

台风龙王中尺度暴雨成因分析

林 毅 刘 铭 刘爱鸣 黄美金

(福建省气象台,福州 350001)

提 要: 2005 年 10 月 2 日台风龙王登陆福建省,在福州地区引发特大暴雨。卫星云图、多普勒雷达资料和诊断分析表明,台风进入台湾海峡后,其东南侧的西南气流受台湾岛地形影响出现分支而形成的两支气流在福州地区的再次交汇,在有利的环境下激发中尺度对流云团发展是这次强降水发生的主要原因。在垂直剖面上 θ_e 的非对称鞍形场结构、湿位涡的下负上正分布及高空强辐散和低空强辐合互耦,为大暴雨的发生、发展提供了热力和动力条件。

关键词: 台风 中尺度暴雨 成因分析

Causation Analysis of Mesoscale Heavy Rain Triggered by Typhoon“Longwang”

Lin Yi Liu Ming Liu Aiming Huang Meijin

(Fujian Meteorological Observatory, Fuzhou 350001)

Abstract: Typhoon“Longwang”, which landed on Fujian Province on October 2, 2005, caused a severe heavy rain over Fuzhou. Based on satellite pictures and Doppler Radar data, diagnostic analysis is conducted. The result indicates that the southwest flow in the south-eastern part of typhoon is forced to split into two branches by the impact of Taiwan’s land-form after it entered into Taiwan Strait. The two branches of air flow join together again over Fuzhou. Evidences suggest that the developing mesoscale vortex triggered by favorable surrounding conditions is the main reason producing this heavy rainfall. In addition, asymmetry saddle-backed structure of θ_e vertical profile, the upper negative and lower positive moist potential vorticity, as well as the high-level divergence and low-level convergence provide dynamical and thermodynamical conditions for occurrence and development of this heavy rain.

本文受 2002 年度国家科技部科研院所社会公益专项研究“福建省台风中尺度暴雨预报研究”项目资助

收稿日期: 2006 年 9 月 11 日; 修定稿日期: 2006 年 12 月 30 日

Key Words: typhoon mesoscale heavy rain causes analysis

引言

热带气旋暴雨,长期以来一直是人们关注的焦点。在过去的10年中,对热带气旋暴雨进行了大量的研究,在远距离台风暴雨、螺旋雨带的形成理论、台风系统对中纬度地区降水的影响和暴雨分布、下垫面特征对暴雨的影响和暴雨的突然增幅等方面都取得了新的进展^[1-3],但对登陆台风的暴雨机制还远未研究清楚,这仍然是暴雨研究的重点。本文选取2005年10月2日台风龙王登陆福建时,在福州地区引发的特大暴雨过程,应用NCEP再分析资料、卫星云图、多普勒雷达等资料,分析这次台风中尺度大暴雨的云图特征和形成原因,提高对台风中尺度暴雨发生的特殊现象的认识,为提高对这种中尺度大暴雨的预警能力提供预报依据。

1 暴雨降水特征和卫星云图观测事实

1.1 暴雨降水特征

2005年10月2日,台风龙王登陆福建时,在福州地区出现了罕见的特大暴雨。特大暴雨范围小、强度强,引发了严重的山洪灾害和城市渍涝,福州成了一片“水乡泽国”,造成严重的人员伤亡和财产损失。

这次台风龙王大暴雨分布在不到一万平方公里的区域内,24小时累积降水最大达到331mm,其中主要暴雨发生在10月2日19:00—22:00的3小时内,1小时降水极值大于100mm的有4个站(图1中标▲站)。特大暴雨具有明显中 β 尺度的特征。这场特大暴雨1小时降水极值达152mm,创福建短历时降水历史极值,而且1小时降水极值大于100mm的站数,也为历年登陆和影响福建

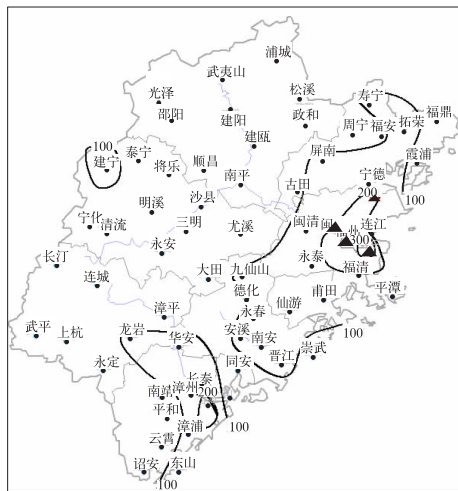


图1 2005年10月2日20时至4日20时
累计降水量分布

台风的短历时降水之最。

1.2 卫星云图特征分析

分析这次强降水过程的卫星云图,发现中尺度大暴雨的发生与台风环流北侧出现的中尺度涡旋有密切的关系,产生中尺度大暴雨的强对流云团是在台风环流北侧偏东气流与其北侧中尺度涡旋环流西侧的偏北气流汇合作用下发展起来的。

在10月2日的卫星云图上,16—17时当台风龙王进入海峡后向西移动的过程中,在台湾岛的北侧,也就是台风龙王环流中心的东北面的外螺旋云带上出现一个直径约230km的弱气旋性涡旋云带(图2中A处,见彩页),17时该气旋性涡旋云带进一步发展,形成清晰的、接近闭合的较为完整的气旋性涡旋环流云带,18时,台风环流北侧的螺旋云带与涡旋云带的相交之处有对流云团迅速发展(C处),云顶最低温度低于 -70°C 。18时低于 -70°C 云区面积约 2800km^2 ,以后迅速发展,19时达到 9450km^2 ,云顶最低温

度达 -94°C , 20 时 -70°C 云区面积发展到 20090km^2 , 并基本维持少动。21 时后涡旋云带的涡旋特征开始消散, 22 时云团也开始有所减弱, 并逐渐向北移动。这块强对流云团造成了福建沿海地区的强降水, 最强降水出现在 20—21 时, 强降水雨团的移动和强对流云团的移动一致。

分析福建中北部沿海测站的逐小时的气压变化曲线(图 3), 北部的罗源站(见图 1 中位置)的气压变化明显地不同于其南面的平潭站, 平潭站的气压低谷与台风登陆相关, 台风登陆后气压迅速上升, 而罗源站在台风登陆后, 气压仍继续小幅下降, 19—21 时气压曲线出现平缓的谷底, 这反映了罗源测站在受到台风系统减压作用后还受到另一个系统的降压影响, 气压曲线的变化反映了罗源测站上空东侧云图上显示的涡旋云带所对应的系统对其的影响。

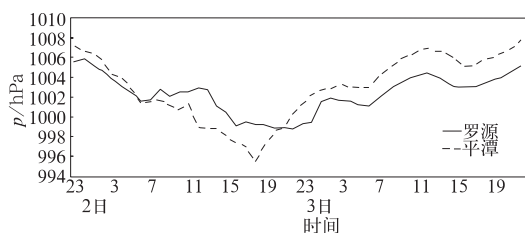


图 3 福建中北部沿海测站逐时
气压变化曲线

2 多普勒雷达分析

从长乐雷达所探测的组合反射率回波演变分析(图 4, 见彩页。因长乐雷达遭受雷击发生故障, 19:40 至 22 时资料缺失), 17:12 回波强度达 64dBz 的对流云团形成于台风北侧的螺旋云带上, 呈接近西北—东南向分布, 强回波宽约 30km , 长约 120km , 具有明显中 β 尺度的特征(对应云图的强对流云团 C)。以后回波加强, 并逐渐向偏北方向移动, 22:08 回波中心最强达 74dBz , 强回波带继续向

偏北方向移动, 23 时后强度逐渐减弱。由于受雷达探测半径的局限, 仅探测到形成强降水的对流云团回波 C, 北侧的涡旋云带系统 A 无法探测到。

从多普勒雷达的 1.5° 仰角径向速度场的演变分析, 与强回波带相应的存在中尺度的辐合线, 强对流云团发生在中尺度辐合线上。18:08 速度场上, 负速度区的面积大于正速度区的面积, 表明有气流的辐合。在测站南面, 零速度线由西北东南向折向西南, 表现为东南风与东北风形成的辐合线。2.9km 以下零速度线呈“S”型, 中低层为暖平流; 再往上至 4km 高度零速度线呈反“S”型, 有冷平流。冷暖平流交汇处有利于台风回波的中尺度对流的发展, 强回波带在冷暖平流交汇处发展起来。而后负区的面积进一步增大, 表明低层辐合加大, 18 时 33 分逐渐演变成西北东南向强度达 $55\sim 60\text{dBz}$ 的强回波带, 以后零速度线由西北东南向折向西南的折角北抬, 表明辐合线的北抬, 此时强回波带也随之北抬。同时, 在径向速度场上发现, 强降水发生时测站上空始终维持东南风急流, 2 日 17:36 正负速度极值中心出现了速度模糊, 通过人工退模糊可计算出正负速度极值中心为 $39\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ (对应长乐地面站观测到 $38\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 大风), 说明在辐合线上存在很强的气流辐合, 为强降水提供充沛的水汽供应。

另外, 在 2 日 19:39 的径向速度图上, 测站南面 50km 距离圈内的大片朝向雷达的径向速度负速度区内出现几块小的正速度区, 并有明显零速度线环绕, 即出现了逆风区。多普勒径向速度图上, 逆风区反映了局部整层抬升或强对流内的上升气流引起的水平动量交换过程, 这种动量交换影响了水平辐散辐合的强弱和分布, 造成中尺度垂直环流的形成, 有利于低层水汽的向上输送, 这两个反向速度中心构成了一侧为辐合区, 另一侧为辐散区的垂直环流, 有利于对流单体的维持、

发展。在随后的1小时,逆风区增大,回波带在逆风区中逐渐发展、加强形成强回波带。1小时大于100mm的强降水,就是在逆风区出现后的1~2小时出现的,可见,逆风区的出现对强降水的发生有很好的指示意义。

3 涡旋云带形成的原因和对强对流发展的作用

3.1 涡旋云带形成的可能原因

利用NCEP再分析资料,分析台风龙王登陆前后的流场表明:在台风龙王西行过程中,其东北侧,从500hPa到100hPa是深厚的反气旋环流,当台风龙王过台湾岛进入海峡西移时,高层200hPa至100hPa的反气旋环流向台湾海峡北部—闽东北地区扩展,使该区域的高层辐散加强。

在中低层,由于副高的稳定和加强,在台风环流和副热带高压环流之间由于极强的气压梯度力而持续维持一支很强的偏东低空气流。这支深厚低空急流自始至终与低压相伴。但台湾岛的特殊地形对这支强东风气流发生了影响。台湾岛的中央山脉长约300km,宽约120km,平均高度2km,花莲附近的主锋高达3.4km以上。在中层,强偏东气流经过中央山脉后,使得背风侧气压下降,有利在台湾海峡上形成低压倒槽;在低层,台风东南侧的西南气流受到台湾岛地形的影响,出现分支(图5),一支在台湾岛西侧围绕台风中心旋转,另一支从台湾岛东侧绕过台湾岛北侧和经过闽北地区环绕台风低压环流运动,这支绕流的气流经过台湾海峡北侧时气旋性曲率加大,可见,中低层气流的作用均有利在台湾海峡北部低压倒槽的形成和发展,而同时高层(100~200hPa)伴有强的辐散场移近中低层的倒槽北部时,高层的抽吸作用又加大了低层气流的气旋性流入,在低压倒槽的北部诱发出中尺度涡旋,这可能是

台湾海峡北部的气旋性涡旋云带形成的原因。图5中绕过台湾岛北部的气流支与图2中18—20时的卫星云图上的涡旋A发展的云带是如此的相吻合也佐证了这一点。

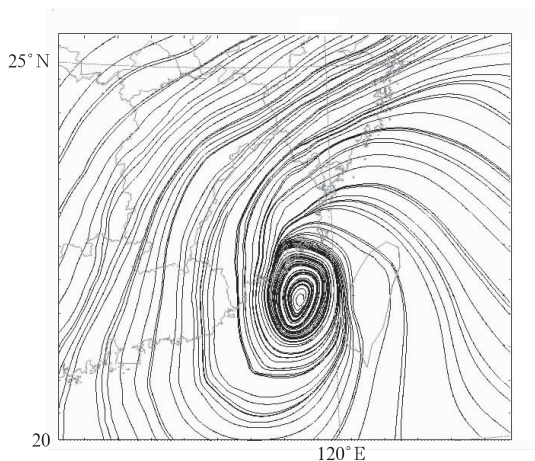


图5 2005年10月2日20时925hPa流场分布

3.2 两支气流汇合对强对流云团形成的作用

台风系统东侧由于台湾地形的作用而形成的分支气流而在福州地区的再次交汇导致强对流云团的形成,是这次强降水发生的主要原因,它通过两方面起作用。

首先,这两支气流的汇合在中低层形成了极强的气流辐合区。由于副高和台风环流之间的强气压梯度,在台风环流上中低层维持 $20\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上的强风气流,两支强风气流在福州地区交汇时,形成气流的强烈的辐合区,低层暴雨区的水汽通量散度的中心值1000hPa达 $-192 \times 10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$,925hPa达 $-176 \times 10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$,850hPa达 $-96 \times 10^{-8} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ (图略),气流的汇合为强对流云团的发展提供了充沛的水汽汇集和辐合上升动力,特大暴雨就是在两支气流的强辐合区上形成发展的。

其次,形成了有利对流发展的大气不稳定层结。从10月2日20时的地面温度场可

以看到(图6),有冷空气自低层从福建沿海南侵,在福建东北部地区为气温低值区,而在台湾海峡东岸由于高层越过台湾中央山脉偏东气流的下沉增温效应,形成气温高值区,导致在福建中北部沿海与台湾岛西岸之间形成强的温度梯度,这样绕过台湾岛的北支偏东气流经过闽北地区后属性发生变化,气流携带的空气温度低,起了输送冷空气的作用,当其与台湾海峡西侧的携带大量水汽的暖湿的偏东气流相汇时,就如两支属性不同的冷暖气流相汇,极大地增强了气流汇合区的大气层结不稳定性,激发强对流发展。这次强降水过程,明显不同于一般的台风螺旋云带上仅由于气流的辐合或地形抬升所发生的强降水,强降水发生时,伴随着强烈的电闪雷鸣,充分表明大气层结的极不稳定,激发强烈的对流运动发展。

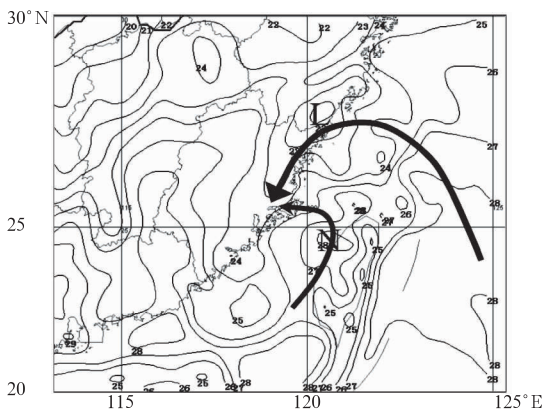


图6 2005年10月2日20时1000hPa
温度分布/℃

4 物理量场特征分析

4.1 高低层动力场的优势配置

以暴雨区 26°N 、 119°E 为中心,分析沿 119°E 涡度场的经向剖面图(图7),在低层的台风区域范围内,为深厚的大范围的正涡度

区,而强降水区对应高层区域的强负涡度中心。由于高层东北面强负涡度区移近,构成了动力场的优势配置,中低层的大正涡度和高空的负涡度集中在非常窄的同一区域,有利形成强烈而深厚的上升运动,上升运动发展高达 200hPa(图8),并且在仅 100 多公里的范围内并存强上升气流和强下沉补偿气流,结合暴雨区两支气流的交汇进行分析,东侧的上升支对应暖湿的偏东气流,西侧的下沉支与偏北气流相匹配,垂直速度场的分布

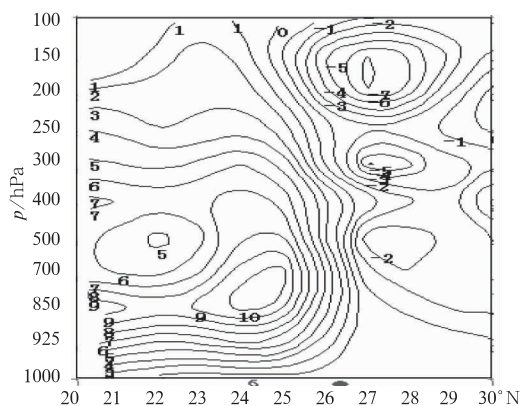
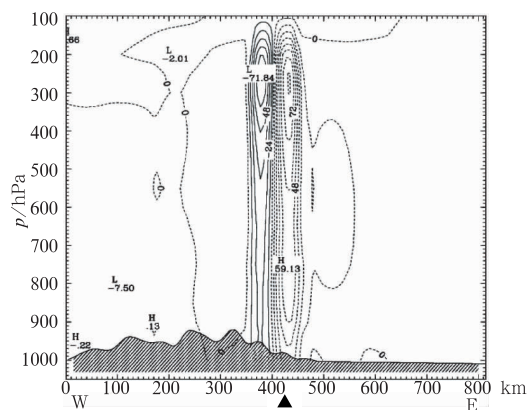


图7 2005年10月2日20时 119°E 涡度
场的经向剖面图
(单位: $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$)



特征进一步说明了由于两支气流的交汇,产生位能向动能的转化,并形成有利强对流发展的次级环流,导致强降水的产生。

同样,在散度场上暴雨区低层的强辐合与高层的强辐散互耦(图略)。这种强散度场与涡度场的垂直互耦是形成强垂直上升运动和特大暴雨产生和持续的重要动力机制。

4.2 湿静力不稳定和湿位涡上正下负结构

在 θ_e 垂直剖面上,低层还表现为一种明显的热力湿对流不稳定,在暴雨区,表现为高温高湿的相当位温 θ_e 的高中心,这是一湿对流不稳定气层(图9a),即 $(\Delta\theta_e/\Delta p) > 0$;其上气层在850~600hPa之间呈现为湿中性,即

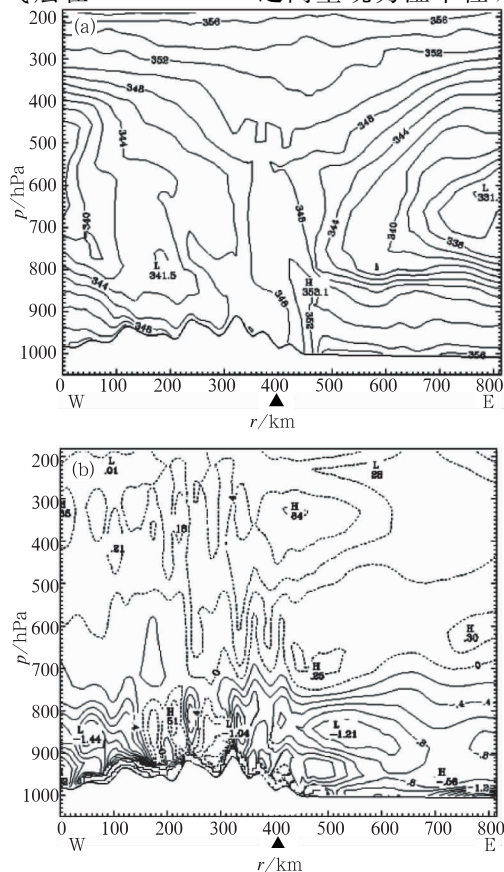


图9 2005年10月2日19时沿26°N相当位温(a. 单位:K)和湿位涡(b. 单位:PVU)的纬向剖面图(▲为暴雨区)

$(\Delta\theta_e/\Delta p) \approx 0$; 600hPa以上的高空,气层是对流稳定的,即 $(\Delta\theta_e/\Delta p) < 0$,同时,由于两支气流的交汇形成 θ_e 的陡峭和密集区,等 θ_e 面出现高低层打通的现象,有利于对流层中高层的高位涡冷空气向低层传递,同时低层的暖湿气流也由此通道向高层输送,促使暴雨区锋生。有效地增强了台风暴雨区的大气层结不稳定度。由湿位涡守恒分析知,由于水平风垂直切变增大和 θ_e 面的倾斜,都将导致垂直运动的加强。

湿位涡的分布与台风大暴雨的发生发展有很好的对应关系,对流发展区湿位涡表现为下负上正(图9b)的垂直分布,强降水发生在对流层中低层湿位涡等值线密集带中零等值线附近,因而湿位涡能够对暴雨落区的预报有较强的指示性作用。

垂直剖面上 θ_e 的这种非对称鞍形场结构和湿位涡的下负上正是对流运动发展的一种典型结构,促使暴雨区锋生,有效地增强了台风暴雨区的大气层结不稳定度,导致强降水的产生。

5 讨论和小结

上述分析表明,台风进入台湾海峡后,台风东侧的气流由于受到台湾岛地形的影响分支而形成的两支气流在福州地区的再次交汇,在有利的环境条件下,激发了强对流云团的发展,是这次强降水发生的主要原因。台湾岛东侧偏东气流的绕流并在福建中北部沿海的汇合,不但为暴雨区提供水汽的强烈辐合,还形成有利强对流云团发展的热力和动力条件。本过程揭示的这种特大暴雨产生的原因,进一步解释了为什么在登陆福建南部的台风中,经常在台风中心北侧200~300km的福建中北部地区出现最强降水中心的现象。以往的分析通常认为这种现象主要是因为闽东北地区的山地地形对台风北侧

强偏东气流的抬升作用,造成降水的增幅。本例的分析结果对这种现象给出了另一种解释:当台风中心位于福建南部沿海时,在北高南低的环流形势下,由于台湾岛的地形作用,使得台风东侧气流的出现绕流及汇合,一旦福建沿海有弱冷空气南侵,就有利于在气流的汇合区形成激发强对流发展的热力和动力条件,导致强降水的发生。

卫星云图上,台风环流北侧的气旋性涡旋云带的变化特征,对强降水的预测和监测提供了重要的信息。台湾海峡北侧涡旋云带的出现,比强对流云团的形成提早2小时左右,涡旋云带的出现显露了可能出现两支气流交汇的形势,预示着气流辐合区存在着有利于强对流云团发展的条件,当涡旋云带减弱后,强对流云团的发展也趋于减弱。云图的这些特征,可作为台风短时暴雨预报的着眼点。同样多普勒雷达速度场上的辐合线的形成和逆风区的出现对强对流云团的发展也有很好的指示意义。

物理量场分析揭示了两支气流的汇合形成了有利特大暴雨发生的动力和热力结构。在垂直剖面上 θ_e 的非对称鞍形场结构和湿位涡的下负上正分布促使暴雨区锋生,有效地增强了台风暴雨区的大气层结不稳定性,

导致强降水的产生。强降水发生在对流层中低层湿位涡等值线密集带中零等值线附近。同时,强散度场与涡度场的垂直互耦是形成强垂直上升运动和特大暴雨产生和持续的重要动力机制。与台风低压相伴的强东风急流不仅是对流云团发展与维持的互伴互耦条件,而且也是暴雨产生与维持的必备条件。

参考文献

- [1] 陈联寿,孟智勇.我国热带气旋研究十年进展[J].大气科学,2001,26(3):420-432.
- [2] 李江南,王安宁,杨兆礼,等.台风暴雨的研究进展[J].热带气象学报,2003,19(增刊):152-158.
- [3] 程正泉,陈联寿,徐德祥,等.近十年中国台风暴雨研究进展[J].气象,2005,31(12):3-9.
- [4] 刘还珠.台风暴雨天气预报的现状和展望[J].气象,1998,24(7):5-9.
- [5] 章淹,张义民,白建强.台风暴雨[J].自然灾害学报,1995,4(3):15-22.
- [6] 林毅,刘铭,蔡义勇.福建中南部台风远距离突发性暴雨的成因分析[J].气象,2005,31(10):68-71.
- [7] 杨克明,张守锋,张建中.“0185”上海特大暴雨成因分析[J].气象,2004,30(3):25-30.
- [8] 姚祖庆.上海特大暴雨天气形势分析[J].气象,2002,28(1):21-25.
- [9] 林毅,刘爱鸣,林新彬.台风中尺度对流云团和中尺度暴雨相互关系的综合分析[J].热带气象学报,2002,18(4):393-398.

林 毅等：台风龙王中尺度暴雨成因分析

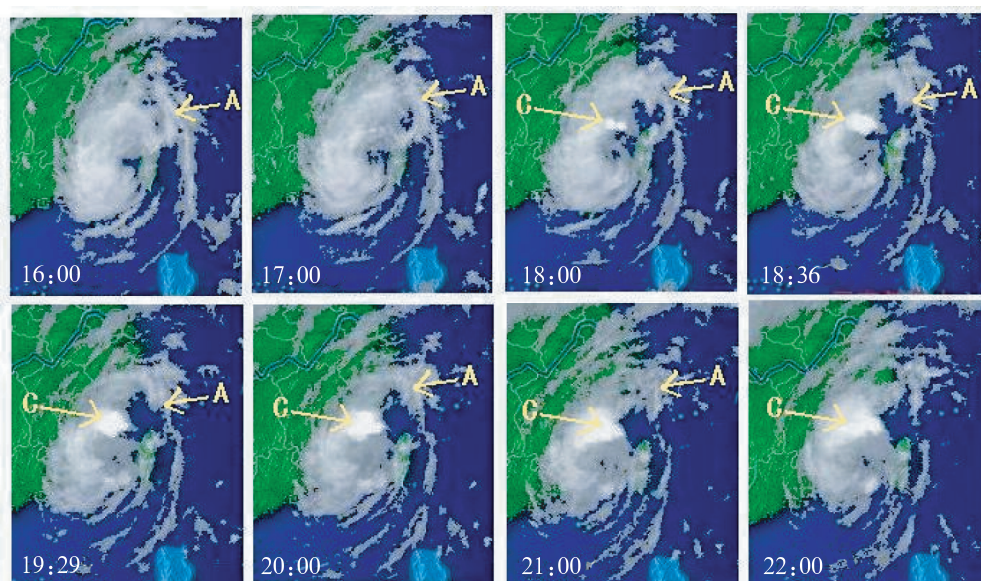


图2 2005年10月2日16—22时红外卫星云图

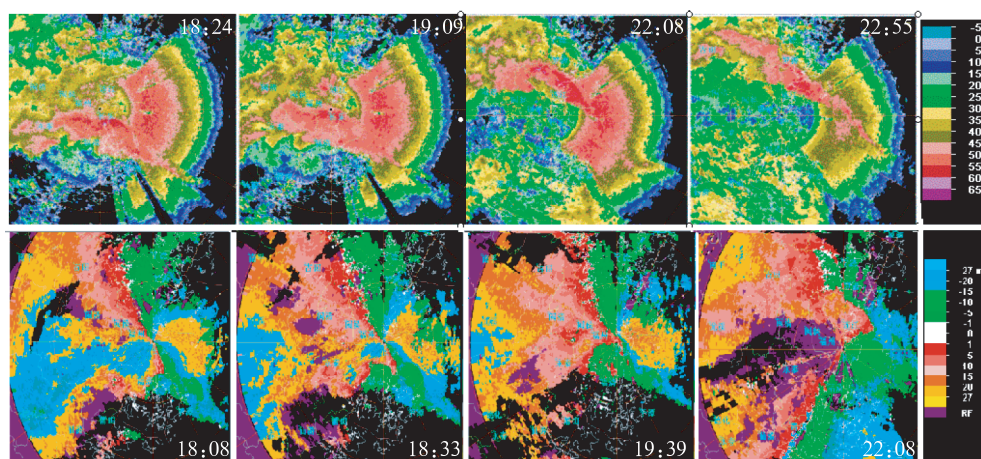


图4 2005年10月2日雷达组合反射率回波(上)、速度场(下)