

文章编号: 2096-1618(2025)02-0226-06

# 两种模式对粤西台风云系微物理结构 模拟结果的检验评估

罗瑞婷<sup>1</sup>, 刘炫州<sup>2</sup>, 殷美祥<sup>3</sup>, 温精敏<sup>4</sup>

(1. 广东省人工影响天气中心, 广东 广州 510641; 2. 广东省肇庆市气象局, 广东 肇庆 526000; 3. 广东省气象服务中心, 广东 广州 510641; 4. 深圳市国家气候观象台, 广东 深圳 518040)

**摘要:**为提高人工影响天气模式产品释用技巧,基于探空、S波段双偏振雷达、卫星和地面观测等多源数据资料,以粤西一次典型台风云系为例,对CMA-GD和CPEFS模式模拟降水云系的水平、垂直结构和云微物理结构的效果进行对比检验。结果表明:(1)对台风云系发展演变的模拟,CMA-GD模式相较于CPEFS模式模拟回波强度和回波移入时间与实况偏差较小;(2)对云系宏观参量的模拟,CMA-GD模式模拟广东地区云顶高度和垂直累积液态水含量较实况偏低,CPEFS模式则偏高;(3)对云系垂直结构的模拟,两种模式对零度层的预报比实况偏高200~300 m,液态水分布接近实况,过冷水分布高度偏高,CMA-GD模式模拟垂直风向和风速更接近实况;(4)对云系微观结构的模拟,CMA-GD和CPEFS模式对雨水、霰混合比模拟明显偏小,CMA-GD模式对雪混合比模拟较接近实况,而CPEFS模式模拟云层较深厚,雨水主要来自高层冰晶、雪、霰等冰相粒子的融化和部分云水的相互转化。

**关键词:**数值模拟;预报检验;台风云系;微物理结构;模式

中图分类号:P426

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2025.02.014

## 0 引言

人工增雨是开发空中云水资源的重要科技手段之一,通过在适当云层中播撒人工催化剂,使更多的水汽和云水转化为降水<sup>[1]</sup>。如何科学地开展人工增雨作业,关键在于选择合适的作业区域、作业时机,因此需要对云系的宏微观特征(云顶高度、云顶温度、0℃层高度、云中各种水成物粒子含量等)进行预判<sup>[2]</sup>,利用数值模式预报云的宏微观结构特征,分析人工增雨的有利条件。近年来,学者和业务人员在不同模式的应用和检验方面做了研究,孙晶等<sup>[1]</sup>、唐林等<sup>[3]</sup>利用MM5中尺度模式对台风外围云系结构和人工增雨作业条件进行分析;德吉白玛等<sup>[4]</sup>对中国气象局人工影响天气中心研发的云降水显式预报系统(以下简称CPEFS)的云系预报效果进行检验,史月琴等<sup>[5-6]</sup>利用CPEFS模式分别对对流云和低槽冷锋云云系结构和降水预报进行研究,罗瑞婷等<sup>[7]</sup>通过分析粤北冰雹过程的特征对CPEFS模式进行检验评估;而对于具有高分辨率华南区域地形数据集以及雷达资料云分析技术等华南区域特色的华南区域中尺度模式(以下简称CMA-GD),广东省针对该模式从不同角度开展了检验评估,龚月婷等<sup>[8-9]</sup>对CMA-GD模式预报的逐时水平风、降水开展检验分析,李珊珊等<sup>[10-12]</sup>

对CMA-GD与其他模式在龙舟水、暴雨期间降水预报进行了对比检验,以上研究主要检验CMA-GD模式预报的常规气象要素。

尽管这些模式对人工增雨作业起到重要的指导作用,但在广东省关于多种模式云系模拟的对比检验及释用技术研究成果较少,尤其是CMA-GD和CPEFS模式的对比检验,难以满足作业精细化、科学性的业务需求。因此本研究融合探空、S波段双偏振雷达、卫星、地面观测等多源数据,以2023年10月18-20日粤西典型台风云系为例,对比分析CMA-GD和CPEFS模式对于预报台风云系的宏观、微物理结构差异,揭示两种模式对粤西台风云系宏微观产品的预报量级大小、出现时间及范围等可能存在的误差,以提高模式产品在人工影响天气作业指挥的应用水平。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源

本文应用的模式资料包括广州热带海洋气象研究所研发的CMA-GD模式产品和气象局人工影响天气中心研发的CPEFS模式产品,两种模式空间分辨率均为3 km,输出时间间隔均为1 h。模式产品类型包括组合雷达反射率、垂直累积液态水、云顶高度、云顶温度、雨水混合比、霰混合比、冰晶混合比、雪混合比等。格点观测数据采用国家气象信息中心提供的FY-2卫星反演云参数产品,包括云顶高度、云顶温度等云特性参

收稿日期:2024-09-05

基金项目:广东省气象局科技资助项目(GRMC2022LM02、GRMC2023M03)

通信作者:殷美祥. E-mail:646343261@qq.com

量产品,同时采用广东省气象数据中心提供的S波段偏振雷达数据,包括雷达组合反射率等数据。

## 1.2 检验方法

利用CMA-GD和CPEFS模式预报的组合雷达反射率因子、垂直累积液态水、云顶高度、云顶温度4个云宏观物理量,与实况雷达反射率因子、垂直累积液态水和实况卫星云顶高度、云顶温度4个物理量进行对比检验,深入分析两种模式对于云系水平结构预报的差异。利用CMA-GD和CPEFS模式预报的云水含量 $Q_c$ 垂直剖面,雪水及霰水含量 $Q_s+Q_g$ 垂直剖面与实况雷达剖面及探空资料进行定量对比检验,深入对比分析两个模式对于零度层高度、冷暖云性质、垂直风场预报能力差异。利用Liu等<sup>[13]</sup>基于约束伽马(C-G)方法构建的适用于S波段双偏振雷达的 $\Gamma$ 雨滴谱三参数反演方案和Wu等<sup>[14]</sup>基于珠海S波段双偏振雷达变量提出的适合华南地区的偏振雷达水凝物分类技术(HCA),反演出各类水凝物含量与模式模拟结果进行定量对比,检验CMA-GD和CPEFS模式对台风外围典型时刻云微物理结构特征的模拟效果。

## 2 结果与分析

### 2.1 天气过程概况

2023年10月18日05时,南海热带低压位于海南

三亚偏南方向165 km,08时根据卫星红外云图叠加500 hPa高度场和850 hPa风场实况分析(图略),台风受弱季风气流卷入,热带低压中心附近对流旺盛,但结构松散。500 hPa高度层上广东南部和中部受海上北上的辐合带影响,地面转为东高西低的高压脊,台风继续向西北方向移动。19日09时前后台风“三巴”以热带风暴级在海南省东方市登陆,随后继续北行,由于脱离了海南岛地形及摩擦,进入北部湾较大海域,加上台风北侧弱冷空气与倒槽形成锋区,东侧副高同步加强西伸,有利东侧偏南急流加强,有利于台风在北部湾北部加强为强热带风暴级。19日,受台风影响,广东西南部沿海出现大雨。20日冷空气到达广东中部,由于受冷空气卷入影响,台风不对称结构加剧,强度明显减弱,折向偏南方向移动,20日09时45分以热带风暴级登陆湛江遂溪沿海。由于中层干冷空气的持续卷入,暖心收缩,加上垂直风切变大,导致高低空环流分离,高层中心向东北方向移动,低层中心逐渐南落,强度逐渐减弱,20日17时减弱为热带低压,21日台风天气过程结束。

### 2.2 云系发展演变模拟检验

从10月18~20日台风过程雷达回波发展演变实况分析(图1a~c),18日09时台风外围云系从广东

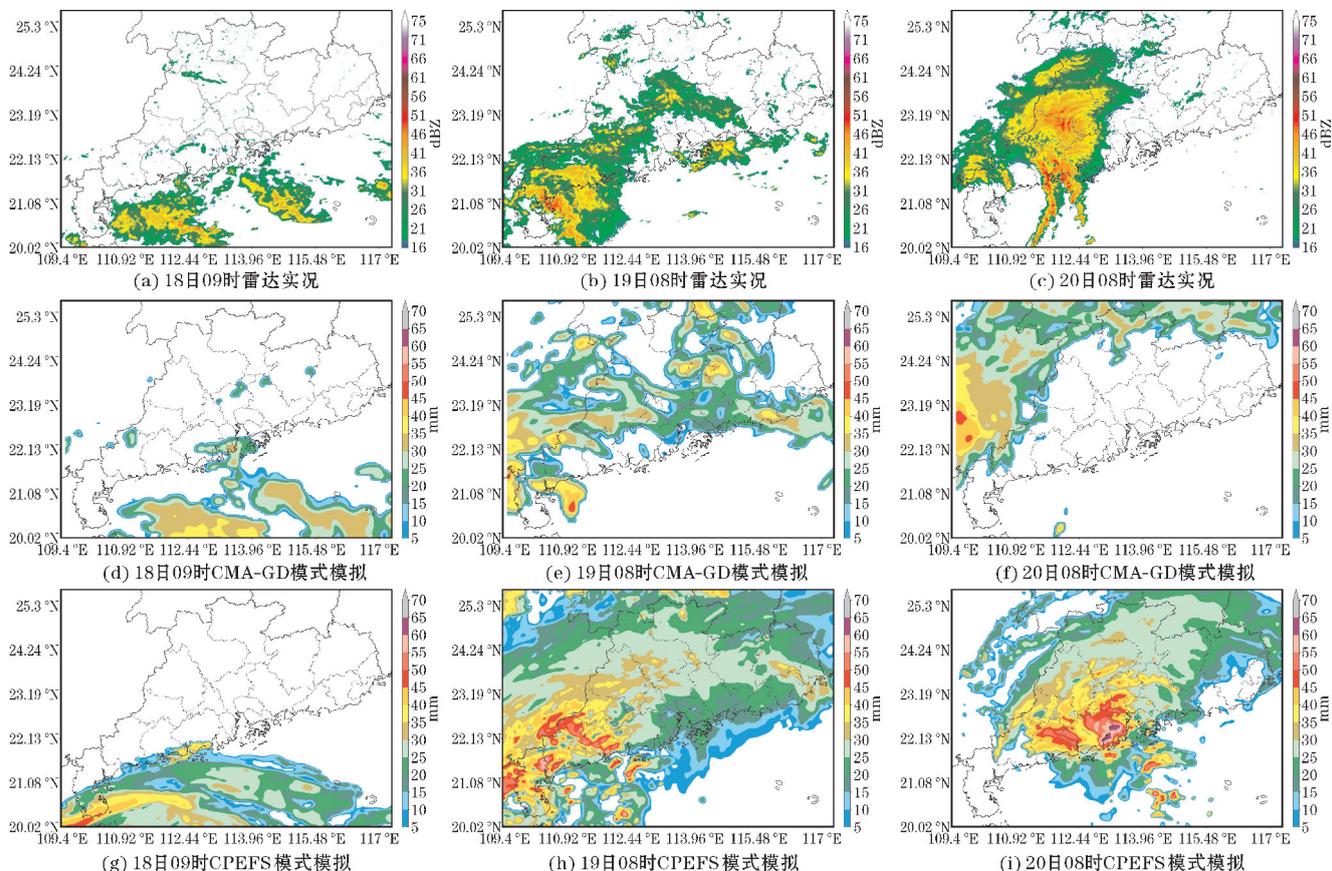


图1 2023年18~20日雷达组合反射率实况和CMA-GD、CPEFS模式模拟结果对比

东南方向移入,向西北方向移动,19日08时台风主体云系越来越靠近广东,降水云系覆盖西南部地区,回波强度达到50 dBZ;20日08时,因冷空气前锋,925 hPa切变线、850 hPa切变线已南下至广东中部偏北地区,台风受中层冷空气卷入影响逐渐南落,20日09时台风中心位于湛江西部沿海,20日广东西南部受台风主体云系与冷空气影响雷达回波仍较强。为对比CMA-GD和CPEFS模式对于云系发展演变的预报效果,选取10月18日08时起报的48 h预报时长的雷达反射率产品进行检验。根据CMA-GD模式预报结果显示:台风外围云系于10月18日08时从东南方向移入广东,相比实况早1 h,云系为冷暖混合云系,位置与实况对应较好;19日08时和20日08时CMA-GD模式预报云系回波强度与实况偏差不大,但预报云系位置偏北偏西。对比CPEFS模式预报结果,CPEFS模式预报台风外围云系比实况早2 h移入广东,19日08时CPEFS模式预报强回波中心与实况对应较好,预报影响范围较大,回波强度略强;20日08时CPEFS模式预报云系位置整体偏东,云系中心回波强度最大达65 dBZ,与实况有一定偏差。

### 2.3 云系水平结构检验

为了解CMA-GD和CPEFS模式对于粤西台风云系水平结构的预报性能,利用2023年10月18-19日卫星的云顶高度、云顶温度、雷达垂直累积液态水产品,进一步分析云系宏观参数特征及降水潜力条件的演变。由表1可知,18日09时广东地区云顶高度普遍达7~16 km,云顶温度约-20℃~-70℃,其中南部沿海和粤东地区存在3个云顶高度大值区,同时也

是云顶温度低值区,说明这些区域云系发展非常旺盛,其中南部沿海两个大值区垂直累积液态水达1~5 kg/m<sup>2</sup>。此时,CMA-GD模式模拟广东地区云顶高度颜色分布不均,说明有不同高度的云同时存在,云顶高度普遍为8~16 km,云顶温度约-50℃~-70℃,2个云系发展旺盛区范围大,位于广东偏西地区和东南沿海,垂直累积液态水含量为0.1 kg/m<sup>2</sup>;而CPEFS模式模拟台风云系主要位于广东西南部、珠三角,云顶高度普遍为14~16 km,云顶温度约-50℃~-70℃,1个云系发展旺盛区位于广东省南部地区及沿海,垂直累积液态水含量为1~7 kg/m<sup>2</sup>。可见,18日09时CMA-GD模式模拟广东地区云顶高度与实况基本相符,对流中心云系预报范围偏大,垂直累积液态水含量偏低;CPEFS模式模拟广东地区云顶高度较实况均匀且偏高,对流中心云系预报范围偏大,垂直累积液态水含量与实况较为一致。19日08时,台风云系进入广东,全省云顶高度普遍达7~16 km,云顶温度约-20℃~-70℃,广东省东南部海和北部湾有2个云顶高度大值区,其中广东西南部和中部地区垂直累积液态水达1~5 kg/m<sup>2</sup>。此时,CMA-GD模式模拟广东地区散布着多个小区域云顶发展旺盛区,云顶高度普遍为4~11 km,云顶温度约-15℃~-40℃,零散分布在韶关、清远、肇庆、茂名、湛江河源和东部沿海地区,垂直累积液态水含量为0.1 kg/m<sup>2</sup>;而CPEFS模式模拟广东全域位于云顶发展旺盛区,云顶高度普遍为14~16 km,云顶温度约-50℃~-70℃,垂直累积液态水含量为0.1~20 kg/m<sup>2</sup>。由此可知,19日08时CMA-GD模式模拟广东地区云顶高度和垂直累积液态水含量较实况偏低,对流中心较实况分散,CPEFS模式模拟则偏大。

表1 典型时刻云宏观参量统计分析表

时次	产品来源	云顶高度/km	云顶温度/℃	垂直累积液态水/(kg/m <sup>2</sup> )
18日09时	实况	7~16	-20~-70	1~5
	CMA-GD模式	8~16	-50~-70	0.1
	CPEFS模式	14~16	-50~-70	1~7
19日08时	实况	7~16	-20~-70	1~5
	CMA-GD模式	4~11	-15~-40	0.1
	CPEFS模式	14~16	-50~-70	0.1~20

### 2.4 云系垂直结构检验

为了解CMA-GD和CPEFS模式对于粤西台风云系的垂直结构预报差异,利用10月19日典型时刻的雷达组合反射率剖面及阳江站探空资料,与两个模式

预报的垂直温度层、风向风速等参量进行定量对比,进一步分析两种模式对云系垂直结构的模拟能力。10月19日08时雷达实况(图1b、图2c)显示粤西地区出现了较强回波,最大回波强度>50 dBZ,云顶高度最高16 km,由于此时阳江的探空资料显示(图略)零度层

高度5 km,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在400 hPa,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在300 hPa, 1000 ~ 500 hPa高度以东南转南风为主, 500 hPa以上为西南风, 风速在2 ~ 20 m/s, 所以液态水主要分布在1 ~ 5 km, 5 ~ 6 km以过冷水为主, 从云系的宏观特征检验得出, 此时最大垂直累积液态水含量 $>5\text{ kg/m}^2$ 。为对比检验CMA-GD模式和CPEFS模式对于云系垂直结构预报的差异, 对粤西相似位置中心云系作垂直剖面, CMA-GD模式预报的10月19日08时粤西地区最大雷达回波强度同样达到50 dBZ(图1e), 云顶高度12.5 km, 零度层高度5.3 km,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在450 hPa,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在350 hPa, 液态水含量大值区在1 ~ 5.3 km, 过冷水主要位于5.3 ~ 6.8 km(图2a)。CMA-GD模式预报1000 ~ 550 hPa高度以东南转南风为主, 500 hPa以上为西南风, 风速6 ~ 22 m/s。此时CPEFS模式预报粤西地区的回波强度更强(图1h), 最大雷达回波强度

$>55\text{ dBZ}$ , 云顶高度12.5 km, 零度层高度5.2 km,  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在400 hPa,  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 在350 hPa, 液态水含量大值区在1 ~ 5.2 km, 过冷水主要位于5.2 ~ 8.5 km(图2b)。CPEFS模式预报1000 ~ 200 hPa高度以东南风为主, 风速较大。综上所述, 从特征温度层的预报效果看, CMA-GD和CPEFS模式预报零度层高度均比实况高200 ~ 300 m, 预报 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度偏高, CPEFS模式预报 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高度与实况更接近; 从暖云、冷云发展情况的预报效果看, CMA-GD和CPEFS模式对于预报液态水分布与实况接近, CMA-GD模式对于预报过冷水分布高度较实况偏高800 m, CPEFS模式预报过冷水更加丰富, 垂直分布高度偏高2.5 km; 从垂直风场的预报效果看, CMA-GD模式预报垂直风向和风速更接近实况。

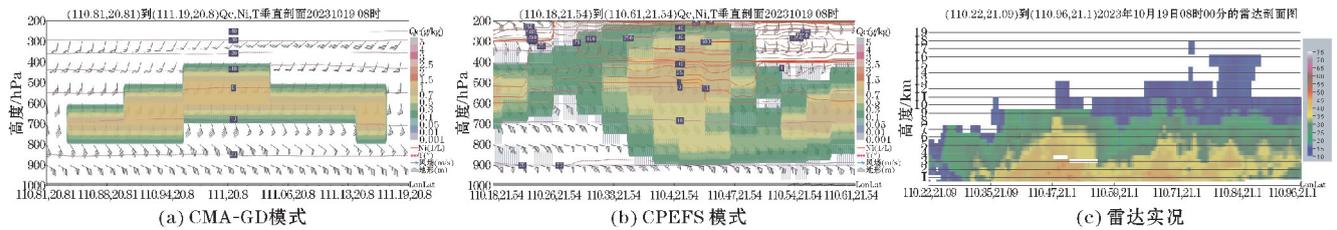


图2 CMA-GD、CPEFS模式模拟2023年10月19日台风云系垂直结构与雷达垂直剖面对比

## 2.5 云系微物理特征检验

本文利用Liu等<sup>[13]</sup>研究构建的S波段双偏振雷达反演雨滴谱参数方案和Wu等<sup>[14]</sup>基于珠海S波段双偏振雷达变量提出的适合华南地区的偏振雷达水凝物分类技术, 计算出2023年10月19日08时双偏振雷达反演粤西地区降水云系各种水凝物垂直分布情况(图3a), 粤西地区零度层位于5000 m, 暖层区1000 ~ 5000 m雨水含量丰富, 峰值位于2000 ~ 5000 m, 最大值 $0.76\text{ g/m}^3$ , 雨水含量的峰值明显高于雪的峰值。雪的峰值所在高度与霰的峰值区高度对应很好, 大值区位于5000 ~ 5500 m, 霰水含量最大值 $0.15\text{ g/m}^3$ 。雪水含量最大值 $0.04\text{ g/m}^3$ , 从5000 ~ 11500 m, 说明云内冷云比较深厚。

图3(b)为CMA-GD模式模拟10月19日08时粤西上空各种水成物粒子比含水量情况, 由图3(b)可知, 雨水主要分布在1000 ~ 500 hPa(0 ~ 6000 m)高度, 呈单峰型分布, 峰值位于850 ~ 500 hPa(2500 ~ 6000 m), 最大值 $0.01\text{ g/m}^3$ 。600 hPa(4600 m)以上主要以雪水为主, 高度延伸到350 hPa(8600 m), 最大值

$0.07\text{ g/m}^3$ , 雪的峰值区高度明显高于其他粒子的峰值区。霰主要分布在700 ~ 400 hPa(3200 ~ 8000 m)高度, 最大值 $0.008\text{ g/m}^3$ 。图3(c)为CPEFS模式模拟10月19日08时粤西上空各种水成物粒子比含水量情况, 从图3(c)看到, 雨水主要分布在1000 ~ 650 hPa(0 ~ 5500 m)高度, 呈单峰型分布, 最大值 $0.075\text{ g/m}^3$ 。600 hPa(4600 m)以上主要以雪水为主, 高度延伸到150 hPa(14300 m), 最大值 $0.28\text{ g/m}^3$ , 霰主要分布在650 ~ 150 hPa(5500 ~ 14300 m)高度, 最大值 $0.07\text{ g/m}^3$ , 400 ~ 150 hPa(8000 ~ 14300 m)存在一定量的冰晶, 最大值 $0.05\text{ g/m}^3$ , 冰晶的峰值区高度明显高于其他粒子的峰值区。综上所述, S波段双偏振雷达反演数据显示, 高层有少量的雪降落, 中层有大量的霰、少量的雪淞附过冷水增长, 零度层附近的雪霰的含量比较丰富, 进入暖区后, 转化为丰富的液态降水。此时CMA-GD和CPEFS模式对于雨水和霰水混合比模拟明显偏小, CMA-GD模式对于雪水混合比模拟较接近实况, CPEFS模式模拟则偏大。CPEFS模式模拟云层较深厚, 雨水主要来自高层冰晶、雪、霰等冰相粒子的融化和部分云水的相互转化。

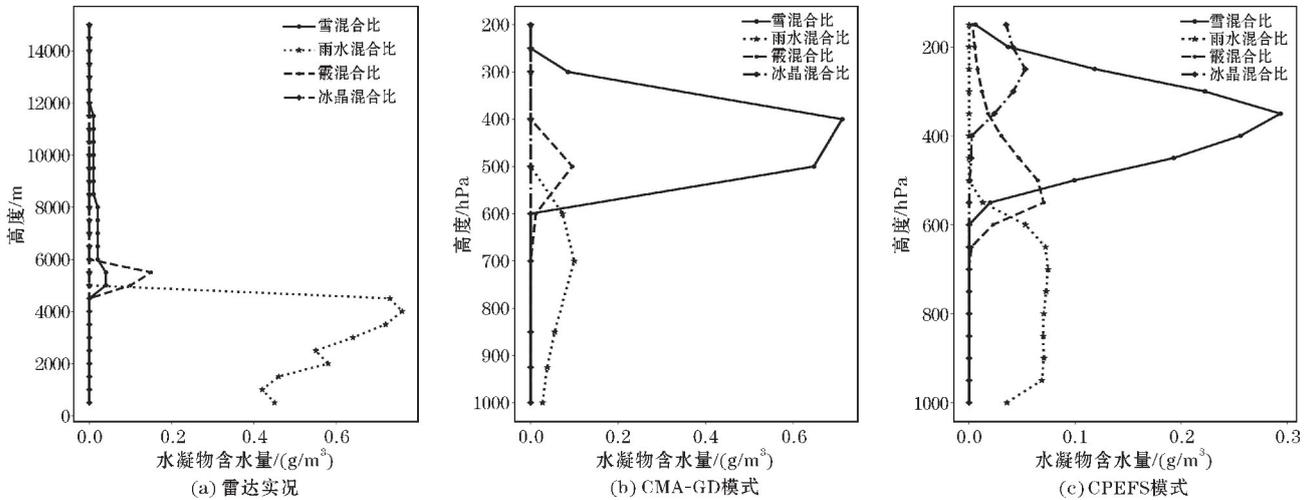


图3 2023年10月19日08时粤西地区降水云系雷达反演各种水凝物与CMA-GD、CPEFS模式模拟结果对比

### 3 结论与讨论

利用探空、S波段双偏振雷达、卫星、地面观测和CPEFS模式等多源数据,以粤西台风云系为例,对CMA-GD和CPEFS模式预报的云系水平、垂直结构及云微物理多个参量进行对比检验,得出的结论如下:

(1) 对于云系发展演变的模拟,CMA-GD和CPEFS模式预报台风外围云系比实况分别早1 h、2 h移入广东省,CMA-GD模式模拟回波强度与实况偏差不大,云系位置偏北偏西。CPEFS模式模拟回波范围较大,回波强度略强,位置整体偏东。

(2) 对于云系水平结构的模拟,CMA-GD模式模拟广东地区云顶高度较实况偏低,对流中心较实况分散,垂直累积液态水含量偏低;而CPEFS模式模拟的云顶高度、垂直累积液态水含量较实况偏高。

(3) 从特征温度层的预报效果看,CMA-GD和CPEFS模式预报零度层高度比实况高200~300 m、预报-20℃高度偏高,CPEFS模式预报-10℃高度与实况更接近;从暖云、冷云发展情况的预报效果看,CMA-GD和CPEFS模式对于预报液态水分布与实况接近,但对于预报过冷水分布高度较实况偏高,CPEFS模式预报过冷水更加丰富;从垂直风场的预报效果看,CMA-GD模式预报垂直风向和风速更接近实况。

(4) 对于云系微物理结构的模拟,CMA-GD和CPEFS模式对于雨水和霰水含量模拟明显偏小,CMA-GD模式对于雪水含量模拟较接近实况,CPEFS模式则偏大,雨水主要来自高层冰晶、雪、霰等冰相粒子的融化和部分云水的相互转化。

本文基于观测实况和CPEFS模式产品的对比检

验,发现CMA-GD模式对广东云系宏微观结构具有较好的预报能力。同时也存在如下问题:预报的云顶高度和垂直累积液态水含量偏低,预报零度层高度比实况略偏高等。针对该问题,CMA-GD模式可以对比分析CPEFS模式在初始场、动力框架、微物理方案等方面的差异,从而改进以上产品预报性能,还可以结合相控阵雷达、飞机观测及地基云降水遥感等精密资料对于多个典型个例进行检验,以提高模式产品在人工影响天气指挥的应用水平。

### 参考文献:

- [1] 孙晶,史月琴,蔡森,等.南方三类云系云结构预报和增雨作业条件分析[J].气象,2015,41(11):1356-1366.
- [2] 孙晶,史月琴,蔡兆鑫,等.一次低涡气旋云系宏微观结构和降水预报的检验[J].干旱气象,2017,35(2):275-290.
- [3] 唐林,李琼,黎祖贤,等.一次积层混合云云系微物理结构数值模拟与增雨条件分析[J].干旱气象,2020,38(1):100-108.
- [4] 德吉白玛,益西卓玛,阿旺白姆. CPEFS模式产品在西藏一次人影服务保障过程中的检验[J].西藏科技,2021(9):59-61.
- [5] 史月琴,刘卫国,王飞,等.一次对流云人工消减雨作业云条件预报和作业预案合理性分析[J].气象,2021,47(2):192-204.
- [6] 史月琴,赵俊杰,孙晶,等.华北地区一次低槽冷锋云系结构和增雨条件研究[J].干旱气象,2022,40(6):1003-1013.

- [7] 罗瑞婷,阮楚雯,殷美祥,等. 粤北一次冰雹过程的特征与模式检验结果[J]. 广东气象,2022,44(4):43-46.
- [8] 龚月婷,张华龙,时洋,等. 2020年CMA-GD模式萝岗站水平风场检验评估[J]. 广东气象,2023,45(4):41-44.
- [9] 刘段灵,陈超,李珊珊,等. 2020年CMA-GD(R3)模式逐时降水检验评估分析[J]. 广东气象,2022,44(2):38-41.
- [10] 李珊珊,涂静,陈玉梅,等. 2023年广东龙舟水特征及模式降水预报检验[J]. 广东气象,2023,45(5):44-47.
- [11] 唐思瑜,沙天阳,涂静,等. 全球和区域模式在2022年广东龙舟水期间的评估[J]. 广东气象,2022,44(4):35-37.
- [12] 涂静,叶萌,张华龙,等. 基于天气学分型的2022年广东省暴雨预报检验[J]. 广东气象,2023,45(1):40-43.
- [13] LIU X, WAN Q, WANG H, et al. Raindrop Size Distribution Parameters Retrieved from Guangzhou S-band Polarimetric Radar Observations [J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(4): 571-583.
- [14] WU C, LIU L P, WEI M, et al. Statistics-based optimization of the polarimetric radar hydrometeor classification algorithm and its application for a squallline in South China [J]. Adv Atmos Sci, 2018, 35(3): 296-316.

## Assessment of the Simulation Results of the Microphysical Structure of Typhoon Cloud Systems in Western Guangdong by Two Models

LUO Ruiting<sup>1</sup>, LIU Xuanzhou<sup>2</sup>, YIN Meixiang<sup>3</sup>, WEN Jingmin<sup>4</sup>

(1. Guangdong Weather Modification Centre, Guangzhou 510641, China; 2. Zhaoqing Meteorological Bureau, Zhaoqing 526000, China; 3. Guangdong Meteorological Service Centre, Guangzhou 510641, China; 4. Shenzhen National Climate Observatory, Shenzhen 518040, China)

**Abstract:** To enhance the application techniques of cloud model products for weather modification, this study utilizes a variety of data sources including radiosonde, S-band dual-polarization weather radar, satellite and ground-based observations. Focusing on a typhoon cloud system in western Guangdong, it conducts a comparative analysis of the simulation capabilities of the CMA-GD and CPEFS cloud models in terms of the horizontal and vertical physical structures, as well as the microphysical properties of the precipitation clouds. The results indicate that: (1) In simulating the development and evolution of the typhoon's cloud system, the CMA-GD model demonstrates smaller deviations in radar echo intensity and arrival time compared to the CPEFS model; (2) For simulating macro parameters of cloud systems, the CMA-GD model shows that the cloud top height in Guangdong is lower, the vertically accumulated liquid water content is lower, whereas the CPEFS model overestimates these values; (3) In simulating the vertical structure of cloud systems, both models' predictions for the zero temperature layer was 200-300 m higher than observed, the distribution of liquid water is close to the actual values, and the distribution of supercooled water is higher than the actual values. The CMA-GD model's predictions for vertical wind direction and speed were more accurate; (4) For simulating the microstructure of cloud systems, both the CMA-GD and CPEFS cloud models significantly underestimated the mixing ratio between rainwater and graupel. The CMA-GD cloud model was closer to the observed snow mixing ratios, whereas the CPEFS cloud model overestimated them. The CMA-GD model simulated deeper snow layers with less graupel, resulting in less transformation into rainwater. Conversely, the CPEFS model simulated deeper cloud layers, with rainwater primarily derived from the melting of high-level ice crystals, snow, and graupel, and from the transformation of some cloud water.

**Keywords:** numerical simulation; forecast verification; typhoon cloud system; microphysical structure; model