王宁, 平凡. 2019. 垂直分辨率对广州 "5·7" 特大暴雨数值模拟影响的研究 [J]. 大气科学, 43(6): 1245–1264. WANG Ning, PING Fan. 2019. The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the Torrential Rain in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(6): 1245–1264. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18193

# 垂直分辨率对广州"5·7"特大暴雨数值 模拟影响的研究

## 王宁1 平凡1,2

1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院,南京2100442 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点试验室(LACS),北京100029

**摘 要** 精细化的垂直分辨率能够更好地反映大气动热力环境和中尺度系统生消演变过程,不同层次高度垂直分 辨率的加密对暖区对流系统触发及组织发展机制的影响有待深入研究。本文针对2017年5月6日(UTC)广州局 地突发的特大暴雨受复杂地形影响、其对流中尺度系统局地触发、后向传播及组织化的特点,运用WRFV3.9.1, 采用GFS资料较好地模拟和再现了此次大暴雨过程,并进行了不同高度垂直分辨率的敏感性试验,以探究垂直 分辨率对此次暖区暴雨触发及组织化过程的影响。结果表明:低层垂直分辨率加密试验能够模拟出更强的偏南回 流、偏东风和较强的低层风场辐合以及较强的温度扰动,进而引起更强的对流触发;中层垂直分辨率加密更有利 于大范围的强干冷空气侵入对流系统,其造成的潜热和不稳定能量的释放,是对流系统发展的重要原因;高空垂 直分辨率的加密试验则描述出了对流系统上部与高空急流出流相关的高空辐散中心、对流系统周围的高空强辐散 中心以及相邻对流单体的垂直环流,细致再现了对流单体合并为对流系统的组织化过程。

关键词 垂直分辨率 暖区暴雨 复杂地形 对流触发 对流组织化
文章编号 1006-9895(2019)06-1245-20
中图分类号 P435
文献标识码 A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1812.18193

## The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the Torrential Rain in Guangzhou on 7 May 2017

WANG Ning1 and PING Fan1,2

1 School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Refined vertical resolution can better reflect atmospheric dynamics-thermodynamics environment and evolution processes of mesoscale systems. The impact of vertical resolution on the mechanism of trigger and development of convective systems in the warm sector needs to be studied further. This study simulated the local burst

通讯作者 平凡, E-mail: pingf@mail.iap.ac.cn

Funded by National Basic Research Program of China (Grants 2018YFC1506801, 2013CB430105), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675059, 41405059, 41375066, U1333130), Basic Research Fund of Chinese Academy of Meteorological Sciences (Grant 2017Y010)

收稿日期 2018-07-10; 网络预出版日期 2018-12-29

作者简介 王宁,女,1993年出生,硕士,主要从事高影响短时天气模拟、卫星资料同化研究。E-mail: ningwangll@163.com

**资助项目** 国家重点基础研究发展计划项目2018YFC1506801、2013CB430105,国家自然科学基金项目41675059、41405059、41375066、 U1333130,中国气象科学研究院基本科研业务费专项2017Y010

	大	气	科	学			
Chinese Journal of Atmospheric Sciences							

torrential rain that occurred in Guangzhou on 7 May 2017 using the WRFV3.9.1 model driven by the GFS data. Several sensitivity experiments have been conducted with varying vertical resolution in different levels of the troposphere to illustrate the impact on local trigger, back-building and organizing processes during this rainstorm. The simulated results show that the experiment with higher vertical resolution at low levels (LOW62) simulated stronger southerly returning flow, easterly winds, low-level wind convergence and temperature disturbance, which led to a stronger convective trigger. Higher vertical resolution at the middle levels (experiment MID68) was favorable for a wide range of strong dry and cold air intrusion into the convective system. The released latent heat and instability energy may be two important reasons for the development of convective system. Higher vertical resolution at upper levels (experiment UPP71) not only well described the upper divergence centers related to the outflow of upper level jet of the upper convective system, but also well simulated other high divergence centers around the convective system .

Keywords Vertical resolution, Warm sector torrential rain, Complex terrain, Convective trigger, Convective systematization

## 1 引言

近年来,公众及农业、航空和交通等行业对精 细化天气预报的需求日益迫切。随着多源观测资料 的增加以及大气再分析资料精度的提高,区域模式 水平分辨率已发展到云分辨尺度,短期天气模拟和 预测水平也有明显改善,但是暴雨、强对流等极端 天气的精细化模拟预报能力依然有限(Leutwyler et al., 2017)。许多研究表明:提高区域数值模式 分辨率,能更好地反映大气动热力环境和中尺度系 统生消演变过程,提高模拟和预报水平。但数值模 式分辨率的提高与其模拟预报水平的提高也并非完 全线性正相关(曾新民等,2009)。因此,针对暴 雨、强对流天气,选取合适的分辨率,研究相应的 影响机制,是提高其精细化模拟预报能力的关键。 此外,以往研究多集中在模式水平分辨率的影响上 (王春明等, 2004), 而对垂直分辨率, 特别是不同 高度的垂直分辨率对强降水过程影响的研究仍有待 进一步深入。

已有的研究表明:中尺度模式的垂直分辨率对 暴雨以及强对流天气的数值模拟预测有重要影响。 廖洞贤和朱艳秋(1992)指出模式的垂直与水平分 辨率需要满足一定的协调关系,并给出了协调关系 式; Persson and Warner(1991)指出水平分辨率 与垂直分辨率的不协调会引起虚假的重力波,增大 模式模拟误差;赵宗慈和罗勇(1999)利用区域数 值模式比较了不同垂直分辨率对降水模拟的影响, 得到了高垂直分辨率优于低分辨率,但容易引起 "数值点风暴"的结论;鞠永茂等(2006)利用 MM5模式对一次梅雨锋暴雨过程进行了数值模拟, 采用双参数最优化处理方法,提高模式大气的垂直 分辨率,验证了水平分辨率与垂直分辨率的不协调 会在水平方向产生虚假的重力波,造成降水落区预 报偏差的结论;Homeyer (2015)为了验证深对流 的对流层顶结构和对流层与平流层的对流传输对 WRF模式分辨率的敏感性,设置了多个由三种不 同粗细的水平与垂直分辨率任意组合的对流可分辨 尺度的数值敏感性试验。结果表明,细致的模式垂 直分辨率能模拟出穿越对流在对流层与平流层之间 深厚的质量交换层。

不同高度层次上,垂直分辨率的调整对模式大 气的影响机制研究也有了一些初步的研究结果 (Aligo et al, 2009; 邓莲堂和周嘉林, 2012; Zhang et al., 2015)。 Ruti et al. (2006) 同时提高 ECHAM4模式的对流层顶及边界层的垂直分辨率 模拟对流降水,模式模拟结果得到较大改善。结果 表明,垂直分层分辨率的增加能够更好地反映动热 力场变化,影响云结构,使模式对流方案模拟性能 更佳,也能够很好地模拟出浓积云;汤剑平等 (2006)利用 MM5 模式模拟了长江流域极端降水 事件,验证了垂直分辨率的提高能够改善模式对强 降水的模拟能力,同时指出垂直分辨率的提高可以 改善模式模拟的地面气温和低层环流及物理过程的 变化,分辨率对中层大气环流的影响敏感性较弱; Aligo et al. (2009) 对美国中西部地区夏季降水事 件进行定量降水预报,探究WRF模式对垂直分辨 率的敏感性,其研究表明,精细化的垂直网格分辨 率,并不一定会导致定量降水预报的持续性改进, 在融化层以上提高垂直分辨率几乎能够使所有个例 的ETS评分增高;而在近地层增加垂直分辨率,

1246

由于能有效识别地面湍流动量和热通量,使大部分 个例的ETS评分提高。其进一步的机制研究表明, 精细化的垂直分辨率尽管能提高模式对温度和水汽 垂直廓线敏感的天气系统的刻画能力,但是也引发 了低层大气的通量交换与融化层上微物理过程的不 协调,导致模式的模拟预测能力降低。

华南暖区降水是我国预报难度较大,而又非常 重要的一种暴雨类型,主要发生在离冷锋较远的锋 前暖区(Zhang et al., 2011)。华南暖区降水在低 层被暖空气控制,受边界层影响较大(Zhong and Chen, 2017),其高层斜压性特征不明显,降水对 流性强,提高垂直分辨率可以在一定程度上改善模 式对华南暖区降水的模拟结果。Yin et al.(2018) 增加WRF模式850 hPa以下和200 hPa以上的垂直 层数,模拟了一次典型的华南暖区暴雨,改进了华 南暖区暴雨的模拟。

尽管上述垂直分辨率的研究初步探讨了垂直分 辨率对暴雨过程的影响,但是针对不同高度层次的 垂直分辨率影响暴雨过程的研究较少,而且垂直分 辨率对暴雨过程的影响也缺乏一致性的研究结论, 更为重要的是,没有细致分析不同高度层次垂直分 辨率影响暴雨的可能机制。本文拟针对2017年5月 7日的广州特大暴雨过程,进行不同高度层次垂直 分辨率配置的数值模拟试验(图1),比较研究不 同高度层次垂直分辨率对暴雨过程的影响,探讨垂 直分辨率影响此次暴雨过程的可能机制。

本文其余部分组织如下:第二部分为广州"5• 7"暴雨的个例介绍及其天气环境条件分析;第三 部分为数值试验设计及模拟结果验证;第四部分探 讨垂直分辨率对暖区暴雨模拟影响的可能机制;最 后一部分为全文的结论与讨论。

## 2 广州 "5·7" 特大暴雨个例介绍及 天气环境条件分析

#### 2.1 广州"5·7"特大暴雨个例概况

2017年5月6日(协调世界时,下同)广州多 地突发暴雨到大暴雨,黄埔、增城、中新、花都等 地出现特大暴雨。增城、新塘镇1h降雨量184 mm,排历史第二位;3h雨量382.6 mm,破广东3 h雨量历史极值;黄埔区九龙镇日降水量544.5 mm,打破广州市日雨量历史极值。此次降水过程 主要有局地性强、小时雨强大、中尺度雨团移动缓 慢、持续时间长等特点。为一次由暖湿气流、复杂 地形、"城市热岛"共同作用的产物,是一次典型 的华南暖区暴雨。突发的强降水,在广州等地引发 了洪涝灾害,造成花都、增城、黄埔区出现严重城 市内涝,房屋倒塌450间,受灾人口2万余人,经 济损失达1.77亿元,且国内各个业务模式对此次暴 雨事件均出现漏报的情况,因此引起了社会的广泛 关注(伍志方等,2018)。

此次广州"5•7"特大暴雨按雨团的移动和形状特点分为两阶段(田付友等,2018):第一阶段6日16时(协调世界时,下同)至7日01时强降水云团在广州花都突生并快速加强,雨团中心位置稳定,20时单体发展最为旺盛,其中16~20时强降水中心位于花都花山镇,最大小时雨量120 mm,累积雨量达287.9 mm;6日21时至7日01时强降水对流云团位于增城,增城、新塘镇小时雨量分别为184.7 mm和150 mm;第二阶段7日01~08时带状雨团快速经过番禺、东莞等地。本文着重研究此次暴雨过程的第一阶段。

#### 2.2 天气形势分析

本文利用 GFS 资料对广州 "5•7" 特大暴雨发 生的天气环境背景条件进行分析,从5月6日12时 的 500 hPa 位势高度场来看(图 2a1),北半球中高 纬为两槽一脊的经向型环流分布,我国东北至西太 平洋沿岸上空为深厚的东北冷涡,其宽广低槽影响



图1 模拟区域示意图(填色: 地形高度, 单位: m) Fig. 1 Illustration of numerical simulation area( terrain height, shaded, m)



图2 (a1, a2) 500 hPa位势高度场(蓝色实线, dagpm)、西太平洋副热带高压(黑色实线, dagpm)、温度场(红色虚线, K)、风场(风向杆, m s<sup>-1</sup>)、槽线(棕色实线)、200 hPa高空急流(散点区, m s<sup>-1</sup>); (b1, b2) 700 hPa位势高度(蓝色实线, dagpm)、温度场(红色虚线, K)、风场(风向杆, m s<sup>-1</sup>)、槽线(棕色实线); (c1, c2) 850 hPa位势高度场(蓝色实线, dagpm)、温度场(红色虚线, K)、风场(风向杆, m s<sup>-1</sup>)、槽线(棕色实线); (c1, c2) 海平面气压场(蓝色实线, hPa)、地面温度场(红色虚线, K)、10米高度风场(箭头, m s<sup>-1</sup>)、地面切变线(黑色实线)。(a1-e1) 2017年5月6日12时(协调世界时,下同); (a2-e2) 2017年5月6日18时。蓝色字母"G"("D")和红色字母"N"("L")分别代表高压(低压)中心、暖空气(冷空气)中心; 灰色填色区代表青藏高原,黑色虚线框显示的位置为广东省, 黑色五角星显示的位置为广州市

Fig. 2 (a1, a2) Geopotential height (blue solid contours, dagpm), the western Pacific subtropical high (black contours, dagpm), temperature field (red dash contours, K), wind field (wind barbs, m s<sup>-1</sup>), trough line (brown solid line) at 500 hPa and high-level jet at 200 hPa (dotted, m s<sup>-1</sup>); (b1, b2) geopotential height (blue solid contours, dagpm), temperature field (red dashed contours, K), wind field (wind barbs, m s<sup>-1</sup>), trough-line (brown solid line) at 700 hPa; (c1, c2) geopotential height (blue solid contours, dagpm), temperature field (red dashed contours, K), wind field (wind barbs, m s<sup>-1</sup>), trough-line (brown solid line) and water vapor flux (dotted, g s<sup>-1</sup> hPa<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup>) at 850 hPa; (d1, d2) geopotential height (blue solid contours, dagpm), temperature field (red dashed contours, K), wind field (wind barbs, m s<sup>-1</sup>), trough-line (brown solid line) at 925 hPa; (e1, e2) sea level pressure (blue solid contours, hPa), surface temperature field (red dashed contours, K), 10-meters wind (arrows, m s<sup>-1</sup>), surface shear line (black solid line). (a1-e1) 1200 UTC 6 May 2017; (a2-e2) 1800 UTC 6 May 2017. Blue letters "G" ("D") and red letters "N" ("L") denote the centers of high (low) pressure systems, and warm (cold) air, respectively. The grey shaded area represents the Tibetan Plateau. The dashed black rectangle denotes the position of Guangdong Province. The black pentagram denotes the position of Guangzhou city

WANG Ning et al. The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the ... 1249



Fig. 2 (Continued)

着我国北方地区;中低纬环流主要呈纬向型分布, 我国西南地区上空存在一弱的高空短波槽,西太平 洋副热带高压(以下简称副高)呈东西向带状分 布,控制广东及南部沿海地区,副高588线位于广 东中部偏北上空,广东上空为西南及偏西气流; 200 hPa流场显示,我国东部地区被宽阔的高空急 流覆盖,急流轴大致呈西南一东北向,位于30°N~ 40°N之间,此时广东省处于高空急流入口区南侧。 18时(图2a2),冷涡加强,槽线向南延伸至副高 588线附近;高空短波槽东移至100°E附近,广东 中北部受此弱短波槽东移的影响;高空急流和副高 588线略有南移,广东大部分地区受副高控制。

5月6日12时700 hPa位势高度场、温度场和 风场(图2b1),青藏高原南侧有暖中心,东侧有 短波槽,槽前为西南暖湿气流,广东省位于下游区 域,受偏西风控制。18时(图2b2),随东北冷涡 的加强,西南低涡东移,范围扩大,在西南地区加 强汇聚;广东至南海西北部一带转为西南气流,但 风速只有5ms<sup>-1</sup>左右。

5月6日12时850hPa温度场和水汽通量场 (图2c1),重庆至江苏一线受一冷中心影响,华南 上空处于其东南侧的等温线密集区,但风场较弱, 仅在广东中西部存在弱的风切变;水汽通量场显 示,广东地区较为干燥,广西中西部地区存在少量 水汽。18时(图2c2),低压系统向东南方向移动 至广西上空,加强了两广地区的气流辐合,使得南 海暖湿水汽输送向广东西部地区;广东西部地区已 转为东南偏南风场,风速加大。

5月6日12时925 hPa位势高度场(图2d1), 我国江淮地区为高压中心,印度为一低压中心,广 东西南至南海西部位势高度场为东脊西槽型;重庆 上空为一冷中心。受重庆冷中心与东北冷涡的共同 影响,广东至台湾半岛地区的温度场转为东脊西槽 型,广东省受弱暖槽控制,暖脊后部的偏东风与较 为暖湿的偏南风形成弱辐合;925 hPa冷中心对应 海平面气压场的高压中心,广东东部沿海冷槽对应 高压脊,表明有非常浅薄的冷空气南下渗透影响该 区域。18时(图2d2),随着江淮高压东移入海, 印度低压加深,广东地区被低压槽控制,东部地区 为高压脊控制;温度场上重庆冷中心范围扩大,位 于其东南边缘的广东北部出现明显降温。

5月6日12时的海平面气压场(图2e1),重庆



图3 2017年5月6日12时广东清远站(59280) *T*-lgp 图。红线:状态曲线,蓝线:层结曲线,绿线:露点温度曲线,风向杆:风场 Fig. 3 Vertical profiles plotted on skew *T*-lgp diagram of the state curve (red line), stratification curve (blue line), dew point curve (green line), and wind field (wind barbs) at Qingyuan sounding station (ID59280) in Guangdong Province at 1200 UTC 6 May 2017

至我国东海地区受弱高压控制,广东地区位于高压 南侧的地面低压倒槽中;从温度场来看,暖脊沿我 国沿海地区北伸,影响范围宽广,广东大部处于暖 脊控制中: 冷高压脊的1014 hPa等值线在夜间有所 西移,控制广东的范围扩大。局地大暴雨发生在地 面冷高压脊后部、地面倒槽中的气流辐合区里,具 有类似"回流暴雨"特征(林良勋等,2006;伍志 方等,2018),但其冷高压后部回流非常弱;500 hPa高空短波槽前,地面存在暖式切变线,从广西 东部向东北方向伸展,经过广东中北部,延伸至福 建西南部,尺度相对较大。18时(图2e2),江淮 弱高压东移入海,地面1014线向西南移动,地面 切变线东移, 广东地区风场由东南风转为东南偏南 风,在广州附近存在气流辐合区。从其天气系统配 置来看,广州"5•7"特大暴雨属于边界层辐合线 型(何立富等,2016)华南暖区暴雨。

根据降水发生前清远站的*T*-lgp(图3)显示, 6日12时,925 hPa以下边界层低层为一个干层, 温度也较高,为暖干气团;中低层(850~650 hPa) 呈现明显的湿区状态,温度露点差较小;对流层中 高层(650~300 hPa)为干区。此时,近地面层为 偏南风控制,850 hPa为东北风,至700 hPa转为西 北风,存在弱的垂直风切变。700 hPa以下的偏北 风促使干冷空气与偏南暖气流辐合。此外,800~ 330 hPa之间对流有效位能CAPE适中(503.7 J kg<sup>-1</sup>),对流抑制能量CIN较小(80.8 J kg<sup>-1</sup>),自由 对流高度(LFC)较高(809.8 hPa),对于华南前 汛期暴雨来说,仍需要较强的外力强迫,才能触发 对流。

本次强对流触发过程发生在弱天气尺度强迫背 景下,斜压性较弱,天气尺度强迫不明显,触发地 区附近层结相对稳定。而在中尺度方面,华南地区 地形复杂,山地较多,城市热岛产生的偏南暖空气 在地形作用下强迫抬升,与山坡下滑冷空气产生辐 合,从而触发出强对流。

## 3 数值模拟试验设计及结果验证

#### 3.1 数值模拟试验设计

本研究将美国国家环境预测中心(NCEP)提供的6h时间分辨率, 0.5°×0.5°空间分辨率的GFS

(Global Forecasting System)再分析资料作为初始 背景场,运用 Weather Research Forecast System (WRF) V3.9.1中尺度数值模式对广州"5•7"特大 暴雨进行数值模拟。模式初始时刻为5月6日00 时,共积分36小时,采用 Morrison 云微物理方案 及 Yonsei University scheme (YSU)行星边界层方 案。实况降水数据采用中国气象数据共享服务网提 供的基于全国3万余个自动观测站逐小时降水量和 CMORPH卫星反演降水产品,实况雷达数据为中 国气象局气象探测中心提供的6 min时间分辨率综 合雷达拼图反射率数据。

考虑到对流边界层的热动力强迫因子、中层干 冷空气侵入以及高空气流辐散对对流触发、演变及 组织化过程的不同影响,本文依据WRF模式中大 气垂直方向低、中、高三层的海拔高度,将大气按 相应的eta层在垂直方向上划分为低、中、高三层, 其对应的eta层高度分别为1~0.78、0.78~0.23、 0.23~0。为了验证模式对此次广州"5•7"特大暴 雨个例的模拟性能及不同垂直分层分辨率对此次特 大暴雨过程的影响,研究分别设置了如下试验方案 (图4):(1)模式中常用的51层不等距整层eta垂 直层为对照试验(以下简称CTL51);(2)在51层 对照试验基础上,均匀增加大气低层的垂直分层,



图4 模拟试验的WRF模式 eta 层垂直分布, CTL51为51 层对照试验, LOW62为62 层低空垂直分辨率加密试验, MID68为68 层中空垂直分辨率加密试验, UPP71为71 层高空垂直分辨率加密试验, ALL81为81 层整层垂直分辨率加密试验

Fig. 4 Vertical distributions of eta levels of WRF model for the 51level control run (CTL51), 62-level with higher vertical resolution at the low levels run (LOW62), 68-level with higher vertical resolution at the middle levels run (MID68) and the 71-level with higher vertical resolution at the upper levels run (UPP71), the 81-level with higher vertical resolution at the whole levels run (ALL81) 总层数为62层(以下称为LOW62);(3)在51层 对照试验基础上,均匀增加大气中层的垂直分层, 至68层(以下称为MID68);(4)在51层对照试 验基础上,均匀增加大气高层的垂直分层,至71 层(以下称为UPP71);(5)提高了整层垂直分辨 率,总层数为81层(以下称为ALL81)。各方案在 垂直空间的分布如图4所示。需要注意的是,为在 模拟中达到最佳模拟效果,同时考虑到垂直分辨率 与水平分辨率的协调问题,随着垂直分辨率的增加 将水平分辨率也做了适当调整,提高垂直分辨率试 验也将水平分辨率由3km提高至2km,水平格点 数由211×181增加为316×271。此外,为了对比 垂直分辨率和水平分辨率对此次暖区暴雨过程模拟 的作用大小,另设置了一组水平分辨率敏感性试验 (CT2),即在对照试验(CTL)基础上不改变垂直 分辨率,只将水平分辨率提高为2km。

#### 3.2 模拟结果分析

为了验证数值模拟试验的结果,本节将对模拟 的广州"5•7"特大暴雨发生的主要时段(5月6日 12时至5月7日00时)的12h累积降水量、花都区 对流降水开始时刻(5月6日16时)和增城区对流 降水开始时刻(5月6日21时)两个典型时刻的雷 达回波与实况进行对比验证,以探讨不同垂直分辨 率对此次广州"5•7"特大暴雨模拟的影响。

此外,许多研究表明,广州"5•7"特大暴雨 是由冷高压后部的弱回流经过城市热岛区域,转为 偏南暖气流,与花都区山坡下滑冷气流水平辐合, 在山前强水平温度梯度作用下触发为强对流(伍志 方等,2018)。因此,本文将模拟的5月6日12时 控制和敏感性试验的地面气象要素场状况与NCEP 再分析实况数据进行了对比,以验证模式对城市热 岛区域的模拟结果。

#### 3.2.1 模拟降水分析

从模式模拟的12h(5月6日12时至5月7日 00时)累积降水结果看,六组试验都能够模拟出 广州"5•7"特大暴雨。模式模拟的主要降水雨带 大致呈西北一东南走向,降水落区大致分为广东西 北部、中部及中东部三个区域,并且都模拟出了降 水强度大于100mm的强降水中心,与实况基本一 致。对比实况(图5a),CTL51(图5b)在广东西 北部的强降水雨带偏南,降水中心雨量偏强;在广 东中部地区的强降水中心位于花都西北方,且模拟 出了两个分散的强降水中心,整体偏弱;广东中东



图 5 2017年5月6日12时至7日00时实况与模拟的12h累积降水量(填色,mm): (a)实况; (b) CTL51; (c) CT2; (d) LOW62; (e) MID68; (f) UPP71; (g) ALL81。黑色五角星代表花都

Fig. 5 Observed and simulated 12-h accumulative precipitation (shaded, mm) from 1200 UTC 6 May to 0000 UTC 7 May 2017: (a) Observed; (b) CTL51; (c) CT2; (d) LOW62; (e) MID68; (f) UPP71; (g) ALL81. Black pentagram denotes Huadu

部的强降水雨带呈西北一东南走向,与实况的西南 一东北走向存在偏差,雨量偏强。对比对照试验, 在提高水平分辨率后,CT2(图5c)矫正了对照试 验在广东中部地区两个强降水中心的状况且降水落 区与实况更接近。分层提高垂直分辨率后,对降水 强度的模拟有明显改善,强降水中心更靠近花都, 其中LOW62(图5d)在广东中部地区的强降水中 心稍偏北,降水强度较实况偏小; MID68(图5e) 在花都附近区域模拟出了两个>100 mm的强降水 中心,广东西北部及中东部地区的雨量偏强; UPP71(图5f)的中部强降水中心异常偏西,强降 水中心面积大于实况,但其强降水雨带走向与实况 存在偏差。同时提高水平分辨率与整层垂直分辨率 后,总体雨带分布、降水落区及强降水中心都与实 况更为接近(图5g)。

为了定量分析不同试验方案对降水的模拟效 果,本文利用统计学方法计算了不同试验方案分别 与实况降水之间的均方根误差(RMSE, Root-Mean-Square Error)(表1),其公式(叶丹等, 2017)为

RMSE = 
$$\sqrt{N^{-1} \sum_{i=1}^{N} [X_{sim}(i) - X_{obs}(i)]^2}$$
, (1)

其中, X<sub>obs</sub>为实况观测降水值, X<sub>sim</sub>为模拟降水值, N为观测数。表1表明,提高垂直分辨率和水平分 辨率都使模式降水预报的RMSE减小,说明模拟效 果提高。与CT2相比,在提高水平分辨率基础上 提升低层垂直分辨率使RMSE减小36.6%,而提升 整层垂直分辨率使RMSE减小36.6%,而提升 整层垂直分辨率使RMSE减小32.7%,垂直 分辨率与水平分辨率使RMSE减小32.7%,垂直 分辨率与水平分辨率均提高的试验使RMSE减小 46.1%~59.9%,其中ALL试验得到的均方根误差最 小,为59.9%,说明垂直分辨率对降水模拟作用大 于水平分辨率,而垂直分辨率与水平分辨相协调时 影响降水模拟作用最大。

3.2.2 模拟雷达回波分析

等效反射率因子(equivalent reflectivity factor) 是雷达气象学中表征在各种散射粒子情况下散射体 反射能力的物理量,以mm<sup>6</sup>m<sup>-3</sup>或者dBZ为单位。 本文中模拟雷达回波(等效反射率因子)是由 NCL (The NCAR Command Language) 绘图语言的wrf\_dbz函数计算所得。其计算基于云微物理参数化方案,并假定:(1) 粒子为恒定密度球体; (2) 指数型尺度分布;(3) 常数截距或Thompson 云微物理方案粒子截距;(4) 零度层以下冰相粒子 视为液相粒子。总的雷达反射率因子等于雨粒子、 雪粒子、霰粒子三者反射率因子之和。单类粒子反 射率因子则通过空气密度、粒子密度、粒子混合 比、尺度分布、截距参数计算所得。

从5月6日16时和21时两个典型时刻的雷达回 波图看,模式基本能够反映此次中尺度暖区对流系 统的触发、传播以及对流单体后向发展的状况。实 况雷达回波图显示,16时(图6a1)中尺度暖区对 流云团在广州市花都区触发,随后在该区迅速发 展,至21时(图6a2)花都区强对流减弱东移,与 增城区向北发展的对流系统合并增强,对流风暴在 该区剧烈发展。此次广州特大暴雨降水过程的对流 系统发展相对较低,却有较强的降水效率,属于低 质心暖云对流。对比实况,对照试验基本模拟出了 对流分布、触发与发展状况。16时,对照试验和 大部分敏感性试验模拟的对流触发位置都稍偏南, 值得注意的是,LOW62的对流触发位置比对照试 验更接近花都,与实况基本一致;21时,CTL51 (图 6b2)模拟的广东中部地区对流系统位置偏西 北,这种位置偏差在提高水平分辨率后(图6c2) 得到了较大程度的改善,且对流系统组织化更加明 显。进而提高垂直分辨率后,对流强度和位置的模 拟效果都有明显提升,其中同时提高水平分辨率和 整层垂直分辨率试验ALL81(图6g2)结果最佳, 成功模拟出了实况中的三个强回波区。因此从降水 及雷达回波的模拟结果来看,水平及垂直分辨率的 提高对此次广州"5•7"特大暴雨的模拟具有重要 意义。

表1 不同试验模拟的累积降水量RMSE和RMSE减小百分比

Table 1	RMSE and RMSE reduction	n percentages of simulated	cumulative precipitation in	different experiments
---------	-------------------------	----------------------------	-----------------------------	-----------------------

		RMSE减小百分比				
试验	RMSE/mm	垂直分辨率敏感性试验	水平分辨率敏感性试验	垂直+水平分辨率敏感性试验		
CTL	1.463463		_	_		
CT2	0.984594	—	32.7%			
LOW	0.624363	36.6%		57.3%		
MID	0.780932	20.7%		46.6%		
UPP	0.788645	19.9%		46.1%		
ALL	0.588198	40.3%		59.9%		



图6 2017年5月6日 (a1-g1) 16时和 (a2-g2) 21时实况与模拟的雷达回波 (填色, dBZ): (a1, a2) 实况; (b1, b2) CTL51; (c1, c2) CT2; (d1, d2) LOW62; (e1, e2) MID68; (f1, f2) UPP71; (g1, f2) ALL81。黑色五角星代表花都 Fig. 6 Observed and simulated composite radar echoes at (a1-g1) 1600 UTC and (a2-g2) 2100 UTC 6 May 2017 (shaded, dBZ): (a1, a2) Observations; (b1, b2) CTL51; (c1, c2) CT2; (d1, d2) LOW62; (e1, e2) MID68; (f1, f2) UPP71; (g1, g2) ALL81. Black pentagram denotes Huadu

#### 3.2.3 模拟城市热岛效应分析

图7表明,各试验都成功模拟出了珠三角城市 群的城市热岛效应,在花都和增城北部分别存在两 个密集城市群,城市群上空存在两个高温中心,华 南东北部山区存在一个低温中心,且冷空气南下至 花都一增城一带与偏南暖湿气流交汇,形成强水平 温度梯度带。在6日12时的地面2米温度场上, LOW62(图7d1)模拟出的城市热岛效应最强, ALL81(图7g1)次之;在地面10米风场上,各敏 感性试验对华南北部冷空气的模拟相比于实况有所 加强,且各敏感性试验也模拟出了稍强于实况及对 照试验的偏南风,致使花都附近存在一条小尺度东 西向切变线,这与田付友等(2018)的分析一致。 图中明显看到偏南气流经过城市热岛转为偏南暖气 流与北部山前冷空气在花都附近地区产生水平辐 合,配合强水平温度梯度使对流单体触发。18时, 冷空气有所加强,在冷空气影响下,华南西南部的 西南风转为东南风,地面切变线由东西向转为东南 一西北向,热岛强度稍有减弱。

综合以上分析,地面要素的模拟改进是成功模 拟此次暴雨过程的关键因素。各敏感性试验对地面 要素的模拟都强于对照试验,但从LOW62与 ALL81的结果来看,LOW62模拟的热岛效应比 ALL81要强,但ALL81模拟的雷达回波与降水效 果更好,这说明此次暖区暴雨过程不仅与热岛效应 有关,也与对流层中高层的物理过程有关。



图7 GFS再分析与模拟的2017年5月6日 (a1-g1) 12时和 (a2-g2) 18时广东省海平面气压场 (蓝色实线, hPa)、2米高度温度场 (红色 虚线, K)、10米高度风场 (箭头, m·s<sup>-1</sup>) 和建城区 (填色, 中紫色): (a1, a2) GFS 再分析资料; (b1, b2) CTL51; (c1, c2) CT2; (d1, d2) LOW62; (e1, e2) MID68; (f1, f2) UPP71; (g1, g2) ALL81。黑色五角星显示位置为花都, 空心五角星显示位置为增城 Fig. 7 Ground fields from GFS reanalysis data and numerical simulations, including sea level pressure (blue solid contours, hPa), 2 m-height temperature (red dashed contours, K), 10 m-height wind (arrows, m s<sup>-1</sup>), city (shaded, medium purple), at (a1-g1) 1200 UTC and (a2-g2) 1800 UTC 6 May 2017 in Guangdong Province: (a) GFS reanalysis data; (b) CTL51; (c) CT2; (d) LOW62; (e) MID68; (f) UPP71; (g) ALL81. Black pentagram denotes Huadu and hollow pentagram denotes Zengcheng

## 4 垂直分辨率影响暖区降水的机制

上节详细比较了不同分辨率下广州"5•7"特 大暴雨的模式模拟结果(雷达回波、地面降水以及 城市热岛效应)。本节则重点分析不同垂直分辨率 对对流系统触发及发展过程的影响,探讨不同垂直 分辨率影响引发广州"5•7"特大暴雨对流系统发

#### 生发展过程的可能机制。

4.1 低空垂直分辨率加密对低层对流触发的影响

低层垂直分辨率的加密(LOW62)主要是能 够更加细致的刻画对流发生过程的边界层环境及对 流系统的触发过程。

图 8 是 CTL51 与 LOW62 模拟的对流系统的触 发过程及大气环境(包括边界层、近地面及细致地



图8 2017年5月6日(a1-a6)CTL51和(c1-c6)LOW62模拟的花都地形(填色,m)对流系统触发过程的雷达回波(填色,dBZ)及850hPa相当位温场(蓝色等值线,K)、风场(箭头,ms<sup>-1</sup>);(b1-b6)沿(a1-a6)中对应时刻剖面线,(d1-d6)沿(c1-c6)中对应时刻剖面线(红色直线)的雷达回波(填色,dBZ)、相当位温(填色,K)、云水混合比(QCLOUD)(黑色虚线等值线,kg kg<sup>-1</sup>)、风场(箭头,ms<sup>-1</sup>)、自由对流高度(白色曲线,km)、抬升凝结高度(蓝色曲线,km)、边界层高度(黑色曲线,km)和地形(黑色阴影,km)的垂直剖面(黑色三角形显示的位置为花都地形)。(a1-d1)14时46分;(a2-d2)14时49分;(a3-d3)14时56分;(a4-d4)15时01分;(a5-d5)15时03分;(a6-d6)15时10分

Fig. 8 (a1-a6) Radar echoes (shaded, dBZ), 850 hPa equivalent potential temperature (blue contours, K) and wind field (arrows, m s<sup>-1</sup>) during the triggering process of the convective system and Huadu terrain (shaded, m) from CTL51 (red straight line shows the profile position) on 6 May 2017; (c1-c6) same as (a1-a6), but for LOW62. (b1-b6) Vertical cross sections of radar echo (shaded, dBZ), equivalent potential temperature (shaded, K), cloud water mixing ratio (black dashed contours, kg kg<sup>-1</sup>), wind field (arrows, m s<sup>-1</sup>), free convection level (white curve, km), lifting condensation level (blue curve, km), boundary layer height (black curve, km), and terrain (black shaded, km) along the section line (red straight line) given in (a1-a6), black triangle denotes Huadu terrain; (d1-d6) same as (b1-b6), but for LOW62. (a1-d1) 1446 UTC; (a2-d2) 1449 UTC; (a3-d3) 1456 UTC; (a4-d4) 1501; (a5-d5) 1503 UTC; (a6-d6) 1510 UTC

形)的比较。由图8可知,LOW62较CTL51能更 好地模拟出对流系统的触发过程。在5月6日14时 46分CTL51的850hPa水平风和雷达回波合成场上 (图 8a1)可以看出,高压边缘的回流偏南风在喇 叭口地形上强迫抬升,在花都附近与偏东风交汇, 有低空风的辐合;在回波图上,主要的回波分布在 花都偏南的地区,而在花都地区还未出现明显回 波。同时,113°13'E的南北温度、风场和云水的垂 直廓线图上(图8b1)可见,在王子山近地面迎风 坡上有偏南气流和偏北气流的交汇,在王子山山顶 有较强的垂直上升运动;此时抬升凝结高度(蓝线 所示)大致在近地面1km左右的低空,自由对流 高度(白线所示)整体位于抬升凝结高度以上,大 致位于近地面1.5~2 km左右;在温度场上,近地 面2km左右的高度上出现了明显的温度波动;需 要指出的是云水物质在 2~2.5 km 的高度上出现了 一个弱的中心,表明对流扰动首先出现在近地面2 km以上的低空,随着对流的发展,可以看出,自 由对流高度、抬升凝结高度和边界层高度(黑线所 示)均有明显的降低。在同时的LOW62中,花都 附近的850 hPa偏南风和偏东风均有所增强(图 8c1),花都附近也未出现明显回波;在南北温度、 风场和云水的垂直廓线图(图8d1)上,地面风场 明显增强,在3~4 km高度上出现了明显的垂直环 流结构,自由对流高度和抬升凝结高度与CTL51 基本相似,边界层高度更低,云水物质范围虽然比 CTL51小,但其高度更高,位于2.4 km附近。在 14时49分的CTL51中,水平风场上没有大的变 化,也未出现明显的雷达回波(图8a2);在南北 温度、风场和云水的垂直廓线图(图8b2)上,温 度扰动明显增强, 云水中心的强度和范围明显增 加,由于对流的发展,造成抬升凝结高度和自由对 流高度降低。相比于CTL51, LOW62的花都附近 850 hPa风场明显增强(图 8c2);此时的垂直剖面 图(图8d2)上可以看到,云水的垂直和水平分布 范围明显增大,强度也有所增强,相应的自由对流 高度和抬升凝结高度也较CTL51 明显偏低。在14 时56分,CTL51的水平图(图8a3)上出现了明显 的雷达回波,表明对流开始触发,在此时的垂直剖 面图(图8b3)上可以看到,云水廓线有明显的发 展,在2.6~2.8 km高度上出现了10 dBZ的雷达回 波,表明对流初步触发出来。同时LOW62中(图 8c3)可以看到,850 hPa水平图上花都地区也出现

了雷达回波;在垂直剖面图(图8d3)上,云水物 质的水平范围明显加大, 雷达回波较 CTL51 也明 显增强,在其南侧出现了一个弱的云水中心。15 时01分, CTL51的850hPa水平图(图8a4)上出 现了中心强度大于30 dBZ的雷达回波,达到对流 单体触发条件,表明对流已经触发;此时垂直剖面 图(图8b4)上,在王子山上空的自由对流高度出 现了一个新的低值,云水物质垂直范围更大,强度 增强,出现了大于30 dBZ的雷达回波,达到对流 触发条件。同时,在LOW62的850hPa水平图 (图 8c4)上,花都地区也出现了中心大于 30 dBZ 的雷达回波,回波范围较CTL51小,但其中心范 围更大: 在垂直剖面图(图8d4)上, 云水物质范 围及强度都强于CTL51,对应的雷达回波也更强, 边界层高度明显降低。15时03分,如图8a5所示 中空对流系统完全触发, 雷达回波强度明显增强, LOW62(图8d5)中花都南侧弱的云水中心进一步 减弱,在其北侧也出现一个弱的云水中心。15时 10分,中空对流系统向低层发展,垂直速度增强, 其强中心已经接触地面,对流高度达到4km左右; LOW62强盛的偏北气流使对流系统更偏南侧发展, 对流中心范围更宽广,中低空垂直环流发展旺盛, 相比于 CTL51 中边界层高度趋于平缓的趋势, LOW62边界层高度依然很低,表明此时对流发展 更旺盛。

值得注意的是,低层加密后,低层温度场结构 发生了显著变化,CTL51的水平图8a上温度梯度 为南北向,而LOW62的水平图8c上温度梯度为西 南一东北向。这种低层加密引起的变化主要缘于两 个方面:(1)是低层加密试验更细致的模拟出了城 市的热岛效应,模拟出的城市区域近地面有较强的 暖中心(如图7c1与c2所示);(2)LOW62更细致 的模拟出了低空850hPa高压边缘东北向回流的冷 空气活动,正是此冷空气的侵蚀造成对照试验与低 空加密试验的温度场的显著差异。

由上述试验可知,LOW62的对流触发强度大于CTL51,这可能与LOW62模拟出了更强的偏南回流和偏东风,偏强的低层风速,及其更为明显的辐合效应有关。同时,两个试验的水平温度梯度差异一方面造成近地面更暖,另一方面也使低层更冷,加大了层结不稳定和对流不稳定能量的堆积,更有利于对流活动的触发,是造成对流触发和传播的重要因素。从动力和热力的综合效应上来看,使

得LOW62模拟出了较强的对流触发过程,这对于 广州 "5•7" 特大暴雨的产生是非常重要的。

### 4.2 中空垂直分辨率加密对干冷空气侵入及对流 系统演变的影响

中层垂直分辨率的加密试验(MID68)主要是 细致地考察中空动热力物理过程的影响。中空一个 最主要的物理过程是伴随着对流系统的发展,有干 冷空气侵入到对流系统中。因此,MID68主要是 考察分辨率的提高对中空干冷空气侵入的影响。

图9是CTL51与MID68模拟的对流系统的发 展过程及干冷空气侵入到对流系统的比较。在5月 6日17时45分,500hPa水平风、位温和雷达回波 的合成场(图9a1)上可清晰地看到,广州白云机 场附近地区 (A点),为位温的高值中心,其值达 342 K,在清远地区为一个位温的低值中心,其值 为337 K,表明此处有相对冷的中心;在雷达回波 图上,花都地区有一个带状对流云带,白云机场附 近地区有一个发展旺盛的对流系统A,其最大雷达 回波已达45dBZ,在其西侧有一新生对流单体B; 500 hPa中高空为盛行的偏西风,在花都附近有局 地的西南风, 表明清远附近的冷中心在偏西气流的 作用下可以侵入到花都及白云地区的对流系统中。 在23°20′N东西向的垂直剖面(图9b1)上可以看 到,白云区对流系统A发展旺盛,30 dBZ的回波 可达7 km以上,大于45 dBZ的强回波区主要分布 在4km以下,在其西侧存在对流单体B,大于30 dBZ的雷达回波高度在4km左右,在位温场上, 对流系统内为位温的高值区,强度可达346 K;值 得注意的是,在对流系统B的西侧3km左右存在 一个位温低值区,其值为338K,表明中空存在一 个干冷中心;从风场上看,4km以上的偏西气流 可以将冷空气输送到对流系统内,干冷空气侵入的 高度大约在3.5~6 km。同时 MID68 中可看到, 位 于花都及白云机场的对流系统与CTL51相比,白 云机场附近的雷达回波A'与其西侧的对流系统B'强 度更强,而清远地区的位温低值中心范围更大,表 明此处的冷空气势力更强; 500 hPa 偏西气流强度 增大,表明干冷空气侵入的动力作用更强;在其东 西向垂直剖面图上,在对流系统A'和对流系统B'西 侧各存在一个位温低值中心,其值为338K,干冷 侵入高度可低至2km,主要的干冷空气侵入发生 在 2~7 km 的高度上,表明与 CTL51 相比, MID68

的中空干冷空气侵入效应更为显著。17时53分, 在CTL51 500 hPa水平风、位温和雷达回波的合成 场(图9a2)上可以看到,清远地区的低位温中心 东伸南压,使对流系统A上空的位温高值减小;对 流系统B强度有所增加。从对应的垂直剖面(图 9b2)上可以看到,对流系统A西侧的位温低值中 心范围扩大,其值降至336K,对流单体B西侧的 位温低值延伸至对流系统内部,促使对流系统B内 部垂直速度剧增,对流发展强度更盛。同时, MID68(图9c2)的位温低值区与高值区大致呈西 一东向分布,西北部冷空气范围更宽广,在等温线 密集区存在加强的西北一西南风切变,与CTL51 相比对流单体A'与对流单体B'强度增大,最大雷达 回波值达50 dBZ以上;在垂直剖面(图9d2)上, 可以看到明显的低于CTL51的位温低值高度,随 着与西侧对流单体C的合并组织发展,对流单体B' 强度增强,同时对流单体A'大于30 dBZ的雷达回 波高度已发展至8 km以上。从18时05分CTL51的 500 hPa水平风、位温和雷达回波合成场(图9a3) 上可以看到, 位温高值中心南侧及西南侧的位温低 值区开始向东向北发展;从雷达回波上看,对流单 体A强度稍有减弱,对流单体B的中心强度增强, 中心值已经达到50 dBZ以上;同时在垂直剖面 (图9b3)上可以看到对流单体B的垂直速度明显 增大,对流层高度明显增高,已达8km左右;同 时 MID68(图 9c3)的两个对流单体强度与 CTL51 相比有明显的增强,且两个对流单体间已经出现初 步的合并组织化发展;在此时的垂直剖面图上,对 流单体 B′ 西侧的位温低值区达到 336 K; 与 CTL51相比尽管对流单体B'的高度偏低,但对流单 体A'大于30 dBZ的回波高度已经达到9 km 左右。 18时20分,由500hPa水平风、位温和雷达回波的 合成场(图9a4)可知,对流单体A与对流单体B 已经合并;对应的垂直剖面(图9b4)可以看到合 并后的对流单体强度增强,垂直速度增大,大于 30 dBZ的回波高度已经达到9 km 左右,强对流单 体内部有一个位温低值区;从此时的垂直剖面(图 9c4) 看到合并后的对流单体 A'与 B'强度强于 CTL51,同时其水平范围更加宽广,影响范围更 大:从垂直剖面(图9d4)上来看对流系统西侧的 位温低值比CTL51更小,为336K,对流系统内 部,干冷空气侵入对流系内部更为显著;对流系统 6期

No. 6 WANG Ning et al. The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the ... 1259





Fig. 9 (a1–a4) Radar echoes (shaded, dBZ), equivalent potential temperature at 500 hPa (blue contours, K) and wind field (arrows,  $m \cdot s^{-1}$ ) during the development process of the convective system and Huadu terrain (shaded, m) from CTL51 on 6 May 2017; (c1–c4) same as (a1–a4), but for MID68; (e1–e4) same as (a1–a4), but for LOW62. (b1–b4) Vertical cross sections of radar echo (shaded, dBZ), equivalent potential temperature (blue contours, K), wind field (arrows,  $m \cdot s^{-1}$ ), boundary layer height (magenta curve, km), and terrain (black shaded, km) along the section line (red straight line) given in (a1–a4); (d1–d4) same as (b1–b4), but for MID68; (f1–f4) same as (b1–b4), but for LOW62. (a1–f1) 1745 UTC; (a2–f2) 1753 UTC; (a3–f3) 1805 UTC; (a4–f4) 1820 UTC

内部垂直增大,MID68强盛的西南气流使对流系 统向东北方向倾斜发展,使对流的后向传播更 明显。

事实上,某层垂直分辨率加密之后也会一定程 度影响其它高度层,因而我们也探讨了低空加密对 其中层干冷空气的可能影响(图9e和f)。如图9所 示,LOW62试验对流系统高度高于CTL51和 MID68试验,对流系统也更为集中。LOW62试验 低层加密后,增强了低空急流和低层辐合,使对流 系统组织合并更为显著,对流系统质心也有上移, 这导致了低层热量随之向上输送,因此LOW62试 验的中层干冷空气相对较弱。

由上述分析可知,加密中空垂直风切变,使得 花都及白云地区对流系统后部的干冷系统更强,兼 之其更强的偏西气流使得干冷空气侵入对流系统的 效应更为显著。干冷空气侵入对流系统造成温度的 降低,有大量的潜热和不稳定能量释放,使得对流 系统发展更为旺盛,同时也加强了后向传播对流系 统活动,使对流组织化过程更加明显。

## 4.3 高空垂直分辨率加密对对流系统组织化过程 的影响

高层垂直分辨率的加密试验(UPP71)主要是 考察垂直分辨率对高空急流以及高空辐散场与对流 系统的配置关系及可能的影响。随着高空垂直分辨 率的加密,能细致地刻画高空急流的时空分布及伴 随的高空辐散,高空急流及高空辐散场的调整必然 会引起其周围对流系统的变化,本节将细致地探讨 垂直分辨率的加密对对流系统组织化过程的影响 机制。

图10是CTL51与高层UPP71模拟的高空急流 及辐散场和对流系统的比较。5月6日15时15分, 在CTL51(图10a1)上高空急流(斜线阴影区域) 主要位于24°20'N附近,呈带状分布;从高空辐散 场上呈多个中心,偏北的中心位于24°20'N高空急 流南端,主要是由高空急流的辐散效应引起,在花 都地区西北侧也有一个辐散中心,在白云区东西两 侧各存在一个强的辐散中心,在上述辐散中心周 围,都有强的对流活动;在其垂直剖面(图10b1) 上,可以看到在白云地区的两个对流单体C和对流 单体D,对流高度在4km附近,在两个单体的对 流层顶存在着一个辐合中心,有利于对流单体的发 展;从垂直风场上可以看到近地面至3km的中空

由地面回流的东南气流控制,3km以上主要由偏 西气流控制,高空急流轴位于7km以上。同时的 UPP71(图10c1)表明,高空急流的空间分布与 CTL51基本相似,但风场的辐散存在着较大差别, 与CTL51相比,高空急流南侧的辐散中心强度和 范围都明显偏强,位置也明显偏南,白云地区两端 的辐散中心也略强于CTL51。从其垂直剖面(图 10d1)上可以看到,白云地区存在着多个对流中 心,其强度较CTL51都偏强,对流高度可达6km, 在其对流层顶存在着宽广的辐散中心,高空辐散作 用有利于多个单体的合并; 高空急流轴也在7 km 附近。15时40分, CTL51中(图10a2)的高空急 流稳定少动, 急流南侧的强辐散中心发展分裂为两 个,花都地区西北侧的辐散中心已经移动至花都附 近,白云区东西两侧的强辐散中心减弱;从雷达回 波上看,白云区两个对流系统强度增强。在对应的 垂直剖面(图10b2)上,可以看到中空辐散明显 加强,使得对流单体C与D有合并的趋势,对流单 体的强度也增强,顶部发展至5km附近。此时的 UPP71上高空急流强度增大,急流南侧边缘较 CTL51更偏南;随着急流的发展,其南侧的强辐 散中心此时向东北发展,影响范围增大,花都西北 侧的辐散中心也已接近花都地区,白云区两侧的辐 散中心相比CTL51更集中。对应的垂直剖面(图 10d2)上,两个对流单体发展旺盛,5~6 km的高 度上有着两个强的辐散中心,较CTL51辐散场不 仅强度大,而且其范围也更广,辐散场的发展使得 两个对流单体发展旺盛,其对流高度已达6.5 km 左右。16时07分,CTL51中花都及白云地区周围 的辐散中心强度稍有减弱,对流单体C中心强度已 高于45 dBZ,从图 10c2 中可以看到,高空辐散场 的发展使得对流单体C'发展强盛。同时,UPP71高 空场(图10c3)上,由于急流的南向发展,急流 南侧强辐散中心分裂,花都地区附近的辐散中心强 度依然很强,白云区西侧及南侧辐散中心向对流系 统方向发展。同时,在垂直剖面(图10d3)上看 到白云区上空的强辐散场使得对流系统内的多个对 流单体开始组织发展。16时53分,CTL51(图 10a4)的高空急流略向南发展,花都西侧的强辐散 中心已经移至花都北部,白云区对流系统合并组织 发展。此时,从垂直剖面(图10b4)上可以看到, 高空辐散场分布宽广,强度达到最大值,其高度明

No. 6 WANG Ning et al. The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the ... 1261



图10 2017年5月6日 (a1-a4) CTL51、(c1-c4) UPP71和 (e1-e4) LOW62模拟的花都地形 (填色, m) 对流系统发展过程的雷达回波 (填色, dBZ) 及200 hPa 高空辐散场 (洋红等值线, 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)、高空急流 (斜线区, m s<sup>-1</sup>)、风场 (箭头, m s<sup>-1</sup>); (b1-b4) 沿 (a1-a4) 中 对应时刻剖面线、(d1-d4) 沿 (c1-c4) 中对应时刻剖面线、(f1-f4) 沿 (e1-e4) 中对应时刻剖面线 (红色直线) 的雷达回波 (填色, dBZ)、高空辐散场 (蓝色等值线, 10<sup>-5</sup> s<sup>-1</sup>)、风场 (箭头, m s<sup>-1</sup>)、边界层高度 (洋红曲线, km) 和地形 (黑色阴影, km) 的垂直剖面。 (a1-f1) 15时15分; (a2-f2) 15时40分; (a3-f3) 16时07分; (a4-f4) 16时53分

Fig. 10 (a1-a4) Radar echo (shaded, dBZ), upper-level divergence (magenta contours,  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>), upper-level jet (oblique line area, m s<sup>-1</sup>) at 200 hPa, and wind field (arrows, m s<sup>-1</sup>) during the development process of the convective system and Huadu terrain (shaded, m) from CTL51 on 6 May 2017; (c1-c4) same as (a1-a4), but for UPP71; (e1-e4) same as (a1-a4), but for LOW62. (b1-b4) Vertical cross sections of radar echo (shaded, dBZ), upperlevel divergence (blue contours,  $10^{-5}$  s<sup>-1</sup>), wind field (arrows, m s<sup>-1</sup>), boundary layer height (magenta curve, km) and terrain (black shaded, km) along the section line (red straight line) given in (a1-a4); (d1-d4) same as (b1-b4), but along the section line given in (c1-c4); (f1-f4) same as (b1-b4), but along the section line given in (e1-e4). (a1-f1) 1515 UTC; (a2-f2) 1540 UTC; (a3-f3) 1607 UTC ; (a4-f4) 1653 UTC

6期

显大于对流高度,此时对流单体内部垂直速度稍有 减弱。同时,UPP71(图10c4)中急流南侧分裂的 强辐散中心重新组合发展,花都西侧地区辐散中心 东移,白云区对流系统周围存在多个辐散中心,雷 达回波大致呈团状发展。相比CTL51,在对应的 垂直剖面(图10d4)中可以看到,白云区的高空 辐散场可达11 km,高空辐散作用更强,使得两个 对流单体C'和D'组织发展的更好,大于30 dBZ的 雷达回波已经达到8 km以上,其宽度和高度都大 于CTL51。

与上节类似,我们也探讨了低空加密对其高空 急流分布的可能影响(图10e和f)。如图10a、c和 e所示,由于LOW62试验低空急流的增强,其回 波位置整体要比CTL51和UPP71试验明显偏北, 也使得山前地面暖区温度明显上升,与北侧山区地 面冷区的温度梯度加大,相应增强了局地垂直环流 的南侧上升支和北侧下沉支。高空急流区位于山区 北侧下沉支,受下沉支增强影响,高空辐散增强, 高空急流也相应增强。LOW62试验中,在山前增 强的低空急流北端和高空急流南侧,相应产生了强 的对流系统。从10b、d和f剖面图来看,LOW62 试验的对流系统质心相对较高,高空辐散中心相对 较强,与水平图结论一致。因此,LOW62试验表 明,低层加密试验通过局地垂直环流的改变,可能 会导致高空急流增强。

上述 CTL51 与 UPP71 的比较表明,高空垂直 分辨率的变化,尽管其对高空急流的位置和强度影 响较小,但其对与高空急流出流有关的高空辐散有 较重要的影响;细化垂直分辨率引起的高空辐散场 的时空变化,加强了对流系统上部的出流,引起了 相邻对流单体间的垂直环流,从而加速了对流单体 的组织化过程。

## 5 结论与讨论

本文运用 WRF3.9.1 区域数值模式,利用 GFS 资料,数值模拟了 2017 年广州"5•7"大暴雨过 程。在此基础上,设计了针对不同高度层次的加密 垂直分辨率敏感性试验,比较研究了不同高度垂直 分辨率对降水落区及强度、对流系统的发生发展过 程及周围环境的大气层结状况的影响,探讨了不同 高度层次的垂直分辨率的加密分别对对流系统触 发、发展及组织化过程的影响,本文的主要结论概 括如下:

(1)本文的数值试验较好的模拟和再现了 2017年5月7日广州特大暴雨过程。模式模拟出了 降水雨带的西北一东南走向的带状分布,也较好地 模拟出了花都区及增城区对流系统的触发、后向传 播发展及对流单体合并的组织化过程。

(2) 垂直分辨率的提高对此次强降水过程的模 拟有显著影响,降水强度显著提升,落区及形态也 与实况更为接近,而当水平分辨率与垂直分辨率相 协调时,对降水模拟影响的作用最大。

(3)不同高度层次的垂直分辨率加密试验均能 有效地提高广州"5•7"特大暴雨的数值模拟。从 对照试验和不同高度层次的垂直分辨率加密的敏感 性试验的模拟结果比较来看,低层加密的敏感性试 验模拟出了低层更强的对流触发过程;中层加密的 敏感性试验较好地模拟出了中空干冷空气侵入对流 系统的细致过程;高层加密的敏感性试验较好地模 拟出了高空急流出流及对流系统上空的辐散场的时 空分布。

(4)与对照试验相比,低层垂直分辨率加密试 验模拟出了更强的偏南回流、偏东风和较强的低层 风场辐合;同时也模拟出了较强的温度扰动。低层 加密试验模拟出的更细致的动力和热力垂直结构是 低层加密试验能够较好地再现对流触发过程的主要 原因。

(5)中层加密试验模拟出了干冷空气侵入对流 系统的细致过程,其模拟出的干冷空气侵入的范围 和强度较对照试验明显偏强。干冷空气侵入对流系 统造成的潜热和不稳定能量的释放,是对流系统发 展的重要原因。

(6)高层垂直分辨率的加密试验较好地模拟了与高空急流出流相关的高空辐散中心和对流系统周围的高空强辐散中心。高空垂直分辨率的加密更好地描述了高空辐散场的时空变化,进而描述出了对流系统上部较强的出流以及相邻对流单体的垂直环流,从而更准确地描述了对流单体合并为对流系统的组织化过程。

需要指出的是尽管本文系统地研究了不同垂直 分辨率对引发广州大暴雨对流系统的局地触发、后 向传播发展及单体合并组织化过程的影响。但这毕 竟是针对广州"5•7"特大暴雨单一个例的研究结

#### No. 6 WANG Ning et al. The Impact of Vertical Resolution at Different Levels on the Numerical Simulation of the ... 1263

果,需要更多的暴雨个例进行分析和检验。同时, 垂直分辨率与水平分辨率在数值模拟试验中存在着 一个最优的匹配关系,如何在数值试验中,利用细 致地探空资料同时考虑水平分辨率和垂直分辨率综 合的影响,将是我们今后研究的重要方向。事实 上,不同高度垂直分辨率不仅仅影响到对流系统的 三维结构及动热力过程,而且能影响对流系统的微 物理结构,垂直分辨率对对流系统的动热力和微物 理的综合研究将是今后工作的重要内容。

#### 参考文献(References)

- Aligo E A, Gallus W A Jr, Segal M. 2009. On the impact of WRF model vertical grid resolution on Midwest summer rainfall forecasts [J]. Wea. Forecasting, 24(2): 575–594. doi:10.1175/2008WAF2007101.1
- 邓莲堂,周嘉林. 2012. 不同垂直分辨率对台风数值模拟影响的敏感 性试验 [J]. 气象与减灾研究, 35(1): 17-20. Deng Liantang, Zhou Jialin. 2012. A sensitivity test of different vertical resolution affect on numerical simulation of typhoon [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 35(1): 17-20. doi:10.3969/j.issn. 1007-9033.2012.01.003
- 何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展 [J]. 应用气象学 报, 27(5): 559-569. He Lifu, Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27(5): 559-569. doi: 10.11898/1001-7313.20160505
- Homeyer C R. 2015. Numerical simulations of extratropical tropopause-penetrating convection: Sensitivities to grid resolution [J]. J. Geophys. Res., 120(14): 7174–7188. doi: 10.1002/ 2015JD023356
- 鞠永茂, 钟中, 卢伟. 2006. 模式垂直分辨率对梅雨锋暴雨数值模拟 的影响 [J]. 气象科学, 26(1): 10-16. Ju Yongmao, Zhong Zhong, Lu Wei. 2006. The effects of model vertical resolution on the simulation of torrential storm over Meiyu front [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 26(1): 10-16. doi:10.3969/j.issn. 1009-0827.2006.01.002
- Leutwyler D, Lüthi D, Ban N, et al. 2017. Evaluation of the convectionresolving climate modeling approach on continental scales [J]. J. Geophys. Res., 122(10): 5237–5258. doi:10.1002/2016JD026013
- 廖洞贤,朱艳秋.1992.关于平流方程的水平和垂直分辨率之间的协调 [J]. 计算物理, 9(S2): 785-786. Liao Dongxian, Zhu Yanqiu. 1992. Concerning the consistent vertical and horizontal resolution for the advection equation [J]. Chinese Journal of Computational Physics (in Chinese), 9(S2): 785-786. doi: 10.19596/j. cnki. 1001-246x.1992.s2.043
- 林良勋, 冯业荣, 黄忠, 等. 2006. 广东省天气预报技术手册 [M]. 北 京: 气象出版社, 53-54 Lin Liangxun, Feng Yerong, Huang Zhong, et al. 2006. Technical Guidance on Weather Forecating in

Guangdong Province (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 53-54.

- Persson P O G, Warner T T. 1991. Model generation of spurious gravity waves due to inconsistency of the vertical and horizontal resolution [J]. Mon. Wea. Rev., 119(4): 917–935. doi:10.1175/1520-0493(1991)119<0917:MGOSGW>2.0.CO;2
- Ruti P M, Di Rocco D, Gualdi S. 2006. Impact of increased vertical resolution on simulation of tropical climate [J]. Theor. Appl. Climatol., 85(1-2): 61-80. doi:10.1007/s00704-005-0174-8
- 汤剑平, 赵鸣, 苏炳凯. 2006. 分辨率对区域气候极端事件模拟的影响 [J]. 气象学报, 64(4): 432-442. Tang Jianping, Zhao Ming, Su Bingkai. 2006. Effects of model resolution on the simulation of regionally climatic extreme events [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64(4): 432-442. doi:10.11676/qxxb2006.043
- 田付友, 郑永光, 张小玲, 等. 2018. 2017年5月7日广州极端强降水 对流系统结构、触发和维持机制 [J]. 气象, 44(4): 469-484. Tian Fuyou, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling, et al. 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(4): 469-484. doi:10.7519/j.issn.1000-0526. 2018.04.001
- 王春明, 王元, 伍荣生. 2004. 模式水平分辨率对梅雨锋降水定量预 报 的 影 响 [J]. 水 动 力 学 研 究 与 进 展, 19(1): 71-80. Wang Chunming, Wang Yuan, Wu Rongsheng. 2004. The effect of model horizontal resolution on quantitative precipitation forecast for Meiyu front torrential rainfall [J]. Journal of Hydrodynamics (in Chinese), 19(1): 71-80. doi:10.3969/j.issn.1000-4874.2004.01.012
- 伍志方, 蔡景就, 林良勋, 等. 2018. 2017年广州"5•7"暖区特大暴 雨的中尺度系统和可预报性 [J]. 气象, 44(4): 485-499. Wu Zhifang, Cai Jingjiu, Lin Liangxun, et al. 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 44(4): 485-499. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2018.04.002
- 叶丹,张述文,王飞洋,等. 2017. 基于陆面模式Noah-MP的不同参数 化方案在半干旱区的适用性 [J]. 大气科学, 41(1): 189-201. Ye Dan, Zhang Shuwen, Wang Feiyang, et al. 2017. The applicability of different parameterization schemes in semi-arid region based on Noah-MP land surface model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(1): 189-201. doi:10.3878/j.issn.1006-9895. 1604.15226
- Yin J F, Wang D H, Liang Z M, et al. 2018. Numerical study of the role of microphysical latent heating and surface heat fluxes in a severe precipitation event in the warm sector over southern China [J]. Asia– Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 54(1): 77–90. doi:10.1007/ s13143-017-0061-0
- 曾新民,刘金波,宋帅,等. 2009. 区域气候模式垂直分辨率对我国夏季降水模拟的影响 [J]. 水动力学研究与进展, 24(1): 71-81. Zeng Xinmin, Liu Jinbo, Song Shuai, et al. 2009. Effects of vertical resolution on simulation of summer precipitation in China by a

regional climate model [J]. Journal of Hydrodynamics (in Chinese), 24(1): 71-81. doi:10.16076/j.cnki.cjhd.2009.01.004

### Zhang X M, Meng W G, Zhang Y X, et al. 2011. Analysis of mesoscale convective systems associated with a warm-sector rainstorm event over South China [J]. Journal of Tropical Meteorology, 17(1): 1–10. doi:10.3969/j.issn.1006-8775.2011.01.001

Zhang D L, Zhu L, Zhang X J, et al. 2015. Sensitivity of idealized hurricane intensity and structures under varying background flows and initial vortex intensities to different vertical resolutions in HWRF [J]. Mon. Wea. Rev., 143(3): 914–932. doi:10.1175/MWR-D- 14-00102.1

- 赵宗慈, 罗勇. 1999. 区域气候模式在东亚地区的应用研究——垂直 分辨率与侧边界对夏季季风降水影响研究 [J]. 大气科学, 23(5): 522-532. Zhao Zongci, Luo Yong. 1999. Investigations of application for the regional climate model over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23(5): 522-532. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.02
- Zhong S X, Chen Z T. 2017. The impacts of atmospheric moisture transportation on warm sector torrential rains over South China [J]. Atmosphere, 8(7): 116. doi:10.3390/atmos8070116