台风双眼墙结构的数值模拟及分析

李　宁[1,3]　王国荣[2,3]　闵　颖[3]

（1. 北京华风气象影视信息集团有限责任公司，100081；
2. 北京市气象台；3. 南京信息工程大学气象灾害重点实验室）

提　要：利用WRF数值模式模拟了2005年大西洋飓风Wilma双眼墙结构的形成及其取代过程。结果表明：（1）双眼墙形成后，外眼墙会逐渐加强内缩，并最终取代内眼墙，最大垂直速度和切向风速的最大径向梯度位于最大切向速度的内侧是台风加强过程中眼墙内缩的主要原因；（2）眼墙之间的moat区具有强烈旋转差异特性，moat区中主要以弱的上升运动为主，在中低层为条件不稳定层结，3～5km高层上有下沉运动分布；（3）外眼墙的形成可能与中高层正的位涡下传有关，其形成的位置可能与低层眼墙位涡的外传和眼墙外位涡的内传的相遇位置有关。

关键词：双眼墙　眼墙取代过程　moat区　异常位涡

引　言

在一些强台风发展过程中，眼墙外侧的螺旋雨带（云带）会形成一个围绕眼墙的部分或完整的集中降水带，这种同时存在内外两个环状强对流带的结构称为台风的双眼墙结构[1-3]，内眼墙和外眼墙之间有一弱的回波区，称为moat区。双眼墙结构是引起台风强度和结构突变的重要原因之一。双眼墙结构出现后，外眼墙逐渐增强并内缩，内眼墙逐渐变弱，最后外眼墙取代内眼墙，台风重新回到单眼墙状态。一般而言，上述过程在24h内即可完成，因此常常伴随着台风强度和结构的突变，给预报带来很大困难[4]。

近年来，对双眼墙结构的形成及其眼墙取代过程的研究越来越引起科学家们的关注。这方面已有一些结果出现：（1）文献[1]把外眼墙的生成与螺旋雨带相联系，认为外眼墙是由外围的螺旋雨带在轴对称过程中形成的。（2）Molinari等[5-7]认为涡动角动量通量可能与双眼墙的形成有关，Nong等[8]指出，初始扰动的存在是双眼墙形成及其眼墙取代过程发生的必要条件。（3）Kossin等[9]研究了双眼墙的正压稳定性问题，Kuo等[10]将双眼墙的形成理想化为一个小而强的涡旋和一个大而弱的涡旋的双涡交互作用，结果表明中心涡旋强度在双眼墙形成过程中起关键作用。张庆红[11]分析了台风Winnie双眼墙的相互作用，认为Winnie的双眼墙之间通过螺旋雨带以VRW或其他形式相互作用。

由于缺乏时时的双眼墙结构的观测资料，因此以往的研究主要集中于对双眼墙结构的描述、双眼墙形成机制的假设和在简单模式（如二维正压模式）的模拟上，因此有必要用高分辨率数值模式再现真实大气中双眼墙的形成及眼墙取代过程，以期提高对台风双眼墙结构的认识，为提高台风强度和风雨预报提供有益线索和思路。

1 模式简介和方法说明

2005年发生在大西洋上的飓风Wilma是大西洋上出现的最强飓风之一，造成了巨大的灾害。据不完全统计，造成了23人死亡，其经济损失高达206亿美元。在Wilma的生命史中出现了飓风的双眼墙结构及整个眼墙取代过程。

利用WRF（V2.1.2）对Wilma进行显式模拟，模拟区域采用四重嵌套，由外及里为网格A、B、C、D区，水平分辨率分别为54km、18km、6km和2km，垂直坐标为η坐标，垂直方向分为不等距的31层，模式层顶气压为50hPa，地面气压为1013hPa。A区和B区参数化方案包括Lin等微物理方案，rrtm长波辐射方案，Dudhia短波辐射方案，Monin-Obukhov地面层方案，termal陆面方案，YSU边界层方案，Betts-Miller-Janjic积云对流参数化方案。C区和D区除了不包含积云对流参数化方案以外，其余方案均与A区和B区相同。

模式初始资料采用NCEP/NCAR 1°×1°的再分析资料，模拟时间从2005年10月19日06时到23日06时（世界时，下同），其中A区和B区从19日06时开始积分，时间步长分别为270s和90s；C区和D区从21日00时开始积分，初始条件和边界条件均来自B区的模式结果，时间步长分别为30s和10s。

在柱坐标系统下分析台风比较方便。因此，本文所有模式输出变量的计算均在柱坐标下完成。在柱坐标下，对于任何一个变量X，均可分成轴对称和非对称两部分。

$$X = X_s + X_a$$

其中，X_s为轴对称分量，X_a为非对称分量。X_s可以表示为

$$X_s(r,z) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} X(r,\theta,z)\mathrm{d}\theta$$

非对称部分X_a可表示为

$$X_a(r,\theta,z) = X - X_s$$

无特别说明，本文内提到的沿方位向平均均是指X_s。

2 模拟结果分析

2.1 模拟结果检验

图1是飓风Wilma的模拟路径与最佳路径（best track）的比较，由于没有对初始场进行订正（如台风bogus，资料同化等），初始台风中心位置偏离实况（best track）中心18km，随着模式开始积分，该距离迅速增大（4h内增加到50km），此后模拟的台风中心与实况之间的距离维持在45km左右，这种状态持续到模拟积分24h。加入网格C和网格D的积分以后，路径误差迅速下降，从164km（第48h）下降到95km（第54h）。此后路径误差维持在100km左右直到第75h，第75h以后，误差开始快速增长直到积分结束。对比官方给出的预报误差，发现本次模拟的路径误差在前48h要略高于官方误差，而60h小时以后的误差则小于官方误差。

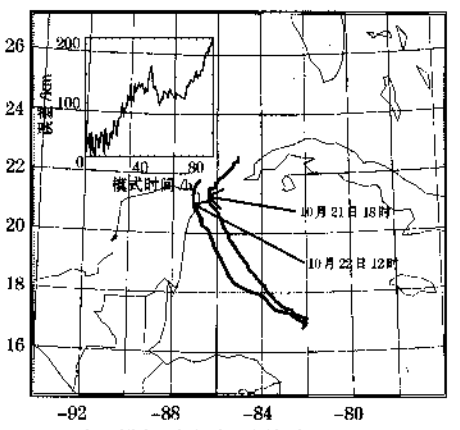


图1 模拟路径与最佳路径的比较

实线为模拟路径，虚线为最佳路径

虽然，模拟的飓风路径并不是很理想，但是，上述模拟过程成功地再现了 Wilma 双眼墙的形成和眼墙取代过程。且实况表明，Wilma 双眼墙维持和取代过程中其中心强度约为 910hPa，本次模拟过程中出现双眼墙结构时，最低海平面气压也在 910hPa 左右，由于本文的重点在于分析双眼墙台风的内部结构以及双眼墙的形成和取代问题，故分析时段主要集中于网格 C 和网格 D 启动后的 36 小时内，因此我们认为上述模拟结果对本文分析仍然是有效和可信的。

2.2　双眼墙结构及眼墙内缩、取代过程

图 2 显示了双眼墙的形成及海平面最低气压的演变情况。从 10 月 21 日 06 时到 14 时海平面气压由 918hPa 下降到 912hPa，此阶段内眼墙缓慢的向内收缩，此后的 4 小时，海平面气压上升了 3hPa，对应的眼墙半径也向外移动了约 10km。从 22 日 00 时开始，双眼墙结构出现。此后的 6 小时，内眼墙和外眼墙并存①，且均向内收缩，对应的最低海平面气压也不断下降（从 914hPa 下降到 905hPa），从 22 日 06 时开始外眼墙取代内眼墙的过程开始出现，此阶段内眼墙半径出现跳跃式分布，表明最大垂直速度在两眼墙之间移动，即眼墙取代过程正在进行。此时，最低海平面气压停止下降，并且出现明显的波动，当眼墙取代完成后（22 日 12 时以后），外眼墙成为台风的主眼墙，此后该眼墙继续向内收缩。上述眼墙取代过程的特征均与观测事实（文献 [1，3]）符合。

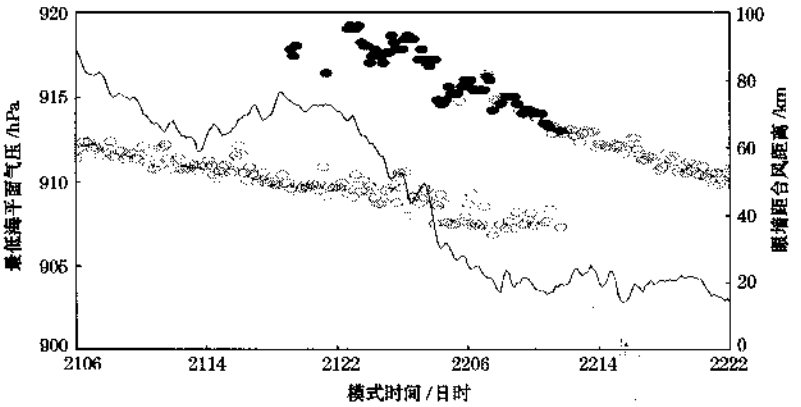


图 2　台风强度与双眼墙的形成

实心圆为外眼墙半径，空心圆为内眼墙半径，实线为台风中心气压；以上结果在网格 C 中计算得到

图 3 是 D 区模式结果 3km 高度上切向风速廓线，可以看到模式时间第 18h，沿方位向平均最大切向风速出现在约 55km 处，最大风速达 68m·s^{-1}，到第 28.83333h，最大风速半径已向内收缩到 50km 以内，风速也下降了约 2m·s^{-1}，同时在约 80km 处出现一个次风速大值中心，风速约为 58m·s^{-1}，该次风速大值中心对应双眼墙中外眼墙的风速大值，到第 33.50000h 时，风速廓线呈明显的双峰型，分别对应台风的内外眼墙，内峰出现在约 45km 处，风速为 64m·s^{-1}，外峰出现在约 70km 处，风速达到

① 此处，当 3km 高度上有两个独立的垂直速度大于 0.5m·s^{-1}中心时，按照其离台风中心半径，分别定义其为内眼墙和外眼墙；当只有一个明显中心时，一律定义为内眼墙。

65m·s^{-1}以上。可以看到，从第28.83333～33.50000h，内眼墙最大风速半径已基本停止向内收缩，且风速略有减小，表明此阶段内眼墙强度略有减弱；而外眼墙则快速向内收缩（内缩了10km以上）并伴随着最大速度的快速增长（从58～65m·s^{-1}），此过程对应着外眼墙的迅速增强。到模式第38.33333h，增强的外眼墙阻挡了低层水汽和热量传入到内眼墙，使内眼墙强度减弱，而外眼墙则进一步加强，因此切向风速廓线又表现为单峰型，最大值位于约66km处，较第33.50000h又有所内缩，且最大风速增强到约70m·s^{-1}，而原先内眼墙对应的风速大值已不存在，表明外眼墙已取代内眼墙成为台风的主眼墙。

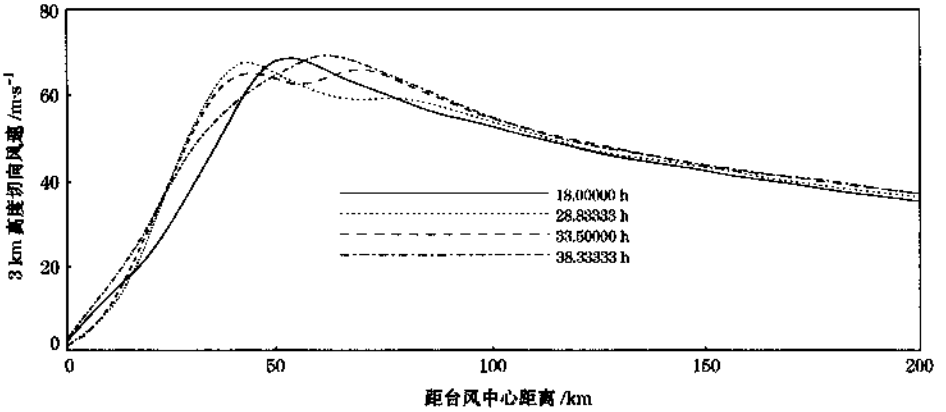


图3 3km高度上沿方位向平均切向速度演变

关于眼墙内缩的机制也有不少假设。图4显示了Wilma沿方位向平均的最大切向风速、最大上升运动以及切向风速最大径向梯度所在半径随时间的变化。可以看到，最大切向风速总是分布在眼墙外侧（最大垂直速度半径与眼墙半径一致），切向风速的最大梯度总是在眼墙靠内一侧。这表明由于眼墙上升运动增强而引起的风速增大会发生在最大切向风速的内侧。当眼墙在自激机制下不断增强，在最大风速半径以内风速的不断增

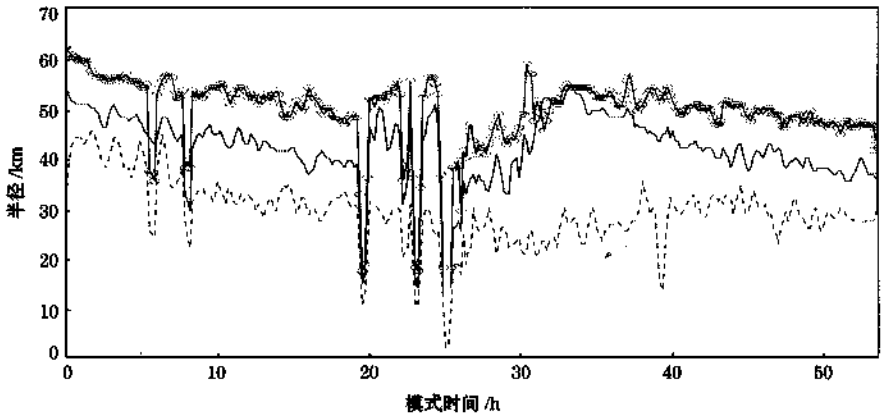


图4 眼墙内缩的风场证据

圈线为沿方位向平均最大切向风速半径；实线为沿方位向平均最大垂直速度半径；虚线为沿方位向平均的切向风速最大径向梯度半径；所有计算在网格区域C的模式输出结果中进行

强，会使台风的最大切向风速向内收缩，因此眼墙也会进一步收缩，眼墙内增强的风速反过来又会加强眼墙的发展，这是一种正反馈机制，这种作用会使眼墙在加强过程中一直向内收缩直至达到某种平衡状态（如梯度风平衡）。

2.3　眼墙与 moat 区的对比分析

moat 区与双眼墙结构形成是紧密相连的，一般认为 moat 区的形成与内外眼墙的强迫下沉有关，但是，moat 区并不是只有出现双眼墙时才有，一些单眼墙台风的眼墙外围也可以看到 moat 区的存在[2]。

图 5a 清楚地显示了内眼墙、外眼墙和 moat 区共存的结构。图 5b、c 分别比较了三者的垂直速度、相当位温的情况。垂直速度分布表明，眼墙内的垂直速度显著大于 moat 区，内眼墙的垂直速度又大于外眼墙

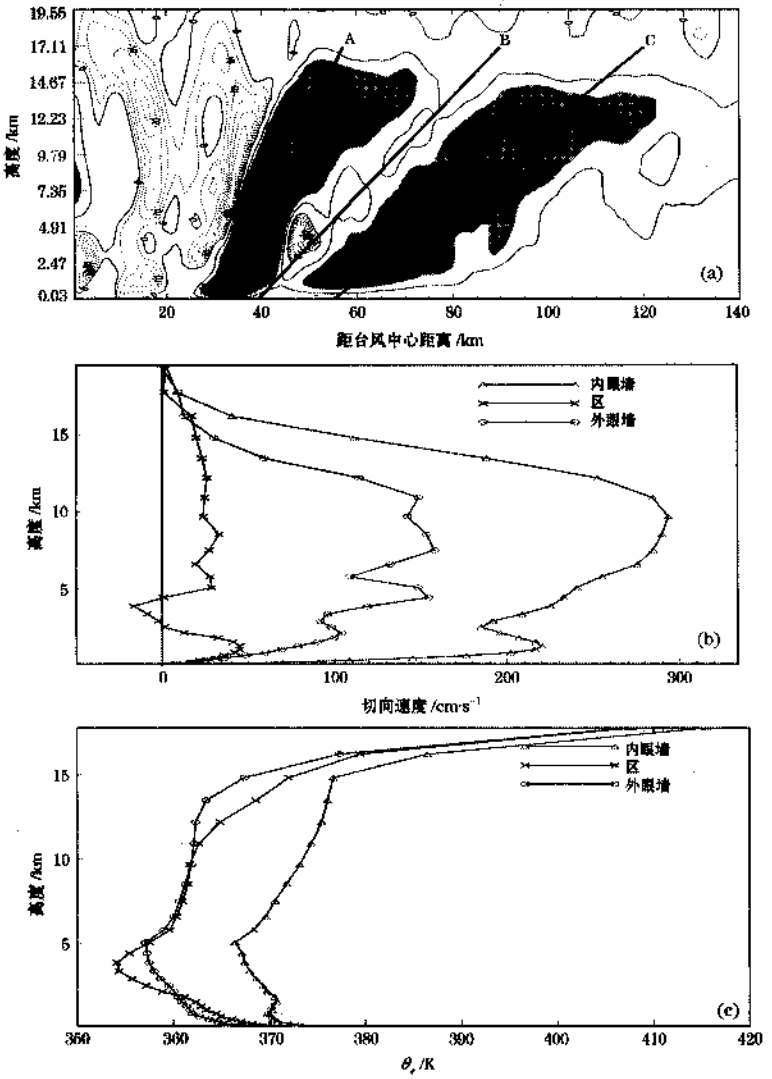


图 5　内眼墙、外眼墙和 moat 区的特征比较

a. 双眼墙及 moat 区结构，阴影区代表垂直速度大于 0.5m·s^{-1}，b. 沿 a 中 A、B、C 的垂直速度比较，c. 沿 a 中 A，B，C 的相当位温比较，模式时间为 32h（2005 年 10 月 22 日 08 时）

垂直速度。从低层到高层，内眼墙垂直速度存在两个极值点，分别位于 2km 以下和 10km，低层的大值中心与边界层内的海气相互作用有关，高层的大值中心对应于高层的加热中心（图略），外眼墙垂直速度随高度分布有 4 个极值点，除低层和高层的大值中心外，在中层 5km 和 7km 处分别存在大值中心，表明其正处于加强阶段。moat 区的垂直速度很小，在 5km 以上具有正的垂直速度，垂直速度分布几乎与高度轴平行，没有大值中心出现。在 2km 到 5km 高度内，垂直速度为负，即该高度层内主要为下沉气流分布，2km 以下又转为上升运动，且在低层有一大值中心。该廓线分布与 Dodge 等[13]的观测分析是吻合的。3 个区域的 θ_e 表明内外眼墙在 5km 高度以下都有条件性不稳定存在，但在 2km 以下，内眼墙 θ_e 内有条件性稳定层存在。moat 区内低层（4km 以下）的空气也是条件性不稳定的，且更加明显。内眼墙 θ_e 值最大，外眼墙和 moat 的 θ_e 值十分接近，在 5km 以上，3 个区域的 θ_e 都向外倾斜，moat 区的 θ_e 线始终位于两眼墙线 θ_e 之间，但靠外眼墙更近，这可能与 moat 区和外眼墙的相互作用有关①。到了高层（12km 以上），内眼墙空气外流，moat 区中空气来自内眼墙的比例增加，因此其 θ_e 线也相应向内眼墙靠近些。

2.4 外眼墙形成过程及异常位涡演变

Willoughby[1]认为外眼墙是由外围的螺旋雨带在轴对称过程中形成的。Nong 等[8]指出 WISHE 机制是双眼墙形成的重要条件，高层湿位涡沿角动量下传到低层是双眼墙形成的一个重要外部条件。王玉清[14]指出在对流层中层层状云中产生的 PV 扰动下传使近地面（海面）切向风速加大，在 WISHE 机制下使对流加强，是外眼墙形成的可能原因。为了进一步了解外眼墙的形成过程，选取外眼墙尚未形成到基本成型的这段时间（模式第 25～28h），详细查看了外眼墙形成过程中位涡的演变情况。图 6 显示了不同时次异常位涡的分布情况。异常位涡（ξ_a）是通过在 C 区输出结果中将各时次沿方位向平均的位涡减去模式第 25h 沿方位向平均位涡得到的。可以看到初始眼墙外围正 ξ_a 主要发生在对流层中层 5km 高度处和对流层上层流出层内。从 ξ_a 演变的动画上可以清楚地看到正 ξ_a 的主要沿绝对角动量（M）等值线传播。在离台风中心 150km 半径范围以内，M 随半径的增大而增大，但在 150km 处低层出现一个闭合的 M 大值中心，等 M 线也明显折向下。由于 ξ_a 表现为基本沿等 M 线传播，因此眼墙内正的 ξ_a 会随等 M 线向上传播到高层外流层后继续向外传播，对流层顶的 ξ_a 向外传播，对流层中层的眼墙外围正的 ξ_a 向外向上倾斜传播。值得注意的是在近地面约 1km 高度处，眼墙外缘的 ξ_a 除了随眼墙内等 M 线向上然后向外传播以外，还有一部分会在低层直接倾斜向外传播。上述向外传播的 ξ_a 会在 150km 外沿等 M 线向下传播，然后在流入层内被径向向内输送。眼墙外围中层 ξ_a 由于降水的拖曳作用也会向下伸展一段距离，这些向下伸展的涡量也会被径向内流向内向下输送。因此低层内传的这些 ξ_a 会与低层眼墙向外输送的 ξ_a 在眼墙外侧不远处的某一半径相遇，低层（近海面）位涡的堆积能引发 WISHE 作用的增长，在自激作用下这些位涡会进一步发展壮大。而眼墙外围中层的 ξ_a 由于其向下伸展的分量被快速的向内

① 我们用 D 区每 3 分钟输出的模式结果进行粒子轨迹分析，分析表明 moat 区、内外眼墙之间存在明显的相互作用，其中 moat 区中的粒子更容易与外眼墙作用，其属性也更接近外眼墙

输送掉，因而没有明显的 WISHE 作用使其进一步加强。相反，其上部向外的径向速度和底部向内的径向速度将其拉长拉细，有使其减弱的作用。文献［8］指出高层湿位涡沿角动量下传和 WISHE 机制是双眼墙形成的主要原因。高层涡动角动量（EFC）下传能使地面气旋系统加强或是台风增强。虽然此处没有直接计算高层的 EFC，但从图 6 可以推断如果有一中尺度天气系统（如高空槽）与台风系统作用，并向台风系统输送了角动量，那么此角动量异常就可能沿等 M 线向下输送，从而使台风加强。此外，从本文结果来看，这种上层扰动沿角动量的下传可能不是像文献［8］给出的模型中所述的沿眼墙外缘的自下到上倾斜向外的等 M 线向下传播，而是在远离眼墙外围 M 线向下弯折处向下传播。王玉清[14]指出，中层位涡下传引发 WISHE 机制是外眼墙形成的可能原因，但是他没有解释是什么因素决定了外眼墙出现的位置，此处的分析表明低层眼墙外缘外传的异常位涡与从低层环境内传的异常位涡相遇的位置可能决定了将来外眼墙的位置。

3　主要结论

用 WRF 模式对飓风 Wilma 进行了高分辨数值模拟，成功地模拟出双眼墙结构，对数值模式结果的分析表明：

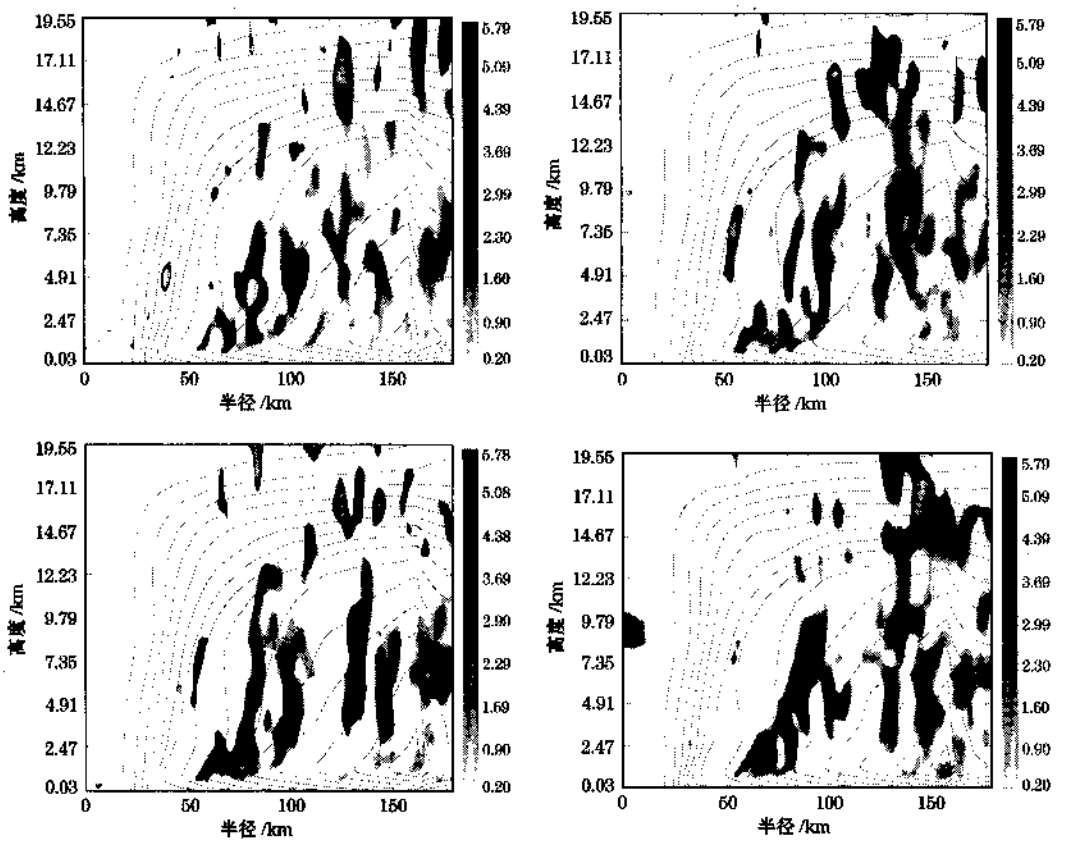


图 6　外眼墙形成过程中异常位涡演变

a. 26 小时；b. 26 小时 18 分；c. 26 小时 54 分；d. 27 小时 54 分

等值线为绝对角动量；阴影为异常位涡分布（仅绘出了小于 6 个 PVU 的值）

（1）双眼墙形成后，外眼墙会逐渐加强，向内收缩，最后外眼墙会取代内眼墙，最大垂直速度和切向风速的最大径向梯度位于最大切向速度的内侧是台风加强过程中眼墙内缩的主要原因。两眼墙之间有明显的弱回波区（moat区）存在。

（2）眼墙之间的moat区具有强烈旋转差异特性；moat区中主要以弱的上升运动为主，在中低层为条件不稳定层结，3～5km高层上有弱的下沉运动分布；相比于内眼墙，moat区中空气的属性与外眼墙空气属性更接近。

（3）双眼墙结构中外眼墙的形成可能与中高层正的位涡下传，并随径向内流向台风中心输送有关。绝对角动量等值线的向下弯折，有利于高层和中层的异常位涡下传，然后在流入层中向台风中心辐合。向内输送的异常位涡在眼墙外侧的某一个半径处累积、加强，在WISHE机制下得到发展，最终形成外眼墙。外眼墙形成的位置可能与低层眼墙位涡的外传和眼墙外位涡的内传的相遇位置有关。

参考文献

[1] Willoughby, H. E., Clos, J. A. and Shoreibah, M. G. Concentric eye walls secondary wind maxima, and the evolution of the hurricane vortex [J]. J. Atmos. Sci., 1982, 39, 395-411.

[2] Willoughby, H. E. Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 1990, 47, 242-264.

[3] Black, M. L. and H. E. Willoughby. The concentric eyewall cycle of Hurricane Gilbert [J]. Mon. Wea. Rev., 1992, 120, 947-957.

[4] Emanuel, K. A., C. DesAutels, C. Holloway, and R. Korry. Environmental control of tropical cyclone intensity [J]. J. Atmos. Sci., 2004, 61, 843-858.

[5] Molinari, J. and Vollaro, D. External influences on hurricane intensity. Part Ⅰ: Outflow-layer eddy angular momentum fuxes [J]. J. Atmos. Sci., 1989, 46, 1093-1105.

[6] Molinari, J. and Vollaro, D. External influences on hurricane intensity. Part Ⅱ: Vertical structure and response of the hurricane vortex [J]. J. Atmos. Sci., 1990, 47, 1902-1918.

[7] Molinari, J., Skubis, S. and Vollaro, D. External influences on hurricane intensity. Part Ⅲ: Potential vorticity structure [J]. J. Atmos. Sci., 1995, 52, 3593-3606.

[8] Nong, S., and K. A. Emanuel. A numerical study of the genesis of concentric eyewalls in hurricanes [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 2003, 129, 3323-3338.

[9] Kossin, J. P., W. H. Schubert, and M. T. Montgomery. Unstable interactions between a hurricane's primary eyewall and a secondary ring of enhanced vorticity [J]. J. Atmos. Sci., 2000, 57, 3893-3917.

[10] Kuo, H-C., L-Y. Lin, C-P. Chang, and R. T. Williams. The formation of concentric vorticity structures in typhoons [J]. J. Atmos. Sci., 2004, 61, 2722-2734.

[11] Zhang Qing-Hong, Kuo Ying-Hwa, Chen Shou-Jun. Interaction between concentric eye-walls in super typhoon Winnie [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1997, 131 (612): 3183-3204.

[12] Christopher M. R. Rapid Filamentation Zones in Intense Tropical Cyclones [J]. J. Atmos. Sci., 2004, 63. 325-340.

[13] Dodge, P., R. W. Burpee, and F. D. Marks Jr. The kinematic structure of a hurricane with sea level pressure less than 900 mb [J]. Mon. Wea. Rev., 1999, 127, 987-1004.

[14] 王玉清. Concentric Eyewall Simulated in A New Tropical Cyclone Model (TCM4). 2006, 南京信息工程大学江苏省重点灾害实验室 (20060623 王玉清. ppt).