为6月21日08时03分和20时04分;图中红色圆点为强热带风暴中心位置,箭头表示垂直切变方向

图2 厦门雷达站探测的组合反射率(单位:dBZ)

21日上午到夜里发生了显著的变化。6月21日08时03分(见图2a),强热带风暴眼区清晰可见,风暴环流范围内均分布有降水,呈现出相对对称的降水结构特征,但反射率强度不是很强。再从6月21日20时04分(见图2b)的组合反射率来看,降水回波主要位于海峡内,并且强降水回波集中在风暴南侧,降水回波在水平空间上表现为明显的一波非对称特征,这种结构特征在之后“莲花”北上过程中长时间维持。是什么原因造成“莲花”的水平降水结构发生如此显著的变化,特别是一波非对称降水结构的形成和维持的可能机制是本文研究的重点。

文中强热带风暴中心位置信息取自中央气象台的实时卫星定位数据。雷达回波数据来自于厦门多普勒雷达探测,组合反射率产品的水平分辨率为4 km,探测范围为站点周边460 km半径内。三维风场资料取自于NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的分析场,时间分辨率为6 h。

环境风垂直切变的计算方法采用Kaplan^[12]和Braun^[13]等人的做法,该方法剔除了大部分热带气旋本身环流,将焦点集中在环境气流上。目前这种方法应用较为广泛,并且被证实是研究环境风垂直切变对热带气旋内部对流、降水分布和强度变化作用的合理方法之一。具体做法为首先将NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的分析场插值到 $100 \text{ km} \times 2^\circ$ 的极坐标上,然后以热带气旋中心所在位置为中心,计算其周围200~800 km半径范围内200 hPa和850 hPa等压面之间平均风速的矢量差,沿矢量方向称为

顺切变方向,相反方向则称为逆切变方向。计算表达式如下:

$$vws = \sqrt{(u_{200} - u_{850})^2 + (v_{200} - v_{850})^2} \quad (1)$$

式中, vws 表示环境风垂直切变的大小, u_{200} 和 v_{200} 分别为200 hPa等压面上的平均纬向风速和经向风速, u_{850} 和 v_{850} 分别为850 hPa等压面上的平均纬向风速和经向风速。

3 非对称降水成因分析

3.1 水汽输送条件

从水汽条件角度来看(见图3),“莲花”降水的主要水汽来源于南海上西南气流的输送,并且主要是从强热带风暴的南-东南侧输入“莲花”环流中。在降水结构相对对称的时期(见图3a),除了西北侧为水汽通量小值区外,其余各个方位上强度相当。同时可以注意到,尽管在其东南侧有水汽通量的极大值区,但是考虑到其输送路径上为台湾岛地形的阻挡,因此这股水汽并不能大量地输送到“莲花”环流中。总的来看,该时期水汽通量的空间分布与降水的空间分布间有较好的对应关系。与降水结构相对对称的时期相比,在降水非对称结构明显的时期(见图3b),强降水的落区与水汽通量大值区之间也存在较为良好的对应关系。两者的区别在于在强度相当的水汽条件下,后者所形成的降水回波强度强,并且降水范围集

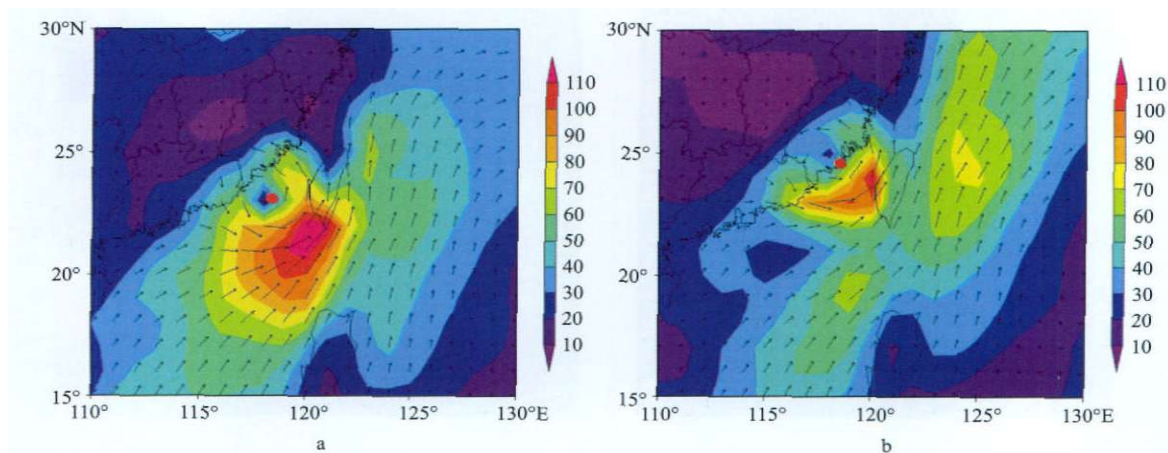
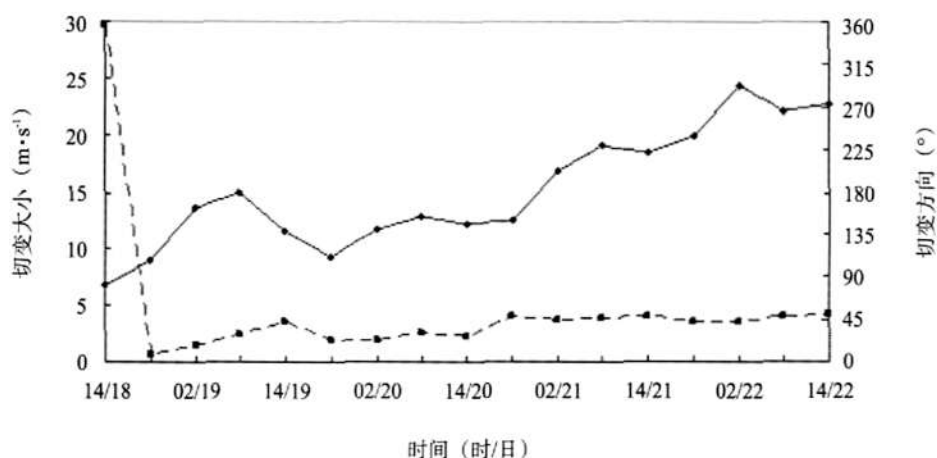


图 a~b 的时间分别为6月21日08时和20时,图中台风标记为强热带风暴中心位置

图3 700 hPa以下各层水汽通量积分(单位: $\text{g} \cdot (\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})^{-1}$)



实线表示切变大小,虚线表示切变方向

图4 环境风垂直切变随时间变化

中(见图2b),即在降水非对称结构明显的时期,“莲花”南侧降水区的对流发展旺盛。

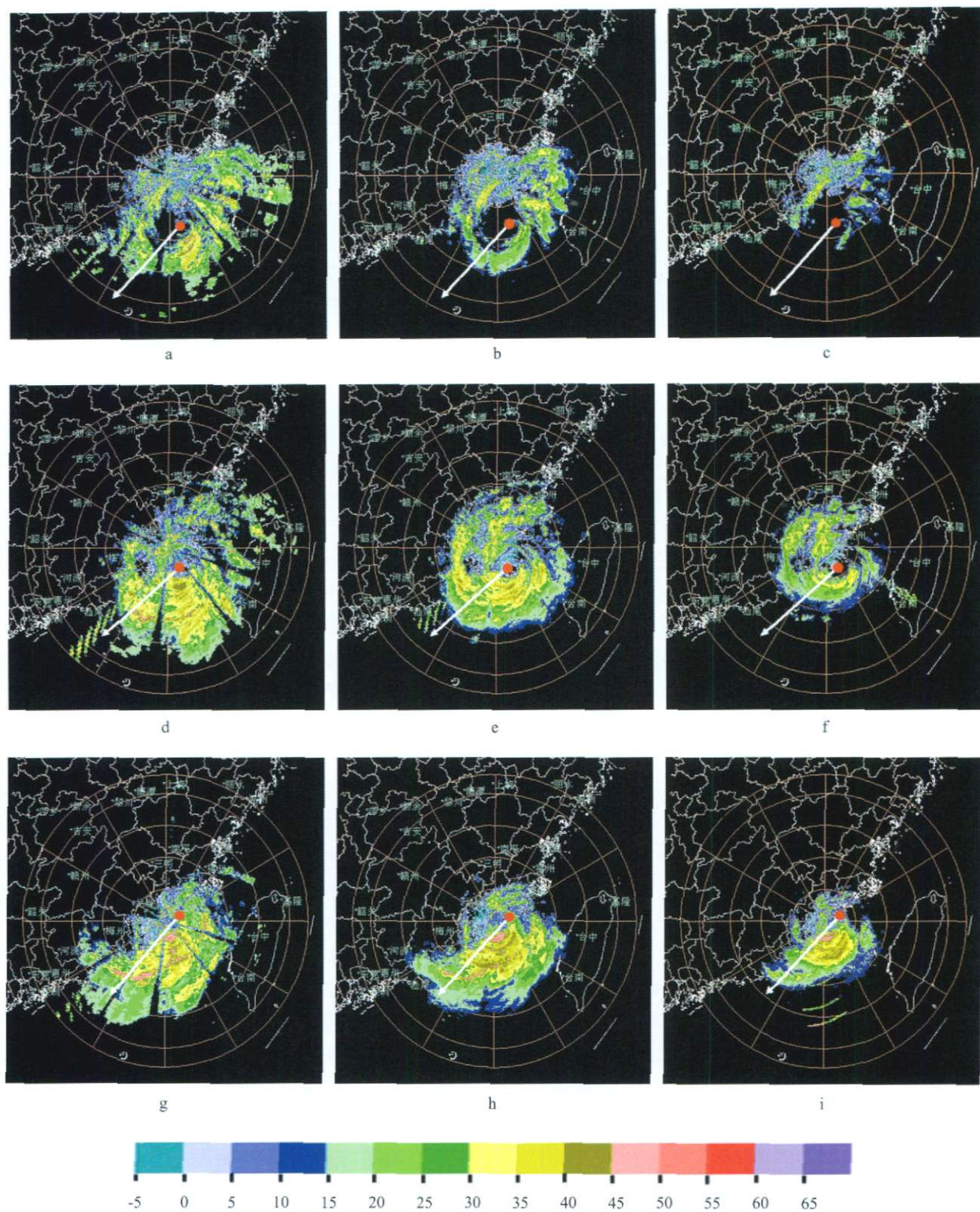
综上所述,“莲花”南侧充足的水汽输送为强降水的发生提供了基本的水汽条件,同时水汽通量在水平空间上的非对称分布也在一定程度上导致了降水的非对称分布。但是,在强度相当的水汽输送条件下却形成了显著差异的降水结构,特别是风暴南侧对流的发展加强和一波非对称降水结构的形成,这从水汽条件的角度难以得到进一步的解释。

3.2 环境风垂直切变的动力作用

图4给出了环境风垂直切变的大小和方向随时间的演变情况。从图中可以看到,在6月21日02时之前强热带风暴处在一个相对较小的垂直切变环境中,之后垂直切变大小逐渐增强,并且维持在 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以上。在切变增强阶段的前期(见图5a,b,c),降水的水平结构相对对称,并且对流强度较弱,所形成的降水回波主要位于较低的高度上。这个时期沿海岸线的陆地摩擦和地形抬升作用所形成的降水回波也是较为明显。在切变增强一定时期后(见图5d,e,f),风暴南侧的强对流逐渐发展起来,降水回波的强度和范围都明显增强,一波非对称降水结构在这一时期初步形成。这期间,陆地摩擦和地形的作用仍然导致陆地上零散的较强降水的形成。随着垂直切变继续增强(见图5g,h,

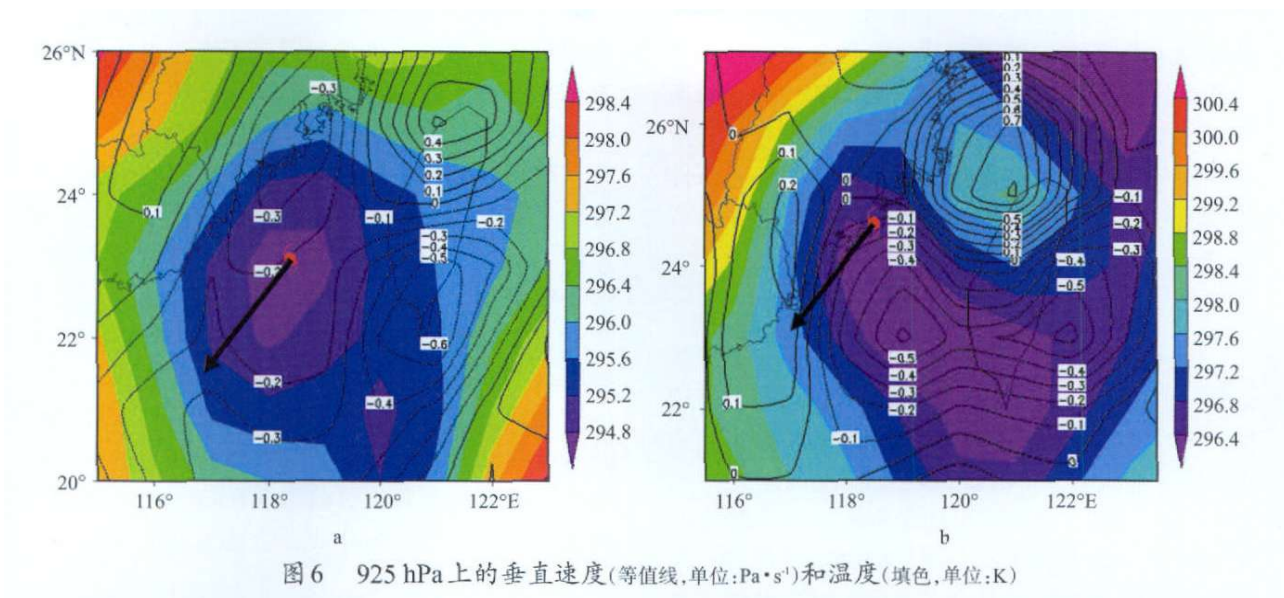
i),深厚的对流系统在风暴南侧建立起来,显著的一波非对称降水结构形成。在这个时期陆地摩擦和地形作用所形成的降水明显减弱。可以发现,一波非对称降水结构的发展与垂直切变强度的变化之间有良好的对应关系,并且前者相对后者的变化在时间上存在一定的滞后,这与文献[4]的研究所得出的结论一致。在图4和图5中还可以发现,6月20日20时以后垂直切变的方向少变,维持东北-西南向。随着切变逐渐增强,一波非对称降水的强降水落区在顺切变方向左侧发展增强并在这个区域维持。大量的观测和数值模拟研究都表明,在较强环境风垂直切变的作用下热带气旋强降水主要位于顺切变方向左侧。

Jones^[14]和Frank等^[15]认为在较强的环境风垂直切变作用下,风暴涡旋环流在垂直方向上发生倾斜,因此造成位涡的垂直异常扰动。为了维持平衡,在风暴的顺切变一侧形成上升运动,而在逆切变一侧则是下沉运动,这就需要在顺切变一侧有冷的温度异常,而在相反一侧有暖的温度异常。在风暴气旋式环流的带动下,垂直运动逆时针旋转,在顺切变左侧形成最强的上升运动。Zhang等^[16]的干动力学诊断分析认为垂直切变在热带气旋中的强迫会产生顺切变一侧的上升运动和逆切变一侧的下沉运动所组成的二级环流。然后由于涡旋的快速逆时针旋转,上升运动形成的凝结粒子会被向下游平流,这使得强降水发生在顺



图a、b、c分别为6月21日08时03分0.5°、1.5°和2.4°仰角上的雷达反射率；图d、e、f分别为21日14时03分0.5°、1.5°和2.4°仰角上的雷达反射率；图g、h、i分别为21日20时04分0.5°、1.5°和2.4°仰角上的雷达反射率；箭头表示垂直切变方向

图5 不同仰角上的雷达反射率(单位:dBZ)



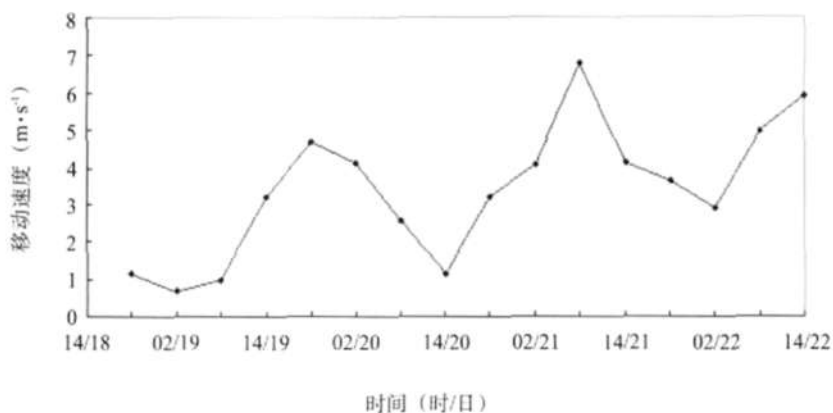
切变方向的左侧。在本文的研究中,当降水回波处于相对对称时期(见图6a),强热带风暴的环流范围内温度和垂直运动分布在各个方位上都是较为对称。随着垂直切变增强,一波非对称降水结构形成时(见图6b),在顺切变方向的左侧出现了上升运动的大值区域;而相反的,在逆切变一侧则是以下沉运动为主,并且这种下沉运动延伸到陆地上,这也在一定程度上抑制了陆地摩擦和地形作用所形成的对流的发展。同时,可以发现在顺切变一侧为温度的负距平区,而逆切变一侧为温度正距平区。垂直运动和温度在水平空间上的配置及其相对垂直切变的位置与文献^[14-16]中所揭示的特征一致。

综合本节以上几点,认为环境风垂直切变是导致“莲花”降水结构改变并最终形成一波非对称

降水结构的主要动力因子。随着垂直切变的增强,同时配合风暴南侧充足的水汽条件,一波非对称降水结构逐渐形成,在较强的垂直切变长时间的作用下,强降水最终集中于顺切变方向左侧,而在逆切变一侧则是下沉运动的区域。

3.3 强热带风暴移动状态的影响

Chen等^[10]的统计研究结果表明,当热带气旋处于较强的环境风垂直切变条件下($>7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),垂直切变对降水非对称分布起主导作用,此时热带气旋的移动方向和速度的变化对降水非对称结构的影响不明显。Shapiro^[7]的研究指出,对于缓慢移动的风暴($<5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),辐合在风暴移动方向的前部最为明显;对于快速移动的风暴($>10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),辐合更为集中地位于右前方象限。“莲花”主要是以



偏北到北偏东方向缓慢移动,在生命史过程中平均移动速度维持在 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右(见图7),并且长期存在于较强的垂直切变环境下。根据已有研究所总结出的结论,这种相对稳定的移速和移向条件难以主导强热带风暴降水的空间分布。

4 结语

本文利用雷达回波和NCEP分析资料,从水汽条件、环境风垂直切变和风暴移动状态等方面诊断分析0903号强热带风暴“莲花”非对称降水结构形成的可能机制,得出以下几点主要结论:

(1)“莲花”南侧充足的水汽输送为强降水的发生提供了基本的水汽条件,同时水汽通量在水平空间上的非对称分布也在一定程度上导致了降水的非对称分布。但是,从水汽条件的角度难以进一步解释风暴南侧对流的发展加强和一波非对称降水结构的形成;

(2)环境风垂直切变是导致“莲花”降水结构改变并最终形成一波非对称降水结构的主要动力因子。随着垂直切变的增强,同时配合风暴南侧充足的水汽条件,一波非对称降水结构逐渐形成,在较强垂直切变长时间的作用下,强降水最终集中于顺切变方向左侧,而在逆切变一侧则是下沉运动的区域;

(3)陆地摩擦和地形抬升作用在切变增强初期能够形成范围较广的降水回波,但是随着切变逐渐增强,在逆切变一侧的下沉运动延伸到陆地上,抑制了陆地摩擦和地形抬升作用所形成的对流的发展;

(4)在较强的垂直切变的作用下,“莲花”相对稳定的移速和移向条件难以主导强热带风暴降水的空间分布;

在Chen等^[10]的研究中,大于 $7.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的环境风垂直切变被定义为较强的切变,但在本文中“莲花”所处的切变环境绝大多数时间里都大于 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,在这种量级的切变长时间作用下仍然在切变增强初期表现为相对对称的降水结构,这两者间看似存在矛盾。笔者认为并非如此,首先Chen等的研究是从统计的角度对大量热带气旋进行分析,对于不同的热带气旋个例而言,由于其强度和水平尺度的区别,在同等级大小垂直切变的作用下其表

现出来的变化特征可能不同。再者,由于计算垂直切变所使用的三维风场资料的来源不同,这也可能导致计算得出的切变大小间存在区别。

对于环境风垂直切变对热带气旋的影响,国外已经将其作为热带气旋统计预报模型的一个重要因子。Lonfat等^[17]在大西洋风暴降水业务预报模型R-CLIPER的基础上增加了环境风垂直切变和地形两个因子,构建了新的风暴降水预报模型PHRaM(Parametric Hurricane Rainfall Model)。其研究表明,当综合考虑了环境垂直风切变和地形这两个因素后,降水的空间分布和振幅的预报结果有了明显的改善。目前国内在这方面的研究和应用还较为少见,因此加强对这方面的研究具有一定的现实意义。

参考文献:

- [1] 岳彩军,寿绍文,曾刚等.“海棠”(Haitang)台风降水非对称分布成因初步研究[J].高原气象,2008,27(6):1333-1342.
- [2] 岳彩军.“海棠”台风降水非对称分布特征成因的定量分析[J].大气科学,2009,33(1):51-70.
- [3] 吕梅,邹力,姚鸣明等.台风“艾利”降水的非对称结构分析[J].热带气象学报,2009,25(1):22-28.
- [4] 石顺吉,余锦华,张大林.热带风暴Bilis(2006)登陆期间一波非对称降水分布成因的探讨[J].热带海洋学报,2009,28(1):34-42.
- [5] Corbosiero K L, Molinari J. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones[J].Mon Wea Rev,2002,130:2110-2123.
- [6] Dunion J P,Velden C S.The impact of the Sahara air layer on Atlantic tropical cyclone activity[J].Bull Amer Meteor Soc,2004,85:353-365.
- [7] Shapiro L J.The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane[J].J Atmos Sci,1983,40:1984-1998.
- [8] Chan J C L,Liu K S,Ching S E,et al. Asymmetric distribution of convection associated with tropical cyclones making landfall along the South China coast[J].Mo Wea Rev,2004,132:2410-2420.
- [9] Rogers R,Chen S Y,Tenerelli J,et al.A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane Bonnie (1998)[J].Mon Wea Rev,2003,131:1577-1599.
- [10] Chen S Y S,Knaiff J A,Marks F D. Effect of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM[J]. Mon Wea Rev, 2006, 134:3190-3208.
- [11] Braun S A,Wu L G.A numerical study of Hurricane Erin (2001).Part II:Shear and the organization of eyewall vertical motion[J].Mon Wea Rev,2007,135:1179-1194.
- [12] Kaplan J,Demaria M.Large-scale characteristics of rapidly intensifying tropical cyclones in the North Atlantic basin[J].Wea Forecasting,2003,18:1093-1108.

- [13] Braun S A, Montgomery M T, Pu Z X. High-resolution simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part I: The organization of eyewall vertical motion[J]. J Atmos Sci, 2006, 63: 19-42.
- [14] Jones S C. The evolution of vortices in vertical shear. I: Initially barotropic vortices[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1995, 121: 821-851.
- [15] Frank W M, Ritchie E A. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure[J]. Mon Wea Rev, 1999, 127: 2044-2061.
- [16] Zhang D L, Kieu C Q. Potential vorticity diagnosis of a simulated hurricane. Part II: Quasi-balanced contributions to forced secondary circulations[J]. J Atmos Sci, 2006, 63: 2898-2914.
- [17] Lonfat M, Rogers R, Marchok T, et al. A parametric model for predicting hurricane rainfall[J]. Mon Wea Rev, 2007, 135: 3086-3097.

Analysis of asymmetric rainfall structure due to strong tropical storm Linfa (0903)

SHI Shun-ji¹, LIN Xiu-bin¹, WU Chen-feng¹, CHEN De-hua¹, ZHENG Li-xin¹, LI Jin-jian²

(1. Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012, China; 2. Sichuan Climate Center, Chengdu 610072, China)

Abstract: Using radar reflectivity and NCEP analysis data, the possible mechanism to form asymmetric rainfall structure of Linfa was diagnosed and analyzed from water vapor condition, environmental vertical wind shear and storm moving aspects. The result demonstrated that the abundant water vapor transportation in south part of Linfa provided basic water vapor condition to the happening of heavy rainfall. The asymmetric water vapor flux distribution contributed to asymmetric rainfall in some degree. Environmental vertical wind shear was the major dynamic factor to lead to the change of rainfall structure and form wavenumber-1 asymmetric rainfall structure finally. As the shear enhanced, and with the abundant water vapor condition in south part of Linfa, wavenumber-1 asymmetric rainfall structure formed gradually. Then the heavy rainfall concentrated in downshear left ultimately as the longtime effect of strong shear. Under strong shear condition, the sink motion around upshear restrained the development of convection, which induced by the friction of land and uplift of terrain. Compared to strong shear, the relative stable moving speed and direction of storm was difficult to be the leading role to rainfall structure.

Keywords: strong tropical storm Linfa; asymmetric rainfall; water vapor condition; environmental vertical wind shear; terrain; the moving of storm