

一次华北强对流风暴的中尺度特征分析

龚佃利^{1,2} 吴增茂² 傅刚²

1 山东省气象科学研究所, 济南 250031

2 中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266003

摘 要 利用非静力平衡模式(MM5v3.5)对 2001 年 8 月 23 日影响华北地区的一次强对流风暴成功模拟的基础上,对其中的中尺度重力波系(MGWs)特征进行分析,并与美国中东部地区 MGWs 进行比较。结果表明:这次 MGWs 波长约为 100~120 km,相速约为 $21\sim 28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,伴随对流风暴的发展维持时间超过 6 h。太行山地形强迫和对流是产生 MGWs 的重要机制,虽然大气层结并不经常具有波导机制,但在地形强迫、对流和切变气流提供波动能量情况下,低层 MGWs 仍可维持较长时间。太行山触发的华北 MGWs 与美国西部高原引发的中东部地区 MGWs 具有相似的地形作用特征。在对流初始发生和对流单体合并阶段,对流和 MGWs 构成一个类似正反馈机制的耦合系统,wave-CISK 机制可能发挥着重要作用;成熟阶段的对流风暴,由于中高层潜热释放和湿下沉气流加强,波动传播加快,引起 MGWs 和对流风暴分离并减弱。MGWs 在触发新雷暴,并将其组织成带状对流系统过程中可发挥一定作用。上述现象较好地验证了 MGWs 的概念模型以及对流与重力波相互作用的理论。

关键词 强对流风暴 中尺度重力波 数值模拟

文章编号 1006-9895(2005)03-0453-12

中图分类号 P445

文献标识码 A

Analysis of the Mesoscale Characteristics About a Severe Thunderstorm in North China

GONG Dian-Li^{1,2}, WU Zeng-Mao², and FU Gang²

1 Shandong Meteorological Institute, Jinan 250031

2 College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003

Abstract A severe thunderstorm that occurred on 23 August 2001 in North China is simulated with a mesoscale model. The downslope wind from the Taihang Mountains is the key mechanism to initiate the convection, on the other hand, the terrain can induce unbalanced low-level flow, which plays an importance role in generating the mesoscale gravity waves (MGWs) by convergence and divergence in the lower troposphere. The MGWs wavelength is 100–120 km, and the propagation speed is $21\sim 28\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The explosive convection can initiate MGWs in the higher troposphere and enhance the low-level MGWs. Convective and shear instability can provide the wave energy. During the initial and merger stages, the convection and MGWs probably interact with each other constructively. Particularly, the line of deep convection seems to provide the waves energy through enhancing mass convergence/divergence, the waves tend to organize convective elements into a line structure, the wave-CISK is a noticeable mechanism, and the wave/convection interaction verifies certain theories of gravity wave propagation and the vertical structure conceptual model. After the storm moves into the Shandong area and reaches a maturation period, the moist downdraft appears, the MGWs disunite from the thunderstorm and move faster, and the MGWs weaken grad-

收稿日期 2003-11-04, 2004-04-05 收修定稿

资助项目 山东省气象局重点课题“山东省中尺度数值预报系统的建立及应用”、“中尺度模式业务系统及高性能计算环境应用”和山东省自然科学基金课题 Y2003E01

作者简介 龚佃利,男,1969年出生,硕士,高级工程师,主要从事中尺度数值模拟分析研究。E-mail: gdlj@sohu.com

ually because of absence of wave duct and energy supply.

Key words severe thunderstorm, mesoscale gravity wave, numerical simulation

1 引言

有关中尺度重力波(MGWs)的识别、特征和作用分析是中尺度气象学研究的一个重要问题,国外气象学者通过一些中尺度试验计划对此进行了大量研究^[1~3]。Uccellini 等^[4]通过对 1949~1986 年间 13 次中尺度波动事件的分析,发现重力波通常表现为单个低压或波包形式,波动周期 1~4 h,水平波长 50~500 km,相速 15~35 m·s⁻¹,地面气压扰动振幅为 0.2~7.0 hPa;根据 MWGs 产生的环境场条件归纳出有利于波动发生的概念模型(UK87)。Koch 和 O'handley^[5]在 UK87 模型基础上,总结了美国中东部地区有利于重力波发展的环流模型(KO97),认为产生 MGWs 的共同天气条件应存在低层锋面逆温和高空急流出口区的强非地转运动,地转调整和切变不稳定是 MGWs 产生的重要机制。文献^[5]还给出了静力平衡条件下、处于临界层(波相速与波传播方向环境风分量相等的高度)和下垫面之间,简单非倾斜重力波系统(垂直 1/2 波长)垂直结构示意图(图 1)。许多研究证

实^[1, 2, 6], MGWs 常和雨带、飑线、强雹暴和暴雪等强天气相伴,对流、密度脉动(加速锋)、地转调整、地形强迫等是大振幅 MGWs 产生的重要机制和波能来源。如 Stobie 等^[7]发现在监测到 MWGs 数小时后,快速增幅的 MWGs 与对流同时增长,对流使 MWGs 加强并持续很长时间,在蒙大拿发生的一次 MWGs 振幅虽然只有 0.6 hPa,却使雷暴单体组织成具有强破坏性的中尺度对流复合体(简称 MCC)^[3]。

国外对重力波特征的分析多以实测资料和数值分析为基础,而我国在该方面的研究则多集中于理论方面。张可苏等^[8]研究了非静力平衡下重力惯性波的频谱、结构和传播特征,认为有关重力波的垂直运动、散度及位温扰动的相对配置对于静力和非静力平衡两个模式是一样的,但气压扰动与涡度场的配置则因静力稳定条件不同而有变化,如弱不稳定大气非静力平衡下的波动与图 1 可以相反。李麦村^[9]采用非线性、Boussinesq 近似方程研究了重力波的波解、波动性质及与暴雨中尺度系统的关系。林锡怀等^[10]通过对地面加密观测资料的中尺度分析,确定了重力波的存在及其在飑线产生中的作用。此

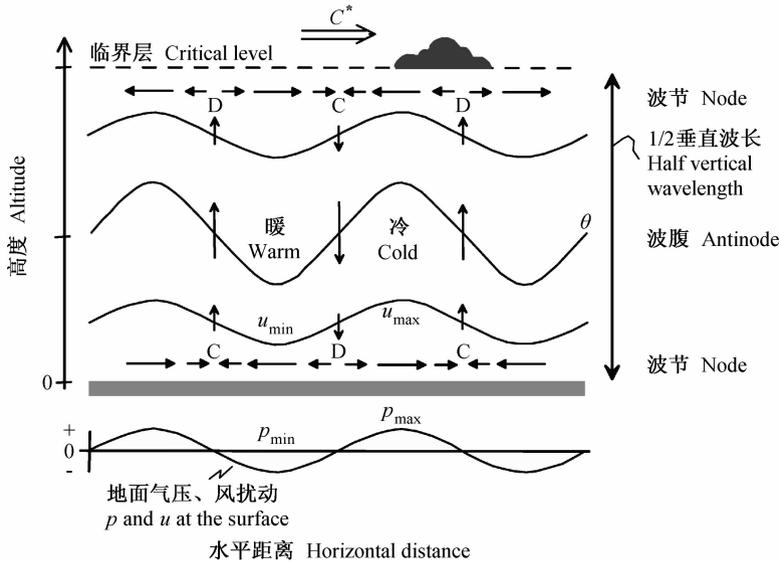


图 1 简单非倾斜结构重力波系统垂直结构示意图(引自文献^[5])。D: 辐散中心; C: 辐合中心; p : 气压扰动; u : 水平风扰动; θ : 位温; C^* : 固有相速

Fig. 1 Schematic depiction of a simple and no tilt vertical structure of gravity waves (adapted from reference [5]). The labeled D and C denote the centers of divergence and convergence, p and u are wave-induced surface pressure perturbation and wind perturbation in the direction of wave propagation, θ is potential temperature, and C^* is the intrinsic (mean flow-relative) phase speed

3 数值模拟方案和结果分析

3.1 数值模式物理方案

采用双向作用 3 层套网格, 中心点为(37.5°N, 114.5°E), 格距分别取 81 km、27 km、9 km, 垂直 σ 坐标分 23 层。大网格范围覆盖了直接影响风暴产生的天气尺度系统, 这对细网格区域中小尺度系统模拟能力的提高十分重要; 内层网格定位则主要为了跟踪风暴发生、发展的全过程, 并便于对太行山地形的作用进行分析, 图 4 给出了第 3 层 9 km 嵌套区域的模式地形、分析剖线和站点分布, 自山阴至日照的剖面与风暴移动路径基本一致, 以下的剖面分析均沿此剖面进行。

以 2001 年 8 月 22 日 08 时为初始时刻, 采用北京 T106 同化分析数据作为背景场, 利用风暴期间的探空和地面观测资料, 对初估场进行再分析, 构成模式的初边值条件。采用时变侧边界、MRF 行星边界层参数化方案和云辐射处理方案。对于云降水物理过程, 3 层区域均考虑霰和冰相过程, 选用 Reisner 霰方案; 另外, 第 1 层网格选用 Betts-Miller 方案, 第 2、3 层选用 Grell 方案, 以反映次网格尺度的对流过程。

3.2 模拟结果简述

模式对 22 日夜华北北部、京津地区强雷暴和 23 日凌晨开始的强风暴过程进行模拟, 以下着重对细网格区降水和地面气象要素的模拟结果进行分析。

3.2.1 降水

比较模拟的风暴主要降水时段(23 日 06~12 时)降水量和降水实况分布可见, 两者吻合得非常一致(图 5), 其中模拟降水量中心大于 50 mm, 位于博山附近, 博山站实测降水 48.9 mm, 为本次过程最大雨量站。此外, 模拟的逐时雨量范围、强度和中心位置与实况基本一致。

3.2.2 地面风、压、湿演变

图 6a 给出了风暴影响前后, 德州、济南等 6 站地面气压自记演变实况。可见, 强风暴影响德州、济南、博山 3 站时, 因处于风暴发展强盛阶段和强中心附近, 3 站的地面气压波动很大, 不足 1 h 内的升压幅度超过 3.0 hPa, 其中, 德州、济南处于风暴并合发展阶段, 气压陡升、陡降的特征更明显。日照虽受风暴中心影响, 地面也出现强风、冰雹天气, 但因风暴已处于减弱阶段, 地面气压波动幅度明显减弱。受风暴边缘影响的泰山站地面气压波动最

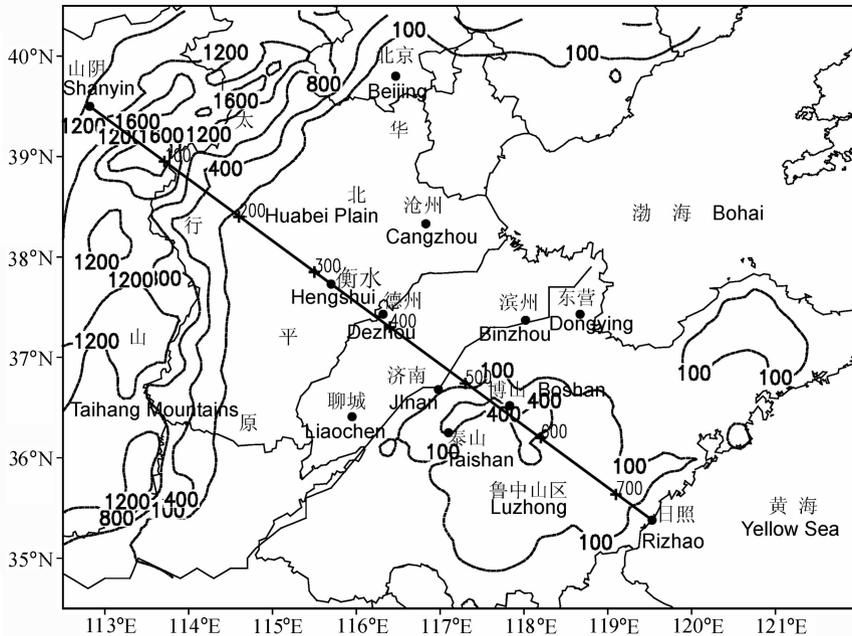


图 4 模式第 3 层网格区域地形、分析剖线和站点示意图

Fig. 4 The terrain data (dashed, units: m) and observation stations in the 9 km MM5 domain. The beeline from Shanyin to Rizhao shows the cross-section along the storm track, the distances away from Shanyin are labelled at the cross-section, the west topography is Taihang Mountain, the centre topography in Shandong is Luzhong Mountain area, and the area between them is the North China Plain

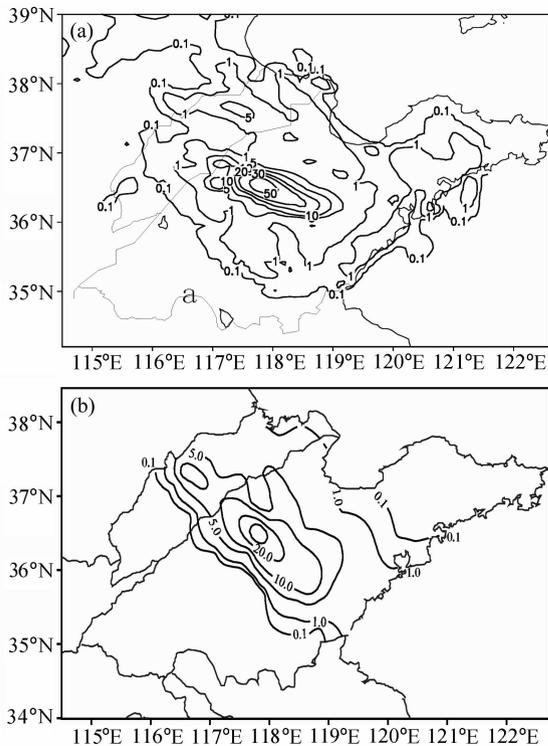


图 5 模拟风暴 23 日 06~12 时 6 h 降水量(a)和实观雨量(b)分布
 Fig. 5 Spatial distribution of model precipitation (a) and observed precipitation (b) from 0600 LST to 1200 LST 23 August 2001

小；东营位于风暴后部，受雷暴高压影响，表现出缓慢的升压过程。上述各站地面气压的变化很好地反映了强风暴不同发展阶段、部位的强度差异。图 6b 为模式输出的上述站点地面气压演变。可见，模式对风暴影响时地面气压的陡升、陡降变化进行了很好的模拟，气压波动强度和均与图 6a 实况基本一致。

图 6c 为模拟的 23 日 02~14 时济南、东营、聊城 3 站地面混合比、2 m 温度、10 m 风速演变。可见，处于风暴中心的济南站在风暴影响时上述物理量均出现明显的跃变；东营站处于风暴后部，实况仅出现雷阵雨天气，上述各量变化均较济南弱；聊城未受风暴影响，可作为风暴发生背景场平均演变情况。此外，模拟的风暴发生过程中云场、10 m 风场演变与实际云图、Doppler 和地面观测也基本一致，不再赘述。总之，模式较好地再现了强风暴发展、演变过程，为进一步分析风暴中的重力波特征奠定了基础。

4 风暴中的中尺度重力波特征

4.1 中尺度重力波的起源、结构和移动特征

图 7 给出了模拟的山阴-日照之间层结条件、垂直风场和气压扰动场垂直剖面。可见，23 日 03 时，在华北平原南部和鲁中地区为强对流不稳定层结

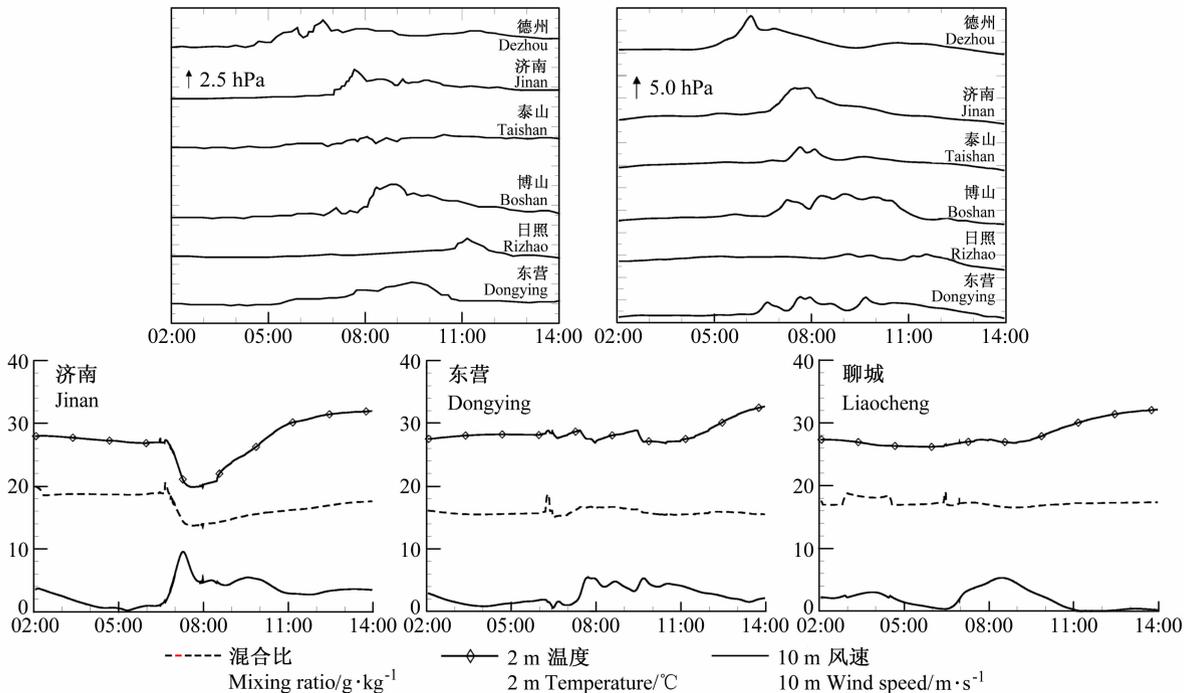


图 6 23 日 02~14 时风暴影响山东前后地面自记气压实况(a)、模拟地面气压(b)演变和 3 站各气象要素演变(c)
 Fig. 6 (a, b) Digitized surface pressure traces obtained from observation (a) and model(b) at selected stations from 0200 LST to 1400 LST August 2001; (c) simulated evolution of surface weather element for the three stations with the same Y-axes. The X-axes in all figures express time (hh:mm LST)

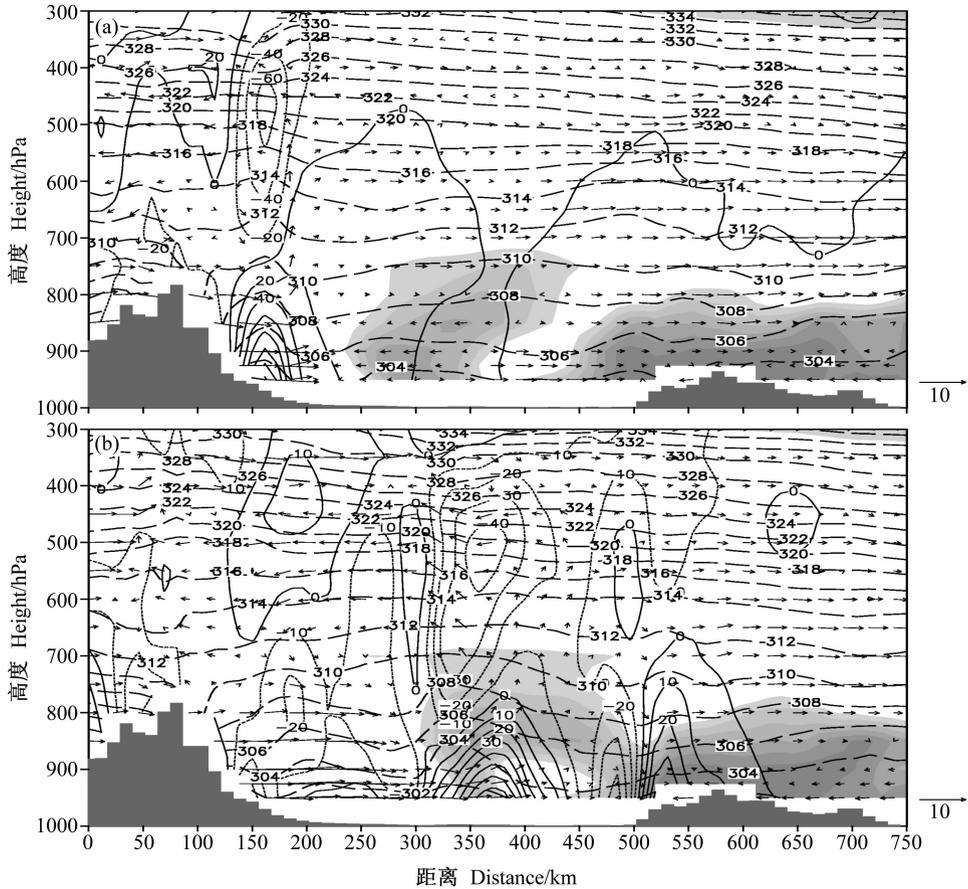


图7 模式模拟23日山阴-日照层结条件、风场和气压扰动垂直剖面:(a) 03时;(b) 05时30分。长虚线:位温,单位K;闭合等值线:气压扰动,单位Pa;风矢长短指示风速大小,单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,图右下角给出了风速标尺;浅阴影区为对流不稳定层结;图底深阴影区为太行山和鲁中山区地形

Fig. 7 (a) Simulated vertical cross-section (see Fig. 4) of potential temperature (long dashed lines every 2 K), vertical wind field (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and pressure perturbation (closed contour lines every 2 Pa) at 0300 LST 23 August 2001, the thin shaded area show the convective instability stratification, and the bottom thick shaded areas show the location of Taihang Mountain (0–160 km) and Luzhong Mountains area (500–600 km); (b) same as (a) but for 0530 LST

(阴影区),在太行山东坡有干冷空气冲击下来,风速超过 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,分析表明,该气流源于上游地区雷暴活动产生的干冷下沉气流,而正是该气流沿太行山下滑形成的下坡风抬升其前部低层的暖湿不稳定层结,从而触发本次强风暴初始对流的发生。从150~200 km对流发生区低层位温波动和气压扰动的配置看,位温脊与冷高压对应,具有明显的重力波结构特征,可见,太行山的下坡风引发对流的同时,也是MGWs发生的重要起源之一。05时30分,图7a中原位于河北东南部(250~350 km)的对流不稳定层结被抬升、东移,并与鲁中山区低层不稳定层结相连,而鲁西北地区(380~450 km)1000 m以下为中性层结(图7b)。对流和MGWs得

到进一步加强,以下着重对MGWs的演变特征进行分析。

图8给出了山阴-日照剖面散度、位温和垂直运动反映的MGWs特征。如图8a所示,23日03时30分,在100~250 km区间,水平、垂直两个方向上的辐合(C)、辐散(D)中心有规律地相间排列,垂直方向1000~4000 m间最大上升(下沉)速度中心分别位于等位温面波动脊(槽)前 $\pi/2$ 位置,与图1给出的重力波垂直结构模型一致。水平方向约1.5个波,波长约100 km;高层也有相邻成对的辐合、辐散中心和弱等熵面波动。此后2小时,重力波结构稳定、向东南方向移动,相速约 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。05时30分(图8b),MGWs移到300~400 km区

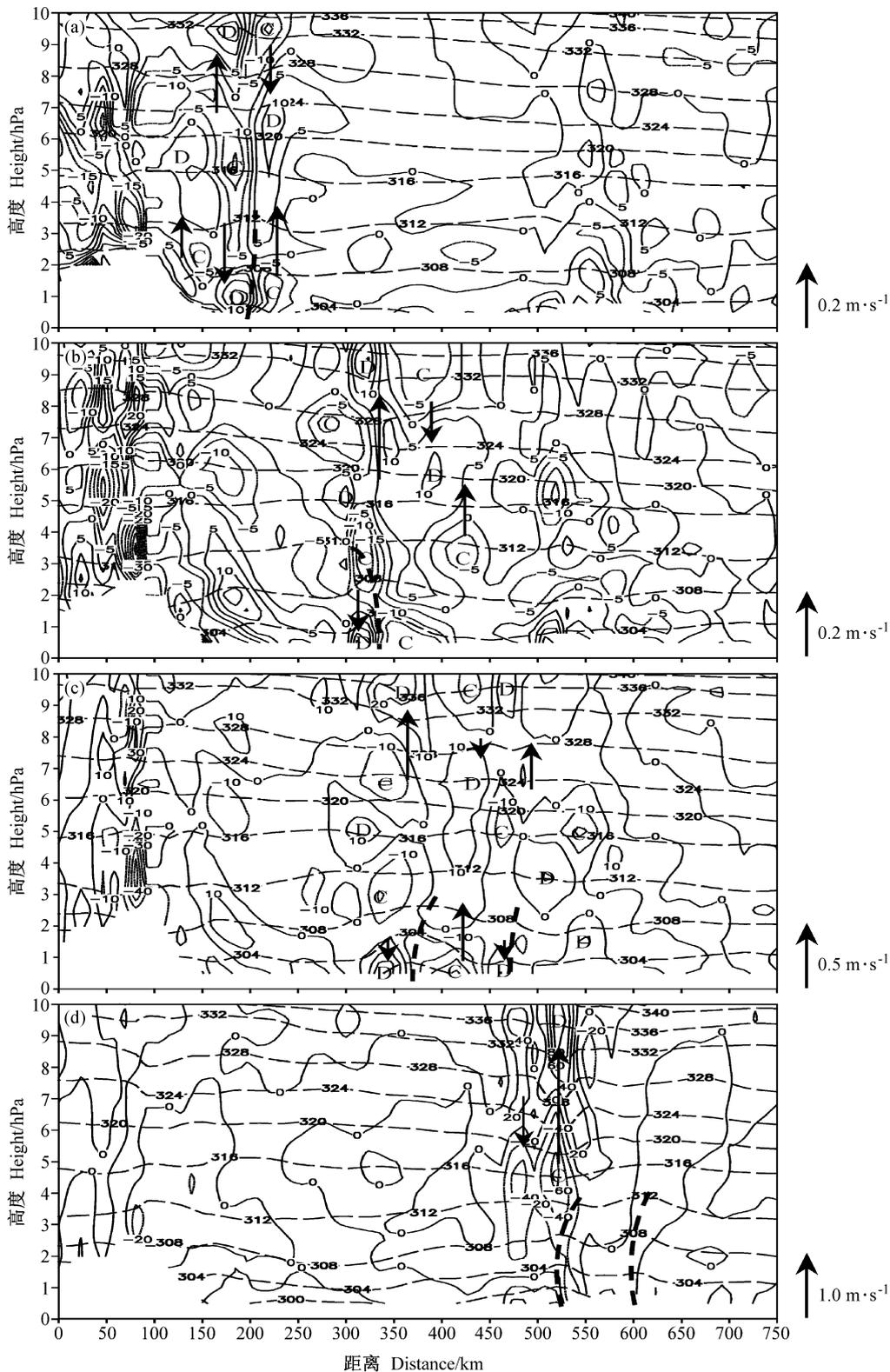


图 8 23 日山阴一日照剖面温度场、散度场和垂直运动反映的 MWGs 特征：(a)03 : 30；(b)05 : 30；(c)06 : 00；(d)08 : 00。散度单位为 $10^{-5} s^{-1}$ ，长虚线为等位温线；C、D 表示辐合、辐散中心；上升、下沉中心用箭头标出，数值大小参考箭头标尺；弯曲虚线指示重力波脊线位置

Fig. 8 Vertical cross-section (see Fig. 4) of potential temperature (long dashed lines every 4 K), divergence (closed contour lines, C and D denote the centers of convergence and divergence, units: $10^{-5} s^{-1}$) and vertical motion (direction and size indicated by large arrows) for 0330 LST(a), 0530 LST(b), 0600 LST(c) and 0800 LST(d) 23 August 2001. The dashed curves show the location of the MWGs ridge

间、850 hPa 高度附近的对流不稳定层结区, 对流加强、波振幅增大, 最大上升、下沉运动中心分离。23 日 06 时(图 8c), 低层波动振幅达到最强, 波长增加到约 120 km, 且对流在鲁西北近地层的中性层结区(图 7b)又激发弱重力波产生, 波动结构变得复杂。此后, 重力波传播到下游强对流不稳定层结区时, 水平辐合、辐散中心相间排列的结构解体, 重力波与对流风暴分离, 传播速度加快, 06~07 时相速超过 $28 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。23 日 08 时(图 8d), 4000 m 以下位温波动较对流风暴提前约一个波长, 波动振幅减小, 而此时对流风暴呈现出成熟阶段的散度场特征, 最强上升运动中心位于对流层中高层。

MGWs 与对流分离、传播加速现象也可从模拟的地面气压波动演变看到。如图 6a 显示, 博山站在气压跃升前, 即有弱气压波峰出现。Zhang 等^[6]利用观测资料和数值模式分析 1977 年约翰斯敦(Johnstown)洪水过程时也发现了类似情形。即当以固定位相关系传播的飏线和 MWGs 移到弱对流不稳定区时, 飏线移速减小, 而 MWGs 继续传播, 因而地面观测到重力波造成的弱气压波峰出现后, 飏线冷气流所致的气压跃升方接踵出现。

图 9 给出了与图 8b 同时次的 600~900 hPa 位

温厚度($\Delta\theta = \theta_{600} - \theta_{900}$)、地面风场和 750 hPa 上升运动区($w > 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的水平配置情况。 $\Delta\theta$ 高(低)值中心用粗虚(实)线标出, 与 MGWs 的压力扰动脊(槽)线对应, 也与雷暴前低压和雷暴高压对应, 图 2 中的重力波脊线也是据此绘出的。可以看到, 最大上升运动中心处于 MGWs 脊前位置, 与地面大风带和垂直上升运动区(阴影区)对应的带状飏线对流与 MGWs 槽脊线平行, 并处于两者之间。这种情形与有关 MWGs 传播理论和垂直结构的概念模型一致, 反映了低层 MGWs 波动与对流非绝热过程的对应关系。与雷达观测对比可见, 上述配置关系表明重力波动在将雷暴单体组织成带状对流过程中可发挥一定作用。

4.2 太行山地形作用分析

有关地形强迫产生定常地形波(背风波)的理论已很成熟^[15], 即在稳定层结大气, 一定强度的气流越过山脊后可形成准静止性重力波。但地形是否可作为传播性重力波重要波动来源或动力机制尚不清楚。Zhang 等^[16]分析美国对流降水合作试验(CCOPE)观测到的 MGWs 过程时, 发现波动是由地形密度流产生的, 并通过数值试验肯定了地形效应在传播性重力波发生过程中的作用。在本次过程

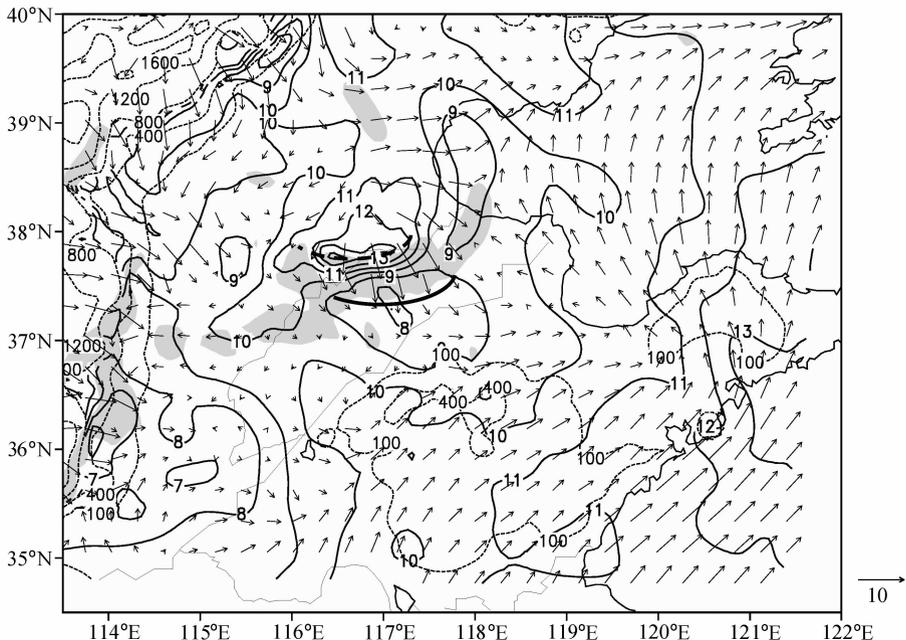


图 9 23 日 05:30 低层 MGWs、地面风场和上升运动配置。实线为 600~900 hPa 位温厚度; 粗实线、粗虚线对应重力波动槽脊线位置; 阴影区为 750 hPa 上升运动区($w > 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); 虚线为地形等高线

Fig. 9 The ridge (thick dashed curve) and trough (thick solid curve) of MGWs in the lower troposphere, surface wind field and updraft area at 700 hPa (values $> 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ shaded) for 0530 LST 23 August 2001. The dashed contour lines are the terrain height in MM5

中，如前分析，23 日 03 时，来自太行山的水跃型下坡风触发河北南部平原对流发展，对流活动受高层稳定层结阻挡，形成高层波动；而在对流层低层，受山脉地形造成的不平衡气流和对流双重作用，低层重力波产生并演变成大振幅重力波。计算 MWGs 发生过程中拉格朗日 Rossby 数值(Ro)^[5]表明，太行山区为 $Ro > 0.5$ 的强非地转运动区(图 10)，这将导致大气质量、动量重新调整，从而产生水平辐合、辐散流型和重力波动。因此，太行山地形效应在重力波产生过程中具有重要作用。当然，重力波的加强、传播尚需层结条件和对流活动的配合。文献[11]指出，湿大气层结的惯性重力波向不稳定层结加强的地方传播时，波动能量增大，波将发展。由图 8 可见，本次风暴发生区为强对流不稳定层结区，为 MGWs 的发展提供了有利条件。

4.3 对流与重力波的可能关系

wave-CISK 机制、切变气流和潜热释放是对流与 MGWs 相互作用的重要机制^[17]。根据 wave-CISK 理论，波动提供了维持对流必需的辐合、辐散流型，并帮助新生雷暴合并组织成深对流，而深对流又可增强产生重力波。Zhang 等^[6]研究认为，在适当层结、风切变等条件下的波动，只有当其触发对流的时间与波动强迫时间相近，且初始对流与波动以固定位相传播时，两者方可形成正反馈机制。图 8 和图 9 显示，23 日 03 : 30~05 : 30，MWGs 与对流之间的位相关系基本符合这一特征，两者之间可能具有正反馈机制，从而促使对流和 MWGs 相互作用和共同增强。

23 日 13 时，当对流风暴东移入海后，从红外卫星云图上也非常清楚地看到，在对流风暴的东南侧海区，有本次对流风暴和自长江口东移的风暴外流激发的多条弧状云带，呈明显的波动排列，波长约 100 km，且这种波列维持到 23 日 20 时以后。这再次表明对流与 MWGs 之间存在内在的相互作用。

4.4 MGWs 加强维持机制分析

Zhang 等^[6]的数值试验表明，在增强湿下沉气流的情况下，地面气压波动将增强，且传播更快，并使波动抬生对流的作用更强。Zhang 等^[18]的研究表明，湿下沉气流可以通过非线性通量交换，将中层波动能量输送到下游地区地面，在低层稳定层中形成波导，但单纯的波导并不能有效地维持波动能量，而基于对流潜热释放的 wave-CISK 机制对于 MGWs 的维持、增强却是至关重要的。本次 MGWs 演变过程较好地揭示了对流对 MGWs 增强和能量维持的作用，同文献[3, 6, 18]的分析结论是一致的。23 日 03 : 30~05 : 30，随着中高层对流潜热的释放和湿下沉运动(降水、大风)的出现和加强，低层波动也同步增强。06 时后，当风暴下沉气流进一步增强，地面出现较强雷暴高压后，重力波移动加快，并与对流风暴分离，但由于低层缺乏有效的波导机制，波动逐渐减弱。重力波相速和波幅的变化在图 2 和图 8 表现得很清楚。可见，对流活动是本次重力波维持的重要能量来源。

根据探空和雷达观测资料分析，本次强风暴发生前后，强垂直风切变基本上位于 700 hPa 高度。

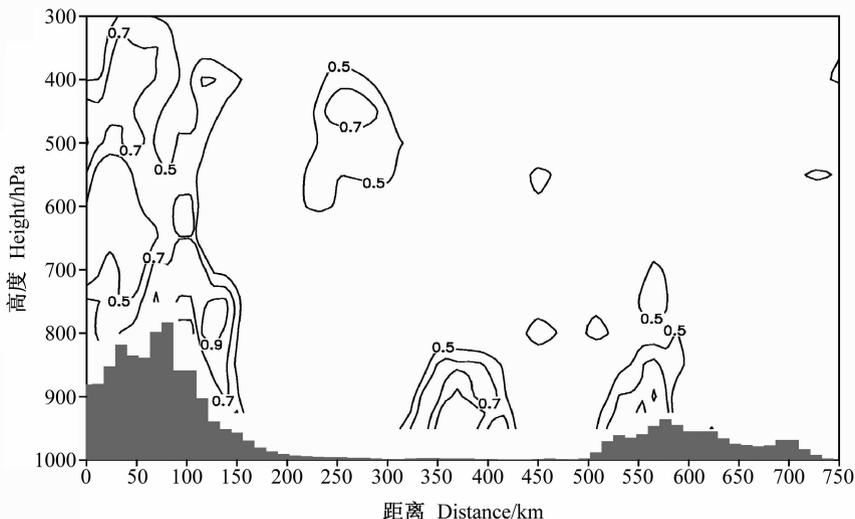


图 10 23 日 02 时山阴-日照 $Ro > 0.5$ 的垂直剖面

Fig. 10 Vertical cross-section of $Ro (> 0.5)$ from Shanyin to Rizhao

23 日 02 时, MGWs 发生区、700 hPa 高度附近的里查森数较小, 个别区域小于 0.5, 基本满足重力波发展的条件。因此, 对流活动对动量、质量的调整, 将破坏基本气流切变, 使切变不稳定能量转化为波动动能。

分析本次 MGWs 产生区的层结条件(图 7)表明, 23 日 03 时, 自山阴至河北东南部(0~250 km), 600 hPa 以下为弱对流不稳定层结, 而 600 hPa 以上中高层大气从太行山到鲁东南均为稳定层结, 与通常维持重力波传播的波导结构不同。23 日 14 时, 从德州至东海东北部(30.5°N, 129.3°E)湿大气 Brunt-vasala 频率^[9]垂直剖面(图略)可见, 对流风暴东移入海后, 东海海面上重力波云带发生环境也具有类似的层结结构。这种层结条件虽不具备波导机制, 不利于重力波能量的维持, 但在对流活动和低层垂直风切变提供波动能量情况下, MGWs 仍可维持一段时间。

5 结论

(1) 本次 MGWs 波长约 100~120 km, 相速约 21~28 m·s⁻¹, 伴随对流风暴发展, 维持时间超过 6 h。太行山地形产生的不平衡气流有利于 MGWs 的产生和维持, 并可对下游地区强对流天气的发展产生影响, 这与美国西部高原地形引起的 MGWs 具有相同的地形作用特征, 但引发 MGWs 的环流背景和机制却不同于后者。地形强迫和对流是本例 MGWs 产生的重要机制。

(2) 对流和切变不稳定是波动产生、加强和维持的重要能量来源。在地形强迫、对流和切变气流提供波能的情况下, 即使无波导机制, 对流层低层 MGWs 仍可维持较长时间, 而高层 MGWs 离开波源和低层 MGWs 与对流分离后, 波动逐渐减弱。

(3) 在对流发生初期和雷暴合并阶段, 对流和 MGWs 形成一个类似正反馈机制的耦合系统, 两者以固定位相关系传播, wave-CISK 机制可能发挥着重要作用。成熟阶段的对流风暴, 波动传播加快, MGWs 和对流风暴分离, 波幅逐渐减小。本过程揭示的 MWGs 结构特征及其与对流的可能关系较好地验证了已有的理论研究结果。

致谢 本文得到北京应用气象研究所许焕斌研究员的悉心指导, 特此感谢。

参考文献

- [1] Koch S E, Robert E G, Paul B D. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part II: Interactions between mesoscale convective systems and the antecedent waves. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116** (12): 2545~2569
- [2] Koch S E, Dorian P B. A mesoscale gravity wave event observed during CCOPE. Part III: Wave environment and probable source mechanisms. *Mon. Wea. Rev.*, 1988, **116** (12): 2570~2592
- [3] Rauber R M, Yang Muqun, Ramamurthy M K, et al. Origin, evolution, and finescale structure of the St. Valentine's Day mesoscale gravity wave observed during STORM-FEST. Part I: Origin and evolution. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, **129** (2): 198~217
- [4] Uccellini L W, Koch S E. The synoptic setting and possible energy sources for mesoscale wave disturbances. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, **115** (3): 721~729
- [5] Koch S E, O'Handley C. Operational forecasting and detection of mesoscale gravity wave. *Wea. Forecasting*, 1997, **12** (2): 253~281
- [6] Zhang Dalin, Fritsch J M. Numerical simulation of the meso- β scale structure and evolution of the 1977 Johnstown flood. Part III: Internal gravity and squall line. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1988, **45** (7): 1252~1268
- [7] Stobie J G, Franco Einaudi. A case study of gravity waves-convective storms interaction: 9 May 1979. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1983, **40** (12): 2804~2830
- [8] 张可苏, 周晓平. 非静力平衡条件下大气重力惯性波的频谱、结构和传播特征. 第二次全国数值预报会议文集. 北京: 科学出版社, 1980. 196~206
Zhang Kesu, Zhou Xiaoping. The frequency spectrum, structure and transmitting characteristic of inertial gravity waves in the condition of nonhydrostatic balance. *Proceedings of the 2th Numerical Forecast in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 196~206
- [9] 李麦村. 重力波对特大暴雨的触发作用. *大气科学*, 1978, **2** (3): 201~209
Li Maicun. The effect of gravity waves on triggering the torrential rainfall. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1978, **2**(3): 201~209
- [10] 林锡怀, 钱家声. 我国东部沿海地区“高后型飑线”的一种形成机制. *应用气象学报*, 1996, **7** (3): 330~335
Lin Xihuai, Qian Jiasheng. A development mechanism of squall-line behind the high pressure in the coastal region of China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1996, **7** (3): 33~33
- [11] 巢纪平. 非均匀层结大气中的重力惯性波及其在暴雨预报中的初步应用. *大气科学*, 1980, **4**(3): 230~235

- Chao Jiping. The gravitational wave in non-uniform stratification atmosphere and its preliminary application for the prediction of heavy rainfall. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1980, **4**(3): 230~235
- [12] 吴洪, 林锦瑞. 垂直切变和地形影响下惯性重力波的发展. *气象学报*, 1997, **55**(4): 499~505
- Wu Hong, Lin Jinrui. The effect of vertical shear of basic flow and topography on the development of gravity waves. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1997, **55**(4): 499~505
- [13] 吴池胜. 地形对重力惯性波发展的影响. *大气科学*, 1994, **18**(1): 81~88
- Wu Chisheng. Effect of topography on the development of inertial gravity waves. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18**(1): 81~88
- [14] Powers J G, Reed R J. Numerical simulation of the large-amplitude mesoscale gravity-wave event of 15 December 1987 in the central United States. *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121**(8): 2285~2308
- [15] 朱民, 余志豪, 陆汉城. 中尺度地形背风波的作用及其应用. *气象学报*, 1999, **57**(6): 705~714
- Zhu Min, Yu Zhihao, Lu Hancheng. The effect of mesoscale lee wave and its application. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57**(6): 705~714
- [16] Zhang Fuqing, Koch S E. Numerical simulation of a gravity wave event over CCOPE. Part II: Wave generated by an orographic density current. *Mon. Wea. Rev.*, 2000, **128**(8): 2777~2796
- [17] Koch S E, Siedlarz L M. Mesoscale gravity wave and environment in the central United States during STORM-FEST. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**(16): 2854~2879
- [18] Zhang Fuqing, Koch S E, Davis C A, et al. Wavelet analysis and the governing dynamics of a large-amplitude mesoscale gravity-wave event along the East Coast of the United States. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, **127**: 2209~2245

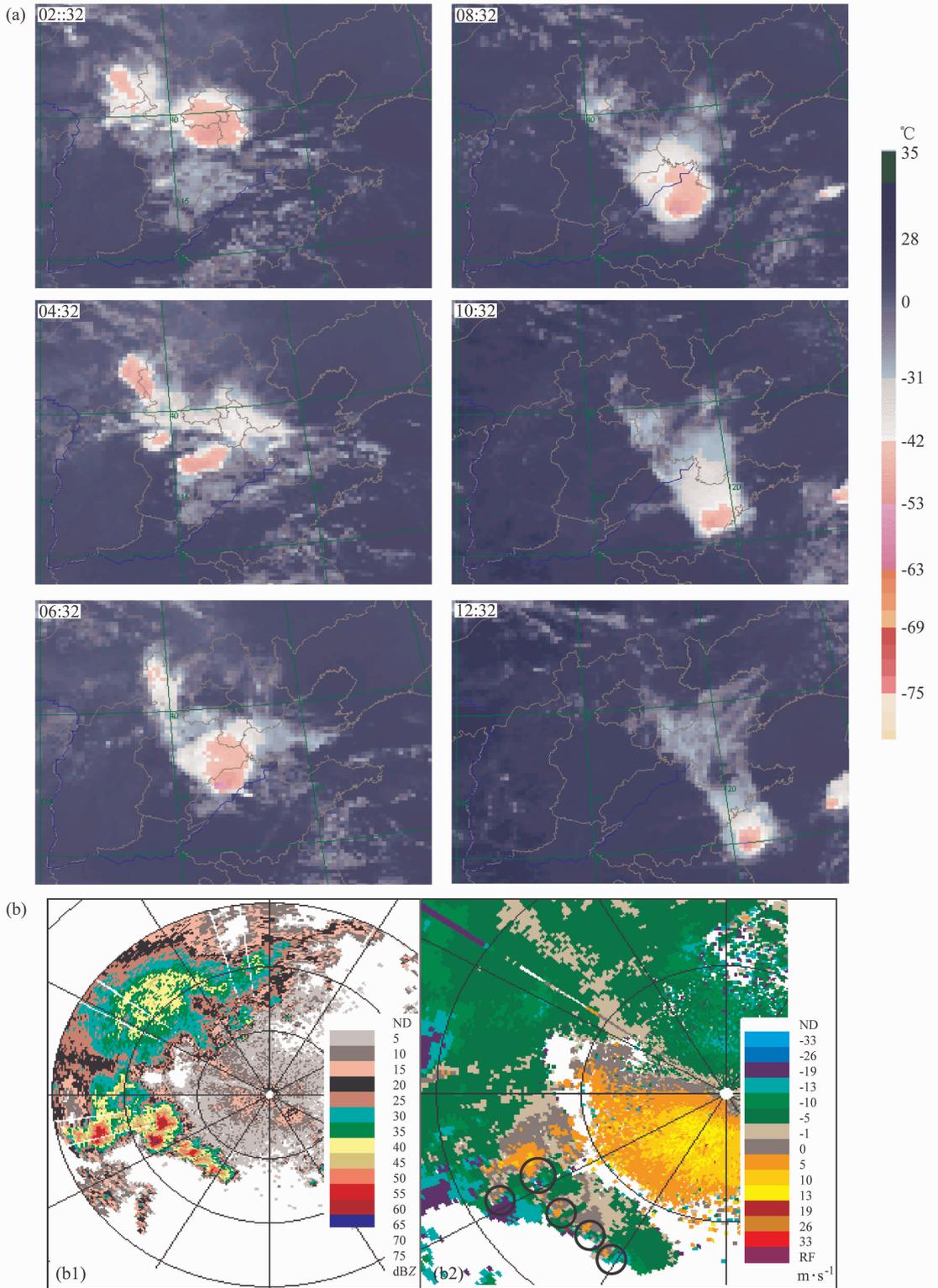


图3 (a)8月23日强风暴红外卫星云图演变;(b)滨州多普勒雷达23日06:38观测强风暴强度(b1)、速度(b2)图,观测仰角均为 1.5° ,每圈间距50 km, (b2)中圆圈指示中气旋位置

Fig. 3 (a) The evolutionary process in GMS-5 infrared images from 0232 LST to 1232 LST 23 August 2001; (b) base scan (1.5° elevation) PPI displays base reflectivity (b1, dBZ) and storm relative mean radial velocity (b2, $m \cdot s^{-1}$) from CINRAD/SC (Binzhou) at 0638 LST 23 August 2001, the space between circles is 50 km, the mesocyclones are denoted with small circle in SRM image