气象学报

热带气旋眼墙非对称结构的研究综述

费建芳 刘 磊 黄小刚 程小平

FEI Jianfang LIU Lei HUANG Xiaogang CHENG Xiaoping

解放军理工大学气象海洋学院,南京,211101

College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China 2012-07-17 收稿, 2013-05-10 改回.

费建芳,刘磊,黄小刚,程小平.2013. 热带气旋眼墙非对称结构的研究综述. 气象学报, 71(5): 987-995 Fei Jianfang, Liu Lei, Huang Xiaogang, Cheng Xiaoping. 2013. Review of the studies of the asymmetric structure of the eyewall of a tropical cyclone. *Acta Meteorologica Sinica*, 71(5): 987-995

Abstract The asymmetric structure of a tropical cyclone (TC) is closely related to its development, so it has great practical significance to research the asymmetrical structure of the eyewall in improving the intensity forecast. During the TC translation, the asymmetric friction induces winds convergence and influences the distribution of convection within the eyewall. Vertical shear as one of the important factors that impact TC intensity blows the upper warmer core apart from its surface circulation. The shear first induces asymmetry of vertical movement, and then causes clouds and rainfall asymmetry in the azimuthal direction. The radial gradient of potential vorticity causes waves in the vortex inner core, which are similar to Rossby waves and affect the asymmetric structure. The ocean as the important energy source supplies plenty of sensible and latent heat. However, it is paid little attention about how the sea surface influences the asymmetry of the TC eyewall. We reviewed the studies of the air-sea interaction under TC conditions, in which the most evident characteristic of the ocean response is the cold wake effect. The sea surface temperature (SST) cooling reduces the sensible and latent heat transportation from the ocean to the atmosphere and impacts the asymmetry of the eyewall. In addition, the sea surface roughness influenced by waves has impacts on the asymmetry of the eyewall through the air-sea boundary layer.

Key words Tropical cyclone, Eyewall, Asymmetric structure, Review

摘 要 热带气旋的眼墙非对称结构与其发展过程密切相关。在热带气旋移动过程中,非对称风场伴随着边界层内非对称 摩擦而引起的辐合,影响着热带气旋眼墙内的对流分布。此外,风垂直切变作为影响热带气旋强度的重要因子,将上层暖心 吹离表层环流,引起眼墙垂直运动的非对称,导致云、降水在方位角方向的非均匀分布。当存在平均涡度的径向梯度时,罗斯 贝类型的波动可以存在于涡旋内核区域,影响眼墙非对称结构。海洋为热带气旋提供潜热和感热形式的能量,是热带气旋发 展的重要能量来源,关于海洋如何影响热带气旋眼墙非对称结构的相关研究较少。文中着重回顾了热带气旋与海洋相互作 用的研究成果,并提出海洋影响热带气旋眼墙非对称结构的机制。海洋对热带气旋最显著的响应特征是冷尾效应,该效应通 过降低海表温度,减少海洋向大气输送的潜热和感热,从而影响热带气旋眼墙非对称结构。此外,海浪改变海表粗糙度,通过 边界层影响移动热带气旋的眼墙结构。

关键词 热带气旋,眼墙,非对称结构,综述 中图法分类号 P444

作者简介:费建芳,主要从事灾害性天气形成机理和预报研究。E-mail:fei_jf@189.cn,feijf@sina.com 通讯作者:刘磊,主要从事海气相互作用的研究。E-mail:liu541226@sina.com

^{*} 资助课题:国家自然科学基金重点项目(41230421)、国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106004)、国家自然科学基金青年项目 (41005029,41105065)。

1 引 言

观测手段及数值预报模式的成熟和完善,资料 同化方法的改进以及对热带气旋(TC)移动机制的 认识不断深入,大幅度提高了热带气旋路径预报的 准确率(陈联寿等,2001),但对影响热带气旋强度的 因子,如海洋混合、环境风垂直切变、背景场热力状 态、上层槽以及眼墙内非对称对流等物理过程的理 解还很有限。因此,热带气旋的强度预报水平仍徘 徊不前,不能满足人们的预期(端义宏等,2005)。热 带气旋的快速加强通常与高海温、弱风垂直切变条 件下的强烈潜热释放等物理过程有关(Gray,1979; 吴迪生等,2001)。对影响热带气旋强度的物理机制 研究,提高热带气旋强度预报精度,是当前热带气旋 研究的重要课题之一(雷小途等,2009)。

热带气旋是形成于暖海洋上强烈的气旋式暖心 涡旋,以热带气旋眼区为中心呈近似轴对称结构。 眼区周围分布着闭合或未闭合的环状深对流,该对 流由海平面一直扩展到对流层顶,并在上升过程中 向外倾斜。除了摩擦边界层及外流层,热带气旋的 气旋式风场呈梯度风平衡关系,与中高层的暖心结 构共同决定了热带气旋风场在边界层以上随高度减 弱的分布特征(Kepert,2010)。同时,热带气旋又呈 明显的非对称结构,如:螺旋雨带、多边形眼墙、非对 称外流层及镶嵌在眼墙内的波动和中尺度涡旋。螺 旋雨带分为内螺旋雨带和外螺旋雨带。内螺旋雨带 通常发生在内核区域(定义为距离热带气旋中心2 倍最大风速半径距离的区域),与热带气旋内存在的 位涡(PV)梯度而引发的涡旋罗斯贝波(VRWs)有 关(Chen, et al, 2001)。外螺旋雨带发生在眼墙外 80-100 km 处,分为移动雨带和准静止雨带。移动 雨带与重力内波的活动相关,而准静止雨带与稳定 的环境强迫有关,如风垂直切变。在垂直方向上,轴 对称的热带气旋水平环流叠加着相对较弱的次级环 流和大量的非对称对流单体。次级环流由边界层内 的向心流、眼墙内的上升气流、螺旋雨带及对流层顶 较为浅薄的外流组成(Ooyama, 1969)。

眼墙作为热带气旋的重要组成部分,是强烈的 对流活动和强风的发生区。该区域的能量转换、潜 热释放等过程对整个热带气旋系统的发展具有十分 重要的作用。通常情况下,热带气旋的强度与眼墙 结构密切相关,当强度较强时,眼墙的轴对称结构较 为明显,形成一个由高风速包围的范围为 20— 100 km的眼区;而强度较弱时,眼墙结构较为松散, 呈三角形到六边形等多边形结构,通常还会出现椭 圆形眼墙或非闭合眼墙,非对称结构特征明显(Muramatsu,1986)。即使在成熟的热带气旋眼墙中,气 压场和温度场呈轴对称结构,而降水、对流和径向风 通常为明显的非对称结构(Frank, et al, 2001)。

下垫面摩擦和环境风垂直切变作为影响热带气 旋强度和结构的外部因子,作用于热带气旋的气旋 式环流时,将会导致眼墙区域出现显著的非对称结 构。涡旋罗斯贝波和中尺度涡旋(约10km)是引起 眼墙非对称结构的内部因子,同时也是造成椭圆形 眼墙及多边形眼墙的主要原因(Muramatsu,1986), 并与热带气旋下垫面摩擦及风垂直切变存在密切联 系。非绝热加热是位涡的主要能量来源,因此,涡旋 罗斯贝波的活动与眼墙内非绝热加热密切相关。此 外,非绝热过程影响眼墙内中尺度涡旋的生命期,从 而改变眼墙非对称结构(黄立文等,2005)。热带气 旋发生、发展于海上,由于海温、海浪改变了热带气 旋内核区域下垫面的热力、动力状态,通过眼墙内的 非绝热过程及下垫面摩擦效应,影响风垂直切变条 件下的垂直对流和涡旋倾斜,进而对热带气旋眼墙 的非对称结构产生影响。

综上所述,热带气旋眼墙环流中普遍存在的非 对称结构与海洋状况息息相关,而眼墙作为热带气 旋环流中最重要的一部分,是热带气旋研究中的重 点。因此,研究热带气旋眼墙内部非对称结构以及 与海-气相互作用的联系,对加深热带气旋强度变化 的认识及提高热带气旋强度预报水平,具有重要的 理论意义和实用价值。

2 下垫面摩擦作用对眼墙非对称结构的影响

在环境引导气流的作用下,热带气旋在对流层 中低层前进方向右侧出现较强的风速。非对称风场 伴随着边界层内较强的局地摩擦阻力引起非对称辐 合,从而影响了热带气旋眼墙内的对流分布,因此, 对于移动的热带气旋来说,下垫面摩擦作用导致眼 墙内的垂直运动(包括云、对流和降水)呈非对称分 布。

Shapiro(1983)利用一个垂直分层、厚度不变的 边界层模式研究了梯度风平衡条件下移动热带气旋 中的稳定气流。研究结果表明,热带气旋在移动过 程中,边界层内的非对称结构主要由摩擦引起,但热 带气旋眼墙非对称结构不能仅仅简单地归结为热带 气旋风场对下垫面摩擦阻力的响应。摩擦效应能够 引起热带气旋的对流层低层出现径向平流,并将动 量向内核区域输送,因此,该效应导致边界层外的因 素影响了眼墙非对称结构,如对流热通量的释放和 环境风垂直切变对眼墙非对称结构的发展起到了关 键作用。当热带气旋移动较为缓慢时(≪5 m/s),边 界层径向内流出现在右前方,在热带气旋的气旋式 流场作用下,动量被输送至高度稳定区域,辐合作用 主要发生在热带气旋移动方向的前方,使得热带气 旋风场达到最强。当热带气旋移速较快(≥10 m/s) 时,非线性的非对称平流相互作用加强,径向内流和 辐合作用集中于热带气旋前部和右侧。

非对称摩擦效应作用于移动热带气旋,将导致 边界层顶出现非对称上升气流(Shapiro,1983;Kepert,2001),在北(南)半球时,该最大上升气流出现 在热带气旋的右(左)前方。热带气旋对流层低层的 非对称流通常由左前方象限的最大相对径向内流及 右前方象限的相对切向流发展而来。由摩擦和热带 气旋移动引起的对流层低层的非对称流很早就受到 关注(Redfield, 1830; Reid, 1838; Piddington, 1848), 并被大量的观测 (Arakawa, et al, 1953; Frank, 1976, 1984; Powell, 1982, 1987; Black, et al, 1988; Powell, et al, 1998) 及理论研究所证实(Shapiro,1983; Kepert, 2001)。Kepert(2001)指出,热 带气旋移动引起的非对称风场随高度呈反气旋式旋 转,由下垫面非对称摩擦强迫而引发的波数为1的 惯性波组成,该非对称结构同样出现在热带气旋眼 墙中。

当热带气旋靠近陆地时,非对称摩擦效应在边 界层具有相似的动力结果(Kepert,2001)。Kepert (2006a,2006b)利用全球卫星定位系统下投式探空 仪资料对 1998 年的乔治斯(Georges)和米奇 (Mitch)两个热带气旋进行了细致研究,结果表明, 两个热带气旋眼墙均呈明显的1波结构,但是,在米 奇台风中,眼墙非对称结构呈 180°反向分布,近表 层的最大径向内流出现在热带气旋左侧,最大切向 风场出现在热带气旋后部。Kepert(2006b)认为该 移动引起的非对称摩擦主要由于靠近陆地,摩擦效 应分布不均匀所引起,并利用模式模拟来证实此机 制,模式结果与实际雷达观测一致,但由于该模式模 拟并没有排除风垂直切变对眼墙非对称结构的影 响,因此,以上现象不能单独地归结为下垫面摩擦效 应。May等(2008)利用雷达探测资料对2005年热 带气旋英格丽(Ingrid)进行了细致研究,发现其眼 墙存在明显的非对称结构。此外,通过利用边界层 模式对热带气旋的边界层过程进行了模拟,研究发 现,下垫面摩擦引发热带气旋眼墙西侧大量的云和 降水,上升气流达6m/s,这个量级远大于由单纯的 热带气旋移动引起的非对称气流。当热带气旋大部 分内部环流在岛上时,其结构较为对称,当其离开岛 屿时,在不同的下垫面摩擦阻力作用下,垂直于海岸 的西北一东南向非对称结构得到发展,进一步说明 了移动热带气旋中不均匀的摩擦效应对热带气旋眼 墙非对称结构的重要影响。

在最近的研究中,Yang 等(2011)利用高精度 数值模式对 2011 年台风纳莉(Nari)进行了一系列 地形敏感性试验,研究地形引发的摩擦效应对热带 气旋眼墙非对称结构的影响。当热带气旋登陆后, 摩擦阻力增大,低层径向内流和中层外流加强而切 向风速减弱。同时,眼墙呈蜂窝状结构,并向高地形 一侧倾斜。当地形阻力增大时,纳莉的主环流和次 级环流更强。地形摩擦效应导致较低的湿位温侵入 内核区域,引起眼墙的崩溃。在登陆过程中,纳莉的 环流与抬升的低湿位温相互作用,在地形摩擦的作 用下,导致热带气旋眼墙非对称结构的形成。

3 环境风垂直切变对眼墙非对称结构的影响

热带气旋眼墙内的垂直运动随着高度发生变 化,环境风垂直切变对眼墙非对称结构的分布有显 著影响。环境风垂直切变作为影响热带气旋强度的 重要因子,能够将上层暖心吹离表层环流(Simpson, et al, 1958),观测和模拟研究表明,当切变大于 某一阈值时,受其影响的热带气旋开始减弱,但减弱 过程具有一定的滞后性,滞后时间与热带气旋强度 和结构有关。此外,风垂直切变减弱热带气旋强度 的同时,造成热带气旋涡旋轴的倾斜,从而在下倾方 向出现等熵面抬升,引起眼墙垂直运动的非对称性, 进而导致云、降水沿方位角的不均匀分布(陈国民 等,2010a)。

当风垂直切变作用于热带气旋涡旋时,涡旋轴 则在顺切变方向出现下倾趋势。将涡旋看成一个上 下两层的涡旋系统,上层涡旋的涡度将向下层传递, 并产生一个与下层涡旋不重合的气旋式环流,而下 层涡旋同样可产生一个上层环流。上下两对涡旋将 围绕对方旋转,即倾斜的涡旋轴将随时间呈气旋式 旋转(Jones, 1995),旋转率依赖于位涡场的强度。 如果涡旋系统尺度较大,稳定度较低,则产生的涡度 穿透层更深,引起的非对称气流更强(Jones,1995; Smith,2000)。当风垂直切变足够强时,上下层涡旋 将出现分离。如果不考虑涡旋中的湿物理过程,倾 斜轴旋转到逆切变一侧,风垂直切变将减弱倾斜度, 倾斜轴的旋转过程持续,当轴指向顺切变时,倾斜度 仍将扩大。倾斜的涡旋可以分解为垂直轴对称结构 和方位角波数为1的斜压扰动,也就是说,眼墙上存 在呈气旋式扰动和反气旋式扰动的一对偶极子,在 眼墙另一侧存在反向的一对偶极子。以上理论建立 在准地转动力学基础上,因此,仅适用于较弱的热带 气旋。

另一个解释风垂直切变下的非对称结构演变的 理论是涡旋罗斯贝波理论。当 $L_{R}(L_{R} = C_{NH}/I, 为$ 罗斯贝变形半径,C_{NH}为重力内波速,I为惯性稳定 度)大于涡旋水平尺度时,在风垂直切变的作用下涡 旋轴的倾斜将激发出方位角1波结构,倾斜的涡旋 轴呈气旋式旋转,倾斜程度缓慢衰减。当空间尺度 较小时,该衰减过程可以完全忽略。对于较小的 L_R,初始扰动激发出含有扰动能量逐渐衰减的连续 涡旋罗斯贝波谱。Schecter 等(2002,2004)提出了 对上述观点的补充,认为涡旋的关键层(气旋的方位 角速度等于1波的位相速度,也就是平均气流与波 作用最强烈的地方)存在阻尼共振,导致倾斜呈指数 衰减。当位涡径向梯度在该半径处为负,阻尼共振 效应减弱了波动,倾斜度出现减小趋势。当该半径 处位涡径向梯度为正,则波动增加,倾斜度增大。 Reasor 等(2004)指出,在 Jones(1995)的研究中,位 涡的径向梯度始终为正,因此,其描述的结果中,倾 斜始终增大。涡旋罗斯贝波理论的最大缺陷是建立 在正压涡旋基础之上。

风垂直切变引起的非对称垂直运动导致眼墙内 云和降水的强度随方位角发生变化。Black等 (2002)对风垂直切变条件下的 1991 年希梅娜(Jimena)和 1994 年奥利维亚(Olivia)两个热带气旋进 行研究,初始阶段,两个热带气旋的眼区半径为 16—18 km,最大风速为 57 m/s,海温高于 28°C,希 梅娜在东风切变达 13—20 m/s 的高垂直切变环境 下保持强度不变。奥利维亚在8m/s的风切变环境 下持续加强,但当风切变由东向西转变,强度增大到 15 m/s,并移动至冷水上后,快速减弱,切向环流明 显变慢,尤其在高层,环流减速更为明显。与此同 时,最大风速半径扩大,雷达反射率呈明显非对称结 构,反射率峰值位于顺切变左侧,与最大垂直运动所 在方位角的位置一致。风垂直切变极大地影响了两 个热带气旋眼墙中的对流结构,单个对流细胞大多 形成于眼墙内顺切变左侧,切向速度为切向风速的 60%-80%,与涡旋罗斯贝波的传播速度一致,对流 细胞旋转至逆切变一侧消散。当风垂直切变增强、 热带气旋移至冷水上时,强度减弱,眼墙非对称结构 明显增强,对流单细胞生命期变短,仅存在于顺切变 左侧。Corbosiero 等(2002,2003)利用闪电资料研 究了热带气旋在风垂直切变中的眼墙非对称结构, 当切变大于5m/s时,超过90%的闪电发生在顺切 变一侧,当热带气旋强度越强,对流活动在顺切变方 向的左偏性越强,主要是因为气流在上升过程中被 逆时针扭曲。此外, Frank 等(1999)、Rogers 等 (2003)、Braun 等(2006,2007)都利用高分辨率的数 值模式研究了热带气旋在风垂直切变条件下的眼墙 非对称结构,进一步证实了风垂直切变与热带气旋 涡旋轴倾斜的关系,利用涡旋罗斯贝波理论解释了 眼墙非对称结构。

4 涡旋罗斯贝波对眼墙非对称结构的影响

近年来,由于位涡理论在热带气旋眼墙研究中 的应用,对眼墙非对称结构与平均环流相互作用的 理解逐渐加深。理论研究证明,位涡(罗斯贝类型) 波动可以存在于涡旋内核区域,影响眼墙非对称结 构。当存在平均涡度的径向梯度时,涡旋罗斯贝波 可以在热带气旋内核传播,与大尺度的罗斯贝波相 似(MacDonald,1968)。

涡旋罗斯贝波的传播及相互作用理论首先由 Montgomery等(1997)正式提出,随后由 McWilliams等(2003)归纳总结。他们认为,平均涡旋的水 平切变通过湿对流过程产生位涡异常的轴对称化, 伴随着涡旋罗斯贝波的向外传播,该过程加快了激 发波动半径处的切向风速。Montgomery等(1998) 和 Möller等(1999,2000)利用三维准地转模式及完 全非线性非对称平衡模式,证实了热带气旋的产生 及加强过程可以在涡旋及单极涡度叠加下通过轴对 称化和吸收异常位涡而发生。

当热带气旋处于热带风暴或较弱的飓风阶段, 眼墙附近表现出单极涡旋结构,当达到飓风强度或 快速发展阶段,呈位涡环状结构(Kossin, et al, 2001; Mallen, et al, 2005), Wang (2001, 2002a, 2002b)利用三维热带气旋模式研究了对称涡旋、非 对称涡旋罗斯贝波及眼墙对流间的相互作用,证实 了在对流层中低层,内核非对称结构主要由方位角 方向的1波及2波涡旋罗斯贝波构成。这些波动沿 眼墙切线呈逆风方向传播,因此,其旋转周期比眼墙 内气泡单体长,同时,涡旋罗斯贝波相对边界层内流 向外传播。涡旋罗斯贝波仅存在于一定半径范围 内,超过此范围,平均涡旋的径向位涡梯度较弱,以 至于不能支持涡旋罗斯贝波的存在。Chen 等 (2003)利用 MM5 模式模拟了初始轴对称的飓风, 证实了向外传播的位涡带的特征与涡旋罗斯贝波理 论一致。涡旋罗斯贝波将较高的位涡及角动量向眼 区输送,伴随着切向风速的加快及热带气旋的加强, 导致最大风速半径向内收缩。李勋等(2010)使用傅 立叶变换方法分解模拟结果中的雷达回波,发现眼 壁和内螺旋雨带的2波非对称沿方位角移速与涡旋 罗斯贝波的理论波速一致。Martinez 等(2010)利 用一个简单的二维无辐散正压模式模拟了一个二维 飓风强度的涡旋,对其非对称特征(如椭圆形及多边 形眼墙的形成和中尺度涡旋的变形)展开研究,对非 对称结构的产生和动力结构进行了说明,描述了发 展中的单极涡旋如何在离散涡旋罗斯贝波或准模态 的非粘性阻滞作用下加强。

Reasor(2000)针对 1994 年飓风奥利维亚(Olivia),通过大量的观测资料研究了热带气旋眼墙的 非对称涡度动力结构及涡旋罗斯贝波,结果表明:眼 墙的涡度非对称结构主要由 3 km 以下的方位角 2 波结构及 3 km 以上的 1 波结构构成,最显著的结 构均出现在最大风速半径处。而 1 波结构与环境风 垂直切变密切相关,随着风切变不断增大,1 波结构 也逐渐增强。2 波结构是最不稳定的波数结构,是 飓风的不稳定涡度环崩溃的副产物。Corbosiero等 (2006)利用高时空分辨率的雷达探测资料研究了 1985 年飓风艾琳娜(Elena)中涡旋罗斯贝波的活 动。涡旋中反射率的对称分量占主要部分,1 波结 构占比小于 20%,与风垂直切变密切相关。较弱的 2 波结构是椭圆形眼墙存在的主要原因。椭圆形眼 墙的切向旋转速度及内螺旋雨带与涡旋罗斯贝波理 论一致。

5 海洋状况对眼墙非对称结构的可能机制

暖的洋面和充沛的水汽是热带气旋发生、发展 的必要条件。海洋以潜热和感热形式为热带气旋提 供能量,是热带气旋重要的能量来源。海洋作为热 带气旋下垫面,在强风作用下产生巨浪,极大地改变 了海-气界面层的摩擦效应。"冷尾流"作为热带气 旋条件下海洋的热力响应,对热带气旋眼墙内的非 绝热过程有着显著影响,因此,在热带气旋眼墙非对 称结构的研究中不应忽略海洋的动力和热力状况, 深入研究海洋在热带气旋条件下的响应,有助于揭 示海洋状况影响热带气旋眼墙非对称结构的可能机 制。

移动的热带气旋在下垫面摩擦阻力的作用下, 辐合效应使眼墙内出现非对称结构。此外,非绝热 过程在湿对流区域降低静力稳定度,增加 L/L_R(L 为涡旋的水平尺度),当罗斯贝变形半径减小时,涡 旋罗斯贝波的固有传播速度降低,从而导致沿方位 角传播的涡旋罗斯贝波绝对速度增大,眼墙非对称 性降低;非绝热驱动的次级环流通过低层到中层的 涡度辐合加强涡旋的位涡,增加涡旋罗斯贝波数和 径向位涡梯度,同样可以导致沿方位角传播的涡旋 罗斯贝波的绝对速度增大,影响热带气旋眼墙非对 称结构。

非绝热加热驱动的次级环流将高、低层的涡旋 耦合,抵消了风垂直切变引起的倾斜作用。Schecter等(2007)证实,单级涡旋中的云可以引起并加快 涡旋罗斯贝波的衰减,因此,可以加强热带气旋的直 立趋势,也就是说,非绝热过程破坏涡旋顺切变一侧 由风垂直切变引起的眼墙非对称结构的冷异常,并 使最大上升气流和云、降水旋转至顺切变左侧象限。 从某种程度上看,非绝热过程降低了眼墙非对称结 构。在大气、海洋相互作用的条件下,由于海表温度 的降低,热带气旋内核区域的表面热通量减小,减弱 了非绝热过程,使得由风垂直切变引起的眼墙非对 称结构增强,与此同时,非绝热过程的减弱导致眼墙 内深对流单体生命期变短,进一步增强了眼墙非对 称结构。

Zhu 等(2004)利用简单的海-气耦合模式研究 了海洋上移动的热带气旋,发现海表温度冷却导致 热通量的降低,减小了边界层内的湿静力能及内核 区域的方位角平均的径向梯度。当不考虑海洋作用 时,β平面上的热带气旋在对流层低层移动方向前 方出现辐散,后方出现辐合,前部辐散与摩擦引起的 边界层辐合相重叠,因此,最大上升气流出现在后 部。耦合过程中,海表热通量主要在内核右后部出 现显著降低,同时导致对流层内位温的下降(相反, 热带气旋内核前部出现较高的位温)。因此,对流层 低层在内核右前方出现明显辐合,与摩擦辐合区域 一致,导致眼墙右前方出现显著的非对称结构。 Möller 等(2005)利用 MM5 模式,将非对称的非绝 热加热嵌入模式中,研究了方位角方向眼墙尺度的 单级波数非绝热加热对涡旋的短期、长期演变的影 响。开始旋转的涡旋,尤其存在非对称结构特征时, 如果在涡旋结构上添加额外的非对称非绝热加热, 由此产生的小涡流将会引起方位角平均涡旋结构的 变化,造成涡旋交替减弱、增强。Hence等(2011)利 用 1998—2007 年大西洋热带气旋季节的热带测雨 卫星(TRMM)降水雷达探测资料统计分析了热带 气旋眼墙的垂直降水结构,研究了海表面温度与眼 墙垂直结构的关系,结果表明,当海表温度较高时, 间歇性的强深回波出现在眼墙上,该回波很可能就 是浮力对流热塔(Braun, 2002; Houze, 2010), 越暖 的水体导致其出现的频率越高。虽然暖洋面导致深 厚的眼墙环流,但不一定使平均环流加强。更冷的 洋面有效地阻断了浮力上升气流,而这些气流将涡 度输送给眼墙,提供一种眼墙和眼区的混合机制 (Braun, 2006; Schubert, et al, 1999; Bell, et al, 2008),从而加强热带气旋。

除了通过热力因素对热带气旋眼墙非对称结构 产生影响外,海洋通过海浪,对热带气旋下垫面粗糙 度的改变,也是眼墙非对称结构研究中不应忽视的 因素。明杰等(2010)利用 WRF 模式研究 2004 年 台风云娜时发现,地形通过下垫面摩擦对涡旋罗斯 贝波的传播具有显著影响,揭示了下垫面通过涡旋 罗斯贝波影响热带气旋眼墙非对称结构的可能机 制。强风引起的波浪改变了海表粗糙度,进而影响 了海-气间的动量通量输送。大量研究试验和理论 指出,动量通量依赖于海表层的波应力过程(Drennan,et al,2003; Moon,et al,2004a,2004b; Fan,et al,2010)。Zhang 等(2007)的研究结果表明:海洋 飞沫及波拖曳系数引起有效波高的增大或减小主要 发生在热带气旋路径右侧的高风速区,是最大波浪 区的松弛过程,发生在最大风速后的若干小时,有效 波高的增大或减小依赖于热带气旋的移动速度。 Fan 等(2009)通过海-气-浪耦合模式的理想化试验, 研究得到波流相互作用减少了热带气旋右后区域的 动量通量输入,并降低了热带气旋路径右侧次表层 流和海表面的温度冷却以及温跃层上翻下沉率。增 长的表层波可以减少空气中的动量通量进入,比非 耦合试验中动量通量进入次表层流少了6%。这个 效应在热带气旋右后方更为重要,主要由于该区域 的波有较大的空间梯度。海面降温程度也会降低, 因为上涌作用减弱,可能会加强热带气旋强度。同 时,最大有效波高在热带气旋路径右侧从17.0 m 降低至 14.7 m, 波长从 359 m 下降到 319 m。海浪 导致海表粗糙度的改变,通过边界层影响移动热带 气旋的眼墙结构。

6 问题与讨论

当前,得益于高时空分辨率观测资料的获得,热带气旋眼墙非对称结构的精细化研究逐渐深入。 Reasor(2000)、Aberson等(2006)、Zhao等(2008)、 Bell等(2008)、王瑾等(2007)分别利用高时空分辨 率的三维机载双多普勒雷达风场资料,WP-3D资料,敏视达WSR-98D雷达探测资料,GPS下投式探 空仪探测资料及FY-2C气象卫星观测资料,展开了 热带气旋内核非对称结构的研究。

由于实况资料在空间及时间上具有较高的精度,能较好地分辨出眼墙结构,促进了眼墙非对称结构的研究。但是,由于探测仪器布点的限制,目前,高时空分辨率的实况资料还不能长时间地对海上热带气旋进行观测,因此,高分辨率的数值模式仍是当前研究热带气旋眼墙非对称结构的主要手段。 Braun等(2002,2006)、Rogers等(2003)、岳彩军(2009)、聂高臻等(2010)、陈国民等(2010)都采用高分辨率的数值模式开展了热带气旋眼墙非对称结构的研究。

热带气旋下垫面的海表温度通过非绝热过程影 响风垂直切变引发的涡旋倾斜效应,改变热带气旋 眼墙非对称结构,此外,热带气旋条件下的海浪改变 了海表粗糙度,通过摩擦效应,对移动热带气旋的眼 墙非对称结构产生影响。当前,风垂直切变及下垫 面摩擦效应对热带气旋眼墙非对称结构的影响已经 得到了广泛关注,但研究中大多忽略了海洋反馈对 热带气旋眼墙非对称结构的影响。眼墙中的涡旋罗 斯贝波及中尺度涡旋等作为导致热带气旋眼墙非对 称的内部原因,与海气间的热量、动量输送密切相 关。因此,研究热带气旋眼墙非对称结构时,必须考 虑海洋的反馈效应。

热带气旋条件下的海洋出现冷涌,混合层加深 及近惯性流等响应特征,同时,大风引起的海浪改变 了海表粗糙度,对海-气界面的热量、动量输送产生 巨大影响。目前,海上高精度资料,尤其是热带气旋 条件下海表温度、海浪的高精度观测资料的获取仍 然存在很大困难,阻止了人们开展海洋状况对热带 气旋眼墙非对称结构的研究。海-气耦合作用的研 究主要依靠理想化试验,或者利用较粗分辨率的海-气耦合模式(Wada, et al, 2010; Sandery, et al, 2010; Tseng, et al, 2010; Chen, et al, 2010)。近 年来,各国科学家也积极发展了各自的中尺度海-气 耦合模式(Moon, et al, 2004a, 2004b; Fan, et al, 2009; Bao, et al, 2000; Zhang, et al, 2006), 但海-气耦合研究的关注点主要是热带气旋条件下的海洋 响应(包括:海水冷涌现象、中尺度冷涡、近惯性震荡 等)以及海洋对热带气旋强度的改变,而利用数值耦 合模式进行热带气旋眼墙非对称结构的研究较少。

因此,要深入研究热带气旋眼墙的非对称和演 变特征,需建立高分辨率的海-气-浪双向耦合模式, 研究热带气旋条件下的海洋反馈对热带气旋眼墙非 对称结构的影响。同时,要充分利用雷达、卫星和飞 机等观测手段,加强个例研究,分析发现热带气旋眼 墙非对称结构发生、发展的演变规律,揭示热带气旋 非对称结构特别是眼墙非对称结构与热带气旋强度 变化的关系。

参考文献

- 陈国民,沈新勇,杨宇红. 2010a. β效应和垂直切变对台风非对称 结构及眼墙替换的影响. 高原气象, 29(6): 1474-1484
- 陈国民,沈新勇,刘佳. 2010b. 垂直风切变对热带气旋强度及结构 的影响. 气象研究与应用,31(1):1-4,10
- 陈联寿,孟智勇.2001.我国热带气旋研究十年进展.大气科学,25 (3):420-431
- 端义宏,余晖,伍荣生. 2005. 热带气旋强度变化研究进展. 气象学 报,63(5):636-645
- 黄立文,吴国雄,宇如聪. 2005. 中尺度海-气相互作用对台风暴雨 过程的影响. 气象学报,63(4):455-467
- 雷小途,徐明,任福明. 2009. 全球变暖对台风活动影响的研究进

展. 气象学报, 67(5): 679-688

- 李勋,李泽椿,赵声荣等. 2010. 强台风 Chanchu(0601)的数值研 究:转向前后内核结构和强度变化. 气象学报,68(5):598-611
- 明杰,舒守娟. 2010. 台风云娜(2004)的敏感性数值试验及其对涡 旋罗斯贝波的影响.南京大学学报(自然科学版),46(3):296-304
- 聂高臻,谈哲敏,仇欣. 2010. 台风"云娜"(2004)的数值模拟:眼墙 对流与环境风切变的关系.南京大学学报(自然科学版),46 (3):317-327
- 王瑾, 柯宗建, 江吉喜. 2007. "麦莎"台风暴雨落区非对称分布的 诊断分析. 热带气象学报, 23(6): 563-568
- 吴迪生,邓文珍,张俊峰等. 2001. 南海台风状况下海气界面热量 交换研究. 大气科学,25(3): 329-341
- 岳彩军. 2009. "海棠"台风降水非对称分布特征成因的定量分析. 大气科学, 33(1): 51-70
- Aberson S D, Montgomery M T, Bell M, et al. 2006. Hurricane Isabel (2003): New insights into the physics of intense storms.
 Part II: Extreme localized wind. Bull Amer Meteor Soc, 87 (10): 1349-1354
- Arakawa H, Suda K. 1953. Analysis of winds, wind waves, and swell over the sea to the east of Japan during the typhoon of September 26, 1935. Mon Wea Rev, 81(2): 31-37
- Bao J W, Wilczak J M, Choi J K, et al. 2000. Numerical simulations of air-sea interaction under high wind conditions using a coupled model: A study of hurricane development. Mon Wea Rev, 128(7): 2190-2210
- Bell M M, Montgomery M T. 2008. Observed structure, evolution, and potential intensity of category 5 Hurricane Isabel (2003) from 12 to 14 September. Mon Wea Rev, 136(6): 2023-2046
- Black M L, Gamache J F, Marks F D, et al. 2002. Eastern Pacific Hurricanes Jimena of 1991 and Olivia of 1994: The effect of vertical shear on structure and intensity. Mon Wea Rev, 130: 2291-2312
- Black P G, Elsberry R L, Shay L K, et al. 1988. Atmospheric boundary layer and oceanic mixed layer observations in Hurricane Josephine obtained from air-deployed drifting buoys and research aircraft. J Atmos Oceanic Technol, 5(6): 683-698
- Braun S A. 2002. A cloud-resolving simulation of Hurricane Bob (1991): Storm structure and eyewall buoyancy. Mon Wea Rev, 130(6): 1573-1592
- Braun S A, Montgomery M T, Pu Z. 2006. High-resolution simulation of Hurricane Bonnie (1998). Part I: The organization of eyewall vertical motion. J Atmos Sci, 63(1): 19-42
- Braun S A, Wu L G. 2007. A numerical study of Hurricane Erin (2001). Part II: Shear and the organization of eyewall vertical motion. Mon Wea Rev, 135(4): 1179-1194
- Chen S S, Campbell T J, Jin H, et al. 2010. Effect of two-way airsea coupling in high and low wind speed regimes. Mon Wea Rev, 138(9): 3579-3602

Chen Y H, Yau M K. 2001. Spiral bands in a simulated hurricane.

Part I: Vortex Rossby wave verification. J Atmos Sci, 58(15): 2128-2145

- Chen Y H, Brunet G, Yau M K. 2003. Spiral bands in a simulated hurricane. Part II: Wave activity diagnostics. J Atmos Sci, 60 (10): 1239-1256
- Corbosiero K L, Molinari J. 2002. The effects of vertical wind shear on the distribution of convection in tropical cyclones. Mon Wea Rev, 130(8): 2110-2123
- Corbosiero K L, Molinari J. 2003. The relationship between storm motion, vertical wind shear, and convective asymmetries in tropical cyclones. J Atmos Sci, 60(2): 366-376
- Corbosiero K L, Molinari J, Aiyyer A R, et al. 2006. The structure and evolution of Hurricane Elena (1985). Part II: Convective asymmetries and evidence for vortex Rossby waves. Mon Wea Rev, 134(11): 3073-3091
- Drennan W M, Graber H C, Hauser D, et al. 2003. On the wave age dependence of wind stress over pure wind seas. J Geophys Res, 108(C3): 8062, doi:10.1029/2000JC000715
- Fan Y, Ginis I, Hara T. 2009. The effect of wind-wave-current interaction on air-sea momentum fluxes and ocean response in tropical cyclones. J Phys Oceanogr, 39(4): 1019-1034
- Fan Y, Ginis I, Hara T. 2010. Momentum flux budget across the air-sea interface under uniform and tropical cyclone winds. J Phys Oceanogr, 40(10): 2221-2242
- Frank W M. 1976. The Structure and Energetics of the Tropical Cyclone[D]. Fort Collins: Dept. of Atmospheric Science, Colorado State University, Paper 258, 180 pp
- Frank W M. 1984. A composite analysis of the core of a mature hurricane. Mon Wea Rev, 112(12): 2401-2420
- Frank W M, Ritchie E A. 1999. Effects of environmental flow upon tropical cyclone structure. Mon Wea Rev, 127(9): 2044-2061
- Frank W M, Ritchie E A. 2001. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes. Mon Wea Rev, 129(9): 2249-2269
- Gray W M. 1979. Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation // Shaw D B. Meteorology Over the Tropical Oceans. Roy Meteor Soc, 155-218
- Hence D A, Houze R A. 2011. Vertical structure of hurricane eyewalls as seen by the TRMM precipitation radar. J Atmos Sci, 68(8): 1637-1652
- Houze R A Jr. 2010. Clouds in tropical cyclones. Mon Wea Rev, 138(2): 293-344
- Jones S C. 1995. The evolution of vortices in vertical shear. Part I: Initially barotropic vortices. Quart J Roy Meteor Soc, 121 (524): 821-851
- Kepert J D. 2001. The dynamics of boundary layer jets within the tropical cyclone core. Part I: Linear theory. J Atmos Sci, 58 (17): 2469-2484
- Kepert J D. 2006a. Observed boundary-layer wind structure and balance in the hurricane core. Part I: Hurricane Georges. J At-

mos Sci, 63(9): 2169-2193

- Kepert J D. 2006b. Observed boundary-layer wind structure and balance in the hurricane core. Part II: Hurricane Mitch. J Atmos Sci, 63(9): 2194-2211
- Kepert J. 2010. Global perspectives on tropical cyclones from science to mitigation Chapter 1: Tropical cyclone structure and dynamics // Chan J C L. World Scientific Series on Asia-Pacific Weather and Climate, Vol. 4:3-54
- Kossin J P, Eastin M D. 2001. Two distinct regimes in the kinematic and thermodynamic structure of the hurricane eye and eyewall. J Atmos Sci, 58(9): 1079-1090.
- MacDonald N J. 1968. The evidence for the existence of Rossby-like waves in the hurricane vortex. Tellus, 20(1): 138-150
- Mallen K J, Montgomery M T, Wang B. 2005. Reexamining the near-core radial structure of the tropical cyclone primary circulation: Implications for vortex resiliency. J Atmos Sci, 62(2): 408-425
- Martinez Y, Brunet G, Yau M K. 2010. On the dynamics of two-dimensional hurricane-like vortex symmetrization. J Atmos Sci, 67(16): 3559-3580
- May P T, Kepert J D, Keenan T D. 2008. Polarimetric radar observations of the persistently asymmetric structure of Tropical Cyclone Ingrid. Mon Wea Rev, 136(2): 616-630
- McWilliams J C, Graves L P, Montgomery M T. 2003. A formal theory for vortex Rossby waves and vortex evolution. Geophys Astrophys Fluid Dyn, 97(4): 275-309
- Möller J D, Montgomery M T. 1999. Vortex Rossby waves and hurricane intensification in a barotropic model. J Atmos Sci, 56 (11): 1674-1687
- Möller J D, Montgomery M T. 2000. Tropical cyclone evolution via potential vorticity anomalies in a three-dimensional balance model. J Atmos Sci, 57(20); 3366-3387
- Möller J D, Shapiro L J. 2005. Influences of asymmetric heating on hurricane evolution in the MM5. J Atmos Sci, 62(11): 3974-3992
- Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes. Quart J Roy Meteor Soc, 123(538): 435-465
- Montgomery M T, Enagonio J. 1998. Tropical cyclogenesis via convectively forced vortex Rossby waves in a three-dimensional quasigeostrophic model. J Atmos Sci, 55(20): 3176-3207
- Moon I J, Hara T, Ginis I, et al. 2004a. Effect of surface waves on air-sea momentum exchange. Part I: Effect of mature and growing seas. J Atmos Sci, 61(19): 2321-2333
- Moon I J, Ginis I, Hara T. 2004b. Effect of surface waves on airsea momentum exchange. Part II: Behavior of drag coefficient under tropical cyclones. J Atmos Sci, 61(19): 2334-2348
- Muramatsu T. 1986. The structure of polygonal eye of a typhoon. J Meteor Soc Japan, 64: 913-921
- Ooyama K V. 1969. Numerical simulation of the life cycle of tropical

994

cyclones. J Atmos Sci, 26(1): 3-40

- Piddington H. 1848. The Sailor's Horn Book for the Law of Storms: Being a Practical Exposition of the Theory of the Law of Storms and Its Uses to Mariners of all Classes in All Parts of the World. Smith, Elder and Co., 292 pp
- Powell M D. 1982. The transition of the Hurricane Frederic boundary-layer wind field from the open Gulf of Mexico to landfall. Mon Wea Rev, 110(12): 1912-1932
- Powell M D. 1987. Changes in the low-level kinematic and thermodynamic structure of Hurricane Alicia (1983) at landfall. Mon Wea Rev, 115(1): 75-99
- Powell M D, Houston S H. 1998. Surface wind fields of 1995 Hurricanes Erin, Opal, Luis, Marilyn, and Roxanne at landfall. Mon Wea Rev, 126(5): 1259-1273
- Reasor P D. 2000. Horizontal Vorticity Redistribution and Vortex Alignment in Developing and Mature Tropical Cyclones. Fort Collins: Colorado State University, 166 pp
- Reasor P D, Montgomery M T, Marks F D, et al. 2000. Lowwavenumber structure and evolution of the hurricane inner core observed by airborne dual-Doppler radar. Mon Wea Rev, 128 (6): 1653-1680
- Reasor P D, Montgomery M T, Grasso L D. 2004. A new look at the problem of tropical cyclones in vertical shear flow: Vortex resiliency. J Atmos Sci, 61(1): 3-22
- Redfield W C. 1830. Remarks on the prevailing storms of the Atlantic Coast of the North American states. J Sci Arts, 20: 17-43
- Reid R E. 1838. A statement of progress made towards developing the law of storms; and of what seems further desirable to be done to advance our knowledge of the subject. Report of the Eighth Meeting of the British Association of the Advancement of Science, 7: 21-25
- Rogers R, Chen S Y, Tenerelli J, et al. 2003. A numerical study of the impact of vertical shear on the distribution of rainfall in Hurricane Bonnie (1998). Mon Wea Rev, 131(8): 1577-1599
- Sandery P A, Brassington G B, Craig A, et al. 2010. Impacts of ocean-atmosphere coupling on tropical cyclone intensity change and ocean prediction in the Australian region. Mon Wea Rev, 138(6): 2074-2091
- Schecter D A, Montgomery M T, Reasor P D. 2002. A theory for the vertical alignment of a quasigeostrophic vortex. J Atmos Sci, 59(2): 150-168
- Schecter D A, Montgomery M T. 2004. Damping and pumping of a vortex Rossby wave in a monotonic cyclone: Critical layer stirring versus inertia-buoyancy wave emission. Phys Fluids, 16 (5): 1334-1348
- Schecter D A, Montgomery M T. 2007. Waves in a cloudy vortex. J

Atmos Sci, 64(2): 314-337

- Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, et al. 1999. Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes. J Atmos Sci, 56(9): 1197-1223
- Shapiro L J. 1983. The asymmetric boundary layer flow under a translating hurricane. J Atmos Sci, 40(8): 1984-1998
- Simpson R H, Riehl H. 1958. Mid-troposphere ventilation as a constraint on hurricane development and maintenance // Proc Tenth Conf on Hurricanes. Miami Beach, FL, Amer Meteor Soc, D4. 1-D4. 10
- Smith R K. 2000. The role of cumulus convection in hurricanes and its representation in hurricane models. Rev Geophys, 38(4): 465-489
- Tseng Y H, Jan S, Dietrich D E, et al. 2010. Modeled oceanic response and sea surface cooling to typhoon Kai-Tak. Terr Atmos Ocean Sci, 21(1): 85-98
- Wada A, Kohno N, Kawai Y. 2010. Impact of wave-ocean interaction on typhoon Hai-Tang in 2005. SOLA, 6A(S1): 13-16, doi:10.2151/sola.6A-004
- Wang Y Q. 2001. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part I: Model description and control experiment. Mon Wea Rev, 129(6): 1370-1394
- Wang Y Q. 2002a. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part I: Overall structure, potential vorticity, and kinetic energy budgets. J Atmos Sci, 59(7): 1213-1238
- Wang Y Q. 2002b. Vortex Rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity changes. J Atmos Sci, 59: 1239-1262
- Yang M J, Zhang D L, Tang X D, et al. 2011. A modeling study of Typhoon Nari (2001) at landfall: 2. Structural changes and terrain-induced asymmetries. J Geophys Res, 116(D9), D09112, doi:10.1029/2010JD015445
- Zhang W Q, Perrie W, Li W B. 2006. Impacts of waves and sea spray on midlatitude storm structure and intensity. Mon Wea Rev, 134(9): 2418-2442
- Zhang Y, Perrie W. 2007. The Influence of air-sea roughness, sea spray, and storm translation speed on waves in north atlantic storms. Amer Meteor Soc, 38(4): 817-839
- Zhao K, Lee W C, Jou B J D. 2008. Single Doppler radar observation of the concentric eyewall in typhoon Saomai, 2006, near landfall. Geophys Res Lett, 35: L07807, doi: 10. 1029/ 2007GL032773
- Zhu H Y, Ulrich W, Smith R. 2004. Ocean effects on tropical cyclone intensification and inner-core asymmetries. J Atmos Sci, 61(11): 1245-1258