

杨雯,黄珊. 2017. 热带气旋外眼墙形成机制研究综述[J]. 气象与减灾研究, 40(3):165-170.
Yang Wen, Huang Shan. 2017. A review of the mechanism of the secondary eyewall formation in tropical cyclone[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 40(3):165-170.

热带气旋外眼墙形成机制研究综述

杨 雯¹, 黄 珊²

1. 国防科学技术大学 气象海洋学院, 江苏 南京 211100
2. 解放军 94116 部队, 新疆 和田 848000

摘要:介绍了国内外关于热带气旋外眼墙形成和维持过程的相关研究进展,包括大尺度环境场和热带气旋涡旋内部动力学过程,如涡旋罗斯贝波理论、轴对称化过程、涡丝化作用、 β -skirt 轴对称化外眼墙形成假说和边界层非平衡动力过程等。随着对外眼墙形成机理研究的不断深入,当前存在多种外眼墙形成的机制理论,而这些机制均强调在外眼墙的形成阶段,热带气旋外围有大量对流及位势涡度扰动的发生发展。因此,热带气旋外眼墙的形成很有可能是多种机制相互作用导致的。最后,提出研究多种机制相互作用导致外眼墙处的对流和位势涡度扰动的发生发展过程具有重大意义。

关键词:热带气旋, 外眼墙形成, 物理机制, 综述

中图分类号: P444 文献标识码: A 文章编号: 1007-9033(2017)03-0165-06

doi:10.12013/qxyjzyj2017-026

A Review of the Mechanism of the Secondary Eyewall Formation in Tropical Cyclone

Yang Wen¹, Huang Shan²

1. Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211100, China
2. PLA 94116 Force, Hetian 848000, China

Abstract: The researches on the mechanism of the secondary eyewall formation was introduced in this paper, including the large-scale environmental field and the vortex internal dynamics processes such as Vortex Rossby waves theory, axisymmetrization process, filamentation, β -skirt axisymmetrization hypothesis and boundary layer unbalanced dynamics process. With the development of secondary eyewall formation mechanism, it was suggested that the interactions of multiple mechanisms may lead to secondary eyewall formation. In addition, several mechanisms emphasized that a large number of outer convections and potential vorticity disturbances occurred during the secondary eyewall formation period. Therefore, it is of great significance to study the development process of the multiple mechanisms interactions, which can result in the outer convections and potential vorticity disturbances.

Key words: tropical cyclone; secondary eyewall; physical mechanism; review

0 引言

过去的数十年间,人们对热带气旋(tropical cyclone, TC)的双眼墙结构及强度的演变已有比较基

础的认识(Black and Willoughby, 1992; Kossin and Sitkowski, 2009; Hence and Houze, 2012)。TC 外眼墙形成(secondary eyewall formation, SEF)过程是指在单眼墙结构外围存在接近环状的深对流的形

收稿日期: 2017-05-26; 修订日期: 2017-08-15。

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号:41675058)。

作者简介: 杨 雯,硕士生,主要从事中小尺度气象学研究, E-mail: 562243521@qq.com.

成过程,通常位于2—3倍最大风速半径(radius of maximum wind, RMW)处,多数情况下该过程还伴随切向风次极大风速的形成。内外眼墙之间存在的无降水或弱降水的环状区域被称为moat区(Houze et al, 2007),内眼墙外的moat区及其外围的外眼墙共同组成了TC的双眼墙结构。在外眼墙形成过程中,新形成的外眼墙强度逐渐增加,到达内眼墙边界层的内流逐渐减弱,来自海洋表面的感热和潜热通量随之减少,内眼墙强度开始减弱。当此过程维持一段时间后,最大风速半径将最终跳跃至外眼墙处。此时,外眼墙强度较内眼墙更大,成为了新的主要眼墙。内眼墙随时间逐渐消散,TC再次回到单眼墙结构,双眼墙替换(eyewall replacement cycle, ERC)过程完成。

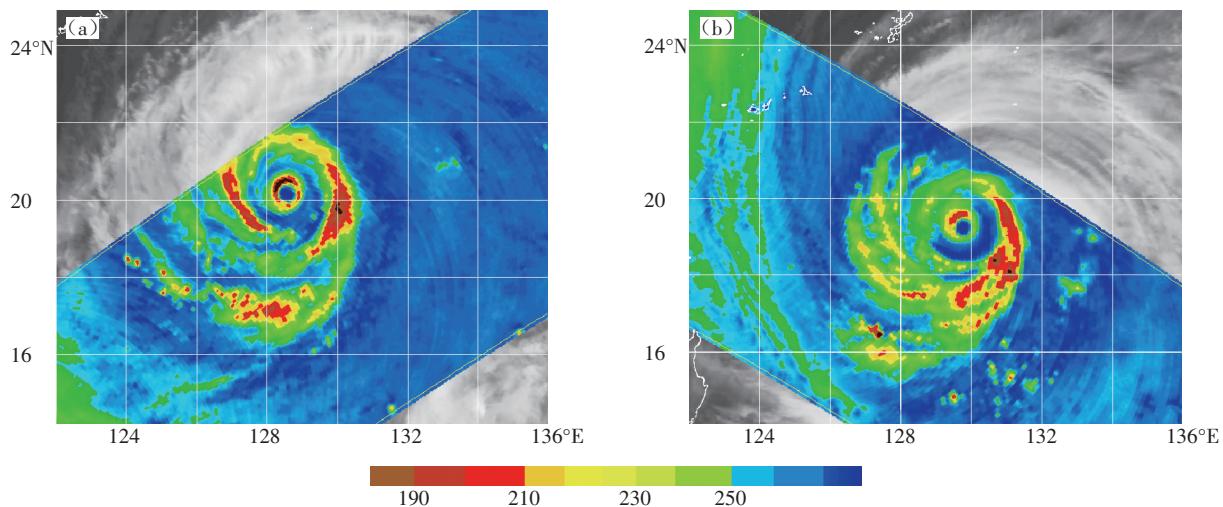


图1 2004年6月18日11时UTC(a)和18时UTC(b)TC Dianmu双眼墙替换过程微波图像(色阶:亮温;单位:K)(http://199.9.2.143/tc_pages/tc_home.html)

Fig. 1 Microwave images of TC Dianmu in its ERC period at 11:00 UTC (a) and 18:00 UTC (b) 18 June 2004 (shaded:brightness temperature; unit: K)(http://199.9.2.143/tc_pages/tc_home.html)

统计发现,西太平洋80%的强TC在其生命史中会经历至少一次双眼墙替换过程(Hawkins et al, 2006; Kuo et al, 2009)。由于双眼墙现象发生频繁且伴随强度和结构的剧烈变化,因此对TC的路径和强度预报存在较大的困难(Willoughby, 2007; Sitkowski et al, 2011; Kossin and Sitkowski, 2012)。然而,由于观测资料在时间和空间上的精度以及模式对双眼墙TC模拟能力的限制,对外眼墙形成的关键机制仍然缺乏准确的了解。为了进一步提高对TC预报的能力,研究导致TC外眼墙形成的内部机制具有重要意义。文中,对近几十年来有关TC外眼墙形成过程的大尺度环境场和涡旋内部动力学过

程等的研究进行综述,以期加深对TC双眼墙结构形成和维持机制的理解。

1 大尺度环境场对外眼墙形成过程的影响

气象学者 Willoughby 在 1979 年提出摩擦可以产生新的眼墙,并于 1982 年提出外眼墙是由主眼墙产生的对流尺度的下沉运动导致的,气旋的强入流运动导致了空气的辐合辐散,进一步产生了新的对流运动。Nong 和 Emanuel(2003)假设初始的有限振幅在 TC 与斜压涡旋、地形、海表面温度变化的相互作用下形成,海面风与其引起的热量交换之间的正反馈机制使得这种有限振幅的扰动可以持续发

展,最终形成外眼墙。Zhou 和 Wang(2013)研究指出,环境场要素与双眼墙结构间存在明显的关联。王国荣(2007)提出,环境风垂直切变对 TC 的结构有重要的影响,外眼墙的形成会阻挡低层空气进入内眼墙。由于环境风垂直切变的作用,这种阻挡作用存在比较明显的方位选择性,从内眼墙流入外眼墙的空气对 TC 外眼墙的发展起到有利作用,而环境场中高层带来的通风作用不利于外眼墙的发展。环境场对 TC 外眼墙的影响不仅仅局限于环境风垂直切变的作用,还有其他因素的影响。例如,Wang (2009)以及 Hill 和 Lackmann(2009)通过理想试验研究发现,当环境中的相对湿度较高时涡旋会发展得更大,并且在发展的过程中经历双眼墙替换。造成这一结果的可能原因是,较高的相对湿度导致 TC 外围的对流释放更多的潜热,进而使上升运动增强,利于外眼墙的形成。由于这些影响的复杂性,目前为止很少有研究从更加一般的热力学或者动力学框架进行过讨论,这些因素对 TC 外眼墙形成过程的影响仍然是一个具有挑战性的科学问题。

2 TC 涡旋内部动力学过程对外眼墙形成过程的影响

近年来,随着观测手段和高分辨率数值模式的进步,针对 TC 内部动力学过程的研究取得了实质性的进展。

2.1 涡旋罗斯贝波理论

MacDonald(1968)首先发现了 TC 的螺旋雨带与罗斯贝波常常具有相似的扰动特征,Guinn 和 Schubert(1993)将这些小扰动定义为涡旋罗斯贝波(Vortex Rossby waves, VRWs)。TC 眼墙处的强位势涡度(potential vorticity, PV)沿径向向外减小。理论和数值模拟都证明了位势涡度梯度有利于涡旋罗斯贝波的发展(Guinn and Schubert, 1993; Chen and Yau, 2000; Wang, 2002a, 2002b)。Montgomery 和 Kallenbach(1997)建立了涡旋罗斯贝波的完整理论基础,并且分析了涡旋罗斯贝波在涡旋和结构变化中的重要性。其研究指出,涡旋罗斯贝波在径向方向的传播速度与位势涡度梯度成正比,当其向涡旋外传播时,随位势涡度梯度的减小传播的速度逐渐降低,因而涡旋罗斯贝波可能会停滞在某个半径处,这个半径称为驻留半径,在这个半径之外涡旋罗斯贝波的传播会受到抑制。因此,涡旋罗斯贝波外传的能量将被局限在驻留半径处,此处风速增大导致外眼墙在此产生。近年来,有研究(Hogsett

and Zhang, 2009; Abarca and Corbosiero, 2011; Martinez et al, 2011)认为涡旋罗斯贝波有可能对外眼墙的形成有直接作用,并且发现 TC 外眼墙的形成位置与涡旋罗斯贝波的驻留位置之间存在较明显的一致性。此外,Zhou 和 Wang(2013)指出,涡旋罗斯贝波可以通过涡旋动量通量辐合加速平均切向风,这一过程可以导致次极大风速的形成,是外眼墙形成的必要条件。

2.2 轴对称化过程

TC 中的轴对称化过程已经在很多研究中得到了充分的讨论(Melander et al, 1987; Dritschel and Waugh, 1992; Fuentes, 2005; 沈武等, 2006)。Kuo 等(2004)利用一个简单的二维正压模式,讨论轴对称化机制对外眼墙形成过程的贡献。该试验在模式当中放入了一个主涡旋,并在外围放入了强度较弱的涡度块,结果显示,一个较强的主涡旋能够使周围的一个或多个较弱的涡度块轴对称化,一段时间后形成类似外眼墙结构的涡度环(图 2)。

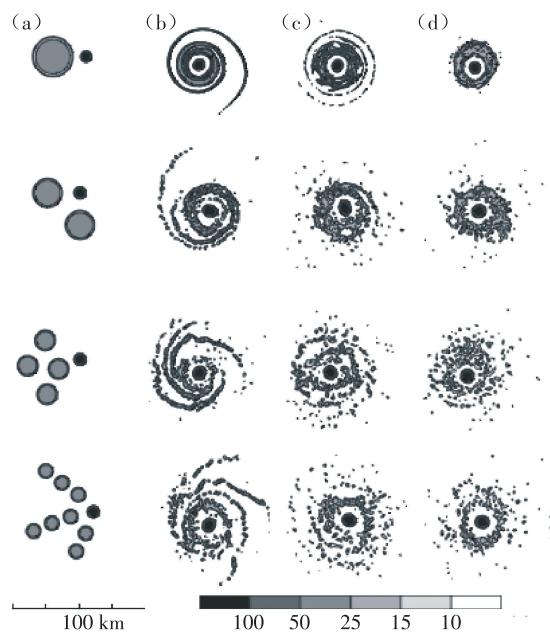


图 2 模拟时间为 0 h(a)、3 h(b)、6 h(c)、12 h(d) 时 TC 轴对称化过程(色阶: 涡度; 单位: s^{-1}) (Kuo et al, 2004)

Fig. 2 TC axisymmetric process diagram at the time of 0 h (a)、3 h (b)、6 h (c)、12 h (d) (shaded: vorticity; unit: s^{-1}) (Kuo et al, 2004)

2.3 涡丝化作用

Rozoff 等(2006)考虑正压的非辐射流体,计算涡度块被拉伸成丝状的时间,将其定义为涡丝化时

间(filamentation time, τ_{fil}),并给出了其计算式:

$$\begin{aligned}\tau_{fil} &= 2(S_1^2 + S_2^2 - \zeta^2)^{-1/2} \\ &= \left(-\frac{\langle v_t \rangle}{r} \frac{\partial \langle v_t \rangle}{\partial r} \right)^{-1/2}\end{aligned}\quad (1)$$

其中, $\frac{1}{2}S_1$ 为拉伸形变; $\frac{1}{2}S_2$ 为剪切形变; $\frac{1}{2}(S_1^2 + S_2^2)^{1/2}$ 为总形变; ζ 为相对涡度; $\langle F \rangle$ 代表对物理量 F 进行时间和方位角平均; v_t 为切向风速。Rozoff 等(2006)认为, 涡丝化时间越长拉伸作用越小, 就越有利于对流的发展, 当涡丝化时间大于 30 min 时, 深对流才能发展起来, 并把涡丝化时间小于 30 min 的环状区域称作涡丝化区域。同时指出, 双眼墙结构中 moat 区形成的原因是其处在内外两个同心正涡度环之间, 涡丝化时间很短, 低层发生的对流极易消散使对流不能发展。但 Wang(2008)提出与 Rozoff 等(2006)不同的观点, 其认为 TC 涡丝化不能使低层对流完全消散, 因此对 moat 区的形成起不到关键作用, 但是对内螺旋雨带的形成有重要作用。Houze 等(2007)发现, 利用涡丝化作用理论得到的 moat 区位置与观测得到的 moat 区位置一致, 证明了 Rozoff 等(2006)涡丝化理论的合理性。

2.4 β -skirt 轴对称化外眼墙形成假说

通过对很多成熟 TC 的观测, Mallen 等(2005)

发现在完全发展的 TC 主眼墙外存在负径向涡度梯度区, 这一区域涡度径向向外衰减, 该区域 β 作用很重要, 因此被定义为 β 边区(即 β -skirt)。 β 边区内的涡度梯度比主眼墙附近的梯度小很多, 但同样存在重要的动力过程, 如 β 边区内有对流形成。然而, 这个对流被很多因素限制, 涡丝化时间、对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)、对流抑制能量(convective inhibition, CIN)共同决定了深对流的形成时间和位置。 β 边区内的深对流向 TC 平均切向气流输送动能和涡度, 进而形成一个或多个局地气旋大风区。通过 TC 边界层和海表面的潜热和感热交换, 大风区将增强形成更多的对流。在对流重叠区扰动动能和对流得到发展, 大风区得到加强。在主涡旋环流的轴对称作用下, 将有可能形成外眼墙结构(图 3)(Terwey and Montgomery, 2008)。仇欣(2010)利用理想数值试验证明, 涡旋罗斯贝波能够产生一个更加广阔的 β 边区, 进而形成外眼墙结构。 β -skirt 轴对称化外眼墙形成假说可以通过对 TC 的观测进行检验。通过下投式探空仪和飞机测量可以计算出方位角平均径向风廓线, 从而证明低层存在涡丝化时间尺度很大的 β 边区。下投式探空仪也可用于计算该区域的 CAPE 和 CIN, 当 CIN 足够小时, 该区域能够频繁发生对

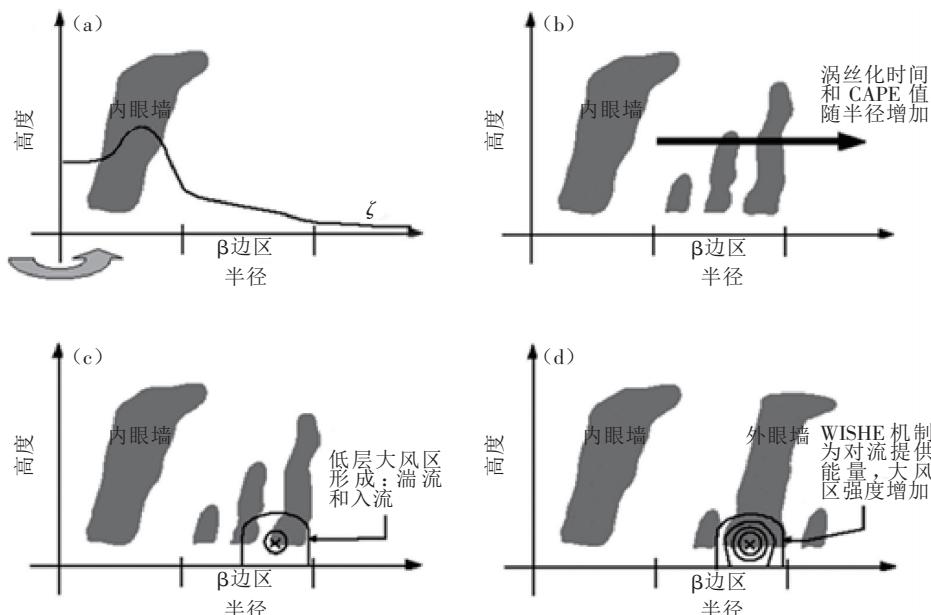


图 3 β -skirt 轴对称化外眼墙形成假说概念图(a—d 分别表示外眼墙形成的 4 个阶段)
(Terwey and Montgomery, 2008)

Fig. 3 Conceptualized schematic of β -skirt axisymmetric secondary eyewall formation hypothesis (a—d respectively represent the four stages of secondary eyewall formation process)(Terwey and Montgomery, 2008)

流(Terwey and Montgomery,2008)。

2.5 边界层非平衡动力机制

Huang 等(2012)对 TC Sinlaku(2008)进行了数值模拟,很好地再现了其外眼墙形成和双眼墙替换过程。分析模拟结果发现,外眼墙形成过程的开始伴随着切向风和边界层内流的增强。当 TC 外围存在较强的边界层内流时,绝对角动量向内输送使得切向风速快速增大且范围扩大,在边界层顶附近将会形成一超梯度风大值区。当空气质点经过此区域时,受到超梯度力的作用使得速度降低并产生辐合,在内眼墙外产生上升运动。当热力和动力条件均满足时,此上升运动有可能进一步激发上方深对流的发展甚至外眼墙的形成。Huang 等(2012)研究发现,边界层非平衡动力机制是导致内眼墙外超梯度风区域产生深对流的重要机制。Abarca 和 Montgomery(2013)以及 Kepert(2013)通过一系列试验证实了 Huang 等(2012)对于外眼墙形成机制的假设。Abarca 和 Montgomery(2013)进一步证明,边界层动力机制可以使内眼墙外产生风速次极大值。但是,Kepert(2013)的最新研究指出,尽管在外眼墙形成过程之前存在切向风的增强,但是也不能说明其为外眼墙形成的直接原因。

尽管在近几十年对具有双眼墙结构 TC 的数值模拟和观测取得了不少成果,但是在以上的几种假说中至今还没有哪一种被公认为 TC 外眼墙形成的主要机制。比如,Judt 和 Chen(2010)认为涡旋罗斯贝波对 TC 外眼墙形成没有直接的贡献。Terwey 和 Montgomery(2008)也指出,只有当涡丝化时间足够长,在对流发展的情况下 TC 外眼墙才会形成。

同时,有研究提出 TC 外眼墙需要多个机制共同作用才能生成。Judt 和 Chen(2010)指出,外眼墙形成前 moat 区先形成,且 moat 区内的位势涡度梯度值接近 0,不利于从眼墙向外发展和传播的涡旋罗斯贝波抵达外眼墙的半径位置。而 moat 区部分会受到涡丝化作用的影响(Rozoff et al,2006),即 moat 区内涡丝化时间较短会抑制涡旋罗斯贝波的传播。因此,外眼墙形成过程受到涡丝化和涡旋罗斯贝波的共同作用。此外,仇欣(2010)指出,涡旋罗斯贝波的凝滞半径机制和 β 边区轴对称化在外眼墙形成过程中可以相互合作,涡旋罗斯贝波不断向外传播并在其凝滞半径处产生一次级环流。同时,凝滞半径处的切向风速逐渐增大,涡度径向梯度在凝滞半径处也随之增大,导致 β 边区径向外延伸。涡旋罗斯贝波的凝滞半径机制有利于建立一个广阔的

β 边区,在此基础上 β 边区轴对称化开始发挥作用。随着对外眼墙形成机理的研究不断深入,证明多种机制相互作用导致外眼墙的形成是很有可能的。

3 结束语

双眼墙替换常常会造成 TC 强度和结构的突变,因此其机理和内部动力机制的研究一直是近年来的热点问题。尽管关于外眼墙形成和双眼墙替换的机制理论已经取得了许多研究成果,但外眼墙形成理论目前还存在很大的分歧,不可否认的是外眼墙的形成很有可能受到多种机制的共同作用。关于 TC 双眼墙的成因,国内外许多学者从大尺度环境场作用到 TC 内部涡旋动力机理等方面都进行了比较深入的分析,其中无论是轴对称化过程、 β -skirt 轴对称化外眼墙形成假说还是边界层非平衡动力机制等,都强调在外眼墙形成过程中 TC 外围有大量的对流及位势涡度扰动的发生发展。同时,Houze 等(2009)在 TC Ophelia(2005)中首次观测到了这种现象并证实了这一结论。因此,研究多种机制相互作用对 TC 外眼墙处的对流和位势涡度扰动的发生发展具有重大意义。但是,要进一步验证影响外眼墙形成和双眼墙替换的机制及其相互作用,还需要更多的 TC 观测和模拟结果。

参考文献(References)

- Abarca S F, Corbosiero K L. 2011. Secondary eyewall formation in WRF simulations of hurricanes Rita and Katrina(2005)[J]. Geophys Res Lett, 38, L07802. doi:10.1029/2011GL047015.
- Abarca S F, Montgomery M T. 2013. Essential dynamics of secondary eyewall formation[J]. J Atmos Soc, 70(10):3216-3230.
- Black M L, Willoughby H E. 1992. The concentric eyewall cycle of Hurricane Gilbert[J]. Mon Wea Rev, 120(6):947-957.
- Chen Y, Yau M K. 2000. Spiral bands in a simulated hurricane. Part I: Vortex rossby wave verification[J]. J Atmos Sci, 60(10):1239-1256.
- Dritschel D G, Waugh D. 1992. Quantification of the inelastic interaction of unequal vortices in two-dimensional vortex dynamics [J]. Phys Fluids, 4(8):1737-1744.
- Fuentes O U V. 2005. Vortex filamentation its onset and its role on axisymmetrization and merger[J]. Dyn Atmos Oceans, 40(1):23-42.
- Guinn T A, Schubert W H. 1993. Hurricane spiral bands[J]. J Atmos Sci, 50(20):3380-3403.
- Hawkins J D, Helveston M, Lee T F, et al. 2006. Tropical cyclone multiple eyewall configurations[C]//American Meteorological Society. 27th Conf. on Hurricane and Tropical Meteorology. 6B:1.
- Hence D A, Houze Jr R A. 2012. Vertical structure of tropical cy-

- clones with concentric eyewalls as seen by the TRMM Precipitation Radar[J]. *J Atmos Sci*, 69(3):1021-1036.
- Hill K A, Lackmann G M. 2009. Influence of environmental humidity on tropical cyclone size[J]. *Mon Wea Rev*, 137(10):3294-3315.
- Hogsett W, Zhang D L. 2009. Numerical simulation of Hurricane Bonnie(1998). Part III: Energetics[J]. *J Atmos Sci*, 66(9):2678-2696.
- Houze Jr R A, Lee W C, Bell M M. 2009. Convective contribution to the genesis of Hurricane Ophelia(2005)[J]. *Mon Wea Rev*, 137(9):2778-2800.
- Houze R A, Chen S S, Smull B F, et al. 2007. Hurricane intensity and eyewall replacement[J]. *Science*, 315:1235-1239.
- Huang Y H, Montgomery M T, Wu C C. 2012. Concentric eyewall formation in Typhoon Sinlaku(2008). Part II: Axisymmetric dynamical processes[J]. *J Atmos Soc*, 69(2):662-674.
- Judit F, Chen S S. 2010. Convectively generated potential vorticity in rainbands and formation of the secondary eyewall in Hurricane Katrina of 2005[J]. *J Atmos Sci*, 67(3):3581-3599.
- Kepert J D. 2013. How does the boundary layer contribute to eyewall replacement cycles in axisymmetric tropical cyclones[J]. *J Atmos Soc*, 70(9):2808-2830.
- Kossin J P, Sitkowski M. 2009. An objective model for identifying secondary eyewall formation in hurricanes[J]. *Mon Wea Rev*, 137(3):876-892.
- Kossin J P, Sitkowski M. 2012. Predicting hurricane intensity and structure changes associated with eyewall replacement cycles [J]. *Wea Forecasting*, 27(2):484-488.
- Kuo H C, Chang C P, Yang Y T, et al. 2009. Western North Pacific typhoons with concentric eyewalls[J]. *Mon Wea Rev*, 137(11):3758-3770.
- Kuo H C, Lin L Y, Chang C P, et al. 2004. The formation of concentric vorticity structures in typhoons[J]. *J Atmos Sci*, 61(22):2722-2734.
- MacDonald N J. 1968. The evidence for the existence of Rossby type waves in the hurricane vortex[J]. *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]. *J Atmos Sci*, 62(2):408-425.
- Martinez Y, Brunet G, Yau M K, et al. 2011. On the dynamics of concentric eyewall genesis: Space-time empirical normal modes diagnosis[J]. *J Atmos Sci*, 68(3):457-476.
- Melander M V, McWilliams J C, Zabusky N J. 1987. Axisymmetrization and vorticity-gradient intensification of an isolated two-dimensional vortex through filamentation[J]. *J Fluid Mech*, 178:137-159.
- Montgomery M T, Kallenbach R J. 1997. A theory for vortex Rossby-waves and its application to spiral bands and intensity changes in hurricanes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 123:435-465.
- Nong S, Emanuel K. 2003. A numerical study of the genesis of concentric eyewalls in hurricanes[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 129(595):3323-3338.
- 仇欣. 2010. 影响台风强度变化的同心眼墙替换和海—气相互作用机理研究[D]. 南京:南京大学. Qiu X. 2010. Study on the mechanism of eyewall replacement cycle and air-sea interaction affecting typhoon intensity[D]. Nanjing: Nanjing University. (in Chinese)
- Rozoff C M, Schubert W H, McNoldy B D, et al. 2006. Rapid filamentation zones in intense tropical cyclones[J]. *J Atmos Sci*, 63(2):325-340.
- 沈武,周嘉陵,马镜娴,等. 2006. 非轴对称双涡相互作用的研究[J]. *气象学报*, 64(4):453-463. Shen W, Zhou J L, Ma J X, et al. 2006. A study on the interaction of non-axisymmetric binary vortices[J]. *J Meteorol Res*, 64(4):453-463. (in Chinese)
- Stikowski M, Kossin J P, Rozoff C M. 2011. Intensity and structure changes during hurricane eyewall replacement cycles[J]. *Mon Wea Rev*, 139(12):3829-3847.
- Sun Y Q, Jiang Y, Tan B, et al. 2013. The governing dynamics of the secondary eyewall formation of Typhoon Sinlaku (2008) [J]. *J Atmos Sci*, 70(12):3818-3837.
- Terwey W D, Montgomery M T. 2008. Secondary eyewall formation in two idealized, full-physics modeled hurricanes[J]. *J Geophys Res*, 113(D12):1113-1126.
- 王国荣. 2007. 双眼墙台风 Wilma 的数值模拟及分析[D]. 南京:南京信息工程大学. Wang G R. 2007. Numerical simulation and analysis of concentric eyewall Typhoon Wilma[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology. (in Chinese)
- Wang Y. 2002a. Vortex rossby waves in a numerically simulated tropical cyclone. Part II: The role in tropical cyclone structure and intensity changes[J]. *J Atmos Sci*, 59(7):1239-1262.
- Wang Y. 2002b. An explicit simulation of tropical cyclones with a triply nested movable mesh primitive equation model: TCM3. Part II: Model refinements and sensitivity to cloud microphysics parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 130(12):3022-3036.
- Wang Y. 2008. Rapid filamentation zone in a numerically simulated tropical cyclone[J]. *J Atmos Sci*, 65(4):1158-1181.
- Wang Y. 2009. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity[J]. *J Atmos Sci*, 66(5):1250-1273.
- Willoughby H E. 1979. Excitation of spiral bands in hurricanes by interaction between the symmetric mean vortex and a shearing environmental steering current[J]. *J Atmos Sci*, 36(7):1226-1235.
- Willoughby H E. 2007. Forecasting hurricane intensity and impacts [J]. *Science*, 315:1232-1233.
- Willoughby H E, Clos J A, Shoreibah M G. 1982. Concentric eyewalls, secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex[J]. *J Atmos Sci*, 39(2):395-411.
- Yang Y T, Kuo H C, Hendricks E A, et al. 2013. Structural and intensity changes of concentric eyewall typhoons in the western North Pacific basin[J]. *Mon Wea Rev*, 141(8):2632-2648.
- Zhou X, Wang B. 2013. Large-scale influences on secondary eyewall size[J]. *J Geophys Res*, 118(19):11088-11097.