

# 广州白云机场一次秋季大暴雨成因 及上游对流云团的触发机制

王刚 梁蕾蕾 刘峰

(民航中南空管局气象中心, 广州 510405)

## Cause of a Heavy Rain in Autumn at Guangzhou Baiyun Airport and Trigger Mechanism of Upper Convection Cloud

Wang Gang, Liang Leilei, Liu Feng

(Guangzhou Meteorological Center, CAAC, Guangzhou 510405)

### 引言

华南暴雨既受西风系统的影响, 又受热带地区天气系统的影响, 中小尺度对流活动频繁, 加之华南地区复杂的地形、下垫面条件以及海陆热力差异对比等对中小尺度对流系统形成和发展等外强迫作用, 使得其预报的难度非常大。

但是, 目前对于华南暴雨的研究主要集中在前汛期和后汛期暴雨, 而对于非汛期暴雨的研究还较少。2011年10月13—14日清晨, 广东省出现了暴雨到大暴雨局部特大暴雨过程。广州、佛山的部分气象站录得超过250mm的特大暴雨降水, 其中广州白云机场录得168mm的大暴雨。因而, 分析这次大暴雨过程的成因, 旨在加深对华南秋季暴雨的认识, 为秋季暴雨过程的预报提供一些思路。

### 1 资料说明与计算方法

使用的资料包括: 常规地面观测和探空资料、每小时1次的自动站加密雨量及风场资料, NCEP的 $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、FY-2D静止卫星逐小时云顶黑体辐射亮温(TBB)资料、广州白云机场多普勒雷达产品、风廓线雷达资料。

### 2 天气背景及物理量分析

广州白云机场13日08时—14日08时共录得168mm的大暴雨。从13日下午13:49闻雷开始, 白云机场的雷暴过程一直持续到13日晚上22:30才解除, 持续8h41min。此次过程造成白云机场190个出港航班延误, 另有23个航班备降, 2个航班返航。

收稿日期: 2012年2月25日; 修回日期: 2012年3月24日  
第一作者: 王刚(1985—), Email: wanggang@atmb.org

### 2.1 环流形势演变特征

在暴雨过程发生前, 13日08时500hPa环流形势上蒙古低压中心位于 $45^\circ\text{N}$ ,  $106^\circ\text{E}$ 。受蒙古低压环流影响, 大陆中东部处于宽广的槽前西南气流控制。副高主体在海上, 西脊点偏东, 位于菲律宾附近。在副高西侧10个纬距以内有热带低压活动。13日08时, 850hPa上受热带低压环流及副高西南侧影响, 华南沿海为东南气流控制。北方有冷空气受高空槽的引导南下, 切变线位于江南南部至南岭一带。地面形势为冷空气以偏西路径南下, 锋锋位于江南南部; 13日20时, 蒙古低压中心东移南压至 $44^\circ\text{N}$ ,  $110^\circ\text{E}$ 附近, 高空槽随之快速东移。热带低压有所北抬, 进一步靠近华南沿海, 华南沿海仍受较强的东南风场控制。在高空槽东移的引导下, 冷空气快速南下, 在浙江中部—福建中部—广东中部一带形成一条东北西南向的切变线。地面图上, 冷空气快速从西路渗透南下, 锋面位于广东省中北部。

蒙古低压东移南压, 带动深厚的高空槽系统东移。南海热带低压北抬, 使华南沿海中低层维持较强的东南风场控制。高空槽引导冷空气快速从西路南下, 切变线东移南压, 使得广东区域低层辐合加强。地面冷空气与华南沿海地区的东南暖湿气流交汇。这些天气尺度系统的合理配置及相互作用, 为暴雨过程发生的提供了十分有利的环流背景条件。

### 2.2 物理量条件分析

#### 2.2.1 低空和超低空水汽输送

水汽条件是产生暴雨的基本条件之一。分析850和925hPa(图1)风场和水汽通量得出, 菲律宾东部海面到广东珠江三角洲一带均位于 $\geq 10\text{g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$

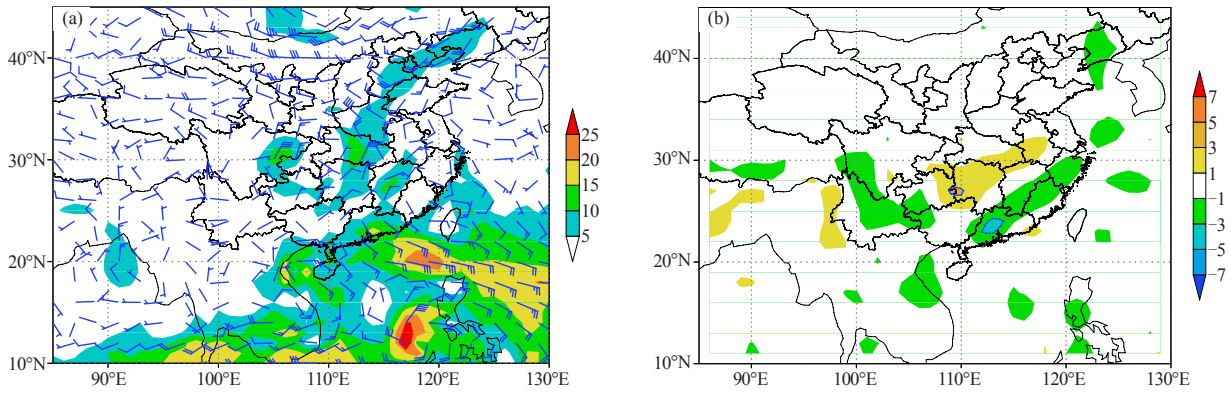


图1 2011年10月13日08时925hPa水汽通量 (a) 和10月13日20时925hPa水汽通量散度 (b)

的较高水汽通量区域内，这条强大而稳定的水汽通道从菲律宾东部的洋面上，一直向西北方向延伸到广东中部地区，这条水汽输送带在超低空（925hPa）更为显著，水汽通量达到 $25\text{g}\cdot(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})^{-1}$ 。这说明在发生暴雨前和暴雨过程中，有水汽通道的建立和维持。从850hPa风场可以看出，这条水汽通道的建立和维持，与南海的热带低压环流和西太平洋副高有关，在副高的西南侧与热带低压之间（即菲律宾东部到华南沿海），造成了一个强的水平气压梯度，进而在低层形成了较强的东南气流和强水汽输送带。强大的水汽输送带将来自菲律宾东部、南海北部的水汽，源源不断地输送到珠江三角洲地区，为暴雨的产生和维持提供了良好的水汽条件。

从13日20时850及925hPa水汽通量散度可见，浙江南部至广东中部为水汽通量辐合区，辐合中心位于广东省中部，850hPa水汽通量散度达到 $-3\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，925hPa水汽通量散度达到 $-5\times 10^{-5}\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这说明低层东南风将水汽输送到广东省中部，为降水的持续发展提供水汽。另外值得注意的是，925hPa的超低空水汽输送的贡献更为显著。

### 2.2.2 位势不稳定层结与不稳定能量

分析清远（59280站）10月12日08时—13日20时的探空资料（表1），发现K指数（K）都在36以上，沙氏指数（SI）为负值，说明在暴雨发生前期有大量不稳定能量积累。GCAPE在12日08时—13日08时逐渐增加，与13日20时开始减弱，说明暴雨发生时开始消耗前期积累的不稳定能量。对流抑制能量（CIN）则相反，12日08时—13日08时，CIN逐渐减小，在13日

08时只有 $0.3\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，非常有利于扰动的发展。暴雨发生时，CIN迅速增加。从上述分析可看出，此次过程前期积累了一定的不稳定能量，有利于中尺度对流系统的发展。

### 2.2.3 动力抬升条件

13日20时，从浙江南部至广东中部沿850hPa切变线为一带状的辐合带，辐合中心位于广东省中部及江西南部。200hPa辐散中心位于广东省中北部地区，基本与低层的辐合区重合。从500hPa垂直速度可见，广东省中部存在一个强上升区。低层辐合，高层辐散的形势有利于广东地区上空产生的垂直上升运动。这种配置下，中低层大尺度动力抬升与高层强辐散呈现出垂直耦合状态，有利于大范围上升运动的持续发展。随着500hPa高空槽的东南移动，使得垂直上升大值区主要位于高空槽前，即对水汽的抬升和降水的产生有组织和引导作用。

从沿 $113^{\circ}\text{E}$ 散度径向剖面图（图2）可见，在广州（ $113^{\circ}\text{E}$ ， $23^{\circ}\text{N}$ ）上空，500hPa以下为辐合，以上为辐散层，辐散中心在250hPa，高层的辐散中心值比低层的辐合值大，由于抽吸作用，增强了该地区的垂直上升运动，使得低层的辐合进一步加强。高低层这种配置是强降水产生的重要条件。强上升运动增强了低层的辐合，有利于低层暖湿气流快速向高空输送，并且有利于触发锋前不稳定能量释放，导致对流性暴雨发生。图2中上升区向高纬地区倾斜也反映了地面锋面超前于空中锋面。低层冷空气的侵入，使冷锋前暖湿空气被迫抬升，这有利于锋区上空不稳定能量的进一步释放和对流的发展。

表1 59280（广东清远站）探空得出不稳定能量条件

| 时间     | K指数 (K) | 沙氏指数 (SI) | 强天气威胁指数 (SWEAT) | 归一化对流有效位能 (GCAPE) | 对流抑制能量 (CIN) | 抬升指数 (LI) |
|--------|---------|-----------|-----------------|-------------------|--------------|-----------|
| 12日08时 | 38      | -1.02     | 240.6           | 0.2               | 58.4         | -1.14     |
| 12日20时 | 36      | -0.02     | 217.3           | 0.5               | 19.0         | -1.38     |
| 13日08时 | 37      | -0.02     | 225.0           | 0.7               | 0.3          | -0.96     |
| 13日20时 | 37      | 0.02      | 225.0           | 0.2               | 71.3         | 0.51      |

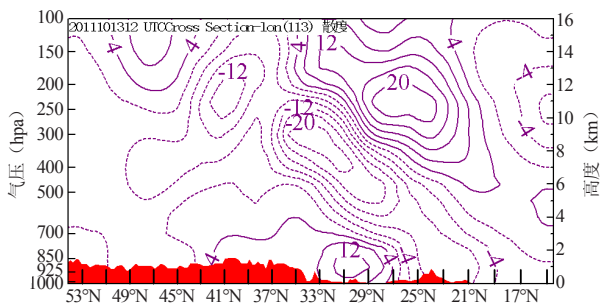


图2 2011年10月13日20时沿113°E径向散度垂直剖面图

### 3 暴雨过程中尺度特征分析

#### 3.1 中尺度云团活动特征

利用高时空分辨率的卫星资料及自动站降水资料,分析暴雨过程中尺度云团发生发展过程,探讨大暴雨产生的机制。从暴雨过程逐时FY-2D云顶辐射亮温及降水量图可看出(图略),强降雨主要发生在冷云区内或者TBB梯度最大处。13日11时在广东沿海及广东西部地区,有分散的弱雨区活动,尚没有明显的对流云团活动。12时,在广东西北部及广西地区新生两个云团(A, B)。随着午后热力作用的加强,13时后A和B云团快速加强,出现 $TBB \leq -52^{\circ}\text{C}$ 的区域,并逐渐东移。A云团于15—16时达到强盛阶段,成为 $\beta$ 尺度对流云团,白云机场受其影响,出现强雷雨天气,小时降雨量达40mm/h。B云团于16—17时达到强盛阶段,并移至广东广西交界处。随后A云团东移减弱,在其后部珠三角西侧生成新云团C(09时),C云团迅速加强,给珠江三角洲带来强降水。B云团东移减弱,分裂为两部分,一部分东北向移动,移至粤北地区后减弱消失,一部分东南向移动与C云团合并。C云团于19—20时达到强盛阶段,之后逐渐减弱。14日00时在C云团的上游珠三角西侧又有一个新云团D发展加强,给珠江口地区又带来一次降水过程。影响广州的强降水主要是三个 $\beta$ 尺度对流云团(A, C和D)造成的,其中两个(C, D)是在前对流云团的上游珠三角西侧发展起来的。影响白云机场的降水是由两个 $\beta$ 尺度对流云团造成的,其中以A云团为主。对流云团上游产生新的对流云团,再次移入造成广州形成大暴雨。

10月13日11—19时每小时雷达反射率显示(图略),11—12时,A云团的发展阶段,本场偏西30~50km内, $A_1$ 单体逐渐发展,开始影响白云机场的航班进近过程。13时, $A_1$ 云团进一步加强壮大,移至本场西北方向,同时本场南面20~30km处有若干小单体( $A_2$ )开始生成。14时,这些若干小单体迅速加强并合并,形成一个较大单体,北移影响本场,产生强雷雨天气。15时本场仍受 $A_2$ 云团影响,同时在A云团的上游(西南方面)开始有孤立的单体开始生成并发展,16—

18时,C云团发展壮大,形成 $\beta$ 尺度对流云团,在云团东北移动过程中,本场连续受到雷雨影响,导致多个航班的备降和延误。可以看出,这次过程是由前后两次对流云团引起的, $A_1$ 单体的强盛时期,其南部有新单体生成,然后迅速发展壮大,影响本场,形成强雷雨天气。 $A_2$ 单体发展壮大后,在西南侧又有新的单体C生成,并逐渐发展形成带状,最终形成 $\beta$ 尺度对流云团,移动过程中,再一次影响本场。因此,对流单体强盛时期,上游产生新的单体,发展并移入,导致白云机场长时间受雷雨影响,对飞行产生了较大的影响。

#### 3.2 上游云团发展的机制

此次大暴雨过程是由于对流云团的上游不断有新的云团生产、发展、移入造成的。从自动站时降雨和自动站地面风场的流线图可以看出(图略),在A云团发展及强盛时期,来自海上的强东南气流被卷入云团前部,东南气流为对流云团输送水汽,有利于云团的发展与维持。对流云团后部则为向外出流,这种出流可能是由于强降水产生的下沉气流引起的。气流向上游流出时,在上游(粤中偏西地区和珠江口西部)形成辐合,产生中尺度辐合线,C云团正是在珠江口西部发展起来的。可以推测,这种低层扰动可能会激发上游云团的发展,产生新的对流云团的发展。上游对流云团的再次移入导致降雨的持续增幅,导致大暴雨天气。中尺度对流系统产生的次级环流,导致在上游形成地面辐合线,可能是上游中尺度对流云团发展的触发机制。

#### 3.3 风廓线雷达特征

广州白云机场风廓线雷达探空图(图3)显示,广州上空自低层到高层由东南偏东风转为西南偏西风,风向随高度做顺时针旋转,整层大气为暖平流,说明广州处于锋前暖区中,积累了相当的不稳定能量。强降雨发生(14—17时)前,低层由弱而浅薄的东南偏东风转为较强而厚的偏东风,说明低层风向产生逆时针偏转,风速增大,并存在上传的过程。这说明暴雨的增幅可能与低空风速的脉动及风向的变化有关。从14日00时00分开始,850hPa以下逐渐转为东北风,风向随高度出现逆转,为冷平流,表明低层有冷空气向下渗透,说明冷锋已经开始影响广州。

### 4 总结与讨论

(1)天气形势分析表明,蒙古低压东移南压,带动深厚的高空槽系统东移,南海热带低压北抬,使华南沿海中低层维持较强的东南风场控制。高空槽引导冷空气快速从西路南下,切变线东移南压,使得广东区域低层辐合加强。地面冷空气与华南沿海地区

(下转69页)

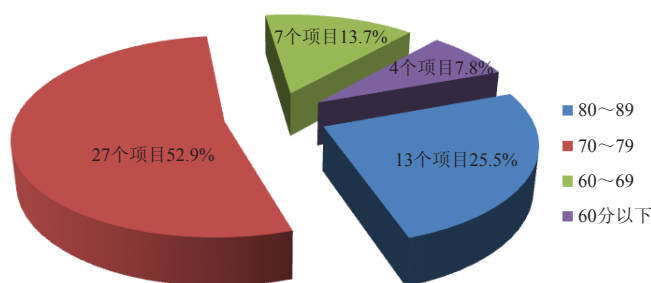


图1 51个项目占各分数段的数量和比例

成果（业务应用在半年以上）在气象业务活动中有不同程度的应用；应用效益平均得分为74.5分，项目成果的应用效益属中等水平。

应用效益得分较高的项目具有以下特点：（1）项目目标与业务实际应用的对接准确，立项时研究目标设计就是要实现业务应用；（2）项目成果的成熟度和使用价值高，属成熟的科技成果转化；（3）项目成果在实际业务中应用的时间相对较长，运行较为稳定；

（4）项目成果已取得业务管理部门正式的业务运行许可；（5）投资规模大的应用基础性项目，业务应用的范围广。

应用效益得分不高的项目有以下原因：（1）有些项目虽已结题，但项目成果仍处于业务试验阶段，尚未达到成熟和可转化的程度；（2）有些项目成果在业务中运行的时间较短，尚未达到业务部门运行的考核要求和业务主管部门运行许可；（3）有些项目

的成果只有部分应用或未进行推广应用，无法体现出应用效益；

（4）同类但水平更高的项目成果转化业务。

本次评估试验的4类项目多是面向业务的应用技术研发项目，立项目标主要是通过项目研发，解决业务技术中的关键问题。其中，也有一些科技基础平台建设项目和成果转化项目。尽管都是应用技术类的项目，但也存在立项目标各异、成果载体不同、立项时间不同步、应用时间长短不一等问题，而使用同一尺度衡量其应用效益，确有不妥之处，会使客观评价产生偏差。但此次的评估也初步检验了气象科研成果应用效益评估指标设计的可行性和合理性，并为今后设计气象科研成果的应用效益评价指标、改进评价方法提供了依据和思路。

（作者单位：中国气象局气象干部培训学院）

（上接57页）

的东南暖湿气流交汇。这些天气尺度系统的合理配置及相互作用，为大暴雨过程发生的提供了十分有利的环流背景条件。500hPa槽的东移，槽前上升运动强。850hPa辐合与200hPa辐散，形成抽吸效应。抽吸效应与垂直上升运动互相耦合，有利于上升运动的维持。副高的西南侧与热带低压之间形成强的水平气压梯度带，低层形成了较强的东南气流和强水汽输送带，其中925hPa超低空水汽输送带贡献更大。过程前期积累了一定的不稳定能量，有利于中尺度对流系统的发展。

（2）分析卫星云图与雷达资料表明， $\beta$ 尺度对流云团的不断发展与移入是造成广州地区大暴雨的直接

原因，强降雨主要发生在冷云区内或者TBB梯度最大处。影响广州地区的大暴雨是3个 $\beta$ 尺度对流云团引起的。对流单体强盛时期，上游产生新的单体，发展并移入，导致白云机场长时间受雷雨影响，对飞行产生了较大的影响。

（3）自动站风场资料表明，中尺度对流系统因强降水产生的次级环流，在上游地区形成地面辐合线，可能是上游中尺度对流云团发展的触发机制。风廓线雷达探空风能够探测到暴雨的一些中尺度特征，暴雨的增幅可能与低空风速的脉动及风向的变化有关。

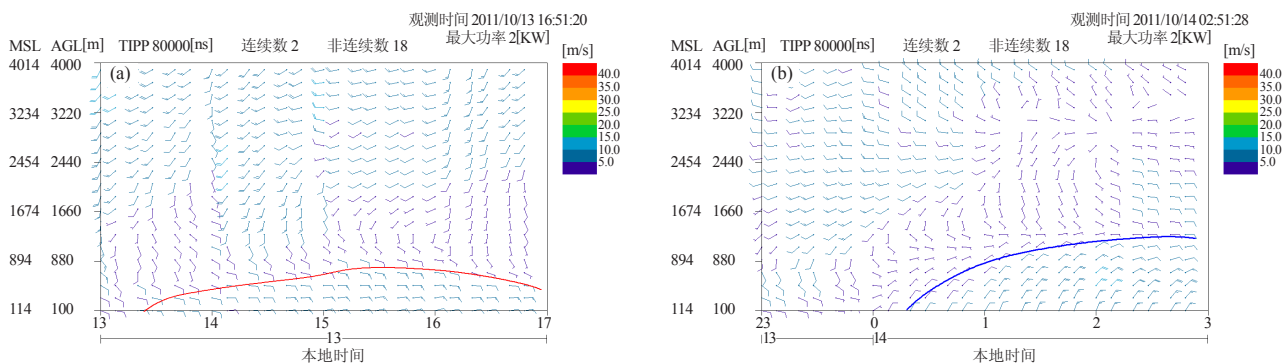


图3 广州白云机场风廓线雷达探空风场时序图  
(a) 13日13—17时，(b) 13日23时—14日03时