

毛志远,黄彦彬,付丹红,等,2025. WRF 模式不同云微物理方案对海南岛一次飑线过程的数值模拟研究[J]. 气象,51(3):298-312. Mao Z Y, Huang Y B, Fu D H, et al, 2025. Numerical simulation of a squall line process in Hainan Island by different cloud microphysical schemes of WRF model[J]. Meteor Mon, 51(3):298-312(in Chinese).

WRF 模式不同云微物理方案对海南岛 一次飑线过程的数值模拟研究*

毛志远^{1,2} 黄彦彬^{1,2} 付丹红³ 曾 敏^{2,4} 邢峰华^{1,2} 敖 杰^{1,2} 王 雨⁵

¹ 海南省气象灾害防御技术中心,海口 570203

² 海南省南海气象防灾减灾重点实验室,海口 570203

³ 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

⁴ 海南省澄迈县气象局,澄迈 571900

⁵ 江苏省如皋市气象局,如皋 226500

提 要: 利用 WRF 模式中 8 种云微物理方案,模拟 2020 年 4 月 22 日发生在海南岛的一次飑线降水过程,对比分析不同云微物理方案对模拟结果的影响。结果表明:不同云微物理方案对地面降水、雷达组合反射率,以及热力、动力场的模拟存在显著差异,其中 Thompson 方案模拟的降水落区与中心强度最接近实况,WSM6 方案在最大降水时刻模拟的雷达组合反射率在强度、范围和形态上与实况相似;在热力、动力场中,各方案均模拟出了地面冷池、低层垂直风切变与冷池出流等飑线特征,降水中心对应强上升气流区,低层辐合与高层辐散的散度场结构有利于强对流出现和降水形成,但在强度和分布上不尽相同。从云微物理特征上看,液相粒子主要分布在 5 km 以下,冰相粒子在 6 km 以上,云水的模拟结果对云微物理方案的选择响应最弱,雪和霰的分布则表现出较高的敏感性,这是由于不同云微物理方案对雪、霰生成、转化与消耗的过程处理存在差异,且同一云微物理过程在各方案中的转化率也不尽相同。

关键词: 云微物理方案,飑线,数值模拟,海南岛

中图分类号: P435

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.121901

Numerical Simulation of a Squall Line Process in Hainan Island by Different Cloud Microphysical Schemes of WRF Model

MAO Zhiyuan^{1,2} HUANG Yanbin^{1,2} FU Danhong³ ZENG Min^{2,4}

XING Fenghua^{1,2} AO Jie^{1,2} WANG Yu⁵

¹ Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Hainan Province, Haikou 570203

² Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203

³ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁴ Chengmai Meteorological Station of Hainan Province, Chengmai 571900

⁵ Rugao Meteorological Station of Jiangsu Province, Rugao 226500

Abstract: Eight different cloud microphysical schemes in the WRF model are used to simulate the precipitation process caused by a squall line in Hainan Island on 22 April 2020, and the effects of different cloud microphysical schemes on the simulation of the Hainan Island squall line are comparatively analyzed. The results show that different cloud microphysical schemes have significant differences in simulating the

* 国家自然科学基金项目(42365011)、国家重点研发计划(2023YFC3007600)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2023J039)和海南省自然科学基金项目(122QN424、420RC754、421QN372)共同资助

2024 年 2 月 19 日收稿; 2025 年 1 月 13 日收修定稿

第一作者:毛志远,主要从事人工影响天气机理研究. E-mail:751969126@qq.com

surface precipitation, radar composite reflectivity, thermodynamic and dynamic fields. Among them, the precipitation area and center intensity simulated by Thompson scheme are most close to the actual observations, and the radar composite reflectivity in intensity, range and pattern simulated by WSM6 scheme at the time of heaviest precipitation is similar to the actual observations. In the thermodynamic and dynamic fields, the characteristics of squall line such as surface cold pool, low-level vertical wind shear and cold pool outflow can be simulated by all schemes, and the precipitation center corresponds to the strong up-draft zone. The divergence structure of low-level convergence and high-level divergence is conducive to the occurrence of severe convection and the formation of precipitation, but there exist differences in the intensity and distribution of precipitation. According to the cloud microphysical characteristics, the liquid-phase particles are mainly distributed below 5 km, and the ice-phase particles are above 6 km. The simulation results of cloud water show the weakest response to the selection of cloud microphysical schemes, while the distributions of snow and graupel show the high sensitivity. This is because different cloud microphysical schemes have different processing ways for the generation, transformation and consumption of snow and graupel, and the conversion rate of the same microphysical process is also different in different schemes.

Key words: cloud microphysical scheme, squall line, numerical simulation, Hainan Island

引言

飑线是我国春夏常见的一种强对流天气系统,通常由多个活跃的雷暴单体呈线状排列组成,影响范围广,持续时间长达十几个小时,常伴有灾害性天气出现(寿绍文等,2009;郭淳薇,2013),极易造成重大经济损失和人员伤亡。相较于雷达、卫星等传统观测手段(公衍铎等,2019;陈涛等,2020;雷蕾等,2021;赖安伟等,2021;蒋超等,2024;邓承之等,2024),数值模拟具有更高的时空分辨率,能更好描述飑线完整生命发展史和宏微观变化(张哲等,2018;杨吉等,2020;Li et al,2021;王智和邹兰军,2022),近年来逐渐成为气象业务和研究的常用手段,在飑线的预报预警及防灾减灾中发挥重要作用。

云微物理过程是数值模式中最重要非绝热加热过程之一,描述了各类水凝物的生成、转化、碰并和沉降等特征,并通过潜热释放和动力反馈进一步影响大气环境场的温湿分布,由于不同云微物理方案对云微物理过程的处理存在差别,飑线降水的模拟结果对云微物理方案的选择表现出较高的敏感性(Morrison et al,2009;黄丹莲等,2017;张弛等,2019;Dawn and Satyanarayana,2020)。殷蕾和平凡(2016)分别利用 Morrison 和 HUJI SBM 方案对华东一次飑线过程进行模拟, Morrison 方案能模拟出飑线完整生命发展史,而 HUJI SBM 方案的对

流组织化程度较低,飑线结构不明显;强降水落区以 Morrison 方案更为准确,在高层 Morrison 方案生成大量云冰, HUJI SBM 方案则以雪和霰为主。许广等(2017)针对江苏北部一次飑线过程,对比 6 种云微物理方案的模拟结果,发现 Lin 方案模拟的带状降水和弱弓状回波特征与实际观测更吻合,同时较好地再现了尾流低压、地面大风和飑锋等地面特征,TS 评分也最优。Bao et al(2019)基于 3 种不同云微物理方案模拟理想飑线的发展演变过程,分析表明大尺度的雪和霰粒子在下落融化过程中促进雨水的生成,并通过蒸发冷却加强地面冷池作用进而加速飑线生成与发展,不同方案中对雪、霰和雨水的模拟差异导致飑线的发展传播速度不尽相同。任星露等(2020)选用 5 种云微物理方案对江苏北部一次弱天气尺度强迫下的飑线过程进行模拟,结果表明不同方案模拟的雷达回波强度和范围差异明显,这与各方案模拟的水凝物空间分布有关;同时,水凝物相互转换产生的相变潜热会影响热动力过程,导致上升气流强度与地面冷池范围显著不同, NSSL 方案的模拟结果与实际观测最相近。Cao et al(2022)比较 4 种云微物理方案对中国东部弓状飑线的模拟结果,发现不同云微物理方案都模拟出了弓状飑线,但冷池与尾向入流的强度和范围存在显著差别, WDM6 方案的模拟结果最贴合实际,雨水混合比和数浓度最大,冷池与尾向入流也最强。

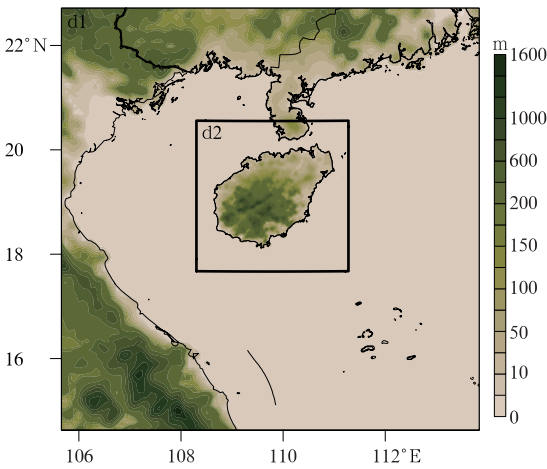
海南岛地处热带,其四面环海的地理位置与岛

内中间高四周低的地形环境,导致强对流特征与我国其他地区存在显著差别(王莹等,2018;王凌梓等,2020;吴冰雪等,2023)。目前,针对海南岛内强对流天气的研究越来越多,但对飚线的分析相对不足,而研究手段多以地面自动气象站和雷达等观测资料的综合应用为主(李宏江等,2021;邢峰华等,2023)。本文针对 2020 年 4 月 22 日发生在海南岛的一次飚线降水过程,利用 WRF 中尺度模式中 8 种云微物理方案进行模拟和对比分析,检验不同云微物理方案对海南岛飚线过程的模拟能力,以期为我国热带海岛地区飚线过程的预报预警和数值模拟应用研究提供一定参考。

1 资料及模拟方案设计

观测数据来自海南岛 542 个地面自动气象站,为方便对比,将站点数据插值到格点上。采用 WRF V4.2 模式双向二重嵌套(图 1),以分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ 的欧洲中期天气预报中心再分析数据(ERA5)作为模式初始场,模拟中心位置为 $(18.7^{\circ}\text{N}, 109.7^{\circ}\text{E})$,水平网格分辨率依次为 9 km、3 km,格点数分别为 100×102 、 109×109 ,垂直方向共 50 层,模式层顶气压 50 hPa。模拟初始时刻为 2020 年 4 月 22 日 02 时(北京时,下同),共积分 27 h,时间积分步长 45 s,每 10 min 输出一次模拟结果,文中所有分析均针对第二层模拟结果。

文中附图涉及地图基于国家测绘地理信息局标



注:d1 为第一层模拟,d2 为第二层模拟。

图 1 模拟区域设置和地形高度(填色)
Fig. 1 Simulation area setting and terrain height (colored)

准地图服务网站下载的审图号为 GS(2020)4619 号的标准地图制作,底图无修改。

为检验不同云微物理方案对此次飚线降水模拟的影响,选取 Lin、Thompson、Morrison、WSM6、WDM6、WSM7、WDM7、P3 方案开展 8 组敏感性对比试验,表 1 为各微物理方案的简要介绍。除云微物理方案外,8 组试验采用相同的初始场和模式设置。第一层网格采用 Kain-Fritsch 积云对流方案,第二层不考虑积云对流方案。其他物理方案主要有 RRTMG 长波辐射和短波辐射方案,YSU 边界层方案及 NOAH 陆面过程方案。

表 1 8 种微物理方案特征
Table 1 Characteristics of the eight microphysical schemes

微物理方案	特征
Lin	源于 Purdue 云模式,该方案为对水汽、云水、雨、云冰、雪和霰过程的预报,适用于高分辨率模拟研究(Lin et al, 1983)
Thompson	预报云水、雨、云冰、雪和霰的质量浓度,增加对雨滴和冰晶粒子数浓度的预报,其对雪粒子的预报是将雪粒子假设为非球面,让雪粒子密度随粒子尺度变化(Thompson et al,2008)
Morrison	同时预报雨、云冰、雪和霰(雹)的质量浓度和数浓度的双参数方案,将所有粒子形状假设为球形,粒子谱分布服从 Gamma 函数,运行前针对不同变量的计算提供各种选择,用户可以根据自身需求选择预报雹或霰粒子(Morrison et al,2005)
WSM6	仅预报云水、云冰、雨、雪和霰质量浓度的单参数化方案,冰相过程整体框架与 Lin 方案相似,改进了冰核与冰晶数浓度的参数化,将冰与水的饱和过程进行分别处理,并在粒子下落时充分考虑了凝结与融化过程(Hong et al, 2004; Hong and Lim,2006)
WDM6	在 WSM6 方案基础上增加预报云凝结核、云水和雨水数浓度,是可用于研究气溶胶对云微物理演变和降水影响的双参数化方案(Lim and Hong,2010)
WSM7	在 WSM6 方案基础上引入霰过程的预报发展而来,为单参数化方案(Bae et al,2019)
WDM7	在 WDM6 方案基础上引入霰过程的预报发展而来,为双参数化方案(Bae et al,2019)
P3	不同于传统的 Bulk 方案,该方案没有分别预报冰晶、雪或霰等冰相粒子,而是统一归为一类冰晶,通过预报依附成冰的质量和体积混合比来表征水汽凝华、聚集和依附(干湿生长)等重要冰相增长机制,从而预报任意冰相粒子的演化过程(Morrison and Milbrandt,2015)

2 天气形势与飊线发展过程

2.1 天气形势

利用 ERA5 资料分析此次飊线降水过程发生前的天气形势。2020 年 4 月 22 日 08 时,500 hPa 西太平洋副热带高压呈带状分布并控制海南岛,588 dagpm 线位于 18°N 附近(图 2a);东亚地区呈现明显的“北高南低”分布特征,低层有弱冷空气由北向南扩散影响我国华南,与暖湿气流在广东、广西一带

交绥(图 2b),海南岛东北部沿海出现 $12\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ 以上的水汽通量大值区(图 2c)。冷暖空气在华南交绥,为此次强对流过程提供了有利的背景条件。

4 月 22 日 08 时海口探空显示(图 2d),对流有效位能(CAPE)为 $1540.1\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$,达到中等强度;对流抑制能量很小,仅为 $5.1\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$;700~400 hPa 最大温度露点差达到 11°C ,中层较干;850 hPa 与 500 hPa 温差高达 28.1°C ,中下层垂直温度递减率大,大气层结不稳定;夹卷层(700~400 hPa)平均风速为 $8.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,有利于动量下传;0~6 km 垂直风

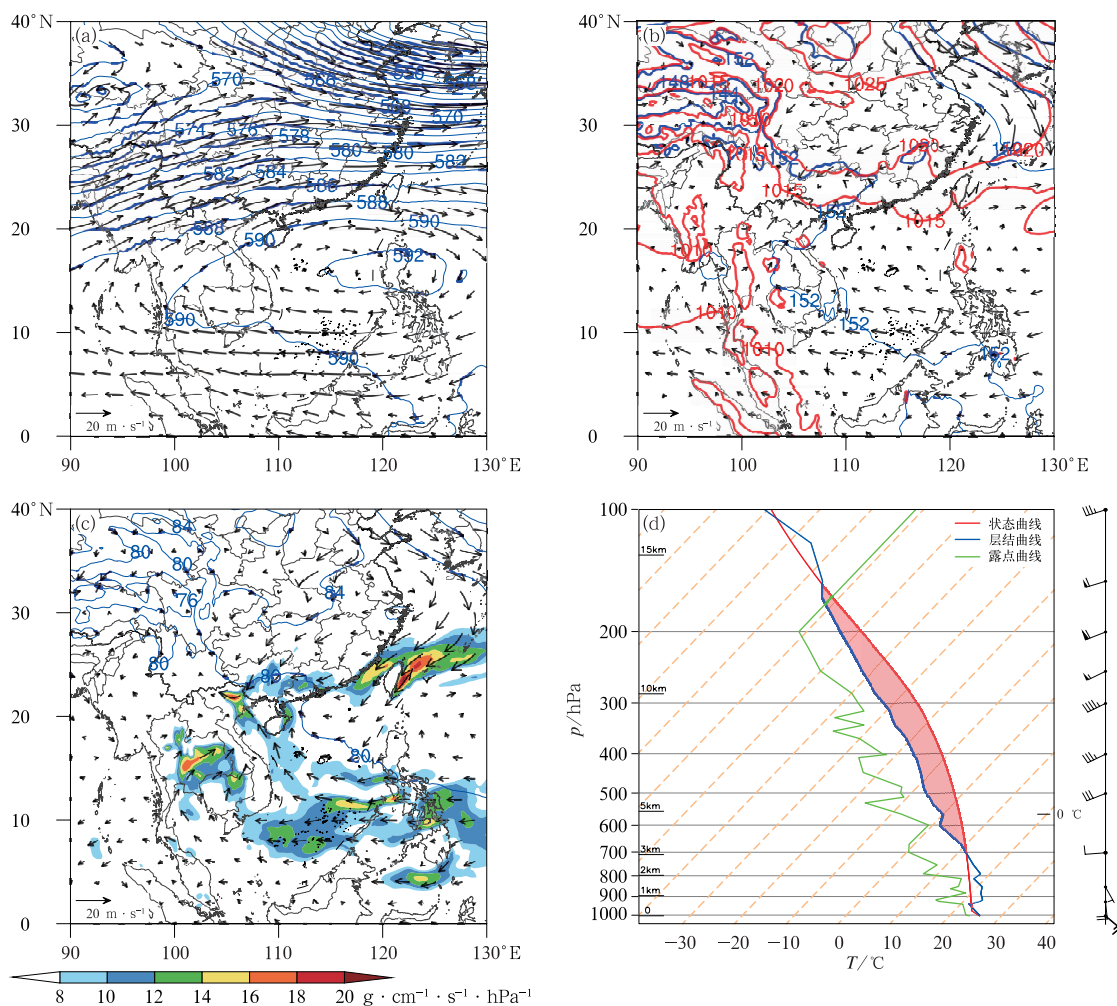


图2 2020年4月22日08时(a)500 hPa位势高度场(蓝线,单位:dagpm)和风场(风矢),(b)850 hPa位势高度场(蓝线,单位:dagpm)和风场(风矢)及海平面气压(红线,单位:hPa),(c)925 hPa位势高度场(蓝线,单位:dagpm)、风场(风矢)和水汽通量(填色),(d)海口站探空曲线

Fig. 2 (a) 500 hPa geopotential height field (blue line, unit: dagpm) and wind field (vector), (b) 850 hPa geopotential height field (blue line, unit: dagpm) and wind field (vector), sea level pressure (red line, unit: hPa), (c) 925 hPa geopotential height field (blue line, unit: dagpm), wind field (vector) and water vapor flux (colored) and (d) sounding curves of Haikou Station at 08:00 BT 22 April 2020

切变为 $15.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 达到中等强度, 有利于对流的组织化; 在 925 hPa 和 800 hPa 分别存在较薄的逆温层, 有利于不稳定能量的积累。综上, 较大的 CAPE 值、对流层中层存在干层、垂直温度递减率较大、夹卷层风速较大的环境条件非常有利于雷暴大风等强对流天气的发生。

2.2 飊线发展过程

4 月 22 日, 伴随弱冷空气向南扩散, 广西南部沿海一带午后已有成熟飊线系统生成并东移, 在进入雷州半岛后飊线南部有阵风锋出现, 此时海南岛西北部受午后热对流影响出现多个中小尺度对流单体(图略)。图 3 是海口站 S 波段双偏振多普勒雷达的组合反射率分布及演变。由图可见, 16 时雷州半岛飊线系统南部的阵风锋与海南岛北部的对流单体相遇, 海南岛上的对流单体迅速发展并组织化, 逐渐形成东北—西南走向的多单体线状对流风暴。随着海南岛对流单体强度增强和东移, 17 时与雷州半岛上的飊线系统合并形成横跨雷州半岛、琼州海峡和海南岛的弓形飊线系统, 该飊线系统结构紧实, 形状狭长, 回波中心强度最强达到 55 dBz。至 18 时, 飊线系统 50 dBz 以上强回波面积增加, 并在海南岛中部的五指山山区发生断裂, 飊线南部在五指山山区

内停滞, 发展速度减缓并逐渐消散, 而飊线北部主体继续向东移动, 19 时移至海南岛东部沿海, 虽然保持飊线的线状结构, 但其内部的对流单体强度相比之前显著减弱, 结构松散, 整个飊线系统发展趋于结束。

3 模拟结果分析

3.1 云微物理方案对降水和雷达反射率因子的模拟

此次飊线过程发展迅速, 图 4 给出了海南岛 4 月 22 日 08—24 时地面自动气象站实况观测和 8 种云微物理方案模拟的 16 h 累计降水量空间分布。可以发现, 实况雨带呈东北—西南分布, 有 5 个明显的降水中心, 最大降水中心位于白沙县南开乡, 站点观测降水量达 118.5 mm, 4 个较弱降水中心降水量约在 20~50 mm。

对比实况与模拟结果可以发现, 不同云微物理方案均能模拟出东北—西南走向的雨带分布, 但在落区和量级上存在较大差别。单参数化方案中, Lin 方案的整体降水强度和降水范围都显著大于实况, 降水落区更集中在中部山区, 100 mm 以上的强降水中心与实况有偏差; WSM6 和 WSM7 方案模拟雨带分布松散, 强降水中心偏西。双参数化方案中,

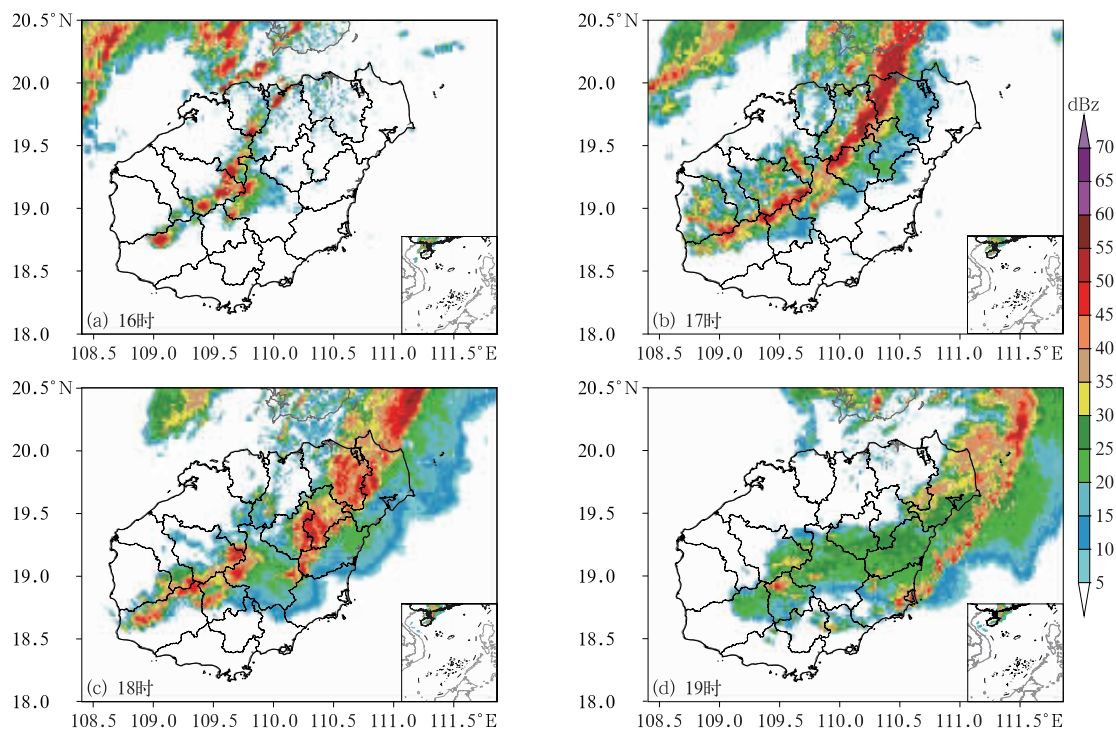
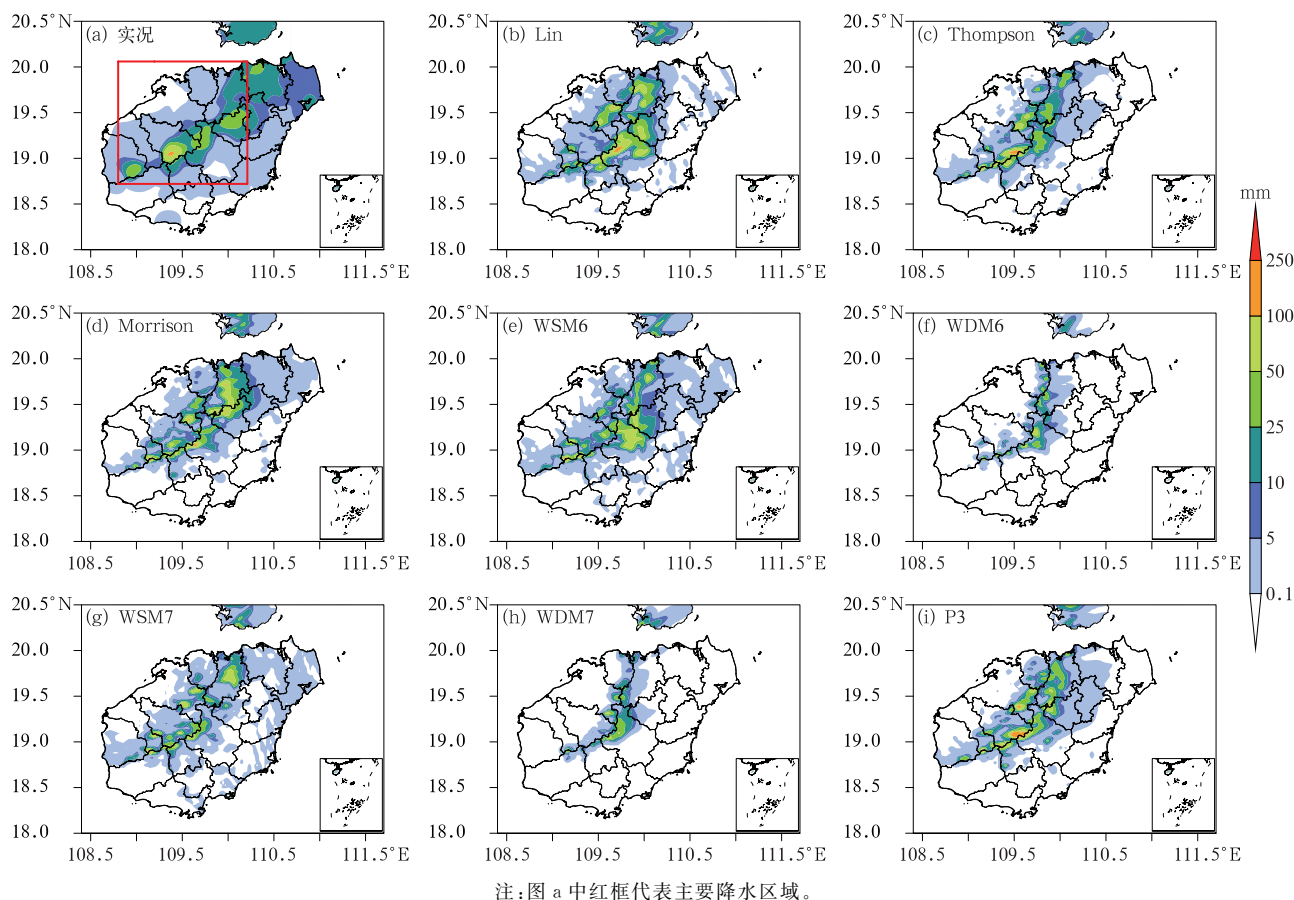


图 3 2020 年 4 月 22 日海口站雷达组合反射率分布和演变

Fig. 3 Distribution and evolution of radar composite reflectivity of Haikou Station on 22 April 2020



注:图 a 中红框代表主要降水区域。

图 4 2020 年 4 月 22 日 08—24 时 16 h 累计降水量(a)实况和(b~i)不同云微物理方案模拟结果

Fig. 4 (a) Observation and (b-i) simulation results by different cloud microphysical schemes of 16 h accumulated precipitation from 08:00 BT to 24:00 BT 22 April 2020

WDM6 和 WDM7 方案模拟效果最差,降水量偏小,雨带偏窄,没有模拟出强降水;Morrison 方案虽然模拟出了多个 100 mm 以上的强降水中心,但是落区与实况不符,中部雨带偏窄,北部雨带的降水量较实况偏大;Thompson 和 P3 方案模拟的降水落区和降水量级与实况最为接近,但 P3 方案的模拟结果在西北部有小范围降水量虚高的区域。综合分析,8 种云微物理方案以 Thompson 方案和 P3 方案对 16 h 累计降水分布的模拟结果较好,其中 Thompson 方案最理想。

选取主要降水区域(图 4a 红框所示区域),对比实况与各云微物理方案区域平均的逐小时降水量和累计降水量随时间的演变特征(图 5),进一步分析各方案模拟的降水量变化差异。如图 5a 所示,区域平均的实况逐小时降水量峰值出现在 22 日 18 时,为 3.2 mm,8 种方案模拟的降水峰值也均在 18 时前后,各方案间的峰值小时降水量存在差异且均小于实况,其中 Lin 方案与实况最为接近,为 2.27 mm,但时间稍有滞后;Morrison、P3、Thompson、WSM6 和

WSM7 方案次之,分别为 2.14、1.93、1.73 和 1.53 mm;WDM6 和 WDM7 方案最小,仅有 0.72 mm 和 0.63 mm。而对于累计降水量(图 5b),Lin 和 Morrison 方案的模拟结果均大于实况,P3 和 WSM6 方案与实况最为接近,其次为 Thompson 和 WSM7 方案,WDM6 和 WDM7 方案最小。

图 6 是实况小时降水量最大时刻(4 月 22 日 18 时)雷达组合反射率实况与不同云微物理方案模拟结果的对比。可以发现,18 时雷达组合反射率实况呈东北—西南向的线状分布,横跨整个海南岛,组合反射率中夹杂着多个 50 dBz 的强对流块。不同云微物理方案模拟的组合反射率都呈东北—西南走向,Lin 方案的组合反射率最大可达 60 dBz,但没有模拟出海南岛西南部的强回波区。Thompson 方案在东北部的模拟结果较实况弱,回波中有多个明显的强对流块,同样没有模拟出海南岛西南部的强回波。Morrison 方案的回波主体以东北部为主,中部的回波由多个单体对流组成,结构松散。WSM6 方案在强度和分布上更接近于实况,回波结构紧实且

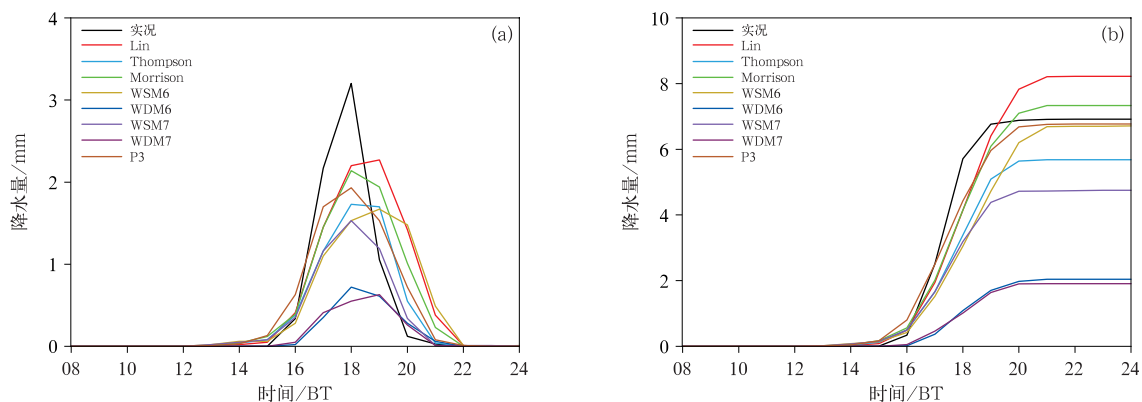
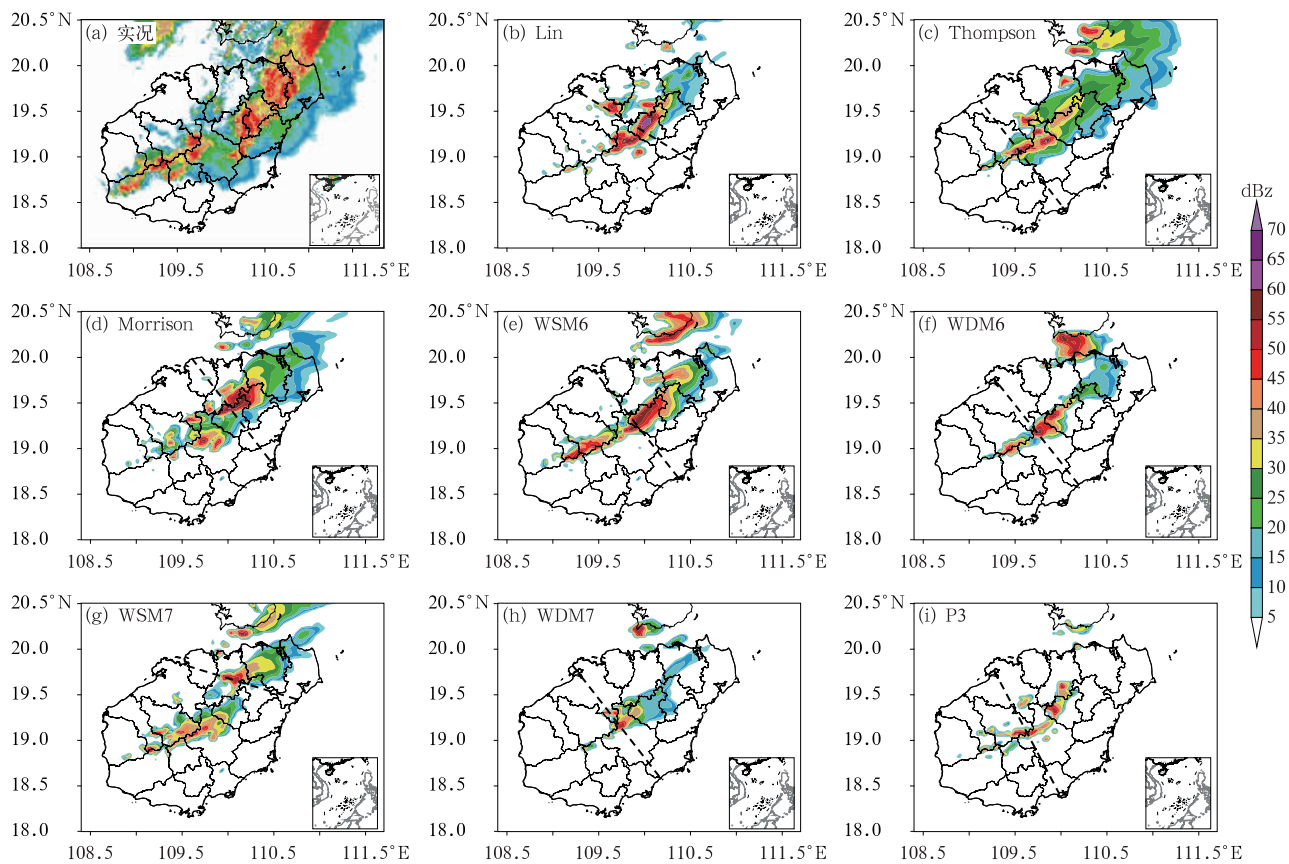


图 5 2020 年 4 月 22 日 08—24 时实况与不同云微物理方案模拟的主要区域平均(a)小时降水量和(b)累计降水量的时间演变

Fig. 5 Temporal evolution of major regional averaged (a) hourly precipitation and (b) accumulated precipitation simulated by different cloud microphysical schemes and the observation from 08:00 BT to 24:00 BT 22 April 2020



注:虚线为图 7、图 8 剖面位置。

图 6 2020 年 4 月 22 日 18 时雷达组合反射率(a)实况和(b~i)不同云微物理方案模拟结果
Fig. 6 (a) Observation and (b~i) simulation results by different cloud microphysical schemes of radar composite reflectivity at 18:00 BT 22 April 2020

狭长, WDM6 方案与 WSM6 方案相似,但回波主体更集中在海南岛的中部区域,有 3 个强对流中心。WSM7 方案中东北部的回波相比于实况更偏北,西南部的回波有多个明显的对流中心。WDM7 方案模拟的回波面积在所有方案中最小,18 时中部的多

个对流中心合并,西南部对流单体消散,飚线结构特征不明显。P3 方案的回波特征与 Lin 方案相似,但回波位置偏海南岛中部,形状更为狭长,由 4 个强对流中心组成,西南部伴随多个面积较小的弱对流。可见,8 种云微物理方案中以 WDM7 方案对雷达组

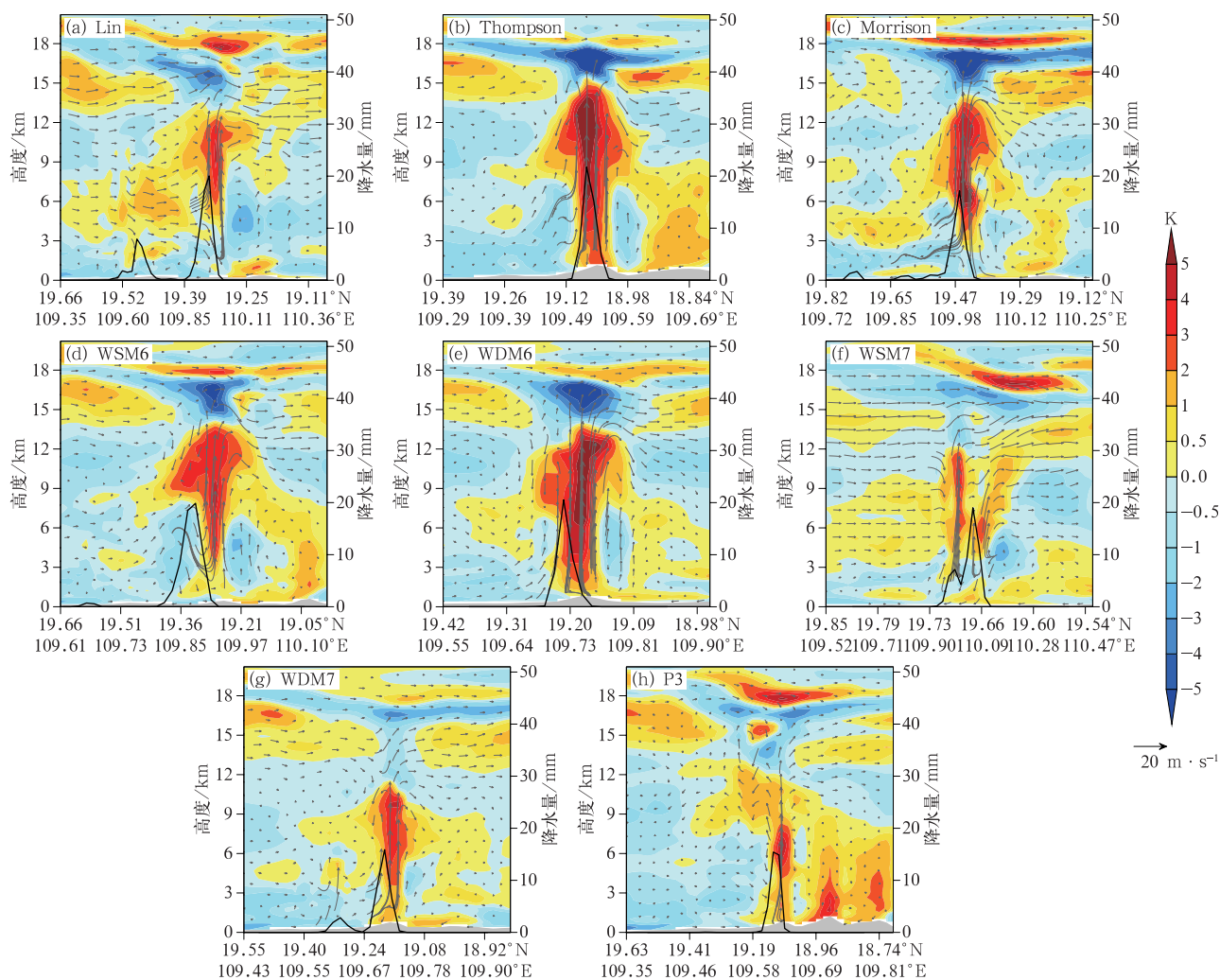
合反射率的模拟最差,其次是 Lin 和 P3 方案,WSM6 方案的模拟结果最接近于实况。

3.2 云微物理方案对热力场和动力场的模拟

根据 RKW 理论和 Rotunno et al(1988),Weisman et al(1988),Thorpe et al(1982),陈明轩和王迎春(2012)研究,飊线具有准二维结构,在发展旺盛阶段沿飊线移动方向做剖面,其低层热力和动力特征的分布均相似。由图 6 可知,不同云微物理方案模拟的飊线系统结构不同,因此本文剖面时不使用统一位置,而是选择实况小时降水量最大时刻(4 月

22 日 18 时),如图 6 虚线所示沿东南—西北方向,分别考虑不同方案模拟的低层垂直风切变最显著的位置,同时为了能更好描述降水与冷池的对应关系,过各方案模拟的强降水中心做剖面,从热力和动力两个方面对比不同云微物理方案模拟结果的差异。

降水蒸发冷却后形成的近地面冷池是飊线的一个重要特征,当存在低层风切变时,冷池会强迫其前方的暖湿气流垂直抬升从而触发新的对流单体,对飊线系统的发展维持有重要意义,本文以扰动位温来表征地面冷池。图 7 是不同云微物理方案模拟的扰动位温、风场(垂直风速放大 10 倍)和小时降水量



注:灰色阴影为地形。

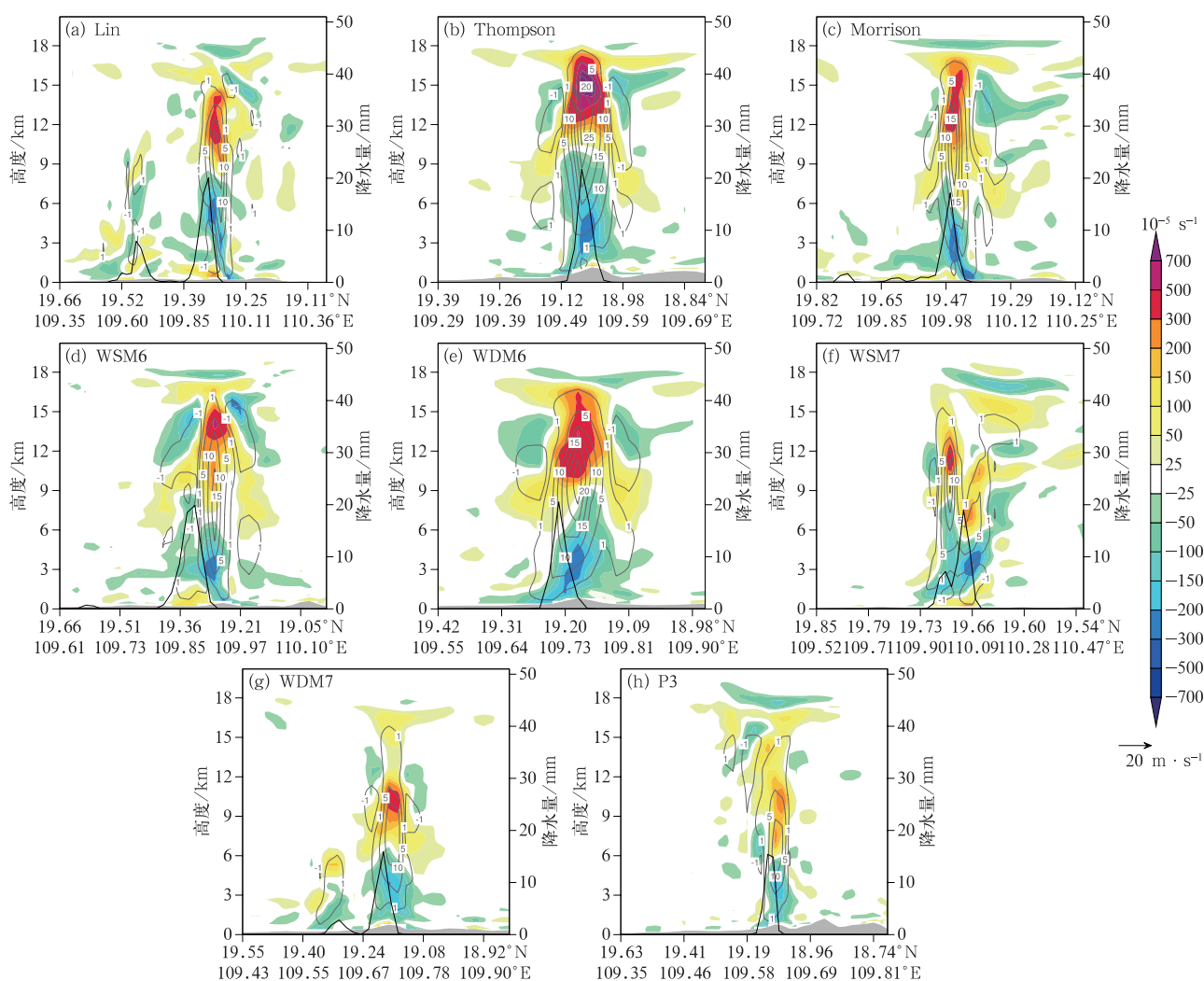
图 7 2020 年 4 月 22 日 18 时不同云微物理方案模拟的沿图 6 虚线的扰动位温(填色)、风场(风矢, $\omega \times 10$)和小时降水量(黑线,单位: mm)的垂直剖面

Fig. 7 Cross-section of perturbation potential temperature (colored), wind field (vector, $\omega \times 10$) and hourly precipitation (black line, unit: mm) simulated by different cloud microphysical schemes along the dashed line in Fig. 6 at 18:00 BT 22 April 2020

的垂直剖面,可以发现 8 种方案在 0~3 km 都能模拟出西北向冷空气和东南暖湿气流辐合形成的对流抬升区。同时,辐合抬升形成的对流区也是扰动位温的大值区,中心值在 3~5 K,这是由于低层水汽受到辐合抬升进入高层后凝结释放潜热,导致周边环境温度增加。其中,Thompson、Morrison、WSM6 和 WDM6 方案大值区的中心值大于 4 K,这与对流区发展较为深厚,强上升气流的托举有利于冰相粒子充分发展释放大量潜热增温有关。18 时不同方案在对流区后方近地面模拟的冷池强度相近,扰动位温约为 -2 K,最大小时降水量在 15~22 mm,强降水落区靠近冷池一侧,随着地面降水的持续蒸发

降温,会逐渐增强冷池对飑线发展的驱动作用,且不同模拟结果中均出现了西北向的冷池出流在辐合抬升对流区前与更前端的东南暖湿气流再次辐合,以 Thompson、Morrison、WSM6、WSM7 和 P3 方案最为明显,这将触发新生对流,有利于飑线的持续发展和降水维持。综上分析,8 种云微物理方案的扰动位温场、风场和降水存在强度和分布上的差异,但是都模拟出了飑线的冷池、低层垂直风切变以及冷池出流触发新生对流的特征。

强烈的上升运动能将低层未饱和状态的水汽向高层输送从而达到饱和状态,有利于降水的形成。图 8 给出了不同云微物理方案模拟的垂直速度、散



注:灰色阴影为地形。

图 8 2020 年 4 月 22 日 18 时不同云微物理方案模拟的沿图 6 虚线的散度(填色)、垂直速度(灰线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和小时降水量(黑线,单位: mm)的垂直剖面
Fig. 8 Cross-section of divergence (colored), vertical velocity (grey line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and hourly precipitation (black line, unit: mm) simulated by different cloud microphysical schemes along the dashed line in Fig. 6 at 18:00 BT 22 April 2020

度和小时降水量垂直剖面。18时不同云微物理方案在3 km以上的中高层都存在分布形状不一的强上升气流区,垂直速度在 $10\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,与地面降水落区基本对应。Thompson方案模拟的上升运动最强,其次是WDM6方案,上升运动能延伸至15 km以上的高度,中心值都高达 $30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,对应地面强降水中心小时降水量分别为22 mm和20 mm;Lin、Morrison、WSM6和WSM7方案模拟的垂直速度为 $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,其中Morrison和WSM6方案上升气流最高达15 km以上,Lin和WSM7方案上升气流最高在15 km左右,Lin和WSM6方案的地面强降水中心小时降水量为20 mm,与WDM6方案相似,而WSM7方案为19 mm,Morrison方案17 mm;WDM7和P3方案模拟的上升气流最弱,中心强度约为 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,地面强降水中心小时降水量分别为16 mm和15 mm。由上述分析可见,不同云微物理方案对飊线动力过程的模拟结果不尽相同,降水中心对应强上升气流区,但小时降水量与垂直速度之间的对应关系并不显著。

从散度垂直分布来看,上升气流运动最强的Thompson方案低层辐合区强度最大值为 $-200\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,辐合区向上延伸至10 km,在所有方案模拟结果中辐合区延伸最高,高层辐散区中心值最大达 $700\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,对应地面降水量最大;WDM6方案上升气流强度仅次于Thompson方案,低层辐合区最大值为 $-200\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,辐合向上延伸高度达9 km,高层辐散区中心值为 $500\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,地面降水量较大;Lin和WSM6方案模拟的辐合区中心值、向上延伸高度和地面降水量都与WDM6方案相当,WSM6方案的高层辐散区中心值达 $500\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,但辐散值为 $300\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的区域不如WDM6方案深厚;Morrison方案高层辐散强度约为 $300\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,低层辐合区最大值 $-200\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,但其向上延伸高度仅到8 km;WSM7方案低层辐合区斜向东南方向延伸至9 km高度,高层辐散区中心值位于12 km,辐散值为 $300\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 以上的区域小;WDM7和P3方案辐合区中心值约为 $-150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,最大延伸高度均在6 km以下,高层辐散区中心在10 km左右,其中P3方案的辐散区中心最大值仅有 $150\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$,对应的降水量也最小。可以看到,由于低层西北向冷空气和东南暖湿气流的交汇,不同云微物理方案对散度的模拟结果虽然差异显著,但都呈现低层辐合、高层辐散的结果特征,这种配置有利于对流的发展和降水的形成。

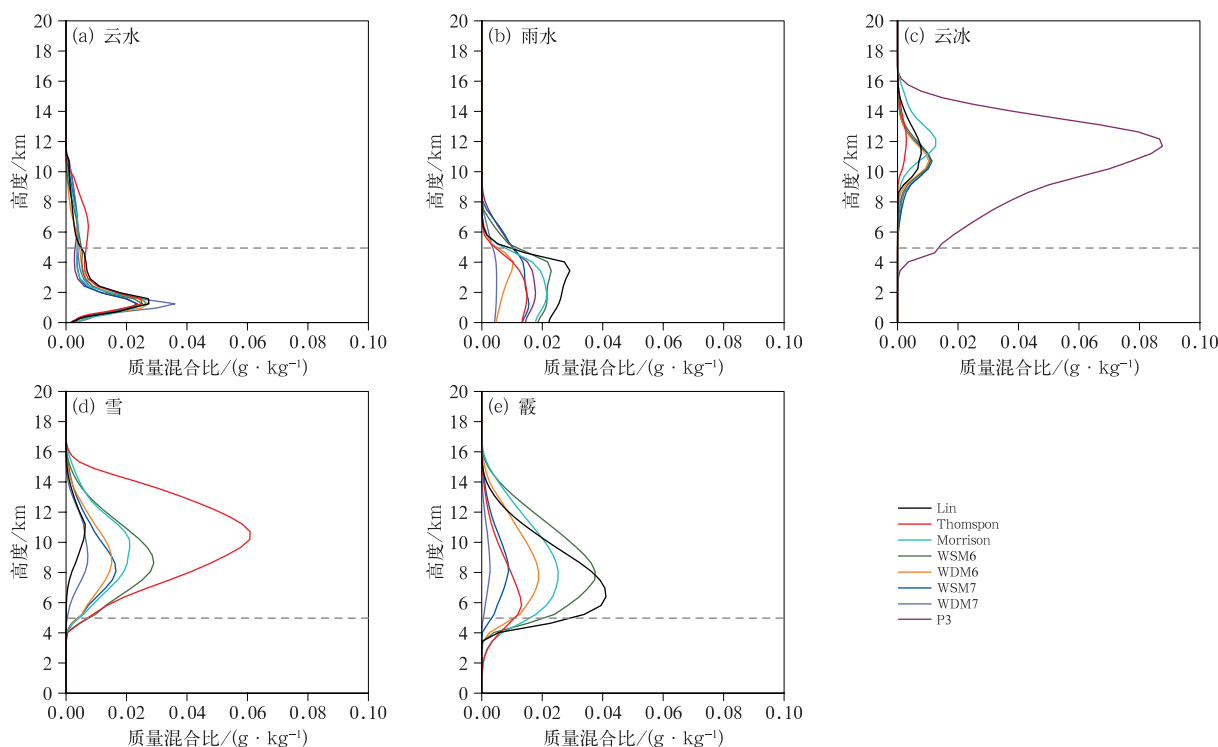
3.3 云微物理方案对水凝物的模拟

云内不同水凝物的分布是云微物理变化过程的结果,同时也反映了云微物理过程中降水粒子间的相互转换和热力、动力过程。图9分别是不同云微物理方案模拟结果区域平均(图4a红框所示区域)和时间平均的云水、雨水、云冰、雪和霰等水凝物含量垂直分布,各方案 0°C 层高度约为4.9~5.0 km,文中统一以5.0 km作为 0°C 层高度进行分析。其中,P3方案将冰相粒子统一归为云冰进行计算,导致云冰的含量显著大于其他方案的模拟结果,因此图9c中只展示P3方案云冰模拟结果,不与其他方案进行对比,在雪和霰的分析中仅对比另外7种方案的模拟结果。

从图9中可以发现,云水和雨水主要分布在 0°C 层(5 km)以下,而云冰、雪和霰的高值区在6 km以上。在云水分布中,不同云微物理方案的选择对云水含量模拟结果影响小,所有方案模拟的云水混合比随高度的分布相似,廓线近乎重合,云水混合比最大值在 $0.027\sim 0.034\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,最大值出现在约1.5 km。在雨水分布中,高值区都在约4.0 km高度,Lin方案模拟的雨水含量最大,而WDM7方案不论在空中还是地面的雨水含量都最小,相应累计降水量中也最小。在云冰分布中,Morrison方案模拟的云冰含量最大,高值区出现在12 km;WSM6、WDM6、WSM7和WDM7方案的云冰含量垂直分布相似,最大含量约为 $0.01\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,出现在10.6 km高度;Lin方案云冰含量较小且高值区不明显,Thompson与Lin方案相似,但模拟的云冰含量最小。在雪分布中,Thompson方案模拟的雪含量最大,达 $0.06\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,远大于其他方案,其次是WSM6和Morrison方案,WDM6和WSM7方案雪的分布相似,Lin和WDM7方案最小。在霰分布中,Lin方案的霰含量最大,WSM6方案次之,Morrison和WDM6方案演变趋势一致但数值稍有差异,WDM7方案霰含量最少。

总体来看,不同云微物理方案对云水含量和分布的模拟基本无影响,雨水和冰晶的分布存在差异但数值上相近,雪和霰的模拟结果对方案的选择最为敏感,这与之前的研究结果相似(陈赛男等,2019;周志敏等,2021)。

在本次模拟中,不同云微物理方案模拟结果最



注:虚线为 0℃层高度,区域平均为图 4a 红框所示区域。

图 9 2020 年 4 月 22 日 08—24 时不同云微物理方案模拟的区域平均和时间平均的不同水凝物的质量混合比垂直廓线

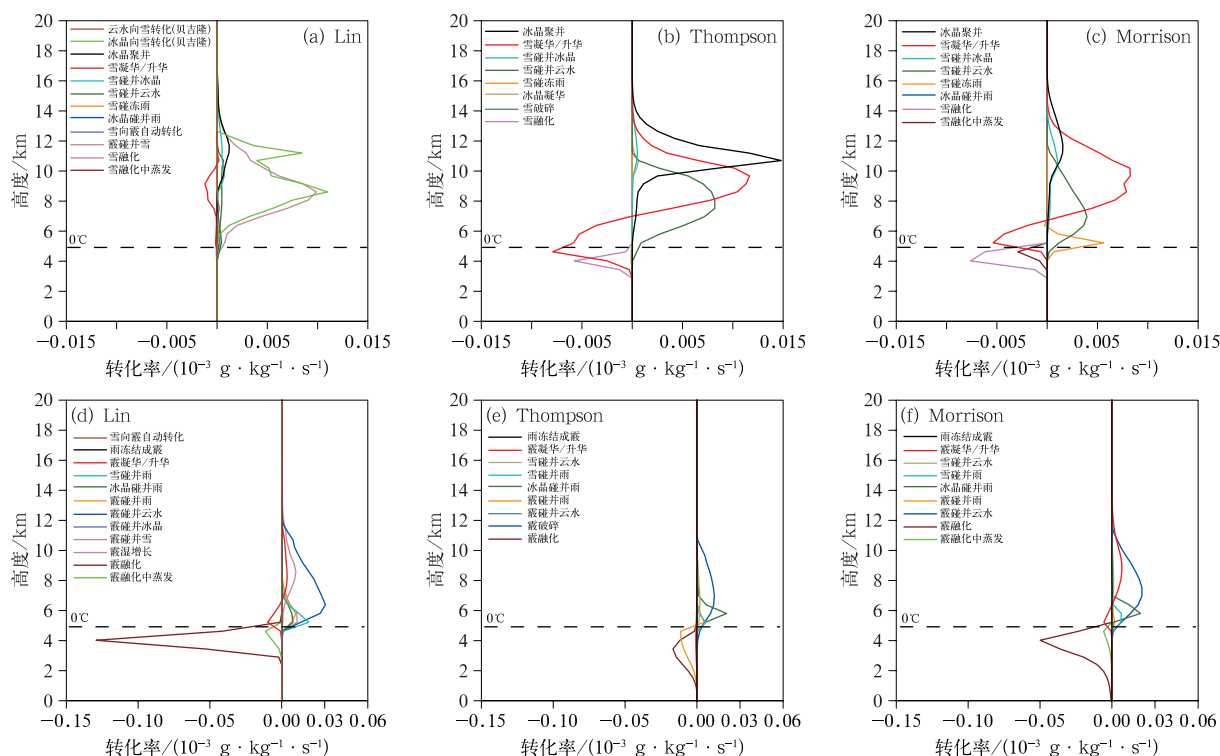
Fig. 9 Vertical profiles of regional and time averaged mass mixing ratios of different hydrometeors simulated by different cloud microphysical schemes from 08:00 BT to 24:00 BT 22 April 2020

大的差别集中在对雪和霰的描述上,为分析造成这种差异的原因,选取雪含量最小、霰含量最大的 Lin 方案,雪含量最大、霰含量较少的 Thompson 方案和雪、霰含量都不突出的 Morrison 方案,定量分析各方案雪与霰的源、汇项转化过程。图 10 为相应的转化率垂直分布,大于 0 为源项,小于 0 为汇项。

在雪的源、汇项中, Lin 方案(图 10a)的雪主要来自 0℃层以上半径 50 μm 冰晶通过贝吉隆过程的转化($0.066 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),其他过程对源项贡献极小;雪的汇项以霰对雪的碰并收集为主,且其转化率与源项相当,0℃层下雪融化与碰并雨融化蒸发可忽略不计,因此 3 个方案中 Lin 方案雪的含量最小。Morrison 方案(图 10c)雪的源项主要包括 0℃层以上雪凝华增长、雪对过冷云水的淞附、冰晶聚并、雪碰并冰晶增长和雪下落过程中在 0℃层附近碰冻过冷雨增长,汇项主要包括 7 km 以下雪升华、雪下落到 0℃层以下融化和融化过程中的蒸发。0℃层以上雪凝华增长是 Thompson 方案(图 10b)

中雪的主要源项($0.069 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$),其次是冰晶聚并($0.057 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和雪对过冷云水的淞附($0.056 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)。随着雪下落,凝华增长转化率逐渐减弱并在 7 km 处结束,雪开始升华,4.8 km 左右升华率达到最大,同时还伴随雪融化,因此, Thompson 方案中更高的源项转化率和较低的汇项转化率使得其雪含量最大。

在霰的源、汇项中, Thompson 方案(图 10e)源项主要来自 0℃层以上霰对过冷云水的淞附、冰晶和雪分别碰并过冷雨滴冻结成霰、过冷云滴在雪表面冻结沉积成霰以及霰下落到 0℃层附近 5~6 km 碰冻过冷雨滴增长;汇项主要有霰升华、0℃层以下霰融化与下落过程中碰并雨水融化。Morrison 方案(图 10f)的主要源项与 Thompson 方案相似,以 0℃层以上霰对过冷云水的淞附为主,其次分别是霰的凝华增长、冰晶和雪分别碰冻过冷雨转化成霰,雪淞附增长成霰以及霰在 0℃层附近碰冻过冷雨滴增长的转化率更小; Morrison 方案的主要汇项为霰的



注:虚线为 0℃层高度,区域平均为图 4a 红框所示区域。

图 10 2020 年 4 月 22 日 08—24 时不同云微物理方案模拟的区域平均和时间平均的

(a~c)雪、(d~f)霰的转化率垂直廓线

Fig. 10 Vertical profiles of regional and time averaged conversion rates of (a~c) snow and (d~f) graupel simulated by different cloud microphysical schemes from 08:00 BT to 24:00 BT 22 April 2020

升华、霰下落融化和下落融化蒸发。Lin 方案中,源项同样以 0℃层以上霰对过冷云水的淞附($0.216 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)为主,但相较于 Thompson 和 Morrison 方案,其源项中不考虑雪淞附增长成霰的过程,增加雪向霰的自动转化(转化率为 0)、霰的湿增长和霰碰并雪、冰晶增长,其他源项还包括霰凝华增长、冰晶和雪碰冻过冷雨;Lin 方案的汇项中,霰下落到 0℃层以下融化的转化率($0.226 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)远大于同方案中的升华($0.017 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)与碰并雨融化的转化率,在 3 个方案的汇项中也最大,其他汇项还包括霰的升华和下落至 0℃层以下后融化蒸发。

值得注意的是,3 个方案霰的汇项都以霰在 0℃层以下融化为主,Lin 和 Morrison 方案中该微物理过程转化率最为突出。考虑到 Lin 方案中雪的融化几近于零,Thompson 和 Morrison 方案雪的汇项转化率差距不大,而云水和冰晶对云微物理方案的选

择反馈较弱,图 9b 中 3 个方案的雨水含量排序与霰的融化转化率一致,说明霰在 0℃层以下融化成雨是本次模拟雨水形成的主要来源,这与新疆、湖北、广东和青藏高原等地区对强降水模拟分析的结果一致(王雨等,2017;周志敏等,2021;周文昊等,2020;毛智等,2022)。

4 结论与讨论

利用 WRF 模式中 8 种不同云微物理方案对 2020 年 4 月 22 日发生在海南岛的一次飊线降水过程进行了模拟研究,对比不同模拟结果在雷达组合反射率、地面降水量、热力和动力结构及水凝物含量上的差异,得到以下主要结论:

(1)降水模拟中,8 种云微物理方案都模拟出了东北—西南走向的雨带实况,其中 Thompson 方案模拟的降水落区与中心强度最贴近实况;各方案模

拟的强降水出现时间与实况较一致,但峰值小时降水量小于实况,区域累计降水量 Lin 方案大于实况,P3 与 WSM6 方案接近实况,WDM7 与 WDM6 方案远小于实况;最大小时降水量时刻模拟的雷达组合反射率在组织结构、范围和形态上与实况存在一定偏差,不同方案间的模拟结果差别较大。

(2)对热力、动力场的模拟中,各方案模拟的扰动位温、上升气流和辐合辐散在强度和分布上存在差异,其中 Thompson 方案的各项模拟结果均大于其他方案,P3 方案最弱。但不同云微物理方案都模拟出了冷池、低层垂直风切变以及冷池出流触发新生对流等飑线特征,降水中心与强上升气流区一一对应,散度场是有利于对流发展和降水形成的低层辐合、高层辐散结构。

(3)对水凝物垂直分布的模拟中,云水和雨水主要分布在 5 km 以下,云冰、雪和霰在 6 km 以上,其中云微物理方案对云水模拟结果的影响可以忽略,雨水和冰晶次之,雪和霰对云微物理方案的选择最为敏感,雪的模拟中 Thompson 方案模拟的含量远大于其他方案,霰的模拟以 Lin 方案最大。

(4)对比 Lin、Thompson 和 Morrison 方案雪和霰的源、汇项转化率,Thompson、Morrison 方案雪的源项主要来自水汽凝华,汇项雪的融化与升华强度相当;Lin 方案雪的源项以半径 50 μm 的冰晶通过贝吉隆过程转化为雪为主,汇项中霰对雪的碰并收集转化率与源项相当,0℃下雪的融化可忽略不计。霰对过冷云水的淞附是 3 个方案霰生成的主要源项,汇项中霰在 0℃以下融化的转化率远大于其他转化过程,并且是本次模拟中雨水形成的主要来源。

综合以上分析可知,由于不同云微物理方案对水凝物,尤其是冰相粒子的处理不同,造成潜热的释放与吸收存在差别,产生的浮力作用使得上升气流强弱不一,导致各方案模拟的地面降水量各不相同,进一步使得地面冷池和辐合辐散的强度产生差异,最终又反馈到飑线发展过程中。然而,以上结论仅是针对海南岛一次飑线降水个例进行敏感性模拟试验得到,并不一定适用于该地区其他飑线降水过程,且所使用的云微物理方案均为默认值,后期将深入分析不同云微物理方案中云微物理过程的相互作用机制,进一步补充和完善结论。

参考文献

- 陈明轩,王迎春,2012.低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟[J].气象学报,70(3):371-386.
- Chen M X, Wang Y C, 2012. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China[J]. Acta Meteor Sin, 70(3):371-386(in Chinese).
- 陈赛男,郭学良,付丹红,2019.北京一次短时局地大暴雨过程的特征及对云物理方案的敏感性数值模拟试验[J].大气科学,43(6):1344-1364.
- Chen S N, Guo X L, Fu D H, 2019. Characteristics of a short-duration and localized severe rainstorm event in Beijing City and sensitivity of cloud microphysical schemes in numerical simulations[J]. Chin J Atmos Sci, 43(6):1344-1364(in Chinese).
- 陈涛,张芳华,符娇兰,等,2020.2014年5月8—9日引发珠江口区域强降水的两个长生命史 MCS 特征分析[J].气象,46(4):449-461.
- Chen T, Zhang F H, Fu J L, et al, 2020. Analysis of two successive rainstorm-induced long-lived mesoscale convective systems struck Pearl River Estuary during 8—9 May 2014[J]. Meteor Mon, 46(4):449-461(in Chinese).
- 邓承之,周国兵,李强,等,2024.四川盆地一次西南低涡影响下的飑线天气特征及其成因[J].气象,50(7):777-790.
- Deng C Z, Zhou G B, Li Q, et al, 2024. Characteristic and formation of a squall line influenced by the southwest vortex in Sichuan Basin[J]. Meteor Mon, 50(7):777-790(in Chinese).
- 公衍铎,郑永光,罗琪,2019.冷涡底部一次弓状强飑线的演变和机理[J].气象,45(4):483-495.
- Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped strong squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. Meteor Mon, 45(4):483-495(in Chinese).
- 郭淳薇,2013.飑线的研究进展[J].气象与减灾研究,36(4):1-7.
- Guo C W, 2013. The research progress of squall line[J]. Meteor Dis Reduct Res, 36(4):1-7(in Chinese).
- 黄丹莲,高士博,闵锦忠,2017.不同云微物理方案对一次飑线过程模拟的影响[J].气象科学,37(2):173-183.
- Huang D L, Gao S B, Min J Z, 2017. Impact of different cloud microphysical schemes on a squall line simulation[J]. J Meteor Sci, 37(2):173-183(in Chinese).
- 蒋超,陈传雷,张凯,等,2024.辽宁地区飑线特征和形成条件[J].气象,50(7):791-803.
- Jiang C, Chen C L, Zhang K, et al, 2024. Squall line characteristics and formation conditions in Liaoning Province[J]. Meteor Mon, 50(7):791-803(in Chinese).
- 赖安伟,马鹤程,崔春光,等,2021.雷达反射率反演水汽和温度同化技术在一次飑线过程中的应用研究[J].气象,47(8):932-952.
- Lai A W, Ma H D, Cui C G, et al, 2021. A squall line case study of assimilating the radar data, retrieval of water vapor and in-cloud potential temperature from reflectivity in a 3DVAR framework[J]. Meteor Mon, 47(8):932-952(in Chinese).

- 雷蕾,孙继松,陈明轩,等,2021.北京地区一次飢线的组织化过程及热力结构特征[J].大气科学,45(2):287-299. Lei L, Sun J S, Chen M X, et al, 2021. Organization process and thermal dynamic structure of a squall line in Beijing[J]. Chin J Atmos Sci, 45(2):287-299(in Chinese).
- 李宏江,曹洁,李勋,等,2021.基于有限区域风场分解的海南岛一次飢线过程演变特征分析[J].自然灾害学报,30(2):24-35. Li H J, Cao J, Li X, et al, 2021. Application of wind partitioning technique in a limited domain to the characteristics of the evolution of a squall line over Hainan Island[J]. J Nat Dis, 30(2):24-35(in Chinese).
- 毛智,朱志鹏,张如翼,等,2022.不同云微物理方案对青藏高原一次强降水的模拟影响分析[J].热带气象学报,38(1):81-90. Mao Z, Zhu Z P, Zhang R Y, et al, 2022. The impact of different cloud microphysics parameterization schemes on the simulation of a heavy rainfall event over the Tibetan Plateau[J]. J Trop Meteor, 38(1):81-90(in Chinese).
- 任星露,张述文,汪兰,等,2020.不同云微物理方案对弱天气尺度强迫下一次强对流的模拟[J].高原气象,39(4):750-761. Ren X L, Zhang S W, Wang L, et al, 2020. Different cloud microphysics parameterization schemes on a strong convection simulation under weak synoptic-scale forcing[J]. Plateau Meteor, 39(4):750-761(in Chinese).
- 寿绍文,励申申,寿亦萱,等,2009.中尺度大气动力学[M].北京:高等教育出版社:157-158. Shou S W, Li S S, Shou Y X, et al, 2009. Mesoscale Atmospheric Dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press:157-158(in Chinese).
- 王凌梓,苗峻峰,管玉平,2020.多云天气下海南岛地形对局地海风环流结构影响的数值模拟[J].大气科学学报,43(2):322-335. Wang L Z, Miao J F, Guan Y P, 2020. Numerical simulation of impact of topography of Hainan Island on structure of local sea breeze circulation under cloudy weather[J]. Trans Atmos Sci, 43(2):322-335(in Chinese).
- 王雨,银燕,陈倩,等,2017.沙尘气溶胶作为冰核对阿克苏地区一次多单体强对流风暴降水及其微物理过程影响的数值模拟研究[J].大气科学,41(1):15-29. Wang Y, Yin Y, Chen Q, et al, 2017. A numerical study of the effect of aerosols acting as ice nuclei on the precipitation and microphysical processes in a multi-size convective storm occurring in Aksu in Xinjiang, Northwest China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(1):15-29(in Chinese).
- 王莹,苗峻峰,苏涛,2018.海南岛地形对局地海风降水强度和分布影响的数值模拟[J].高原气象,37(1):207-222. Wang Y, Miao J F, Su T, 2018. A numerical study of impact of topography on intensity and pattern of sea breeze precipitation over the Hainan Island[J]. Plateau Meteor, 37(1):207-222(in Chinese).
- 王智,邹兰军,2022.一次长三角地区飢线过程的数值预报分析[J].气象科学,42(3):420-426. Wang Z, Zou L J, 2022. Analysis and numerical forecast research on a squall line in the Yangtze River Delta[J]. J Meteor Sci, 42(3):420-426(in Chinese).
- 吴冰雪,苗峻峰,杨薇,2023.边界层参数化对海南岛山地环流结构和湍流特征模拟的影响[J].地球物理学报,66(5):1888-1910. Wu B X, Miao J F, Yang W, 2023. Impact of planetary boundary layer parameterizations on simulated mountain circulation structure and turbulence characteristics over the Hainan Island[J]. Chin J Geophys, 66(5):1888-1910(in Chinese).
- 邢峰华,黄彦彬,李光伟,等,2023.海南岛一次强飢线系统演变的双偏振特征分析[J].热带气象学报,39(5):742-750. Xing F H, Huang Y B, Li G W, et al, 2023. Dual-polarization characteristics of a strong squall line evolution in Hainan Island[J]. J Trop Meteor, 39(5):742-750(in Chinese).
- 许广,费建芳,黄小刚,等,2017.一次飢线过程的云微物理参数化方案数值试验及其成因分析[J].气象科学,37(3):283-292. Xu G, Fei J F, Huang X G, et al, 2017. Simulation experiments of cloud microphysical parameterization schemes on a squall line and its genesis analysis[J]. J Meteor Sci, 37(3):283-292(in Chinese).
- 杨吉,郑媛媛,夏文梅,等,2020.东北冷涡影响下江淮地区一次飢线过程的模拟分析[J].气象,46(3):357-366. Yang J, Zheng Y Y, Xia W M, et al, 2020. Numerical analysis of a squall line case influenced by northeast cold vortex over Yangtze-Huaihe River Valley[J]. Meteor Mon, 46(3):357-366(in Chinese).
- 殷蕾,平凡,2016. bin 和 bulk 微物理方案在我国飢线模拟中的敏感性研究[J].科学技术与工程,16(16):136-142, 148. Yin L, Ping F, 2016. Sensitivity study of bulk and bin microphysical scheme to a simulated squall line in East China[J]. Sci Technol Eng, 16(16):136-142, 148(in Chinese).
- 张弛,王咏青,廖玥,等,2019.初始场与云微物理参数方案在飢线数值模拟中的对比研究[J].高原气象,38(2):410-420. Zhang C, Wang Y Q, Liao Y, et al, 2019. The comparative study of initial field and cloud microphysical parameter scheme in the numerical simulation of squall line[J]. Plateau Meteor, 38(2):410-420(in Chinese).
- 张哲,周玉淑,高守亭,2018.一次辽东湾飢线过程的观测与数值模拟分析[J].大气科学,42(5):1157-1174. Zhang Z, Zhou Y S, Gao S T, 2018. Observational and numerical analyses of a squall line occurring over Liaodong Gulf of China[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5):1157-1174(in Chinese).
- 周文昊,陆春松,高文华,等,2020.华南一次暖区暴雨的演变及云微物理机制模拟研究[J].热带气象学报,36(6):805-820. Zhou W H, Lu C S, Gao W H, et al, 2020. A modeling study of the evolution and microphysical mechanisms of a warm-sector heavy rainfall in South China[J]. J Trop Meteor, 36(6):805-820(in Chinese).
- 周志敏,崔春光,胡杨,等,2021.一次梅雨锋暴雨过程数值模拟的云微物理参数化敏感性研究[J].大气科学,45(6):1292-1312. Zhou Z M, Cui C G, Hu Y, et al, 2021. Sensitivity of microphysical parameterization on the numerical simulation of a Meiyu front heavy rainfall process[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1293-1312(in Chinese).

- Bae S Y, Hong S Y, Tao W K, 2019. Development of a single-moment cloud microphysics scheme with prognostic hail for the Weather Research and Forecasting (WRF) model[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 55(2): 233-245.
- Bao J W, Michelson S A, Grell E D, 2019. Microphysical process comparison of three microphysics parameterization schemes in the WRF model for an idealized squall-line case study[J]. *Mon Wea Rev*, 147(9): 3093-3120.
- Cao Q, Zhang S W, Lei G L, et al, 2022. Impact of different double-moment microphysical schemes on simulations of a bow-shaped squall line in East China[J]. *Atmosphere*, 13(5): 667.
- Dawn S, Satyanarayana A N V, 2020. Sensitivity studies of cloud microphysical schemes of WRF-ARW model in the simulation of trailing stratiform squall lines over the Gangetic West Bengal Region[J]. *J Atmos Sear Terr Phys*, 209: 105396.
- Hong S Y, Dudhia J, Chen S H, 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. *Mon Wea Rev*, 132(1): 103-120.
- Hong S Y, Lim J O J, 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 42(2): 129-151.
- Li J Y, Su Y, Ping F, et al, 2021. Simulation of the dynamic and thermodynamic structure and microphysical evolution of a squall line in South China[J]. *Atmosphere*, 12(9): 1187.
- Lim K S S, Hong S Y, 2010. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models[J]. *Mon Wea Rev*, 138(5): 1587-1612.
- Lin Y L, Farley R D, Orville H D, 1983. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 22(6): 1065-1092.
- Morrison H, Curry J A, Khvorostyanov V I, 2005. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: description[J]. *J Atmos Sci*, 62(6): 1665-1677.
- Morrison H, Milbrandt J A, 2015. Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part I: scheme description and idealized tests[J]. *J Atmos Sci*, 72(1): 287-311.
- Morrison H, Thompson G, Tatarskii V, 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: comparison of one- and two-moment schemes[J]. *Mon Wea Rev*, 137(3): 991-1007.
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L, 1988. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(3): 463-485.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115.
- Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W, 1982. Two-dimensional convection in non-constant shear: a model of mid-latitude squall lines[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 108(458): 739-762.
- Weisman M L, Klemp J B, Rotunno R, 1988. Structure and evolution of numerically simulated squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 45(14): 1990-2013.

(本文责编:张芳)