

文章编号: 2096-1618(2023)03-0330-10

广州“5·22”致灾特大暴雨的多源资料分析 ——从天气尺度背景到 γ -中尺度涡旋

张佳华¹, 罗亚丽^{1,2,3}, 高艳宇³, 肖天贵¹, 张宇¹, 陈杨瑞雪¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 四川 成都 610225 ;2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044;3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081)

摘要:为提高对季风海岸极端降水成因机制的认识,利用分钟-公里级分辨率资料,采用双偏振雷达定量降水估计和定量识别中涡旋(MV)的方法,分析2020年5月21日夜间至22日清晨珠三角地区致灾特大暴雨的多尺度特征与机制。结果表明:该事件8 h累积降水最大397 mm,48站次录得>75 mm/h极端小时降雨(EXHP);在天气尺度低空切变线及其南侧强劲的暖湿西南气流影响下,强降水对流的入流空气的CAPE约3000 J/kg,CIN不超过10 J/kg,LCL约300 m,可降水量超过70 mm;降水产生的弱偏北气流和来自热带洋面的偏南气流对峙,形成准静止的中尺度锋区,其抬升作用使对流得以维持;6个低层MV与EXHP伴随,MV强度弱,主要出现在地面中尺度切变线附近,弱冷池的南缘、近地面辐合中心,大多数时刻MV跟逐6 min累积雨量的大值没有空间相关。

关键词:华南前汛期极端降水;多尺度特征; γ -中尺度涡旋;分钟—公里级分辨率观测资料

中图分类号:P463.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2023.03.013

0 引言

华南前汛期(4–6月)是东亚季风主雨季的第一阶段,其间华南地区强降雨频发,累积降水量占当地年总雨量的一半^[1–2]。华南沿海的珠江三角洲城市群地区小时极端降水(小时雨量超过第95百分位)发生频次呈升高趋势^[3],有时会发生特别极端的短时强降雨,如著名的广州“5·7”事件:2017年5月17日广州市录得最大小时降水量219 mm、最大3小时降水量383 mm,导致严重的灾害和损失^[4]。

大尺度天气系统影响下,极端短时降水的产生与湿对流的活动、中尺度组织模态及强降水对流内部的动力结构关系密切。对流单体排列起来形成一条 β 中尺度强回波带,如果其移动方向与单体排列方向几乎平行,则容易在几小时内产生强降雨^[5–6];多条中尺度强回波带准平行地排列起来,缓慢移动,10 h左右可产生400~500 mm极端降水^[7–9]。美国大约50%极端小时降水(>75 mm/h)与镶嵌在中尺度对流系统(MCS)内部的 γ -中尺度涡旋有关^[10],在造成休斯顿2016年4月18日洪涝灾害的极端降水事件中, γ -中尺度旋转产生的动力加速对产生最大的累积降水有重要贡献^[11]。数值模拟研究表明,在相同的热力条件下,强的低空(0~1 km)垂直风切变(VWS;约15 m/s)会产生强的低层 γ -中尺度旋转,强烈旋转产生的非线性

动力垂直加速作用在低层超过浮力加速,造成低层更多水汽被吸入抬升,显著提升模拟的“点最大”雨量和面雨量^[12]。

中国也观测到极端小时降水有时伴随低层 γ -中尺度旋转,如广州“5·7”事件的最强小时雨量伴随一个较浅的 γ -中尺度涡旋^[13–15],东北地区一次降水事件中录得96 mm/h降水也跟一个直径20~30 km的中尺度涡旋有关^[16]。Zhang等^[17]分析2017年5月15日珠三角地区强降水事件,在极端小时降水站次最多的时候识别到一个弱的中涡旋(最强的方位角切变仅 $3.1\times10^{-3}/s$),该涡旋生命期约54 min,始终维持在极端雨强区域内部,在涡旋中心附近(距离约1~3 km)3个雨量计观测6 min累积雨量达到峰值之后涡旋快速增强,约12 min内涡旋达到最强,随后,随着极端雨强区域移走涡旋迅速减弱消亡。Zhang等^[17]将中涡旋强度偏弱归因于弱的0~1 km VWS(4~5 m/s),并推测活跃的暖雨过程产生强的凝结潜热释放可以增强低层辐合从而对形成弱的涡旋有贡献,而涡旋与极端雨强区域并存时一定程度上促进强降水的作用也不能排除。

关于东亚季风区极端雨强与 γ -中尺度旋转的关系的认识仍然十分有限,有必要从观测角度进一步弄清楚一些根本性的问题:在其他极端降水事件中是否也伴随着低层 γ -中尺度旋转,旋转的强度如何,在分钟级时间尺度上中尺度旋转与极端雨强的时空配置关系怎样。

2020年5月21日夜间至22日清晨,珠江三角洲

地区发生特大暴雨事件,广州市最大累积雨量378.6 mm,百年一遇,小时降水最大值为153.2 mm/h,48个地面气象站录得 >75 mm/h的极端小时降水(本文定义的EXHP),造成4个中小河流水文站点水位超警戒,对广州市造成极大的影响,4人遇难,多个区域停水停电,大批车辆被淹。本研究聚焦在此次灾难性极端降水事件(简称广州“5·22”特大暴雨事件),利用雨量计逐分钟观测、多普勒雷达逐6 min观测,以及先进的双偏振雷达定量降水估计算法和定量识别中涡旋的方法,建立了分钟-公里尺度分辨率的观测数据集,结合再分析资料,分析此次事件发生的天气背景、环境动热力状况、地面中尺度特征,以及与EXHP相伴出现的 γ -中尺度旋转的强度、持续时间等特征。通过对观测事实的细致剖析,为将来深入探讨东亚季风区极端雨强与 γ -中尺度旋转之间的物理关联奠定一定的基础。

1 数据和方法

1.1 数据

利用中国气象局提供的地面气象观测站小时降水数据,以及逐分钟降水、温度、风向风速数据,分析广州“5·22”事件的降水时空演变,及近地面中尺度冷池和辐合线等。广东省地面气象站的站间距离大多5~10 km,在城市群地区分布更加密集(图1a)。

广州S波段双偏振雷达探测半径约为230 km,径向方向具有很高的分辨率,为250 m,每6 min完成一次体扫,共9个扫描仰角。其基数据被用于定量降水估计(QPE)。采用基于衰减率和差分相移率(Kdp)的方法^[18],与传统采用雷达反射率和差分反射率的QPE方法相比,该方法能够更准确地反演强降水^[19-20]。格点化QPE数据的时间间隔为6 min,水平网格格距250 m,垂直方向0.5~15 km(间隔为500 m)。采用75 mm/h为EXHP阈值,该阈值略大于2016-2021年4-9月珠三角城市群地区雨量计观测的小时降水率累积密度函数的第99百分位(73 mm/h;第99.9百分位为104 mm/h)。

利用ERA5再分析资料(0.25°×0.25°,垂直37层,逐小时)分析降水事件的天气背景。利用香港探空和清远探空资料计算与湿对流触发发展和中涡旋形成关系密切的环境动热力条件,如对流有效位能(CAPE)、0~1 km VWS、0~3 km风暴相对螺旋度(SRH)。

1.2 识别涡旋

广东雷达观测的径向速度被用于识别 γ -中尺度涡旋(MV)。MV在雷达径向速度图上表现为正负速

度偶。目前国内外还没有形成基于雷达观测的MV的判别标准,因此,本研究参考中气旋判别标准^[21-23]来识别中涡旋。首先判断是否存在雷达观测的径向速度偶,进而判断是否满足以下条件:旋转直径(最大径向速度和最小径向速度之间的距离)介于2~10 km,旋转速度(最大径向速度和最小径向速度差值的1/2)达到或超过5 m/s。本文采用的最大直径和最小旋转速度对应的最小切变值为0.001/s,这与Tang等^[24]统计中国南方 γ -中尺度涡旋采用的切变阈值相一致。

采用计算机和人工判断相结合的方法识别MV。首先对雷达径向速度观测进行质量控制,包括退速度模糊和九点中值平滑。定量识别涡旋的程序,参考以往研究^[22,25-26],主要包括以下4步:

(1)选取雷达观测的分析区域。以某一EXHP记录所在的站点为中心,得到它与广州雷达的径向距离为 R 、方位角为 ψ ,对应该EXHP记录的分析区域为 $R \pm 20$ km、 $\psi \pm 45^\circ$ 。

(2)识别“类型矢径”。在分析区域内,寻找每个雷达相同径向距离处具有速度值顺时针方向连续增加的相邻方位角的距离库,直到速度值不再增加,构成一维距离序列,称为一个类型矢径,要求角动量达到 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}$ 或者切变值达到0.001/s。

(3)识别对称的二维特征。将相邻的类型矢径组合在一起构成二维特征,要求一个二维特征至少包含6个类型矢径,并且径向尺度与方位尺度之比 <2 。

(4)计算二维特征的旋转速度、旋转中心和旋转直径,要求旋转速度 ≥ 5 m/s,并且旋转中心和EXHP记录的站点之间距离 <10 km。

将上述方法应用于最低的两个扫描仰角(0.5°和1.5°)观测数据。相同扫描仰角上,如果前、后2个时次都识别出旋转,并且其中直径较小的旋转的中心位于直径较大的旋转的半径范围之内,则认为前、后2个时次的旋转为同一个旋转。连续出现至少3个时次(即持续至少18 min)的旋转被认为是中涡旋。最后,对定量识别出来的涡旋逐一进行人工检查,进一步排除由于杂波而造成的虚假涡旋。

2 降水概况、天气背景与环境条件

广州2020年“5·22”事件的降水发生在2020年5月21日17时至22日10时(当地时;LST),强降水集中在21日22时至22日06时,此8 h累积降水达100 mm以上的站点分布在珠三角城市群北部及下游约60 km内(图1a),其中:黑色十字为累积雨量最大处,黑色三角为广州雷达位置,两个黑色正方形分别为清远、香港探空站位置,黑色矩形框为本研究的强降水关键区。8 h累积降水量最大达到397.5 mm(东莞

G1936 站)。从关键区平均的降水时间演变来看(图 1b),灰色柱表示关键区小时面雨量,折线为最大小时降水发生在 22-06 时 8 个站点的小时雨量。降水从 21 时开始较明显地增幅,01 时开始迅速增强,02-03 时达到峰值,然后持续减弱,22 日 10 时关键区内降

水结束。从站点小时降水来看,在强降水集中发生的 8 h 内,共有 48 站次观测到 >75 mm/h 的 EXHP(图 1c),其中 15 站次超过 100 mm/h,最大的小时降水达到 153.2 mm(02-03 时;东莞 G1971 站)。选择极端短时降水发生的 8 h 为重点分析时段。

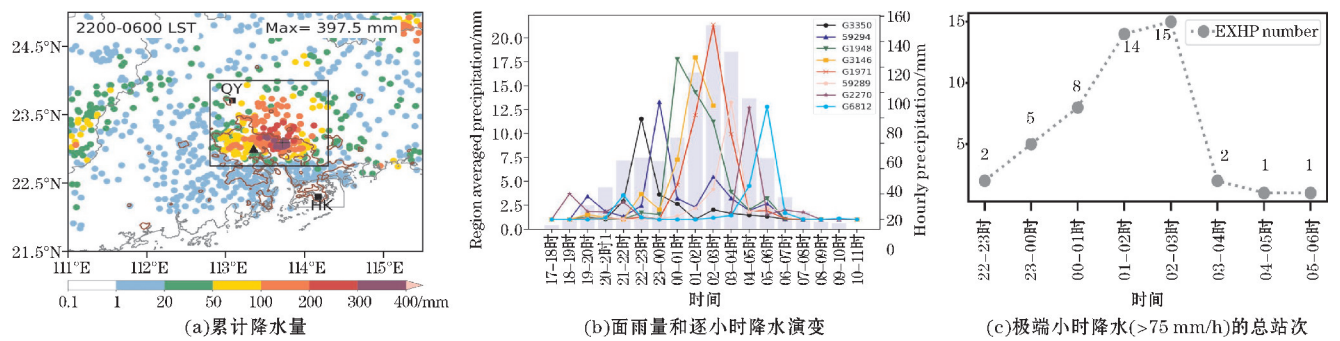


图 1 降水实况的时空分布图和极端小时降水总站次的时空分布

图 2 是利用再分析资料得到的天气背景场,图 2(a)、(b)表示 500 hPa 温度(填色;单位:K),位势高度(等值线;单位:位势米)和水平风场(风羽;单位:m/s)

分布情况;图 2(c)、(d)为 850 hPa 相当位温(等值线;单位:K;蓝色实线为 ≤350 K 部分,橙色实线为 ≥355 K 部分)和水平风场(风羽;单位:m/s;大风速

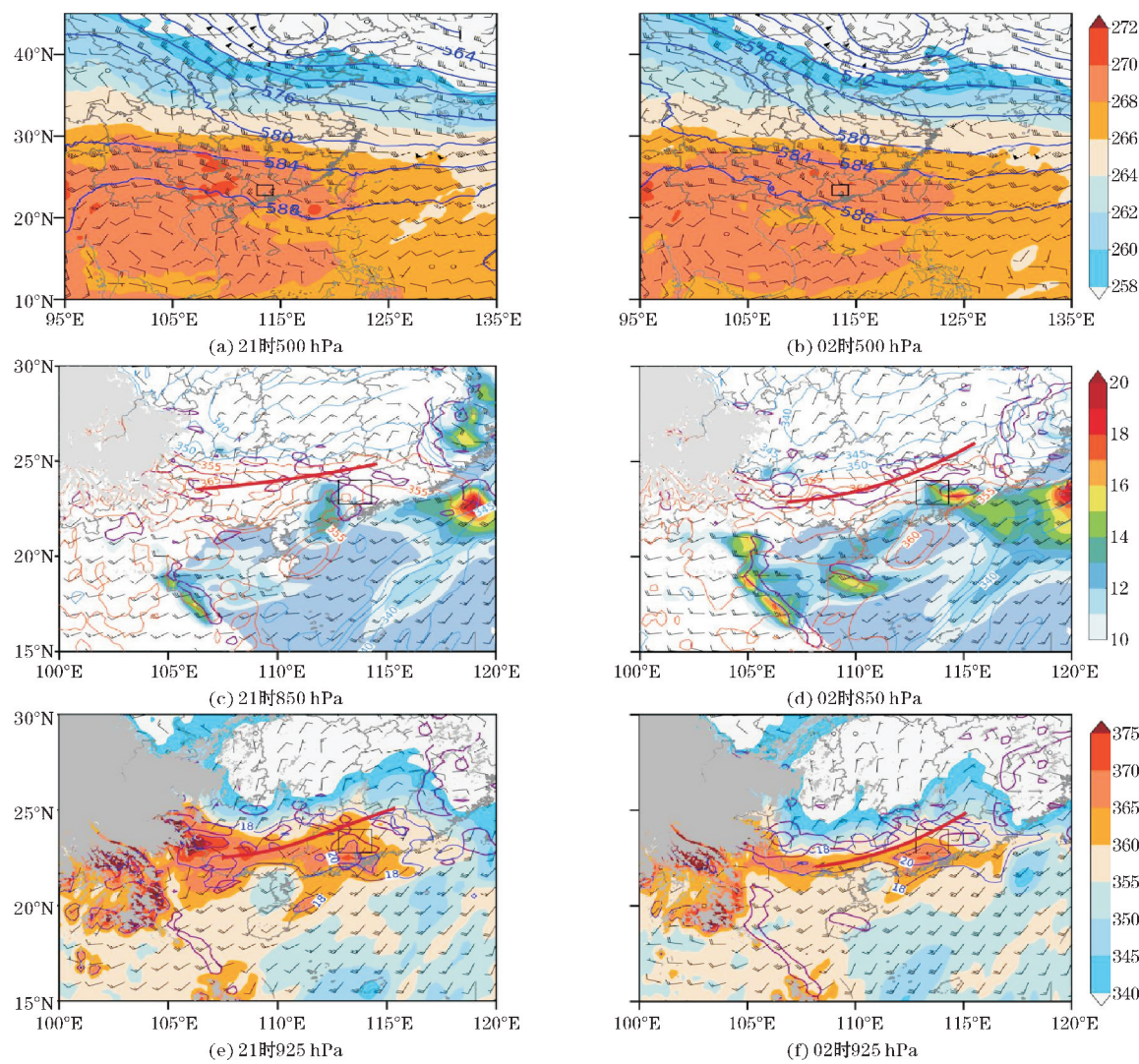


图 2 2020 年 5 月 21 日 21 时和 22 日 02 时的天气背景场
(黑色方框为关键区,黑色风羽短杆、长杆和三角旗分别对应 2.5 m/s,5 m/s 和 25 m/s,红棕色实线为切变线)

区($\geq 10\text{ m/s}$)用填色表示)分布情况;图2(e)~(f)为925 hPa比湿(蓝色等值线;单位: g/kg ;只显示了高比湿区($18\sim 20\text{ g/kg}$)),相当位温(填色;单位: K),散度(紫色等值线;单位: $-5\times 10^{-5}/\text{s}$;只显示了辐合区)和水平风场(风羽;单位: 10 m/s)分布情况。可以看到,极端降水发生时,关键区位于500 hPa槽后(图2a,b),风向西北,风速约 $10\sim 13\text{ m/s}$,588 dagpm位势高度等值线准东西向分布于 $20^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$,关键区位于暖区,温度水平梯度小。850 hPa(图2c,d)有一条西南—东北走向的切变线,从广西中部延伸到广东北部,它向南移动进入关键区,强降水中心出现在850 hPa切变线南侧的暖湿区(相当位温 $\theta_e>355\text{ K}$),关键区上风方存在

西南风急流带,中心最大风速超过 12 m/s 。925 hPa(图2e,f)也有一条东北—西南走向的切变线,其位置相对850 hPa切变线略偏南,约02时切变线进入关键区北部,沿着切变线存在明显的暖湿带($\theta_e>360\text{ K}$)和辐合带,关键区处于暖湿辐合带的东段,925 hPa比湿超过 18 g/kg 。对流层低层没有出现明显辐散,故不存在以往研究发现的华南海岸线附近暴雨过程中边界层辐合和对流层低层辐散的垂直耦合^[27]。总之,此次极端降水事件发生在夜间,强的低空西南气流向着珠三角地区输送暖湿空气,与低空切变线有关的边界层辐合提供了有利的抬升条件,关键区内具备有利于湿对流发生和发展的动力抬升条件和暖湿不稳定条件。

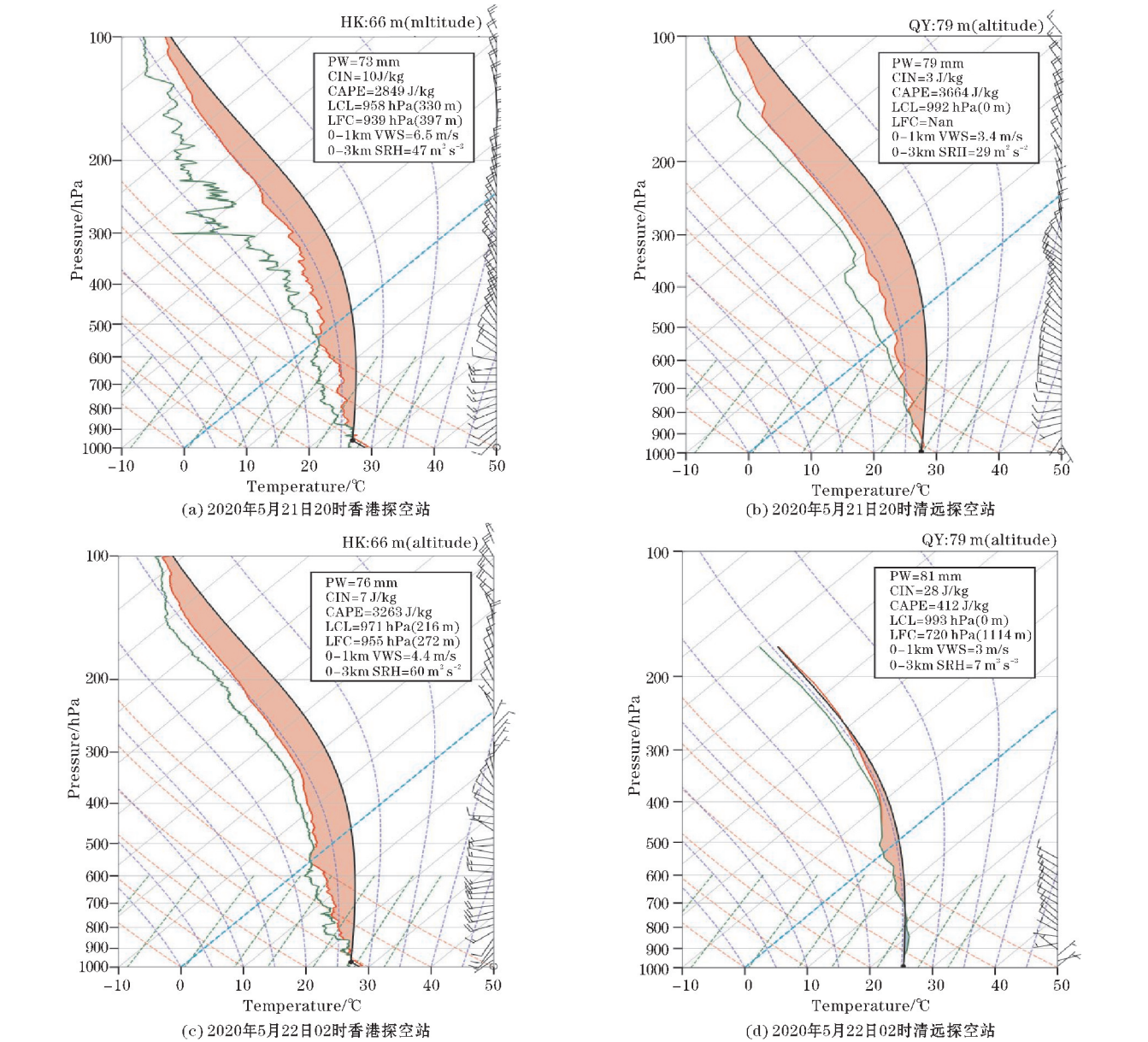


图3 香港和清远探空

关键区内的清远探空站位于强降水中心的西北边,8 h累积降水不超过50 mm(图1a),其21日20时和22日02时探空分别观测到了降水即将发生时和降

水影响后的大气状态;香港天文台的2次探空观测则大致代表强降水对流上游的大气状况。20时(图3a,b),香港和清远上空的可降水量都超过70 mm

(香港73 mm, 清远79 mm), 从近地面至500 hPa的温度和湿度廓线接近重合, 温度露点差 $<4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发生强降水的水汽条件十分充足; 近地面空气的对流有效势能(CAPE)较高(香港2849 J/kg, 清远3664 J/kg), 对流抑制能量(CIN)均不超过10 J/kg(香港10 J/kg, 清远3 J/kg), 抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)都较低(距地面不到400 m), 有利于强降水对流的触发和发展。02时(图3c,d), 清远上空明显受到了降水影响, 尽管PW仍然维持极高(81 mm), 400 hPa以下大气几乎饱和, 但是CAPE显著下降, CIN、LCL和LFC都大幅升高, 热力条件难以支撑对流发展维持, 且触发对流的动力抬升要求却提升了; 而处于强降水上游的香港探空仍然显示PW极高、湿层深厚、CAPE大、CIN小、LCL和LFC极低的特点, 表明边界层入流空气仍然具备有利于强降水对流维持发展的热力条件。当低空切变线南移扫过关键区(大约08时)之后, 整个关键区内的动、热力条件不再利于对流维持(图略), 此次降水过程结束。

3 对流演变与地面中分析

逐时雷达组合反射率(填色; 单位: dBZ), 地面10 m高度的水平风场(箭头; 单位: m/s)和地面2 m高度的位温场(红色等值线; 单位: K)分布情况。其中黑色方框为关键区, 黑色小圆圈表示以该时刻为起始的一小时内发生EXHP的站点位置, 蓝色粗短线表示地面切变线。如图4所示, 从大约22时00分开始, 关键区内超过50 dBZ的强回波区域逐渐汇聚, 约23时00分呈现准团状, 其南边界与来自南海北部的偏南暖湿气流相连, 强回波区域内出现EXHP及与降水蒸发冷却有关的偏东北风, 风速最大不超过5 m/s, 没有形成组织化的强出流, 在偏南气流的北缘附近偏北风极弱, 但是形成一条明显的中尺度切变线, 沿切变线为位温梯度的相对大值区(约 0.05 K/km), 即较弱的中尺度锋区, EXHP主要出现在切变线附近。随后几小时, 上述地面中尺度特征仍然清晰可见, 弱的中尺度锋区与强回波区域一起缓慢地向南移动, 移速不超过10 km/h, 远远小于中国东部飑线的平均移速^[28](约54 km/h)。强回波的移速缓慢有利于产生EXHP和极端的累积雨量, 显然这与中尺度冷出流较弱直接有关, 而冷出流不强则主要由于关键区内大气极为潮湿、湿层深厚(图3), 不利于发生强的雨滴蒸发冷却进而形成强下沉气流和地面中尺度冷高压。

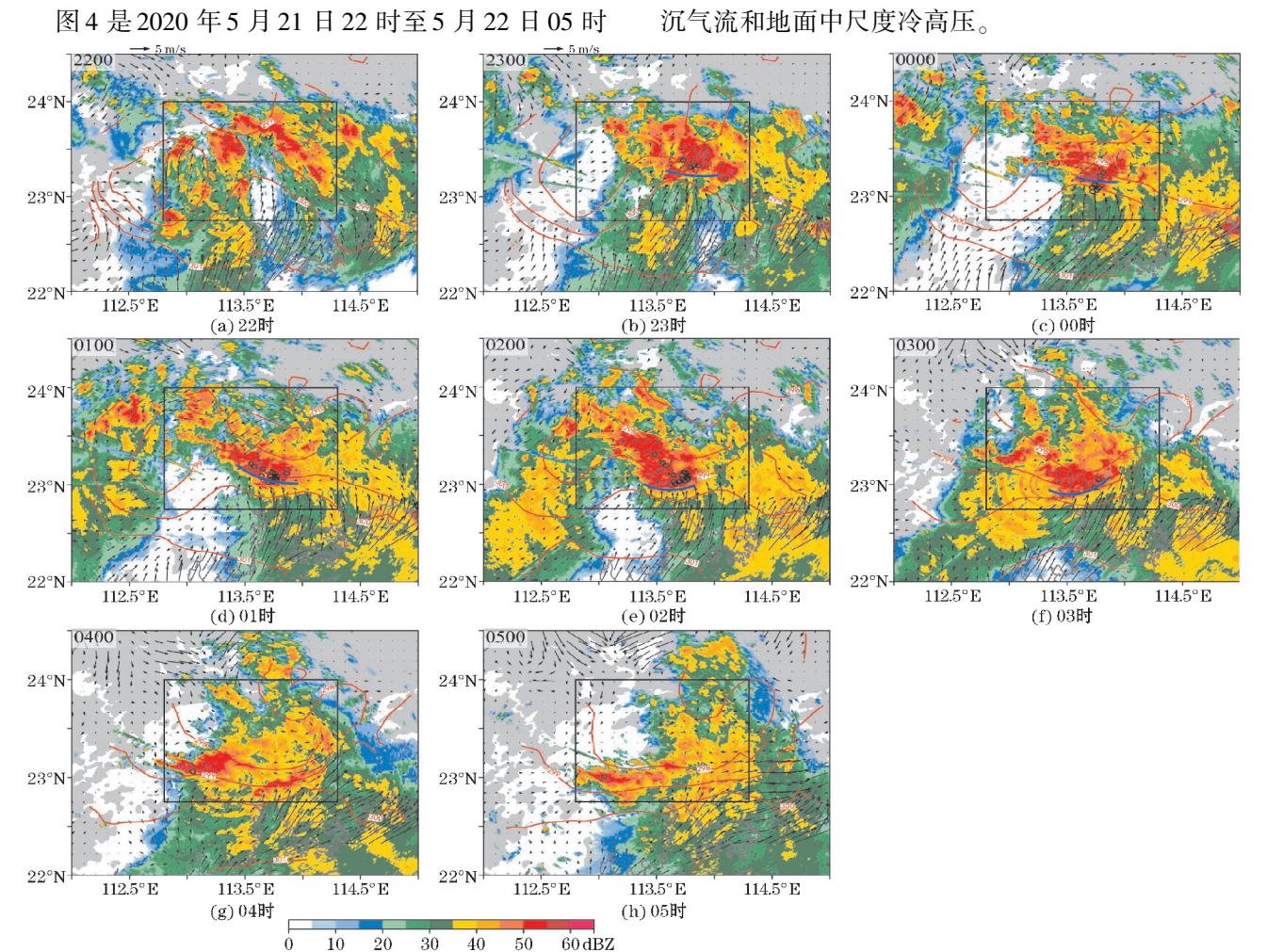


图4 2020年5月21日22时至22日05时逐小时雷达组合反射率,地面10 m水平风场和地面2 m位温场分布

利用地面自动站逐分钟观测,分析 EXHP 站点逐 5 min 积雨量、2 m 温度和 10 m 风的时间演变,作为例子给出 3 个 EXHP 站的情况(图 5)。当站点上观测到降水,风向由偏南转偏北,温度骤降大约 2 K,降温幅度仅为华南前汛期一次飑线个例^[29]的一半,而江淮地区 35 次飑线过境造成的平均降温大约为 6 K^[30];降水持续过程中,风向以偏北为主,有时转为偏南风或东南风,偏北风影响时温度缓慢降低,偏南风影响时温度略有回升;当降水基本停止、雨强极弱时,基本静风,温度维持较低。整个过程中,10 m 风速基本没有超过 5 m/s。

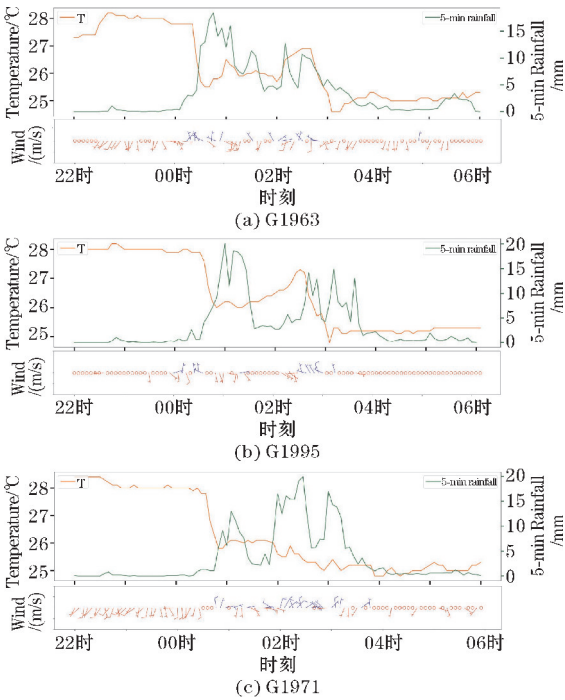


图5 3个代表性 EXHP 站点的 5 min 累计降水量(绿色)、2 m 温度(橙色)和 10 m 风(仅显示风速>1 m/s) 22 时至 06 时的逐 5 min 时间演变图

上述分析结果一致表明,此次事件中极端降水产生的近地面降温幅度小、冷池及其流出均很弱,冷空气与暖湿偏南气流对峙交汇,较弱的中尺度锋区处暖湿空气沿等熵面上升,在 200 ~ 300 m 高度就发生凝结,并达到自由对流高度,对流得以持续发展且位置少动,产生 EXHP 和特大暴雨。

4 γ -中尺度旋转特征

在上述有利于发生强降水的大尺度环境条件和对流反馈形成的近地面准静止中尺度锋区作用下,自动气象站(AWS)录得总计 48 站次 EXHP,其中 36 站次(75%)伴随有 γ -中尺度涡旋, MV 总数为 6, 涡旋中心与至少一个 EXHP 站点的距离不超过 10 km。按照 MV 出现的时间先后,将其编号为 MV-1 ~ MV-6。本节将描述分钟级时间尺度上,涡旋特征及其与极端雨强的时空配置。

MV 的强度、尺度、持续时间等基本特征见表 1。本研究识别出与 AWS 录得的 EXHP 相伴随的 5 个气旋性涡旋和 1 个反气旋性涡旋,跟国际上统计中气旋的强度^[21]相比,它们的强度整体偏弱,仅一个涡旋(MV-4)的最大切变($4.5\times10^{-3}/s$)超过弱中气旋的强度阈值(约 $3.5\times10^{-3}/s$),其余 5 个涡旋的强度都为弱切变(最小 $1.6\times10^{-3}/s$,最大 $3.0\times10^{-3}/s$);中涡旋的最大旋转速度最小值为 6.25 m/s (MV-1),最大值为 11.50 m/s (MV-4),其次是 9.25 m/s (MV-2),而广州“5·7”事件中伴随最大小时累积降雨(200 mm/60 min)的 MV 的旋转速度维持在大约 12.5 m/s,强于本研究的 MV。涡旋生命期内的直径介于 5 ~ 10 km,最大直径均超过 9 km,平均直径 8.3 ~ 9.5 km。涡旋维持时间最短 18 min,最长 102 min,平均 40 min。

表1 识别出的 6 个中涡旋的强度、尺度、持续时间

	最大旋转速度/(m/s)	最大切变/($10^{-3}/s$)	最大直径/km	平均直径/km	持续时间/min
MV-1	6.25	1.6	9.9	8.6	18
MV-2	9.25	4.5	10.0	8.3	60
MV-3	7.50	2.3	9.8	9.0	18
MV-4	11.50	3.0	10.0	8.6	102
MV-5	8.00	1.8	10.0	9.5	24
MV-6	6.75	1.9	9.9	8.4	18
平均值	8.21	2.5	9.9	8.7	40

以往国际上研究北美地区产生地面大风的准线状对流系统内部的低层中涡旋得出,强的低层 VWS 和 SRH 有利于强的水平涡度被扭转为垂直涡度形成中涡旋,此外,风暴系统产生的斜压涡度被上升或下沉运

动扭转,地面摩擦产生的涡度被输入发展中的低层中涡旋,以及科氏力增强气旋性涡度也都是低层中涡旋的可能形成机制^[31]。“5·22”事件的低层 VWS 很弱,21 日 20 时和 22 日 02 时香港探空、21 日 20 时清远探空显示 0~1 km VWS 仅 6.5 m/s、4.4 m/s、3.4 m/s (22 日 02 时清远站探空受到降水影响,故不作讨论),0~3 km SRH 为 47 m²/s²、60 m²/s²、29 m²/s²,远远小于美国伴随中涡旋的极端小时降水(>75 mm/h)的 0~3 km SRH 平均值(约 175 m²/s²^[11]);并且,由于“5·22”事件降水产生的冷池偏弱,与其有关的斜压涡度也不会强。因此,本研究个例的环境动热力条件和降水的反馈特征(弱的雨滴蒸发冷却)均不利于生成强的低层中涡旋,推测如此弱的中尺度旋转的动力垂直加速作用可能不强^[12]。

识别出的中涡旋持续时间最长的是 MV-4,首次和末次出现的时间分别是 01:00 和 02:42。选取 01:00–02:00,展示逐 6 min 涡旋与 1 km 高度雷达反射率因子、雷达 QPE 结果、录得 EXHP 的 AWS 观测 6 min 累积雨量、以及地面切变线的空间配置(图 6)。图 6 中,第(i)列为 1 km 高度的雷达反射率因子(填色;单位: dBZ)、地面风(箭头;单位: m/s)和地面切变线(蓝色曲线)的逐 6 min 演变,其中,黑框表示第(ii)列和第(iii)列的绘图范围,黑色十字代表录得 EXHP 的 AWS 位置,黑色三角形为雷达站点位置;第(ii)列表示 0.5°仰角雷达 QPE(灰色填色;单位: mm/h)和地面切变线(蓝色曲线)逐 6 min 演变,其中,红色圆圈表示对应时刻中涡旋位置(中涡旋的切变值标注在圆圈下方),圆点表示发生 EXHP 的 AWS 位置(彩色代表该站点录得的对应该时刻过去 6 min 累积降水量;单位: mm/h);第(iii)列表示 0.5°仰角的径向速度(彩色填色;单位: m/s)的逐 6 min 演变,其中,红色圆圈表示对应时刻中涡旋位置(中涡旋的切变值标注在圆圈下方),黑色×符号表示 01:00–02:00 录得 EXHP 的 AWS 位置。圆弧分别代表距离广州雷达 30 km 和 60 km 的位置。MV-4 首次出现时,位于地面切变线的西段(图 6i-a),中尺度锋区内靠近暖湿偏南气流一侧(对比图 4d 和图 6i-a),此处容易发生斜压涡度(尽管强度很可能不强)被上升气流扭转而形成涡旋,同时这里也对应着地面西南风、南风、东南风汇聚的辐合中心(图 6i-a),拉升作用也有利于低层涡旋的形成和增强。随后直到其消亡, MV-4 与地面切变线一起缓慢南移,始终位于中尺度锋区内,多数时候略微靠近地面偏南暖湿气流一侧(图 6i-a 至 6i-k)。

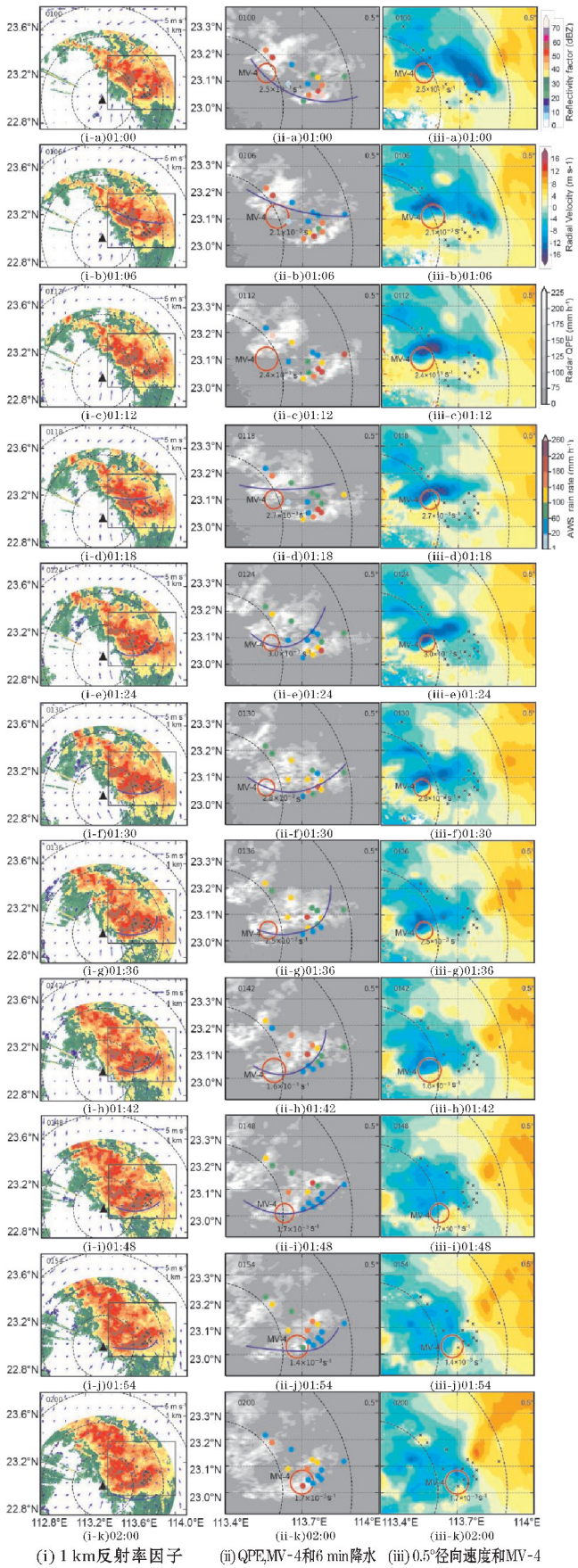


图 6 22 日 01:00–02:00 伴随中尺度涡旋的 EXHP 个例相关观测事实示意图

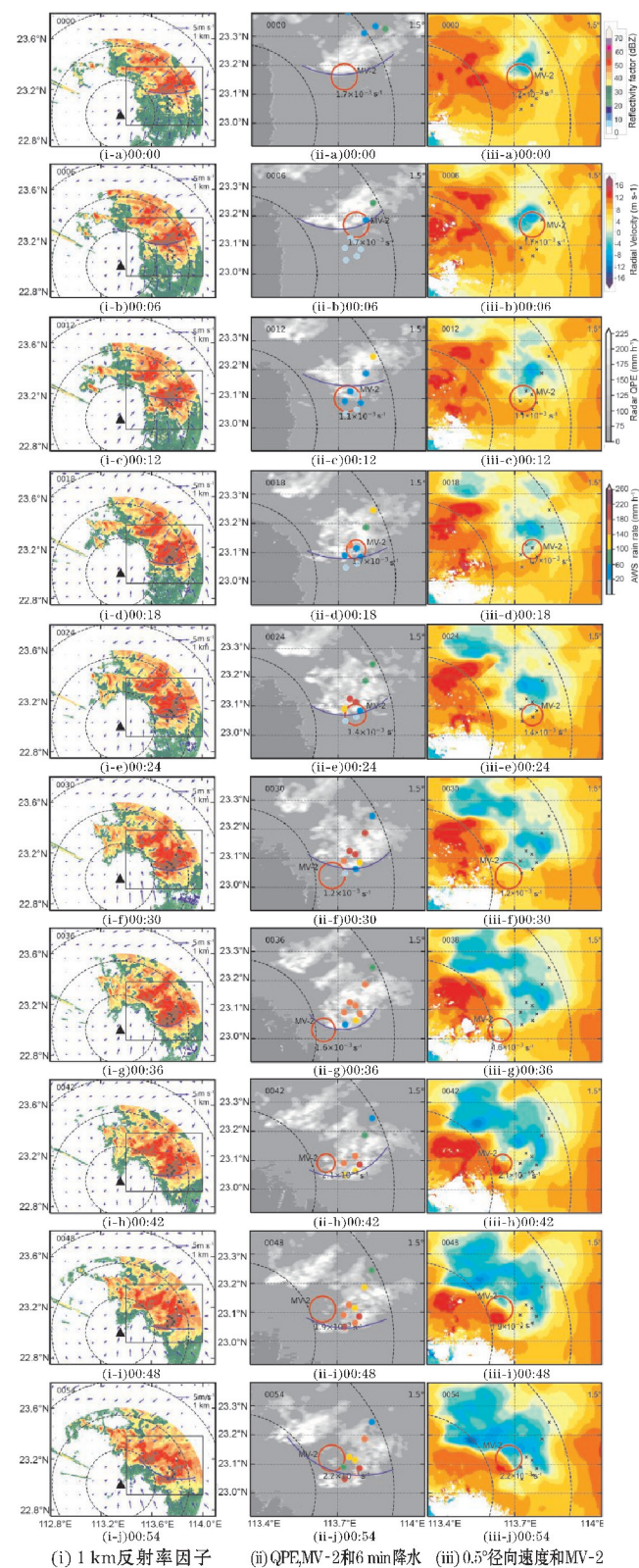


图7 22日00:00–00:54伴随中尺度涡旋的EXHP个例相关观测事实示意图

从EXHP的AWS位置及其6 min累积雨量(图6中间一列用彩色圆点表示)来看,强的6 min累积雨量大多数时刻并不在MV-4内部或10 km距离之内,二者的空间相关性不高,例如,01:54之前,在地面切变线东段附近没有识别出中涡旋,但是却产生了比较多的

极端强的6 min累积雨量。逐6 min雷达QPE提供了空间连续的雨强分布(图6中间一列用灰度表示),代表强降雨的高亮度区域在大多数时刻并不与涡旋位置重合,这也说明中涡旋不是产生“5·22”事件中EXHP的6 min累积雨量大的关键因素。虽然,在二者重合度较高的少数时次(图6ii-k),不能排除低层中涡旋的动力垂直加速作用一定程度上可能促进了低层上升运动,进而提升了局地降雨率。

6个中涡旋中持续时间第二长的是MV-2,共60 min(首次出现于00:00,最后于00:54)。与MV-4类似,MV-2生命期的大多数时刻都位于地面中尺度锋区内,偏南气流前缘,偏南风、东南风、偏北风汇聚的辐合中心(图7i-a至图7i-j);MV-2与6 min累积雨量的大值区有时重合靠近(图7ii-a,7ii-b,7ii-e),有时分离较远,空间相关性不高。其余4个中涡旋维持时间短(3个18 min,另1个24 min),强度相对MV-4和MV-2更弱(表1),它们有些出现在地面中尺度切变线附近,有些位于远离切变线的强回波区域内,与6 min累积雨量的大值区空间相关性不高(图略)。

5 结论

东亚季风区雨强大,华南前汛期小时累积雨量达到100 mm左右并不罕见,但是,与极端短时降水相伴随的低层 γ -中尺度涡旋特征和作用仍认识不清。2020年5月21日夜間至22日清晨珠江三角洲地区发生造成严重灾害的特大暴雨事件,即广州“5·22”事件,本研究利用地面AWS逐分钟降水、气温和风向风速观测,广州多普勒雷达逐6 min基数据,香港、清远高空观测站的探空观测,以及 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ERA5再分析资料,采用先进的双偏振雷达定量降水估计方法,并借鉴中气旋识别方法建立了定量识别中涡旋的方法,分析广州“5·22”事件的多尺度特征与成因机制,包括天气尺度背景、地面中尺度特征、中尺度环境动热力状态,以及伴随EXHP的低层 γ -中尺度涡旋。主要结论如下:

(1)本次特大暴雨过程的雨强极端。21日22时至22日06时,共有48站次观测到 >75 mm/h的EXHP,其中15站次超过100 mm/h,最大的小时降水达到153.2 mm(02–03时;G1971站),8 h累积降水量最大达到397.5 mm。

(2)主导天气尺度系统为低空切变线及其南侧强劲的暖湿西南气流,沿切变线南侧存在辐合抬升,来自南海北部的空气CAPE大、CIN小、LCL和LFC低,为湿对流触发和发展提供了有利的环境动、热力条件;PW超过70 mm的深厚的潮湿大气中,降水产生的近地面弱偏北气流和来自热带洋面的偏南气流对峙交汇,形成准静止的中尺度锋区,发挥稳定的中尺度抬升机

制,强降水对流得以维持。

(3)48 站次 EXHP 中 36 站次(75%)伴随 γ -中尺度涡旋。共识别出 6 个低层中涡旋,仅 1 个达到弱中气旋的切变强度,与广州“5·7”事件伴随最大小时累积降雨的中涡旋的旋转速度大致相当(11.5 m/s对比 12.5 m/s),其余 5 个涡旋均为弱切变强度,涡旋强度弱的主要原因归结为弱的 0~1 km VWS 和 0~3 km SRH,以及弱的雨滴蒸发冷却形成的冷池较弱,导致斜压涡度不强。中涡旋主要出现在地面切变线附近、降水蒸发冷却产生的中尺度冷池的南缘、地面中尺度辐合中心,弱的斜压涡度被上升或下沉气流扭转、辐合拉伸作用都是涡旋形成的可能机制。

(4)尽管不能排除低层中涡旋的动力垂直加速作用一定程度上可能促进了低层上升运动,进而提升了局部的降雨率,但大多数时刻中涡旋与 EXHP 的 6 min 累积雨量的大值没有空间相关,中涡旋不是形成 EXHP 的关键因素。

未来可分析东亚季风区更多的极端短时降水事件,包括华南、江淮、华北等子区域的事件,从个例剖析和大样本统计角度,揭示与极端短时降水相伴的 γ 中尺度旋转的出现频次、特征及其与极端雨强的关系。

参考文献:

- [1] Ding Y H. Monsoons over China [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1994:419.
- [2] Luo Y, Zhang R, Wan Q, et al. The Southern China Monsoon Rainfall Experiment (SCMREX) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 2017, 98:999–1013.
- [3] Wu M, Luo Y, Chen F, et al. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China [J]. J. Appl. Meteor. Climatol, 2019, 58:1799–1819.
- [4] 广东省气象局. 广东省气象局关于“5·7”广州突发特大暴雨气象服务情况的报告[R]. 广州:广东省气象局文件. 2017.
- [5] Schumacher R S, Johnson R H. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems [J]. Mon. Wea. Rev., 2005, 133:961–976.
- [6] Doswell C A, Brooks H E, Maddox R A. Flash flood forecasting: An ingredients-based methodology [J]. Wea. Forecasting, 1996, 11:560–581.
- [7] Luo Y, Gong Y, Zhang D L. Initiation and organizational modes of an extreme-rain-producing mesoscale convective system along a Mei-yu front in East China [J]. Mon. Wea. Rev., 2014, 142:203–221.
- [8] Wang H, Luo Y L, Jou B J D. Initiation, maintenance, and properties of convection in an extreme

rainfall event during SCMREX: Observational analysis [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 2014, 119 (13):206–232.

- [9] Luo Y, Chen Y. Investigation of the predictability and physical mechanisms of an extreme-rainfall producing mesoscale convective system along the Meiyu front in East China: an ensemble approach [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 2015, 120:10593–10618.
- [10] Nielsen E R, Schumacher R S. Dynamical Mechanisms Supporting Extreme Rainfall Accumulations in the Houston “Tax Day” 2016 Flood [J]. Mon. Wea. Rev., 2020, 148:83–109.
- [11] Nielsen E R, Schumacher R S. Observations of Extreme Short-Term Precipitation Associated with Supercells and Mesovortices [J]. Mon. Wea. Rev., 2020, 148:159–182.
- [12] Nielsen E R, Schumacher R S. Dynamical Insights into Extreme Short-Term Precipitation Associated with Supercells and Mesovortices [J]. Atmos. Sci., 2018, 75:2983–3009.
- [13] Yin J, Zhang D L, Luo Y, et al. On the Extreme Rainfall Event of 7 May 2017 over the Coastal City of Guangzhou. Part I: Impacts of Urbanization and Orography [J]. Mon. Wea. Rev., 2020, 148:955–979.
- [14] Li M, Luo Y, Zhang D L, et al. Analysis of a Record-Breaking Rainfall Event Associated With a Monsoon Coastal Megacity of South China Using Multisource Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021 (99):1–11.
- [15] Zeng Zhilin, Wang D H. On the local rain rate extreme associated with a mesovortex over South China: Observational structures, characteristics, and evolution [J]. Mon. Wea. Rev., 2022, 150:1075–1096.
- [16] Wang G L, Zhang D L, Sun J S. A multiscale analysis of a nocturnal extreme rainfall event of 14 July 2017 in Northeast China [J]. Mon. Wea. Rev., 2021, 149:173–187.
- [17] Zhang Q, Luo Y, Tang Y, et al. On the relationship between meso- γ -scale rotation and extreme short-term precipitation: Observational analysis of a rainstorm over the Pearl River Delta [J]. Journal of Meteorological Research, 2022, 36:539–552.
- [18] Wang Y, Cocks S, Tang L, et al. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part I: Algorithm description [J]. Journal of Hydrometeorology, 2019, 20(5):985–997.
- [19] Cocks S B, Tang L, Zhang P, et al. A prototype quantitative precipitation estimation algorithm for

- operational S-band polarimetric radar utilizing specific attenuation and specific differential phase. Part II: Performance verification and case study analysis [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2019, 20(5): 999–1014.
- [20] Seo B C, Krajewski W F, Ryzhkov A. Evaluation of the specific attenuation method for radar-based quantitative precipitation estimation: Improvements and practical challenges [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2020, 21(6): 1333–1347.
- [21] Andra D L. The origin and evolution of the WSR-88 D mesocyclone recognition nomogram [R]. Preprints, 28th Confon Radar Meteorology, Austin, TX. *Amer. Meteor. Soc.*, 1997: 364–365.
- [22] Robert R Lee, Anderson White. Improvement of the WSR-88D Mesocyclone Algorithm [J]. *weather and forecasting*, 1998, 13: 341–351.
- [23] Eugene W McCaul JR, Dennis E Buechler, Steven J Goodman, et al. Doppler Radar and Lightning Network Observations of a Severe Outbreak of Tropical Cyclone Tornadoes [J]. *Amer. Meteor. Soc.*, 2004, 132: 1747–1763.
- [24] Tang Y, Xu X, Xue M, et al. Characteristics of low-level meso- γ -scale vortices in the warm season over East China [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 235: 104768.
- [25] Zrnic' D S, Burgess D W, Hennington L D, et al. Automatic detection of mesocyclonic shear with Doppler Radar [J]. *Atmos. Oceanic Technol.*, 1985, 4: 425–438.
- [26] Burgess D W, Lee R R, Parker S S, et al. A study of minisupercells observed by WSR-88D radars [J]. *Amer. Meteor. Soc.*, 1995: 4–6.
- [27] Du Y, Chen G. Heavy rainfall associated with double low-level jets over southern China. Part II: Convection initiation [J]. *Monthly Weather Review*, 2019, 147(2): 543–565.
- [28] Meng Z, Yan D, Zhang Y. General features of squall lines in East China [J]. *Monthly weather review*, 2013, 141(5): 1629–1647.
- [29] Qian Q, Lin Y, Luo Y, et al. Sensitivity of a simulated squall line during SCMREX to parameterization of microphysics [J]. *Geophys. Res. Atmos.*, 2018, 123: 4197–4220.
- [30] 吴瑞姣, 陶玮, 周昆, 等. 江淮灾害性大风飚线的特征分析 [J]. *气象*, 2019, 45(2): 155–165.
- [31] Brooks, Doswell H E C A, Zhang X, et al. A Century of Progress in Severe Convective Storm Research and Forecasting [J]. *Meteorological Monographs*, 2019(59): 1–41.

Analysis of the Disaster-causing Guangzhou “May 22” Extreme Rainfall Event Using Multisource Data: from Synoptic Background to Meso- γ -scale Vortices

ZHANG Jiahua¹, LUO Yali^{1,2,3}, GAO Yanyu³, XIAO Tianguai¹, ZHANG Yu¹, CHEN Yangruixue¹

(1. College of Atmospheric Sciences, CUIT, Chengdu 610225, China; 2. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), NUIST, Nanjing 210044, China; 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: To increase the awareness of the causes and physical mechanisms of extreme precipitation over monsoon coasts, the disaster-causing extreme precipitation event in the Pearl River Delta from the night of May 21 to the morning of May 22, 2020 is analyzed using the km-and-minute resolution data and the dual-polarization radar-based quantitative precipitation estimation and meso-vortex (MV) detection. The results show that, in this event, the maximum 8-hr rainfall accumulation is 397 mm and there are 48 records of extreme hourly precipitation (EXHP; >75 mm/h) collected by rain gauges. Under the influences of a synoptic low-level shear line and the strong warm, moist southwesterly airflow on its south side, the upstream inflow air fed into the extreme rainfall-producing convective system is characterized by large convective available potential energy (CAPE; about 3000 J/kg), small convection inhibition (CIN) of no more than 10 J/kg, low lifting condensation level (LCL) of about 300 m, and the amount of precipitable water exceeding 70 mm. The precipitation-generated weak northerly flows near the surface converge with the southerly airflow from the tropical ocean, forming a quasi-stationary mesoscale frontal zone acting as an uplift mechanism to maintain the heavy rainfall-producing convection. Six meso- γ -scale vortices are accompanied with the EXHP periods. The strength of such meso-scale rotation is generally weak. The mesoscale vortices mostly appear on or near the surface meso-scale shear line and the southern edge of the weak cold pool generated by rain evaporation, collocated with the surface convergence center. The MVs at most times are not spatially related to the large 6 minute rainfall accumulation of the EXHP.

Keywords: extreme hourly precipitation; multiscale feature; meso- γ -scale vortex; observations of minute-and-kilometer-scale resolutions