

文章编号: 2096-1618(2023)04-0440-10

# “5·22”广州西北气流控制下特大暴雨过程的中尺度特征分析

贺芸萍<sup>1</sup>, 谌芸<sup>1,2,3</sup>, 肖天贵<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 国家气象中心, 北京 100081; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082)

**摘要:**为提高对西北气流控制下暴雨过程的认识,以期为此类暴雨预报提供支撑,利用国家级自动站与区域加密自动站逐小时降水资料, FY-2G 卫星和广州多普勒天气雷达探测等资料,采用中尺度分析技术与重要物理量参数计算等方法,分析“5·22”广州特大暴雨过程的中尺度特征。结果表明:降水主要发生在夜间至凌晨,短时强降水占日雨量的比均达 75%,强对流性明显。暴雨过程由在西北气流控制下的下滑槽配合对流层低层的西南低空急流及其左侧南移进入广东的深厚低涡切变系统产生,中高层西北气流与低层暖平流形成上干冷、下暖湿的不稳定层结。在高温高湿环境下东北风与西南风形成的地面辐合线触发对流,夜间随着低空急流增强,地面辐合增幅,上升运动加剧。 $\beta$  中尺度对流云团合并加强,后向传播的对流单体在西北气流引导下形成列车效应,伴随着高降水效率的热带低质心暖云降水,导致珠三角强降水产生并持续,从而形成特大暴雨。

**关键词:**华南前汛期暴雨;中尺度特征;槽后西北气流;地面中尺度辐合线;列车效应

**中图分类号:** P438

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2023.04.011

## 0 引言

华南地区具有年雨量最大、暴雨次数最多、雨季长的特点<sup>[1]</sup>,是中国发生暴雨洪涝灾害频数最高的地区。华南暴雨既受到西风带系统影响,同时也受到热带地区天气系统影响,中小尺度的对流系统活动十分频繁,再加上华南地区复杂的喇叭口和海岸线等地形,将对中小尺度对流系统的形成发展起到外强迫作用,预报的难度非常大<sup>[2]</sup>。因此,华南暴雨尤其是华南前汛期暴雨一直是气象专家学者们研究的重点课题之一。

20 世纪 70 年代末期开展的华南前汛期暴雨试验发现,观测到的 12 次暴雨过程中有 11 次过程出现锋前暖区暴雨<sup>[3]</sup>,可见暖区暴雨在华南前汛期是一种常见的暴雨类型。除此之外华南前汛期还有一种发生在 500 hPa 高空槽后西北气流中的暴雨,相比暖区暴雨更少见,其与暖区暴雨最主要的区别在于暖区暴雨发生在槽前强盛的西南气流中,而槽后暴雨的发生区域处于槽后西北气流控制下,这类暴雨具有历时短、雨强大、易致灾、预报难的特点<sup>[4-5]</sup>。高空槽后的西北气流引导冷空气下滑并向底层入侵,叠加在低层暖湿不稳定层结上,为暴雨天气提供强的不稳定层结条件,有利于中尺度对流活动;此外,中层西北气流与低空西南急

流的相互作用,加大了中高层垂直风切变,提供充足动力条件,暴雨过程的对流强度因此加强<sup>[6-9]</sup>。

虽然发生在不同天气尺度系统的相互作用下,但暴雨本身是中尺度现象,通常直接产生暴雨特别是极端暴雨的天气系统为中尺度对流系统<sup>[10]</sup>。慕建利等<sup>[11]</sup>分析强降水的演变特征发现在静止锋前暖区的大片强降水区内,暴雨中心的出现与 $\beta$  中尺度对流系统和地面中尺度系统的发生发展有关。强降水通常由中 $\alpha$  尺度气旋内有组织的 $\beta$  中或 $\gamma$  尺度对流系统(MCS)产生<sup>[12-13]</sup>。在有利于强降水的环境条件下,含有中气旋的 $\beta$  中尺度对流系统会明显增加强降水的可能<sup>[14]</sup>。发生在华南地区的暴雨大多是由地面中尺度辐合线触发对流,从而产生强降水<sup>[15-17]</sup>。叶朗明等<sup>[18]</sup>对地面风场特征的分析表明,随着增强的超低空东南急流向北推进,在地形强迫作用下,当对流云团移至中尺度辐合线上时,对流单体将得到发展增强。850 hPa 的低涡与切变线作为华南前汛期暴雨中最常见的系统之一,对中尺度对流系统(MCS)的发生发展有明显的影响<sup>[19]</sup>,是导致暴雨产生的直接影响系统。傅慎明等<sup>[20]</sup>对一类低涡切变型的华南前汛期致洪暴雨的研究分析发现西南涡是这次广西暴雨过程的直接影响系统。地面中尺度低压是辐合维持和水汽集中的重要机制<sup>[21]</sup>。曾智琳等<sup>[22]</sup>分析地面气象要素发现中尺度对流系统的入流作用促使中尺度低压槽形成,而槽内负变压配合东南风受地形摩擦作用形成风速辐合

收稿日期:2022-04-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41930972,41975001,91937301)

通信作者:谌芸. Email:chenyun@ema.gov.cn

的共同作用,触发了对流。

2020年5月21日半夜至22日凌晨,广州东南部及东莞北部发生了一次高空处于西北气流控制下的特大暴雨过程,广州市有42个站点小时雨强超过80 mm/h,8个区域加密自动站22日08时日雨量超过250 mm/24 h,主要降水区域位于增城、黄埔区一带。东莞老城区、广州黄埔区以及增城受此次过程影响发生严重的城市内涝,多条街道被淹,严重影响市民出行,中小学因此停课。前期数值模式将此次暴雨的主要落区预报在广东中东部和沿海等地而非珠三角地区,预报效果并不十分理想。预报员主观预报结论对雨带整体把握较好,但对广州、东莞等地局地极端暴雨的精细化预报方面仍存在一定偏差。因此,这次发生在下滑槽后西北气流控制下特大暴雨的物理概念模型、中尺度特征以及对流的触发机制等是值得分析的问题。

## 1 资料与方法

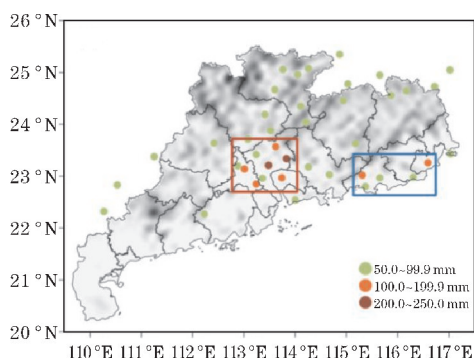
本文利用NCEP/NCAR  $1^\circ \times 1^\circ$ 时间间隔为6 h的再分析资料,国家级地面自动站08时日雨量与区域加密

自动站逐小时降水资料,地面自动站全要素小时观测资料与高空常规观测资料,清远加密探空资料,FY-2G卫星以及广州多普勒天气雷达探测资料;主要采用Cressman插值方法<sup>[23]</sup>,中尺度分析技术<sup>[24-25]</sup>以及重要物理量参数计算方法,对此次暴雨过程的中尺度特征进行分析。

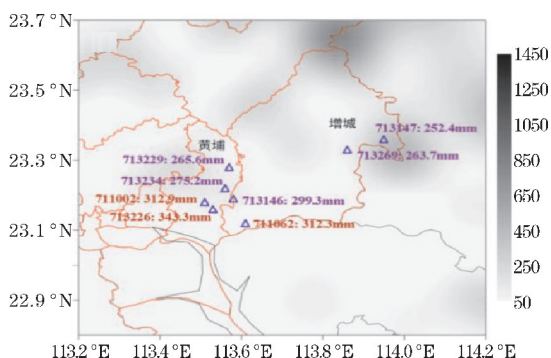
## 2 降水特征分析

### 2.1 空间分布

由22日08时的24 h降水量分布(图1a)可见:暴雨过程主要发生在广东省范围内,各地均有日雨量 $\geq 50$  mm/24 h的降水,东部沿海与珠三角地区出现达100 mm/24 h以上的大暴雨,广州东南部日雨量超过200 mm/24 h。对广州市区域自动站22日08时日雨量进行分析发现:有8个自动站日雨量超过250 mm/24 h达到特大暴雨量级(图1b),主要分布在广州黄埔区东部、增城西南端及其东部地区。



(a) 国家站日雨量 $\geq 50$  mm/24 h 站点分布



(b) 广州区域自动站日雨量 $>250$  mm/24 h 站点分布

图1 2020年5月21日08时至22日08时站点日雨量分布(红色方框表示日雨量 $\geq 100$  mm/24 h的珠三角地区,蓝色方框表示日雨量 $\geq 100$  mm/24 h的广东东部沿海地区,红色实线为广州区界,蓝色三角为达到特大暴雨量级的自动站点,紫色表示该站点日雨量 $>250$  mm/24 h,红色表示该站点日雨量 $>300$  mm/24 h)

### 2.2 时间分布

由22日08时日雨量超过250 mm/24 h的8个区域自动站小时降水变化(图2)可见:本次暴雨过程主要降水时段为夜间至凌晨(21日19时-22日06时),21时位于增城东部的713147站点最先发生80 mm/h以上的强降水,此后该站点降水强度迅速减弱至5 mm/h以下;降水最强时段为22日00-03时,各站点均有超过60 mm/h的强降水发生,80 mm/h以上的强降水集中在02-03时,多个站点达到其降水极值,其中位于增城西南部紧邻黄埔的713226站点连续2 h雨强达到100 mm/h以上,最大雨强为117 mm/h;各站点 $>20$  mm/h的短时强降水占日雨量比例均大于75%,具有强对流性。可将本次降水分为3个阶段:21日19-22时增城东部最先发生强降水;21日22时-22日

03时黄埔东部及增城西南端强降水集中发生加强并维持;22日03-05时黄埔东南部降水明显减弱后再次增强。

22日00-03时降水最强时段内,由22日08时日雨量超过250 mm/24 h的8个区域自动站6分钟雨量变化(图3)可见:该时段内各站点均有超过10 mm/6 min的强降水,00-02时各站点雨量有明显的峰值,波动较大,02-03时各站点降水较为均匀,稳定少波动。15 mm/6 min以上的强降水主要集中在00:36-02:12,713146站点在01:06和01:12连续两个时次的6分钟雨强达20 mm/6 min以上,最大雨强可达22.1 mm/6 min。增城东部降水减弱的同时,黄埔东部及增城西南端的降水开始沿由北至南的地理位置顺序增多,反映雨团从北向南的移动趋势。

综上,本次“5·22”广州特大暴雨过程存在广东



东部沿海和珠三角地区两个暴雨中心,广州市有8个区域加密自动站点达到特大暴雨量级,主要分布在增城与黄埔一带。降水主要发生在夜间至凌晨,最强时段为22日00-03时,雨团由北向南移动,大于20 mm/h的短时强降水占日雨量的比例均大于75%,具有强对流性和局地性。

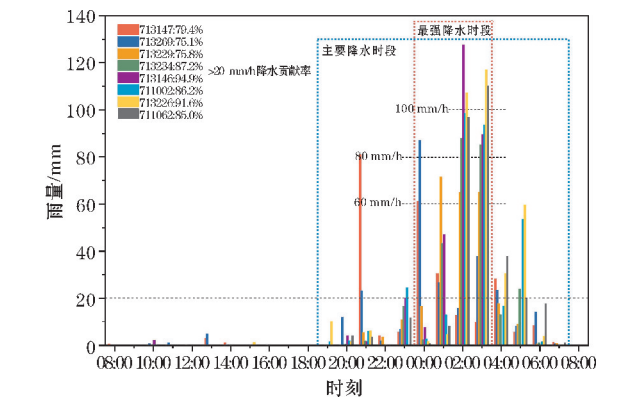


图2 2020年5月21日08时至22日08时雨量>250 mm/24 h的8个区域自动站小时降水变化

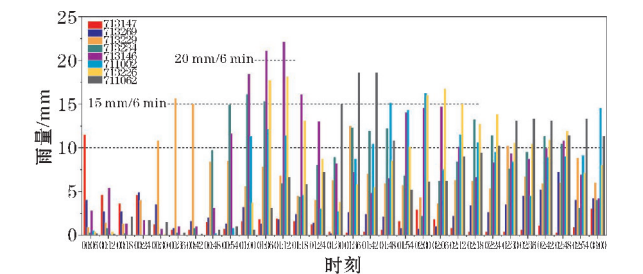


图3 2020年5月22日00时至03时雨量>250 mm/24 h的8个区域自动站6分钟雨量变化

### 3 环境场分析与对流触发机制

#### 3.1 大尺度环流背景

21日18时暴雨过程发生前,广东位于200 hPa西北高空急流右侧,被南亚高压东侧的西北气流所控制(图4a);珠三角地区处于500 hPa下滑槽后西北气流控制下(图4b);在低层850 hPa和925 hPa,福建西部-广东北部一带存在低涡切变线系统,珠三角地区位于850 hPa切变线南侧的低空急流区(图略),高低空急流耦合的天气形势有利于上升运动的维持和发展。

对18时(图5a)和00时(图5b)进行中尺度分析,珠三角地区始终处在500 hPa高空槽后西北气流控制下;位于福建西部至广东北部一带的低涡切变线系统逐渐南压进入广东,其700 hPa和850 hPa位置一致,说明该系统较为深厚。本次过程日雨量大于50 mm/24 h的降水主要发生在西南低空急流左侧,高空槽后西北气流控制的区域内,上空存在低涡系统后部的冷切变,由此可知本次暴雨过程处在下滑槽后西北气流的背景下,主要影响系统有西南低空急流及其左侧的低涡切变系统。

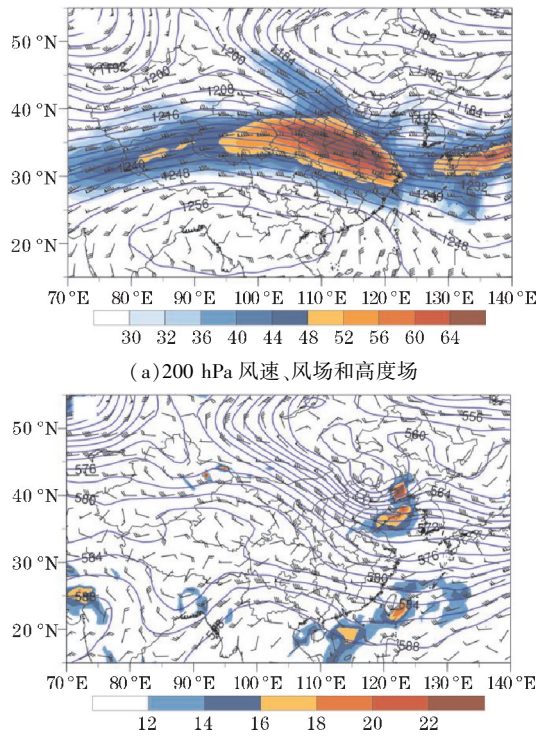


图4 2020年5月21日18时风速(填色)、风场和高度场(蓝色等值线)

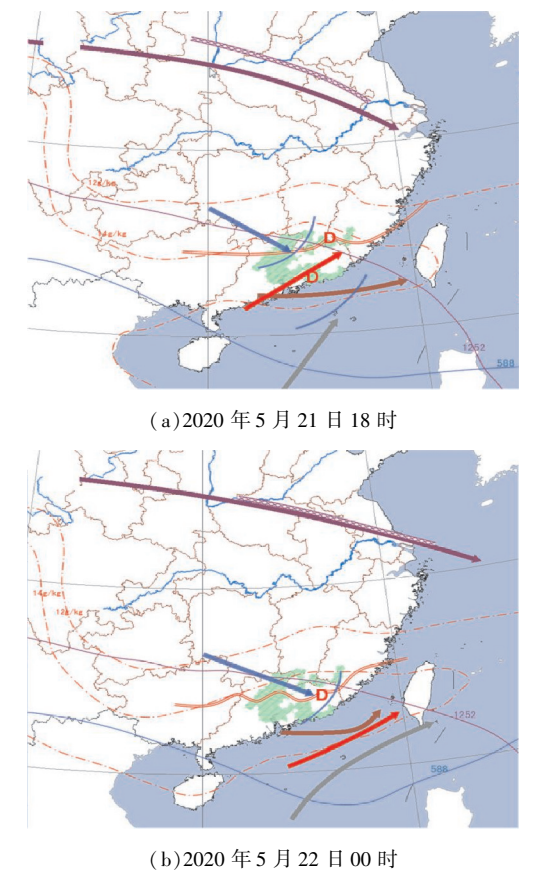


图5 中尺度分析(紫色:200 hPa、蓝色:500 hPa、红棕色:700 hPa、红色:850 hPa、灰色:925 hPa;粗箭头代表急流、细箭头代表显著流线、交叉线代表高空急流核、双实线代表切变线、虚线代表辐合线、短实线代表槽线、长实线代表等高线、红色点划线代表850 hPa比湿的等值线、阴影区代表>50 mm/24 h的强降水区)

3.2 环境场条件

21日18时(图6)至22日00时(图略),925 hPa超低空急流使大量暖湿空气持续向广东沿海一带输送,形成了一条西南-东北向的大值水汽输送带,水汽到达暴雨区上空受急流左前侧的辐合气流影响发生辐合,达 $-4\times10^{-5}\text{ g}/(\text{ s}\cdot\text{ cm}^2\cdot\text{ hPa})$ 以上,比湿大于 $16\text{ g/kg}$ 说明暴雨区上空低层水汽十分充足,为暴雨发生提供了好的水汽条件。暴雨区位于中心风速达 $64\text{ m/s}$ 以上的200 hPa西北高空急流右侧辐散区内

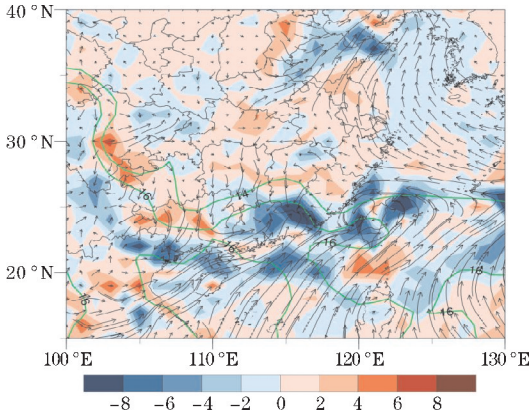
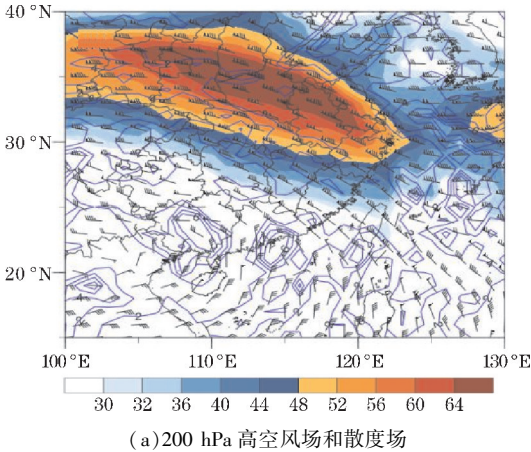
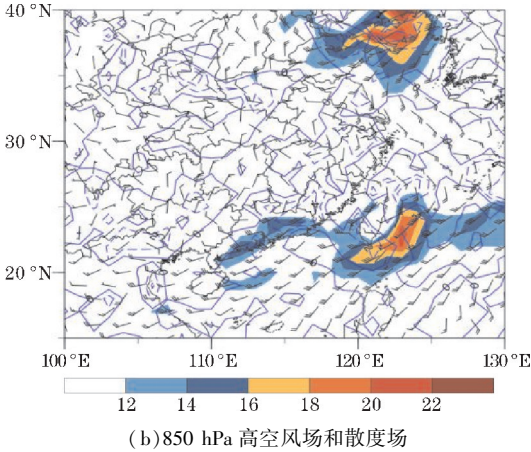


图6 2020年21日18时925 hPa比湿(绿色实线)、水汽通量(矢量箭头)及水汽通量散度(填色)分布



(a)200 hPa 高空风场和散度场



(b)850 hPa 高空风场和散度场

图7 2020年5月21日18时高空风场(填色风速)和散度场(蓝色实线辐散区,蓝色虚线辐合区)

(图7a),低层850 hPa风速超 $12\text{ m/s}$ ,达到低空急流级别且存在辐合(图7b),高层辐散配合低层辐合,动力抬升条件充足。

根据21日08时(图略)与20时(图8)清远站探空曲线,08时暴雨发生前的SI指数为 $-3.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{K}$ ,K指数为 $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,测站500 hPa以下风向随高度发生顺转,中高层西北气流携带干冷空气入侵,配合低层的暖平流,形成了上干冷、下暖湿的温度垂直结构,加强了大气层结不稳定。20时垂直风切变较08时更强,925 hPa以下风向由东北风随高度顺转为西南风,中低层风向由西南风转为西北风,有利于近地层对流触发且对流触发后能有组织地发展;对流有效位能(CAPE)增至 $2716.2\text{ J/kg}$ ,对流抑制能量(CIN)为 $0\text{ J/kg}$ ,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)都接近1000 hPa,说明此时处在高能高湿的环境下极易发生对流,且对流一旦发生,就能在较低的高度迅速发展起来。

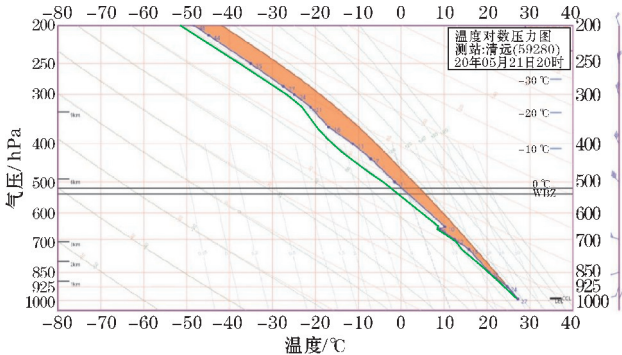


图8 2020年5月21日20时清远站探空

3.3 对流触发机制

21日22-00时,东北风与西南风在广州中西部发生辐合,形成一条呈西北-东南走向的地面中尺度辐合线并向南移动(图略)。22日00时(图9a)该地面辐合线南压至广州东南部一带,在其西南方向触发新的对流,促使对流系统向西南方向传播,增城东部受其影响产生达 $80\text{ mm/h}$ 以上的强降水。当对流单体在地面辐合线附近生成时,将进入气流辐合区及不稳定能量大值区,使回波加强发展产生强降水<sup>[26]</sup>。22日01-03时(图9b~d),由于夜间低空急流加强,风速增大,地面辐合线两侧风场发生明显的气旋式旋转,辐合抬升暖湿空气,对流被进一步触发,边界层西南风与东北风之间的对峙使辐合线位置稳定少动,对流系统也能稳定维持在其上空,因此该时段内发生并维持了2 h强度超过 $100\text{ mm/h}$ 的极端降水。

综上,本次广州特大暴雨过程的对流触发机制主要是:处在高能高湿的环境下,东北风与西南风形成的地面辐合线触发对流;夜间随着低空急流增强,地面辐合增幅,加剧上升运动,辐合线得以稳定维持。合适的层结高度加上中低层的强垂直风切变,使对流能在较低的高度迅速发展并有利于其组织化。



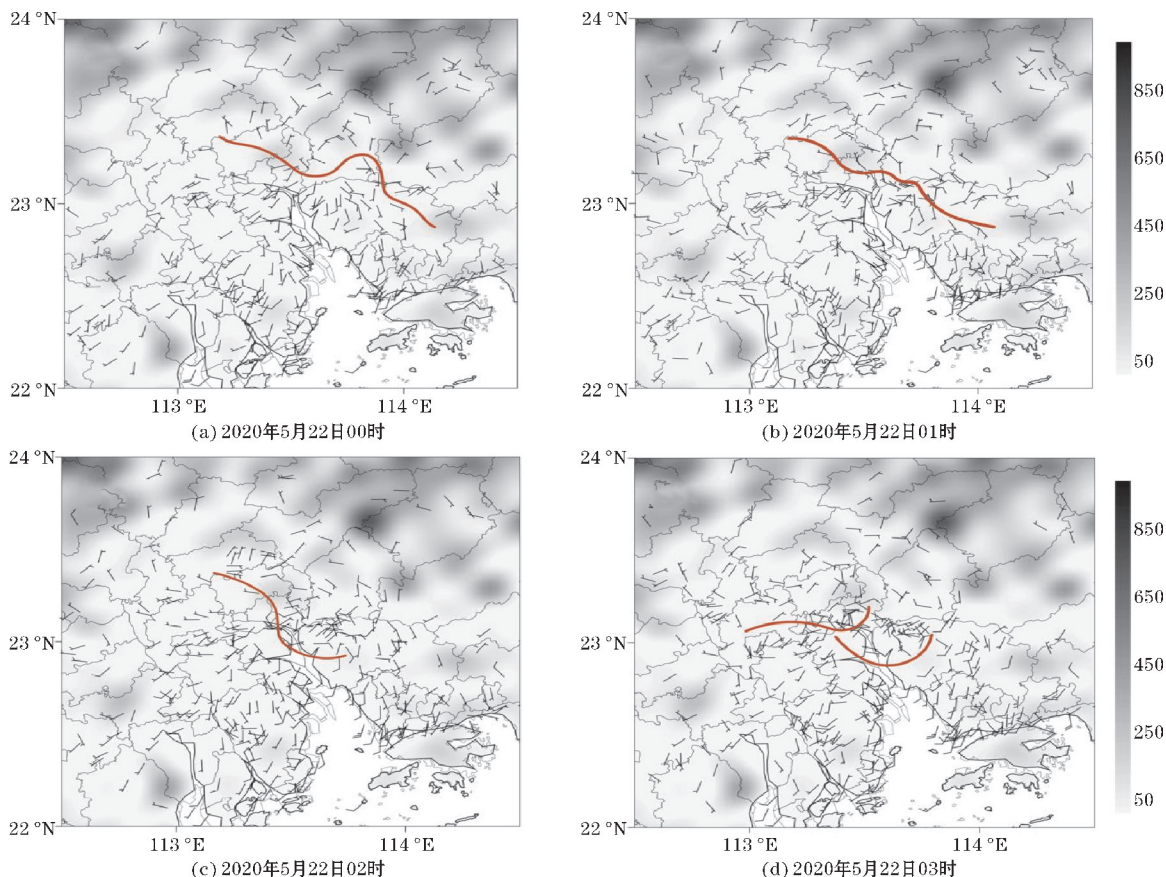


图9 地形高度(阴影区)与地面风场(红色实线为地面中尺度辐合线)

## 4 中尺度云团和雨团的发展演变特征

21日15–17时,位于珠江口以东的雨团在其后部沿中层引导气流移来的小对流云团影响下东移,与东部沿海的雨团合并为一个直径约100 km的中尺度雨团a(图略),18时又因从西北方向移来的小对流云团与海面上的 $\alpha$ 中尺度云团合并而加强,导致东部沿海发生50 mm/h的强降水(图10a)。18时至22日00时,从西北方移来的对流云团A1停滞在珠江口东北部,与A2合并成一个冷中心 $<-82^{\circ}\text{C}$ 的 $\beta$ 中尺度对流云团A,其西侧有一对流云团C生成(图11a~e),小时雨强 $>10\text{ mm/h}$ 的雨团在珠三角地区聚集,22时合并加强为一个水平尺度100 km,降水大值中心达70 mm/h以上,与对流云团A核心区位置一致,呈西北–东南走向的中尺度雨团b(图10a~e)。21时至22日02时,边界层东北风与西南风对峙使上空的 $\beta$ 中尺度对流云团A稳定少动,对流云团C在西北气流引导下与其合并形成一个中尺度对流复合体A(图11e~j),对流云团C生成的雨团c也与b合并导致降水进一步增强(图10d~i),黄埔东部因此出现达100 mm/h的极端降水并维持了2 h。

综上,在西北引导气流下对流云团合并加强,雨团受其影响聚合并导致降水强度增强,在此过程中夜间低空急流加强,边界层风向对峙使得地面中尺度辐合线稳定维持,其上空的 $\beta$ 中尺度对流云团A也稳定少动,随着对流云团C与A合并形成中尺度对流复合体A,降水再次增强并持续,最终形成暴雨。

## 5 中尺度对流系统的雷达特征

### 5.1 雷达回波的演变

分析广州多普勒雷达组合反射率演变发现,21日18–21时(图12a~d),位于广州中部的单体风暴后方的线状对流单体向西南扩展,与前方的回波合并形成一条呈东北–西南向的 $\beta$ 中尺度带状对流系统,21时增城东部受其影响出现达80 mm/h以上的强降水。21–23时(图12d~f)持续新生的对流单体在带状对流系统西北方组织排列,整体向东南方向扩展形成水平尺度达100 km,呈东西走向的多单体线状风暴,后向传播特征明显,与此同时在中层西北气流引导下对流单体移经黄埔等地,有站点开始发生 $>20\text{ mm/h}$ 的短时强降水。

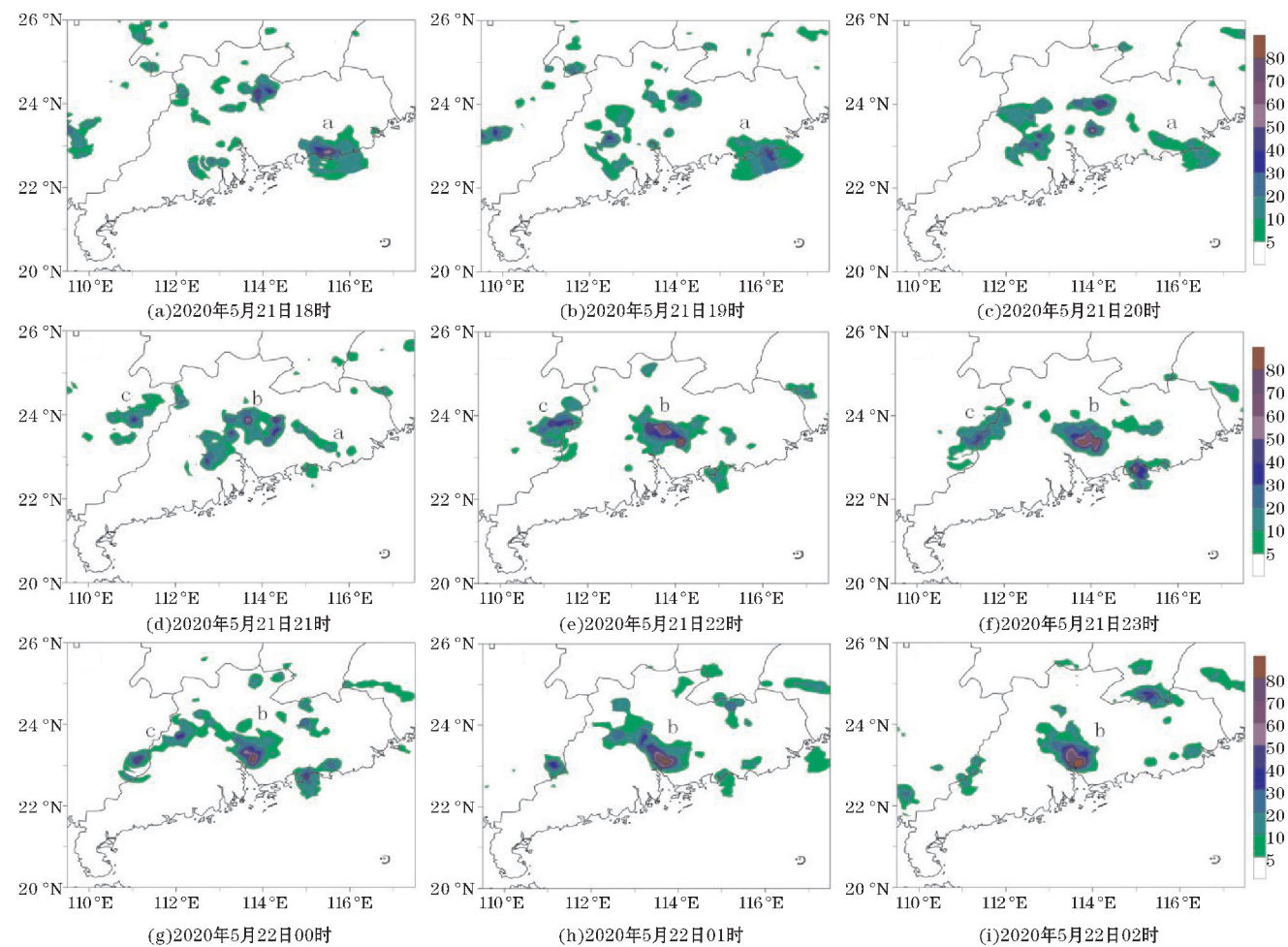


图 10 区域自动站小时雨量

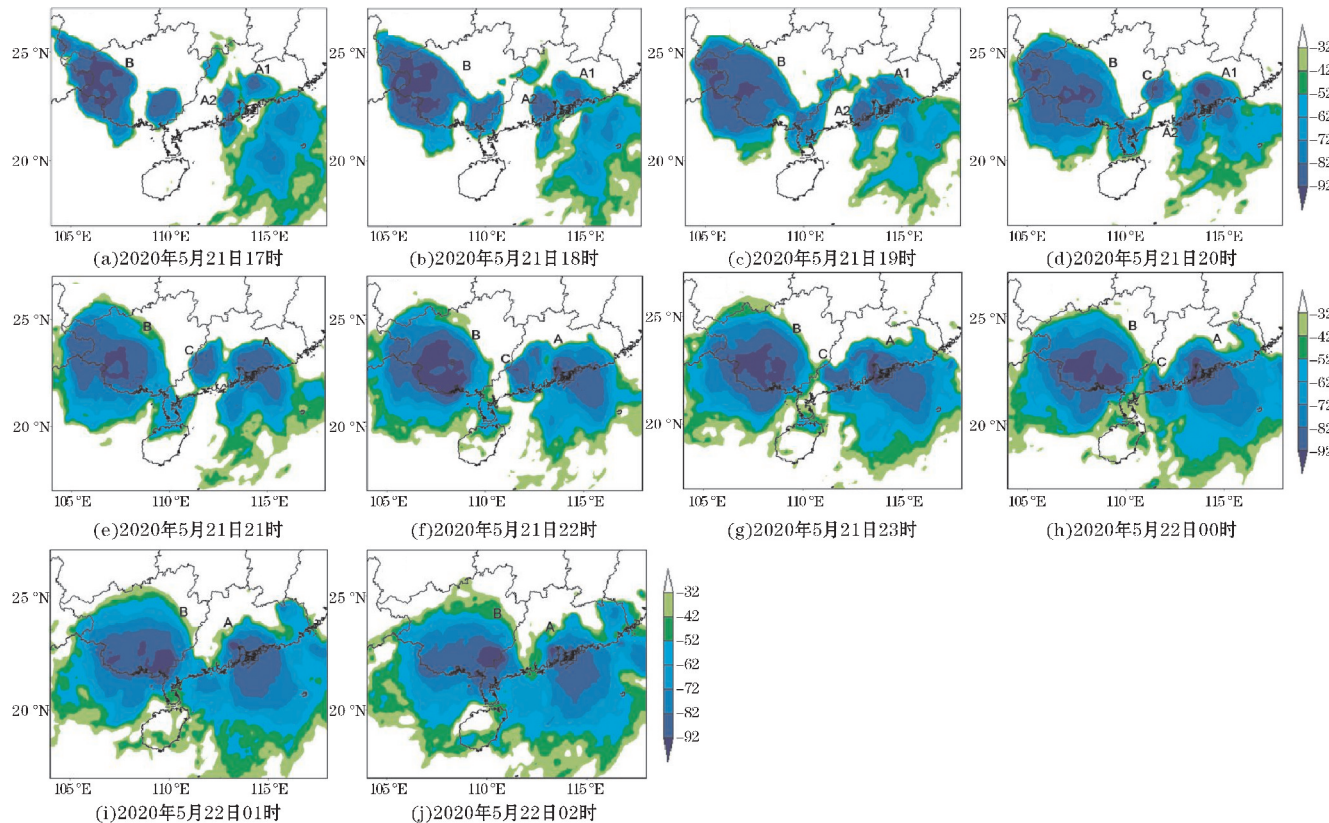


图 11 FY-2G 卫星 TBB 逐时演变



21日23时至22日00时(图12f~g),中心强度达45 dBZ以上的对流单体在强回波北部生成后向东南扩展形成两条线状回波,与其西侧的线状对流单体呈西北-东南向平行排列往东南方向移去,发生列车效应。00~02时(图12g~i),测站西北方移入广州的松散回波逐渐加强为直径达25 km以上,中心裹挟有50~55 dBZ对流单体的 $\beta$ 中尺度对流系统,并转向偏东方向移动,受其移近影响,黄埔东部站点6分钟雨量开

始增多,01时 $\beta$ 中尺度对流系统的强中心位于黄埔南部,此后逐渐衰减为东北-西南走向的带状回波向东南移去,在该回波后部东莞以西和增城西南端有回波强度达40 dBZ以上的对流单体生成,而其西北方约45 km处形成一条强度达25 dBZ以上,中心线状排列着多个30~45 dBZ对流单体的带状回波,与其平行排列向东南方向移去。

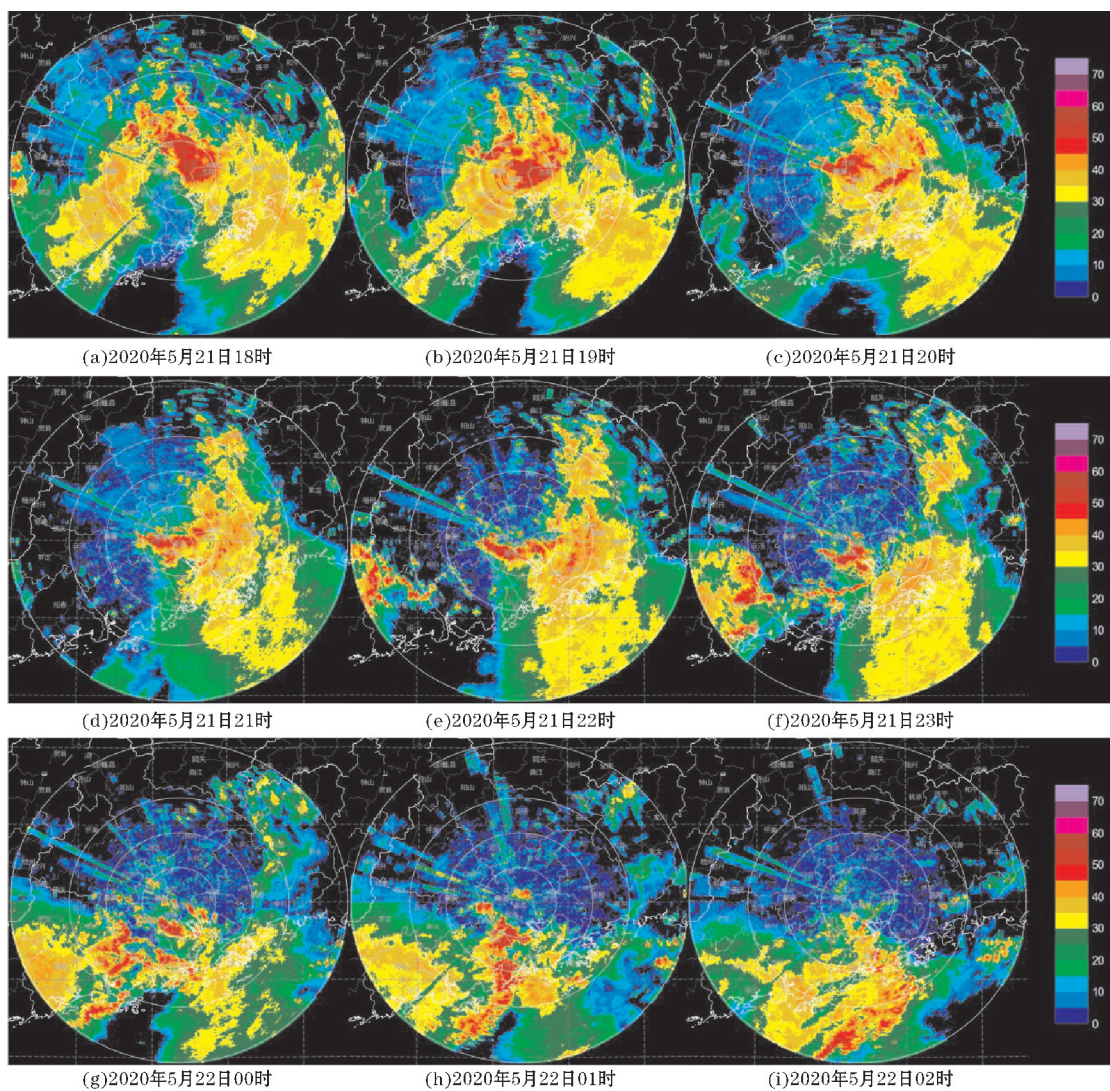


图12 广州多普勒雷达组合反射率演变

## 5.2 垂直结构特征

根据区域加密自动站6分钟雨量,分别选取暴雨过程的两个阶段中最强时次(21日20:36, 13.1 mm/6 min; 22日01:12, 22.1 mm/6 min)作雷达回波垂直剖面来分析其垂直结构特征。

分别沿图13(a~b)中黑色实线作垂直剖面,21日20:36 45 dBZ以上的强回波呈柱状,其顶高扩展至6 km,距离测站最近的强回波顶高仅2.5 km,但回波

强度达50 dBZ以上,回波顶呈多峰型结构,能扩展至15 km左右,为积层混合云降水。带状对流系统中镶嵌着多个对流单体,正是这些对流系统造成了该时段的强降水(图13c)。22日01:12,根据20时清远探空计算0℃层高度约为5.6 km,此时45 dBZ以上的强回波区位于0℃层以下,强度大于40 dBZ的回波在7 km高度以下,符合暖层厚、低质心的结构特征,具有热带低质心暖云降水性质,有利于产生高效率的降水(图13d)。



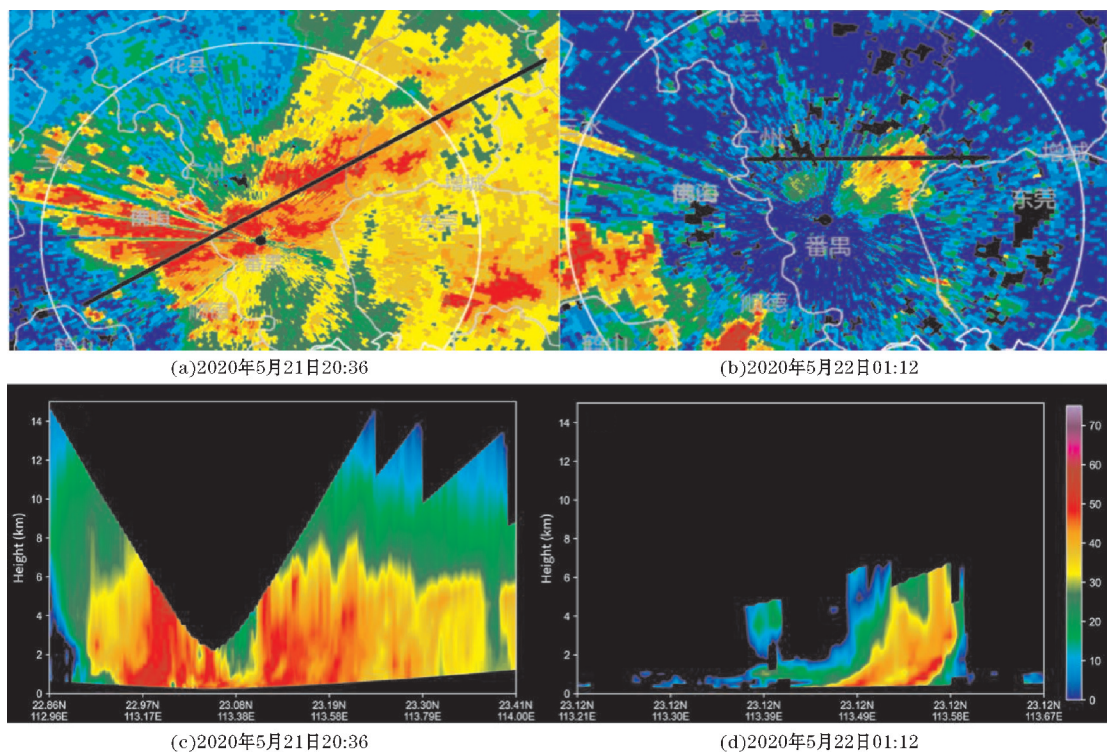


图 13 广州多普勒雷达 0.5° 仰角基本反射率与雷达回波垂直剖面(沿黑线作垂直剖面)

6 物理概念模型

如图 14 所示,本次特大暴雨过程广州处于 500 hPa 下滑槽后西北气流背景下,中高层西北气流携带干冷空气侵入,与低层暖平流形成了上干冷、下暖湿的不稳定层结;925 hPa 西南超低空急流与东北气流发生辐合,水汽和能量在暴雨区得以累积;850 hPa 低涡切变线系统使风场发生气旋式旋转,西南低空急流与西北高空急流耦合,均有利于暴雨区累积的能量与水汽向上输送,不稳定层结大气被抬升,从而释放不稳定能量。西南-东北风形成的地面辐合线抬升暖湿空气并在其西南方触发新的对流,对流单体的后向传播有利于对流系统长时间维持和发展;较低的层结高度使对流触发后能迅速发展起来,配合中低层西南-西北风的强垂直风切变,有利于对流系统组织化;夜间西南低空急流加强,边界层西南-东北风的对峙使得地面辐合线稳定维持,其上空的对流系统也因此稳定少动;在中层西北气流引导下不断有新生对流单体移经辐合区加强,从而产生更强降水,发生列车效应,促使强降水持续较长时间,最终形成暴雨。

由此可见,此次“5·22”广州特大暴雨过程中产生强降水的直接系统是  $\beta$  中尺度对流系统;中高层的西北气流起到了增加大气层结不稳定,提供动力抬升条件,促使对流系统组织化发展以及引导对流单体向辐合区和雨区移动的作用;而夜间低空急流的加强使

得边界层西南风与东北风对峙,以及列车效应的发生是强降水持续从而形成特大暴雨的主要原因。

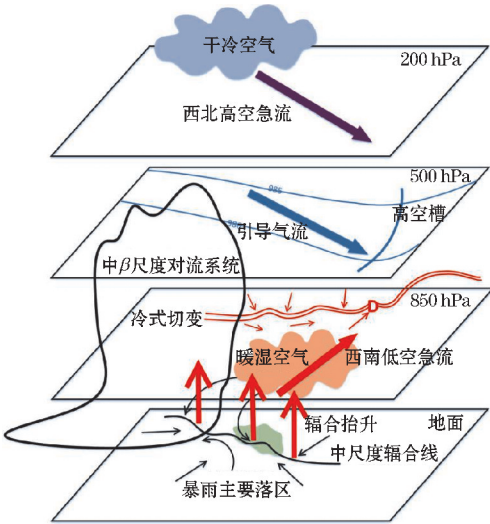


图 14 2020 年“5·22”广州特大暴雨过程的物理概念模型

7 结论

分析“5·22”广州西北气流控制下特大暴雨过程的环境场、对流触发机制及中尺度特征,结论如下。

(1) 此次过程存在广东东部沿海和珠三角地区两个暴雨中心,广州市有 8 个区域加密自动站 22 日 08 时日雨量达到特大暴雨量级,主要分布在增城与黄埔一带。降水主要发生在夜间至凌晨,降水最强时段为



22日00–03时,雨团由北向南移动,大于20 mm/h的短时强降水占日雨量的比均达75%,具有强对流性。

(2)此过程由在西北气流控制下的下滑槽配合对流层低层的西南低空急流及其左侧南移进入广东的深厚低涡切变系统产生。中高层的西北气流携带干冷空气南下,与低层暖平流形成了上干冷、下暖湿的不稳定层结;低层水汽条件好;西南低空急流和超低空急流不断地向暴雨区输送暖湿空气,对流性不稳定能量得以累积;低层辐合,高层辐散,有强的动力抬升条件,易触发不稳定能量释放,有利于对流的发展。

(3)高温高湿环境下东北风与西南风形成的地面中尺度辐合线触发对流;夜间随着低空急流增强,地面辐合增幅,加剧上升运动,辐合线得以稳定维持。合适的层结高度与强的垂直风切变使对流能在较低的高度迅速发展且有利于其组织化。

(4) $\beta$ 中尺度对流云团的合并加强是珠三角地区强降水的主要原因。对流单体后向传播并在500 hPa西北气流引导下向东南方向移动,在黄埔等地形成列车效应,强降水得以持续较长时间。为热带低质心暖云降水,降水效率高。

(5)“5·22”广州特大暴雨过程的直接影响系统是 $\beta$ 中尺度对流系统,在高温高湿的环境下形成的地面辐合线触发对流,在西北气流及其控制下的下滑槽的作用下,形成列车效应,伴随着夜间低空急流加强和高降水效率的热带低质心暖云降水,强降水得以持续从而形成特大暴雨。

## 参考文献:

- [1] 鹿世瑾. 华南气候[M]. 北京:气象出版社, 1990.
- [2] 薛纪善. 1994年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社, 1999.
- [3] 黄士松. 华南前汛期暴雨[M]. 广州:广东科技出版社, 1986:244.
- [4] 臧传花,李淑玲. 逐步消空法预报西北气流条件下的山区暴雨[J]. 气象, 2005, 31(8):42–45.
- [5] 郑婧,许爱华,孙素琴,等. 高空西北气流下特大暴雨的预报误差分析及思考[J]. 气象, 2018, 44(1):14.
- [6] 赖绍钧,何芬,陈海山,等. 华南前汛期一次致洪暴雨过程的中尺度结构特征[J]. 高原气象, 2012, 31(1):167–175.
- [7] 李亚琴. 一次华南静止锋上的中尺度对流系统触发暴雨过程分析[C]. 中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场. 2010.
- [8] 伍志方,曾沁,吴乃庚,等. 广州“5·7”高空槽后和“5·14”槽前大暴雨过程对比分析[J]. 气象, 2011, 37(7):838–846.
- [9] 胡雅君,张伟,赵玉春,等. “5·7”闽南沿海暖区特大暴雨中尺度特征分析[J]. 气象, 2020, 46(5):14.
- [10] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5):12.
- [11] 慕建利,王建捷,李泽椿. 2005年6月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析[J]. 气象学报, 2008(3):437–451.
- [12] Akiyama T. A medium-scale cloud cluster in a Baiu front. Part I: Evolution process and a fine structure[J]. J Meteor Soc Japan. 1984, 62:485–504.
- [13] Chen G T J. Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-yu season[J]. J Meteor Soc Japan, 1992, 70:497–515.
- [14] 俞小鼎. 短时强降水临近预报的思路与方法[J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3):202–209.
- [15] 张思嘉. 一次广州特大暴雨事件的局地对流触发机制研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2019.
- [16] 周兆丁,陈芳丽,曾丹丹,等. 广东前汛期一次锋前暖区暴雨触发机制分析[J]. 广东气象, 2019, 41(3):1–4.
- [17] 李超,陈潜,赵春阳,等. 相似天气背景下深圳两次前汛期降水过程对比分析[J]. 海洋气象学报, 2021, 41(2):24–33.
- [18] 叶朗明,苗峻峰. 华南一次典型回流暖区暴雨过程的中尺度分析[J]. 暴雨灾害, 2014, 33(4):342–350.
- [19] 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 I. 引发暴雨的 $\beta$ 中尺度对流系统的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2002(4):541–557.
- [20] 傅慎明,赵思雄,孙建华,等. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究[J]. 大气科学, 2010, 34(2):235–252.
- [21] 张一平,俞小鼎,孙景兰,等. 一次槽后型大暴雨伴冰雹的形成机制和雷达观测分析[J]. 高原气象, 2014, 33(4):1093–1104.
- [22] 曾智琳,湛芸,朱克云,等. 2017年“5.7”广州特大暴雨的中尺度特征分析与成因初探[J].

- 热带气象学报,2018,34(5):791–805.
- [23] Cressman G P. An operational objective analysis system [J]. Monthly Weather Review, 1959, 87 (10):367–374.
- [24] 张小玲,周庆亮,谌芸,等. 中尺度天气分析技术在强对流天气预报中的应用[C]. 全国灾害性天气预报技术研讨会. 2009.
- [25] 张小玲,谌芸,张涛. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报,2012,70(4):13.
- [26] 张红梅,张深涛,连晨放. 福建西南部一次特大暴雨过程的双偏振雷达特征分析[J]. 气象与环境科学,2021,44(2):16–24.

## Analysis of the Mesoscale Characteristics of the Heavy Rain Process Controlled by the Northwest Airflow in Guangzhou on “5·22”

HE Yunping<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>1,2,3</sup>, XIAO Tiangu<sup>1</sup>

(1 College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2 National Meteorological Center, CMA, Beijing, 100081, China; 3 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, 519082, China)

**Abstract:** In order to improve the understanding of the rainstorm process under the control of the northwest airflow and provide support for such rainstorm forecast, this paper uses the hourly precipitation data of national automatic stations and regional encrypted automatic stations, FY-2G satellite data and Guangzhou Doppler weather radar detection data, etc., by methods of the mesoscale analysis technology and the calculation of important physical parameters to analyze the mesoscale characteristics of the “5·22” Guangzhou torrential rain process. The results show that: The precipitation in this rainstorm process mainly occurred from night to early morning, and the proportion of short-term heavy precipitation accounted for 75% of the daily rainfall, and the strong convection was obvious. The heavy rain process was caused by the down-slope trough controlled by the northwesterly air current, the southwest low-level jet in the lower troposphere and the deep low vortex shear system that moved southward from the left side into Guangdong. The unstable stratification of dry and cold upper layer and warm and humid lower layer is formed by the northwest airflow in the middle and upper layers and the warm advection in the lower layer. In the high-temperature and high-humidity environment, the ground convergence line formed by the northeasterly wind and the southwesterly wind triggered the convection. At night, with the strengthening of the low-level jet, the ground convergence increased and the upward movement was intensified. The  $\beta$  mesoscale convective cloud clusters merged and strengthened, and the backward propagating convective cells formed a train effect under the guidance of the northwest airflow. The train effect, accompanied by the tropical low-mass warm cloud precipitation with high precipitation efficiency, led to the occurrence and maintenance of heavy precipitation in the Pearl River Delta, and finally an extremely large rainstorm was formed.

**Keywords:** heavy rain in the pre-flood season in South China; mesoscale characteristics; northwest airflow after the trough; ground mesoscale convergence line; train effect