

文章编号:1673-8411 (2014) 03-0020-07

# 华南一次特大暴雨诊断及数值模拟

叶朗明<sup>1</sup>, 陈明惠<sup>2</sup>, 夏冠聪<sup>3</sup>

(1.江门市气象局, 广东 江门 529000; 2.玉林市气象局, 广西 玉林 537000; 3.中山市气象局, 广东 中山 528401)

**摘要:**用NCEP/NCAR再分析格点资料对2009年5月23-24日发生在华南的特大暴雨过程进行了诊断分析,并利用中国新一代GRAPES模式进行了数值模拟研究。结果表明:副高稳定维持,西侧偏南气流引导季风云团北抬;水汽来源主要为孟加拉湾西南气流和南海东南气流,水汽辐合主要集中在925hPa-850hPa,具有明显日变化特征;垂直上升运动提前约6小时于强降水的出现,暴雨中心位于最大垂直速度中心附近。模式成功模拟了暴雨过程的雨带分布及环流形势演变,显示中尺度涡旋是造成暴雨的主要影响系统,其不仅造成陆地的低层辐合高层辐散,还为暴雨区提供了正涡度,促使2个中 $\alpha$ 尺度对流系统的生成和发展东移,直接导致暴雨的发生。

**关键词:**暴雨;诊断分析;GRAPES模式

中图分类号:P458.2

文献标识码:A

## DIAGNOSTIC ANALYSIS AND NUMERICAL STUDY OF A THUNDERSTORM IN SOUTHERN CHINA

**Abstract:** Based on the NCEP / NCAR reanalysis gridded data and GRAPES model Diagnostic analysis and Study on Numerical Simulation of Southern China thunderstorm occurred in 23-24 May 2009 is studied. The result shows that moisture sources of torrential rain process comes from Somali cross-equatorial flow, stiff southwest flow of bay of Bengal and the south sea airflow. In periods of torrential rain, stronger convergent winds at lower levels and stronger divergent winds at high levels is conducive to low-level vortex system development and maintenance. Storm center is located near the center of the maximum vertical velocity. It is successful to simulate the large-scale atmosphere circulation development and distribution of torrential rain. It shows that the mesoscale vortex is the main influencing system causing torrential rain, which is in direct relationship with the genesis and intensive development of a meso- $\alpha$  scale low vortex at 850hPa on the basis of GRAPES model.

**Key words:** torrential rain; diagnostic analysis; GRAPES model

## 0 引言

华南地处我国最南端,受到热带与中纬度天气系统的交替作用,暴雨频率高,雨强大,汛期持续时间长,暴雨次数和强度均居全国之首,给经济建设与人民生命财产带来巨大损失。而华南地区由于受静止锋、季风、海风分布、地形等复杂因素的影响,常常

会爆发大暴雨,这也是华南预报员预报的难点和热点问题。多年来气象学者对华南前汛期暴雨的研究得到了许多有意义的成果<sup>[1-6]</sup>,认为低空辐合及对应的强上升运动和气旋性涡柱是造成这次暴雨的动力学机制。对具代表性的华南连续暴雨如94.6和05.6等的研究,也揭示了一些暴雨发生发展的物理机制<sup>[7-14]</sup>,暴雨的发生和维持与大尺度背景环境有密

收稿日期:2014-06-15

资助项目:广东省江门市气象局基金资助项目(201201)

作者简介:叶朗明(1982-),男,江西龙南人,硕士研究生,工程师,主要从事暴雨、数值模式和海陆风研究,ye\_langming@126.com

切的联系。陶诗言等<sup>[15]</sup>对中国暴雨做了系统性的分析总结, 得出了系列关于暴雨发生发展和天气系统配合结论, 把持续性暴雨的发生发展背景大致分成了三种类型, 并指出了西太平洋副高的位置决定了从海上来的水汽通道。陈炳洪、薛纪善<sup>[16-17]</sup>等的研究表明, 活跃的南海季风与低纬度环流配置是华南前汛期持续性暴雨产生的背景条件。田晨、徐蓉等<sup>[18-19]</sup>的研究表明, 下垫面的非均匀性改变边界层热力和动力过程, 进而影响强降水的分布。林毅等<sup>[20-23]</sup>研究了急流对暴雨发生的影响, 并进行了数值模拟试验。孙素琴、杨婷等<sup>[24-25]</sup>对区域性特大暴雨进行了诊断分析。但是近年在运用中国新一代数值模式 GRAPES 进行暴雨研究还是比较少, 多为使用 WRF 和 MM5 模式。

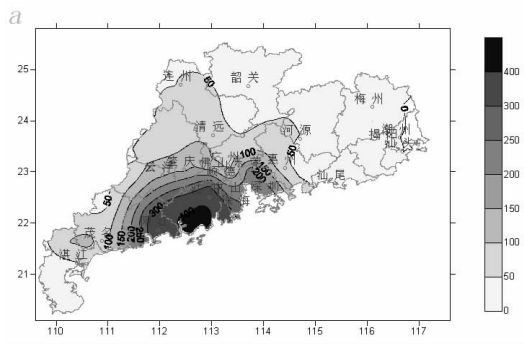
本文利用 NCEP/NCAR 每天 4 次的  $1^\circ \times 1^\circ$  再分析资料、地面常规观测资料, 进行天气学分析和动力学诊断, 还利用了我国新一代 GRAPES 模式进行暴雨过程的数值模拟试验, 模式采用分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料为背景场, 水平分辨率设置为 12km, 模式顶层为 10hPa, 垂直分层为 31 层, 使用 30S 高分辨率地形资料以及相应的下垫面特征资

料。以便揭示这次特大暴雨过程的一些本质特征。

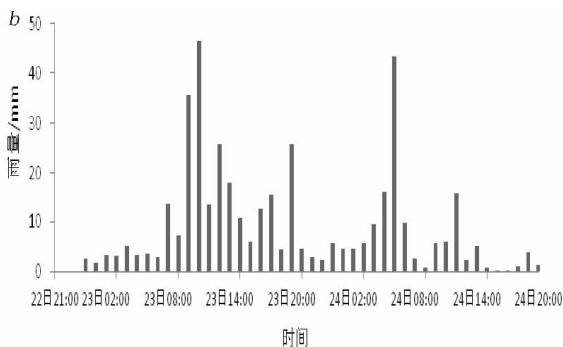
## 1 雨情分析

2009 年 5 月 23–24 日, 珠江口西侧出现暴雨到大暴雨, 局部地区出现特大暴雨降水, 主雨区位于江门至阳江一带(图 1a)。广东省有 8 个气象观测站录得大于 250mm 的过程雨量, 其中最大雨量为台山站 420mm; 有 68 个区域自动站超过 250mm, 其中台山市端芬镇录得最大过程雨量 618mm。

降水可分为两个阶段(图 1b, 以台山站为例): 第一阶段发生在 23 日白天, 08:00 开始台山沿海出现一条 45dBz 的强雷达回波带不断北抬, 降水最强的 09:00~11:00 时间段, 出现了强度中心达 60dBz 的强回波单体, 台山站最强降水出现在 11:00, 时雨量达 46.7mm, 09:00~20:00 的 12h 累积雨量 221.9mm。第二阶段从 24 日早晨开始, 沿海强回波不断生成并涌上内陆, 06:00 多个站点录得大于 40mm 的时雨量。持续的强降水过程, 使得粤西多个气象台发布暴雨红色预警信号, 也造成农田受浸、山体崩塌和水闸受损, 经济损失严重。



(a) 全省雨量分布图



(b) 台山站雨量演变图

图 1 2009 年 5 月 22 日 20 时至 24 日 20 时雨量图

## 2 天气形势分析

暴雨发生前, 21 日 20 时, 500hPa 中高纬度环流为两槽一脊型, 块状的副热带高压脊线稳定维持在  $21^\circ\text{N}$ ,  $118^\circ\text{E}$  附近, 850hPa 珠江口以西为一致的西南气流, 水汽条件充足, 南海有低压云团发展。

暴雨发生时, 22 日 20 时, 500hPa 588 线维持在沿海, 粤西南降水逐渐明显; 从 5 月 23 日 08 时的综合示意图(图 2)可以看到在  $30^\circ\text{--}35^\circ\text{N}$  上, 200hPa 为副热带西风急流区, 暴雨区位于高空急流轴的南侧,

从风场上分析, 华南处于辐散区。500hPa 副热带高压稳定维持, 有利于季风扰动沿着副高西侧北上。586hPa 线(黑线)的西脊点位于珠江口附近, 珠江口西侧位于副热带高压边缘的不稳定区, 有利于强降水天气的出现, 这种配置是造成华南暴雨的典型条件之一<sup>[17]</sup>。23–24 日副高稍有东退, 但副高主体稳定, 粤东则位于副高控制区域, 不利于降水发生。南海中部海面的扰动云团缓慢西北移, 受其外围东南风影响, 为粤西输送充沛的水汽, 导致珠江口及其西侧持续性的强降水。

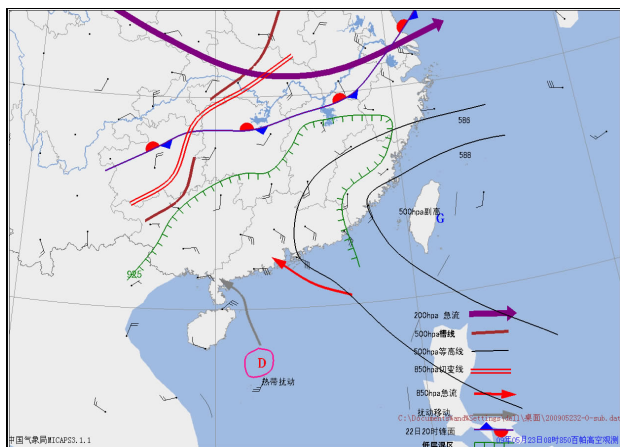


图2 2009年5月23日08时综合图

暴雨发生后,25日20时,东亚大槽开始建立,副热带高压减弱东退,华南被槽后西北风场控制,降水结束。从天气形势分析初步得出,此次强降水过程是稳定的副高下,季风扰动北上造成的结果。下面从水汽条件、动力等方面对此次暴雨过程作进一步的物理量诊断和分析。

### 3 物理量诊断

#### 3.1 水汽条件

充足的水汽是暴雨发生的必要条件,而仅仅大

气柱现存的水汽通常还不足以造成暴雨,还需上游源源不断的水汽供应。分析水汽通量发现(图3a),输送到暴雨区的水汽通道主要有两支:一支为孟加拉西南气流,另一支是南海115°E附近的东南气流,两支水汽在南海中部汇合,水汽通量最大中心达到 $18\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ ,两支气流汇合主要输送到珠江口两侧,中心值达 $8\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ ,粤东及北部湾的水汽通量则要小很多。

为探讨水汽通量散度随时间的演变,以强降水中心取东西南北各1.5个纬度的区域做平均水汽通量散度,讨论其上空不同高度水汽通量散度随时间的演变。从21日20时–22日20时,强降水中心上空基本为弱的水汽通量辐合或者辐散区,而从23日02时开始,低层出现明显的水汽辐合区,其中最大值出现在925hPa,达到 $-8.0\times 10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ (图3b),此时强降水开始出现,且在23日20时–24日14时辐合出现另一个峰值,集中在850–1000hPa高度,辐合层高度达到最大,这就表明强降水区的水汽供应非常充足,同时也对应于另一次强降水的峰值。24日20时水汽开始辐散,降水逐渐减少。因此,水汽通量散度反映出此次强降水的发生、发展和消散,在暴雨中心区有很强水汽辐合。

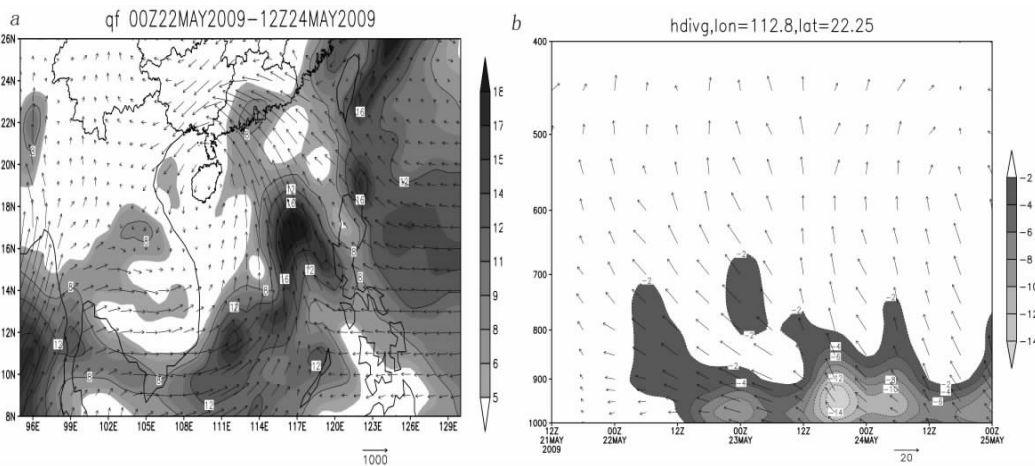


图3 (a)2009年5月22日08时–24日20时925hpa平均水汽通量(单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ );  
(b)(21.5–23.5°N;111.5–113.5°E)区域水汽通量散度时间演变(单位: $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}$ )

#### 3.2 动力条件

从台山观测站(22.25°N;112.8°E)垂直速度剖面图可分析出(图4a),从5月22日14时开始,低层开始出现上升运动,500hPa以上仍为下沉运动,此时降水还未发生。22日20时起上升运动迅速扩

展到300hPa,强度增强,23时台山站开始出现降水,500hPa出现强度为 $-7\times 10^{-3}\text{hPa/s}$ 中心,23日07:00–23日20:00强降水时段中,垂直速度再度加强,出现 $-17\times 10^{-3}\text{hPa/s}$ 中心。24日02:00–24日08:00次强降水时段中,对应垂直速度出现第二个强度中心,



之后地面降水开始明显减弱。

分析 700hPa 垂直速度区域分布 (图 4b), 可以看出在 20~23°N, 113°E 附近, 为垂直速度的负值

区, 最大上升速度为  $-13 \times 10^{-3} \text{hPa/s}$ , 说明这区域存在强烈的上升气流运动。

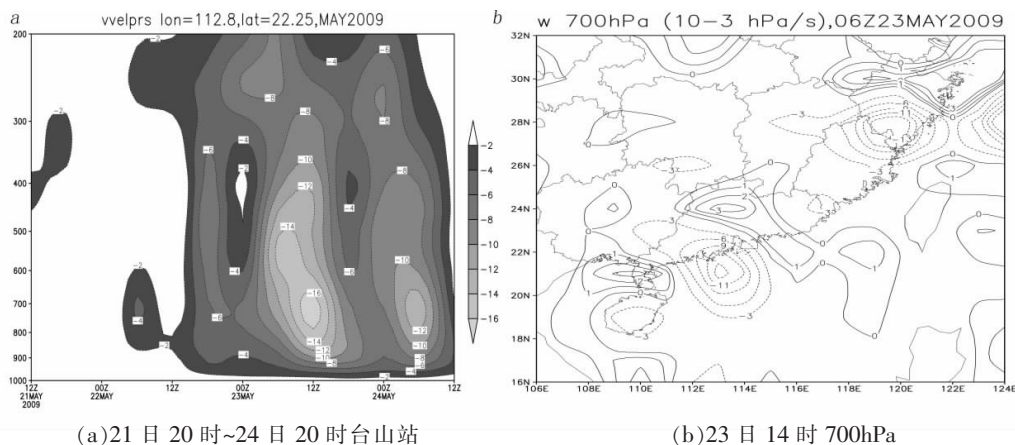


图 4 2009 年 5 月垂直速度图 (单位:  $10^{-3} \text{hPa/s}$ )

从图 5 可见, 22 日 20 时暴雨发生前, 200hPa 存在明显的辐散场, 散度中心值达  $7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 23 日 08 时高层辐散场进一步增强, 同时低层开始出现辐合中心, 高层辐散场的抽吸作用给中尺度系统的发展提供了动力条件。涡度场来看, 23 日 14 时-24 日 20 时中层一直维持正涡度 (阴影), 表明 500hPa 有正涡度平流。这种低层辐合, 高层辐散的配置既有利于上升运动, 也有利于低层中尺度系统的发展及维持。

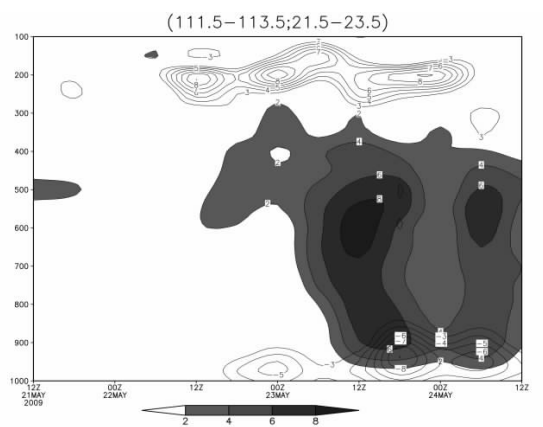


图 5 21 日 20 时-24 日 20 时暴雨区域 (21.5°N-23.5°N; 111.5°E-113.5°E) 散度、相对涡度的时间-高度剖面图 (实线为散度, 单位:  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ ; 阴影为相对涡度, 单位  $10^{-5} \text{s}^{-1}$ )

### 3.3 大气层结情况分析

假相当位温  $\theta_{se}$  是一个重要的温湿特征参数, 它在大气干绝热和湿绝热变化中都是守恒的。用假相当位温随高度的变化  $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$  表示对流不稳

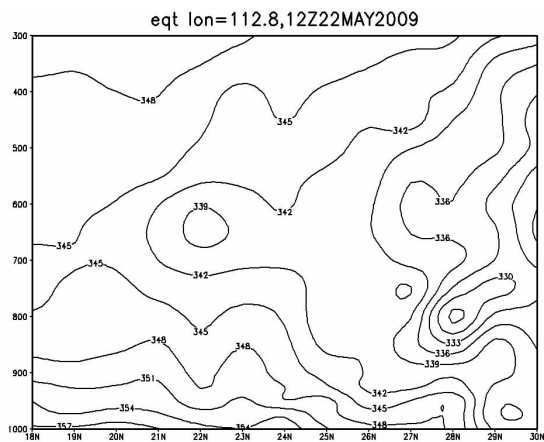


图 6 2009 年 5 月 22 日 20:00 假相当位温空间分布 (单位: K)

定, 假相当位温随高度升高而降低;  $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$  表示对流稳定, 假相当位温随高度升高而升高。沿暴雨区 112.8°E 经度作  $\theta_{se}$  的垂直剖面, 22 日 20 时, 21~23°N 附近在 1000hPa-700hPa 存在密集的假相当位温等值线,  $(\partial \theta_{se} / \partial p) > 0$ , 表示那里是不稳定区域, 在 700hPa-500hPa 假相当位温变化不明显, 处于相对的稳定层结, 500hPa 以上  $(\partial \theta_{se} / \partial p) < 0$  表示对流稳定, 随着低空暖湿空气不断流入, 低层层结变的不稳定, 容易产生强降水。

### 4.1 模拟研究的模式和方案

本文运用中国气象局数值预报创新基地发展的 GRAPES 模式系统进行暴雨过程的数值模拟试验。采用时间间隔为 6h, 分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 NCEP 再分析资料为背景场, 模拟区域中心选取为 (22.5°N,

113°E), 网格点数为 293×209, 水平分辨率 12km, 网格包括了整个雨区; 模式顶层为 10hPa, 垂直分层为 31 层, 使用 30S 高分辨率地形资料以及相应的下垫面特征资料。参数化方案: 使用 Kessler 微物理过程, Grell 积云对流参数方案, RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案, MRFPBL 以及 Noah land-surface 陆面过程。模拟时间从 2009 年 5 月 22 日 20BST 至 24 日 20BST, 共 48h, 采用 200s 的时间步长, 每 1h 时输出一次积分结果。

#### 4.2 降水模拟与观测对比分析

分析 2009 年 5 月 22 日 20 时到 23 日 20 时实况 24 小时雨量与模式降水进行比较 (图 7a,b), 主

雨带均集中在珠江口及其以西地区, 上川岛观测站实况出现 263 毫米, 模拟最大雨量出现在深圳为 180 毫米, 虽然位置略有偏移, 但强度及雨带分布与实况较一致, 模拟在粤北至江西南部有小范围暴雨降水, 实况要偏小。模式对于每 6 小时的降水也有一定的准确性, 分析 23 日 08 时-14 时的降水实况, 雨区主要集中在珠江口西侧, 模拟结果对于粤西的降水基本能模拟出来, 但降水强度偏弱。23 日 14 时-20 时的降水, 降水主要在粤西和珠江三角洲附近, 模拟比较好的把降水落区模拟出来。总体来说, 模拟结果较好地再现了实况降水的雨带位置、走向及暴雨中心的位置和强度。

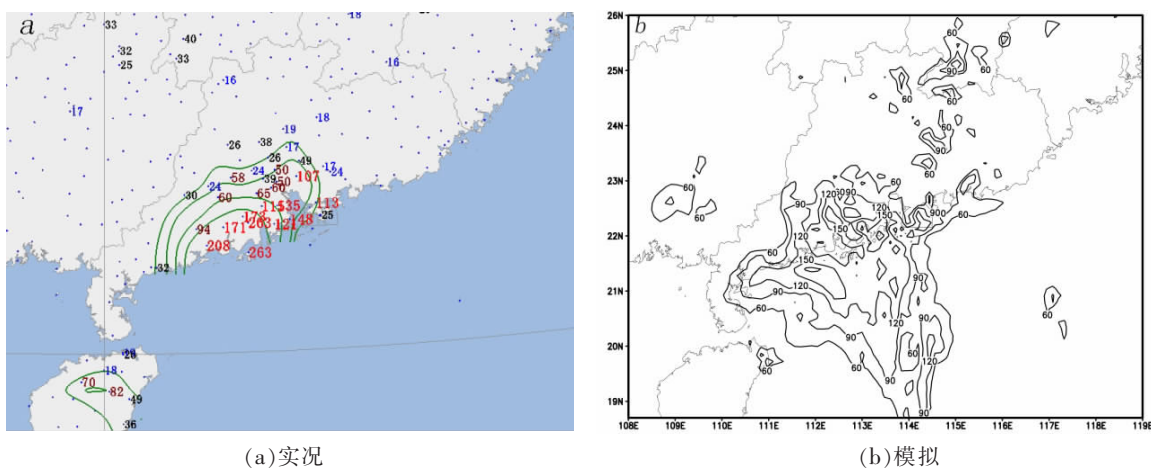


图7 2009年5月22时-23日20时雨量分布(单位:mm)

#### 4.3 大尺度环流场的模拟

从模拟出来的大尺度环流场的情况来看 (图略), 中高纬地区两槽一脊的环流形势与实况相比, 强度和位置大体一致, 模拟的西太平洋副热带高压与实况位置基本一致 (图 8), 也模拟出来南海北部的季风扰动, 850hPa 西南季风范围与实况总体吻合, 但模式模拟出来的西南季风强度要略微偏强, 总体看来模式比较成功的模拟出了这次暴雨过程, 因此可以用模拟结果来分析这次过程的细节, 以弥补观测数据不足的困难。

#### 4.4 模拟中尺度涡旋

模拟 16h 后 500hPa 的流场 (图 9a), 发现在华南南部出现一个中尺度涡旋系统, 从风场上分析这个涡旋源源不断给广东省内陆输送水汽。分析红外云图演变, 两个对流云团分别于 23 日上午和 24 日凌晨在涡旋东北侧生成, 并逐渐发展东移, 云顶亮温均低于  $-60^{\circ}\text{C}$ , 主体直径约 300km, 形状呈椭圆 (图

9b), 具有中  $\alpha$  尺度特征, 缓慢移动的对流云团造成了台山冲蒺镇 100.4mm/h 强降水。

模拟 5 月 23 日 12 时暴雨区上空的涡度场和散度场, 850hPa 在两广交界一带出现一个辐合中心, 中心最大值达到  $-7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 珠江口西侧的暴雨区处于辐合区内, 200hPa 则处辐散区, 最大辐散中心值达  $10 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 850hPa 在南海北部 ( $20^{\circ}\text{N}$ ,  $112^{\circ}\text{E}$ ) 维持一个的相对涡度的大值中心 (图略)。经过台山站经度 ( $112.8^{\circ}\text{E}$ ) 做相对涡度和散度的垂直剖面图 (图 9c,d), 可发现在  $20.5^{\circ}\text{N}$  和  $21.5^{\circ}\text{N}$  存在两个相对涡度正值区, 中心最大值达到  $45 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  和  $32 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 而散度场上也存在两个负值中心, 最大辐散中心值达  $-15 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  和  $-20 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , 对比模拟雨带分布, 发现这两个区域分别对应于海上的强降水中心和陆地降水中心。这种低层强辐合, 高层辐散的配置给对流云团的发展提供有利的动力条件, 中尺度涡旋系统的发展和维持, 不仅给陆地带来充沛水

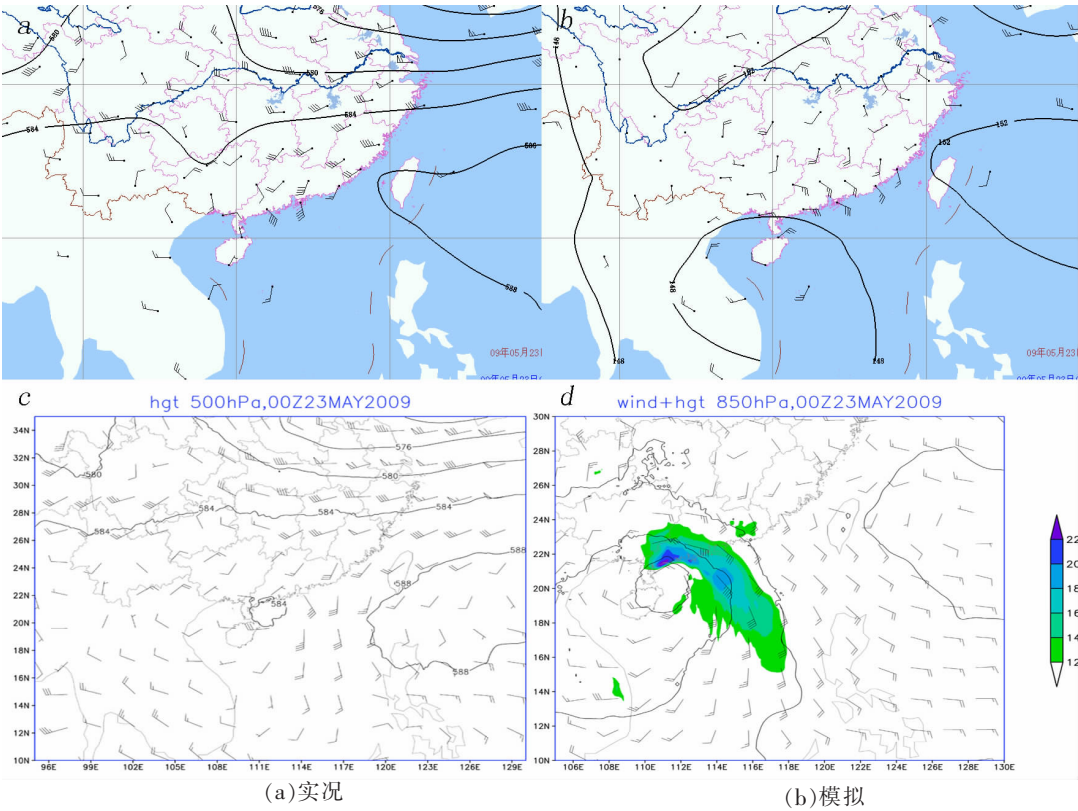
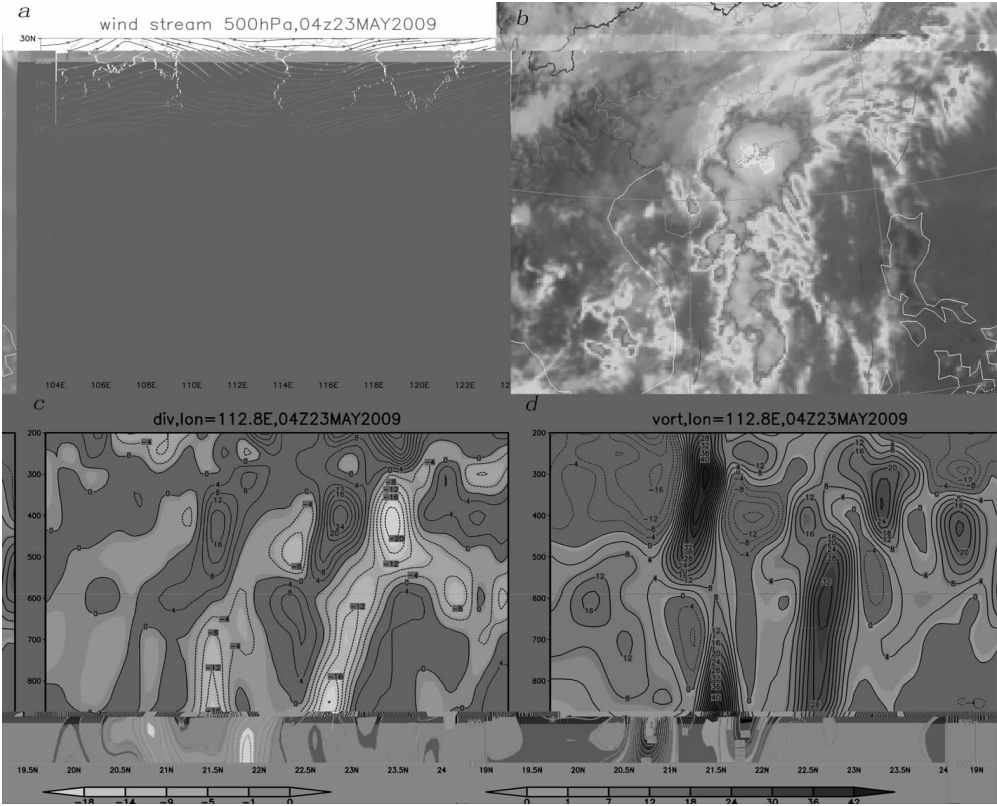


图 8 2009 年 5 月 22 时-23 日 20 时雨量分布(单位:mm)



(a)500hPa 流场,(b)红外云图,(c)沿 112.8°E 散度的垂直剖面(单位: $10^{-5}s^{-1}$ ),  
(d)沿 112.8°E 相对涡度的垂直剖面(单位: $10^{-5}s^{-1}$ ),

图 9 模拟 16h(5月23日 12 时)



汽,还给中 $\alpha$ 尺度对流系统生成发展提供了正涡度,从而造成珠江口西侧的特大暴雨天气过程。

## 5 结论

(1)2009年5月23-24日强降水中心出现在江门-阳江一带。暴雨过程期间,华南处于200hPa西风急流南侧辐散区,500hPa586线位于珠江口附近,西太平洋副高稳定维持,使得南海热带扰动云团发展,并沿着副高西侧的偏南气流北抬,是此次大暴雨过程的有利天气系统。

(2)水汽通量场的分析表明,水汽主要来自孟加拉西南气流和南海115°E附近的东南气流,两支水汽在南海中部汇合,然后输送到珠江口两侧,水汽通量散度集中在925hPa,并具有明显的日变化。

(3)垂直速度分析表明,垂直上升运动提前约6小时于强降水的出现,暴雨中心位于最大垂直速度中心附近,强降水发生在有利的垂直上升运动下。

(4)GRAPES模式成功模拟出此次强降水过程的大尺度背景场的演变、中尺度降雨的分布,基本能够表现出中尺度系统降水的发生、发展和演变过程,但模拟的降水强度偏弱。模拟显示中尺度涡旋系统是造成暴雨的主要影响系统,其不仅造成陆地的低空辐合高空辐散,还提供了正涡度,促使2个中 $\alpha$ 尺度对流系统的生成和发展东移,直接导致暴雨的发生。

### 参考文献:

- [1] 林良勋,冯业荣,黄忠等.广东省天气预报技术手册[M].北京:气象出版社,2006.
- [2] 林良勋,吴乃庚,黄忠,等.广东2008年罕见“龙舟水”特点及成因诊断分析[J].气象,2009,35(4): 43-50.
- [3] 赵玉春.热带扰动引发华南前汛期暴雨的机理研究[D].南京:南京信息工程大学,2007.
- [4] 罗建英,廖胜石,钟祥平.2004年7月华南暴雨期水汽的初步研究[J].广西气象,2005,26(S1): 47-49.
- [5] 张小霞,陈小芸,杨宇声,等.佛山一场大暴雨的强降水特征[J].广东气象,2006,28(2): 40-42.
- [6] 温晶,纪忠萍,谢炯光.2008年前汛期广东长连续暴雨过程的500hPa环流特征[J].广东气象,2008,30(4): 8-11.
- [7] 吕梅,成新喜,陈中一,等.1994年华南暴雨期间夏季风的特征及其对水汽的输送[J].热带气象学报,1998,14(2): 135-141.
- [8] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.华南前汛期一次暴雨过程中的中尺度对流系统[J].中山大学学报:自然科学版,2003,42(3): 73-77.
- [9] 蒙伟光,王安宇,李江南,等.华南暴雨中尺度对流系统的形成及湿位涡分析[J].大气科学,2004,28(3): 330-341.
- [10] 张润琼,沈桐立.贵州02.6大暴雨的模拟与诊断分析[J].气象,2006,32(1): 95-101.
- [11] 孙建华,赵思雄.华南“94.6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究Ⅱ物理过程、环境场以及地形对中尺度对流[J].气象,2013,39(5).
- [12] 伍志方,曾沁,叶爱芬,等.珠江三角洲短时大暴雨的多普勒特征及成因[J].自然灾害学报,2009,18(5): 119-126.
- [13] 王丛梅,丁治英.河北夏季低涡暴雨的统计研究[J].自然灾害学报,2006,15(5): 69-75.
- [14] 戴廷仁,寿绍文,陈艳秋,等.辽宁地区一次暴雨过程成因的位涡诊断分析[J].自然灾害学报,2006,15(3): 31-36.
- [15] 陶诗言.中国之暴雨[M].北京:科学出版社,1980.
- [16] 薛纪善.1994年华南夏季特大暴雨研究[M].北京:气象出版社,1999.
- [17] 陈炳洪,林良勋,张维.5.23广东特大暴雨过程特点及数值诊断分析[J].热带气象学报,2011,27(5): 738-744.
- [18] 徐蓉,苗峻峰,谈哲敏.南京地区城市下垫面特征对雷暴过程影响的数值模拟[J].大气科学,2013年第6期,1235-1246.
- [19] 田晨,周伟灿,苗峻峰.中国地区下垫面特征对强对流天气影响研究进展[J].气象科技,2012,40(2): 207-212.
- [20] 林毅,刘铭,刘爱鸣.高低空急流在闽西北大暴雨过程中的作用及数值模拟[J].气象科学,2006,26(4): 449-455.
- [21] 赵思雄,傅慎明.2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析[J].大气科学,2007,31(6): 1059-1075.
- [22] 于波,林永辉.引发川东暴雨的西南低涡演变特征个例分析[J].大气科学,2008,32(1): 141-154.
- [23] 郑钢,张铭.一次切变线暴雨过程的诊断研究和数值试验[J].气象科学,2004,24(3): 294-302.
- [24] 杨婷,苗春生,唐振飞.江西“6.19”特大暴雨天气过程诊断分析[J].气象与减灾研究,2010,33(3): 34-41.
- [25] 孙素琴,于爱兵,郑婧.一次梅雨锋暴雨与中- $\beta$ 尺度低涡及小高压的关系[J].气象与减灾研究,2012,35(2): 23-30.
- [26] 黄晓东,梁巧倩,郑伟杰,等.2009年广东前汛期一次连续性特大暴雨的特征及成因[J].广东气象,2009,(6).