不同微物理参数化方案对我国北方一次大范围暴雪天气过程的数值模拟研究*

王淑彩[1,2]，平凡[2,1]，孟雪峰[3]，李玉鹏[2,4]

1 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院，南京 210044

2 中国科学院大气物理研究所，云降水物理与强风暴重点实验室（LACS），北京 100029

3 内蒙古自治区气象台，呼和浩特 010051

4 吉林省气象科学研究所，长春 130062

摘要 本文以 ERA5（ECMWF Reanalysis v5）再分析资料为初始场，利用 WRF（The Weather Research and Forecasting）模式对 2020 年 4 月 19-20 日的一次大范围暴雪天气过程进行数值模拟研究。模式采用不同云微物理参数化方案进行敏感性实验，并与实测数据（自动站降水数据、雷达基数据）进行对比，分析了此次暴雪天气过程不同阶段的降水、雷达反射率、动热力和水凝物的时空演变和三维细致结构特征。研究表明：Morrison 方案更好的模拟出了本次暴雪天气过程，表现在模拟的雷达回波强度、范围及形态更与实况一致，模拟出的降水量的相关系数和均方根误差都优于其他方案；其微物理细致结构表现为强上升运动和低层正涡度的长时间维持，以及 7km 以上高层较多的冰晶、中低层较少的霰粒子和雨水粒子。从热动力场上看，bin(SBM fast)方案在 600hPa 高度以下存在明显的涡度波列，这主要是因为 bin 方案将粒子群分档处理，没有捆绑不同粒子类型运动，更能细致描述出不同粒子的下沉拖曳作用。从云微物理特征上看，不同方案模拟的雪、霰、云水以及雨水粒子的比质量都较为接近，而对冰晶比质量的模拟不管在量级还是在分布范围上都存在很大的差异，这种差异决定了不同微物理方案模拟的雷达回波和降水量级和相态的差异。

关键词： 暴雪 数值模拟 云微物理过程 水凝物

文章编号　**中图分类号** P435　**文献标识码** A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2107. 21064

收稿日期　2021-08-17；**网络预出版日期**

作者简介 王淑彩，女，1996年出生，硕士研究生，主要从事风云卫星资料质控研究。E-mail：1652010637@qq.com

通讯作者 平凡，男，研究员，博导，主要从事对流云微物理过程、中尺度动力学研究。E-mail：pingf@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点研究开发项目（2018YFC1506801, 2018YFF0300102）

Funded by The National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2018YFC1506801, 2018YFF0300102)

Numerical simulation of a large-scale snowstorm in northern China using different cloud microphysical parameterization schemes.

Wang Shucai[1,2], Ping Fan[2,1], Meng Xuefeng[3], Li Yupeng[2,4]

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

2 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics(LACS), Beijing 100029, China

3 Inner Mongolia Meteorological Observatory，Hohhot 010051, China

4 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062, China;

Abstract Using ERA5 reanalysis data as the initial field, and the WRF model was used to conduct the numerical simulation study of a large-scale snowstorm event from April 19-20, 2020. we adopted different microphysical parameterization schemes for sensitivity experiments, and the capability of the model for simulation was evaluated based on observation data (precipitation data collected at automatic weather stations, radar base data). The temporal and spatial evolution characteristics of precipitation, radar reflectance, dynamic thermodynamics and water condensate in heavy snow weather were also analyzed. The results show that the Morrison scheme can better simulate the snowstorm weather event, which shows that the simulated radar echo intensity, range and shape are more consistent with the observation data, and the correlation coefficient and root mean square error of simulated precipitation are better than other schemes. The detailed microphysical structure of the proposed scheme is characterized by strong ascending motion and long-term maintenance of positive vorticity in the lower layer, and more ice crystals in the upper layer above 7km and less graupel and rain particles in the middle and lower layers. From the perspective of the thermal dynamic field, there is an obvious vorticity wave train below the height of 600hPa in the bin scheme. This is mainly because the bin scheme grades the particle swarm, does not bind different particle types to move, and can describe the sinking and dragging effect of different particles in a more detailed way. From the cloud microphysical characteristics, the specific masses of snow, graupel, cloud water and rain particles simulated by different schemes are close to each other. However, the simulation of the specific mass of ice crystals has great differences in both magnitude and distribution range, which determines the difference in magnitude and phase state simulation of radar echo and precipitation by different microphysics schemes.

Keywords: snowstorm, numerical simulation, cloud microphysical process, hydrometeors

1 引言

暴雪是我国北方冬季最常见的气象灾害之一，常伴有大风、寒潮以及冰冻等天气，是主要的成灾因素。大范围、长时间的暴雪事件对交通、电力、农业等设施均能造成严重影响，局地性的大暴雪、特大暴雪事件常常危及人民生命财产安全，属于典型的高影响天气（滕方达等，2020）。我国的暴雪天气过程主要包括内蒙暴雪、环渤黄海区域的回流暴雪、南方暴雪、高原暴雪以及东北暴雪，因此东北地区是我国暴雪多发的关键区之一，局地性的大雪和暴雪发生次数呈现波浪式上升趋势（王焕毅等，2017）。

数值模式发展的早期，对暴雪的研究大部分还是基于天气学分析方法对暴雪环流形势、系统配置等进行分析。秦华锋等（2008）对 2007 年东北地区的一次罕见暴雪过程成因进行了分析，表明高低空明显的垂直切变和高层辐散与低层辐合的配置导致强上升运动；中低层深厚的正涡度产生和维持是强暴雪形成的主要动力机制；干冷空气侵入是产生暴雪的主要触发因素；南方暖湿水汽的北上是产生东北暴雪的重要原因之一。孟雪峰等（2012）对内蒙古东北地区一次漏报的暴雪天气进行诊断分析，表明对流层中低层温度平流随高度的减小有利于对流层中低层不稳定层结的建立；地面副冷锋与气旋合并加强，850hPa 中尺度低涡强烈发展，加强了对流层低层的辐合上升运动，触发不稳定能量释放，这是强降雪形成的主要原因，因此边界层“冷垫”作用对强降雪有一定的增幅。前人研究表明，天气学分析的方法仅能够抓住降雪事件中的主要影响系统，从而理解天气过程的演变和发展规律，但是不能精细地描述降雪的落区和强度。

随着数值模式的发展，目前大部分学者的研究都倾向于采用天气学分析方法和微物理过程分析方法相结合，来分析降雪天气过程。数值模式中对云微物理过程的描述主要是通过微物理参数化方案实现的。根据对水成物的描述不同，云微物理参数化方案可分为两类，一类是体积水方案（bulk），另一类是分档方案（bin）。bulk 方案是用各类水凝物粒子对应的经验函数来描述云中各类水凝物粒子的总体粒子谱分布特征，该方案计算量小，因此广泛应用于实际的业务和理论研究者中。但是 bulk 方案只适合描述云中水凝物粒子的总体分布特征，不适合描述某个尺度段的粒子变化引起的谱演变（许焕斌等，1999）。而 bin 方案则是根据水成物的相态、粒子大小、形状、密度等微物理特征，将水成物分成几十或几百档，

给出各档粒子的预报方程及他们之间的相互转化关系（Khain at al，2015；史月琴等，2006）。分档方案将粒子群分档处理， 描述了不同档位粒子的相互作用，与自然图像很接近。 但是 bin 方案的计算量巨大，远不能满足实际的业务需求，因此大多只用在理论研究中。

云微物理参数化方案的选择对数值模拟结果有重要影响，研究不同微物理参数化方案对天气过程的影响是国内外的研究热点之一（尹金方等，2014；Wu et al, 2013；Adams-Selin et al, 2013；Khain et al, 2016；Qian et al, 2018），但是目前的大量研究都是基于飑线、冰雹、超级单体风暴等强天气过程进行数值模拟研究（Fan et al, 2015; Fan et al, 2017; Yin et al, 2019;）。Morrison and Milbrandt（2011）分别采用 MY（Morrison-Milbrandt Yau）方案对一次超级单体风暴进行模拟，表明方案中对于霰、雹粒子的处理是导致模拟结果不同的重要原因。Lei Yin 等（2017）利用 bin 方案和 bulk 方案对我国东部的一次飑线过程进行对比研究，表明 bulk 方案模拟的雷达结构较窄但是组织性良好，bin 方案模拟的结构较松散但是强度更强，更与实况一致，但是 bulk 方案模拟的降水落区和强度更与实况一致。前人对暴雪等弱对流天气过程的研究较少，但也有一些研究成果，Alcimoni 等（2018）利用 WRF 模式，以 FNL 和 ERA-interim 数据为边界和初始场条件，对安第斯山脉南部的复杂地形条件下的极端降雪事件进行不同微物理参数化的研究，表明初始场对预报的结果至关重要，FNL 背景场条件下 WSM6 模拟的降雪量效果最好，Morrison 和 WDM5 方案模拟的过强，效果最差；ERA-interim 的雪深模拟结果比 FNL 更接近实况。Parvin 等（2021）利用 WRF 模式，采用四种微物理方案(WSM6、Goddard、Morrison 和 Thompson)和两种行星边界层方案(Yonsei University (YSU)和 Mellor-Yamada-Janjic (MYJ))得出了八种不同的组合，对 2014 年发生在里海西南海岸的湖泊效应导致的一次降雪过程进行数值模拟研究，结果表明 Morrison-MYJ 和 Goddard-MYJ 是估算降水和降雪时空变化的最佳配置，MYJ 边界层方案比 YSU 边界层方案更能模拟出降水的强度和分布。国内也对暴雪天气过程进行了一些研究，林文实等（2009）在利用 MM5 模式模拟华北地区的一次暴雪天气过程中，比较两个纯显式冰相云微物理参数化方案的差异，两个方案对降雪分布和强度预报差别较小，但云中的微物理过程有较大的不同。崔锦等（2014）研究了不同微物理参数过程对东北对降水相态的影响，表明

不同微物理方案对降水落区和降水强度预报影响不明显，而降水相态对微物理参数化方案较敏感，主要表现在对雨区和雨夹雪区预报影响显著。滕方达等（2020）利用 Lin（Purdue Lin）、WSM6（WRF Single-Moment 6-class scheme）、Thompson、WDM6（WRF Double-Moment 6-class scheme）四种微物理过程参数化方案对辽宁的一次暴雪过程进行对比研究，表明 Thompson 方案模拟出更多的雪粒子和最少的霰粒子，Lin 方案霰粒子南北范围广、伸展高度高，WSM6 和 WDM6 两种方案模拟出较少的霰粒子。综上所述，不同的物理参数化方案对水成物的种类、密度、数目、谱分布的设置差别较大，对云微物理过程的物理描述和处理方法上也存在较大差异，因此不同微物理参数化方案模拟的暴雪天气过程的热动力过程、水凝物过程、雷达回波以及地面降水等也应存在显著区别。但是目前的大多数微物理方案的研究都是基于暴雨、飑线、冰雹等强对流天气进行研究的，对降雪天气过程的研究很少。而降雪天气过程的雷达回波很弱，对流发展也偏弱，不同微物理参数化模拟的动热力、水凝物等是否存在很大差异还需要进行大量研究。

本文利用 WRF 模式对我国北方的一次大范围暴雪天气过程进行数值模拟，对比不同微物理参数化方案（Thompson、Morrison、WDM6、NSSL、SBM fast (bin)）模拟的雷达回波、降水量、动热力以及水凝物等物理量特征，从而为暴雪天气过程的预报提供一定的理论研究基础。

2 资料和方法

2.1 个例介绍

2020 年 4 月 19 日至 20 日 15 时(世界时，下同)，我国东北地区受到一次大范围暴雪天气过程侵袭，东北三省大部分地区以及内蒙古东部都不同程度的受到影响。内蒙古呼伦贝尔、黑龙江齐齐哈尔和黑河局地积雪达 15 厘米到 25 厘米。齐齐哈尔市为当地有气象记录以来 4 月下旬最大，其中，内蒙古的扎兰屯积雪深度最大，最深达 47 厘米。本次大范围降雪天气过程造成了交通瘫痪，铁路、公路以及机场关闭。且发生在春耕的关键时期，对农业设施也造成了很大破坏，发生在疫情防控的关键时期，大范围的降温过程，增加了公众健康安全风险。

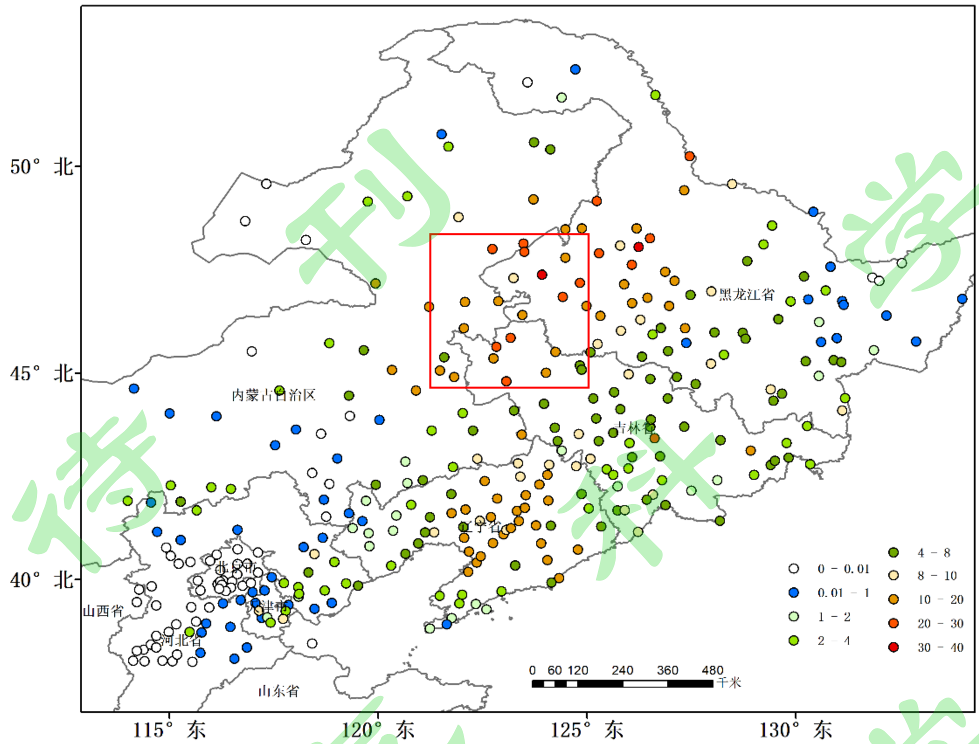

图 1 截至 2020 年 4 月 20 日 12 时，24 小时累计降水量实况分布（单位：mm），红色框为本次实验主要关注的区域

Fig.1 Distribution of 24h accumulative precipitation at national weather stations in northeast of China from 1200 UTC 19 April to 1200 UTC 20 April 2020(unit: mm). The red boxes are the areas of major concern in this experiment.

2.2 天气形势分析

为了分析此次暴雪天气过程的天气背景条件，利用欧洲中期天气预报中心（European Centre For Medium Range Weather Forecasts，ECMWF）的全球再分析数据（ECMWF Reanalysis v5，ERA5），分别分析了此次大范围暴雪天气过程发生前的 500hPa、850hPa 以及地面的环流场、温度场和风场。ERA5 的空间分辨率为 0.25°×0.25°，时间分辨率为 1 小时。从 500hPa 高度场（图 2a）上可知，亚洲中高纬地区为“一槽一脊”形势，蒙古国中西部地区以及中国东北华北地区被高压脊所控制。我国东北的北部有一深厚的冷涡，中心位于贝加尔湖以东和库页岛以西附近，冷空气沿着槽线附近进入我国内蒙东部从而影响整个东北地区，且我国大部分东北地区以及中东部地区受到急流的影响，对流不稳定增强。从 850hPa（图 2b）低空环流和比湿的分布来看，低涡中心位于内蒙东部地区，低涡前部的西南气流和偏南气流从南方携带暖湿气流，并向东北输送。从地面天气形势（图

2c）可知，我国东北正好在低压中心附近，受到低压中心的控制，其中心气压低于 1001hPa，且低压中心具有不断加强的趋势。北方的干冷气流与南方的饱和暖湿气流在东北地区汇集。这种低层辐合高层辐散的天气系统加上低层大量水汽的输送，导致这次大范围暴雪天气发生和维持。

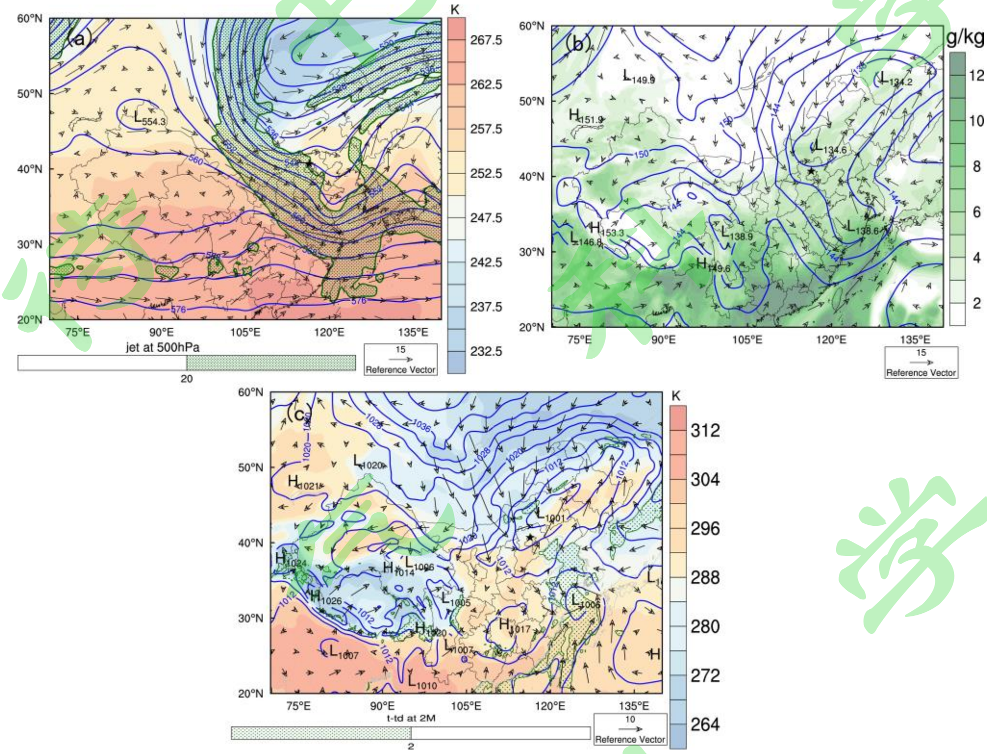

图 2 ERA5 再分析资料 2020 年 4 月 19 日 06 时（UTC）天气形势图(a)500hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：dagpm）、温度（色阶，单位：K）、风场（箭矢，单位：m/s）和急流（风速大于 20m/s，色阶），（b）850hPa 高度（蓝色等值线，单位 dagpm）、风场（箭矢，单位 m/s）和比湿（色阶，单位：g/kg），（c）地面气压（蓝色等值线，单位：hPa），风场（箭矢，单位 m/s）和温度（色阶，单位：K）

Fig.2 (a) Geopotential height（blue contour, unit: dagpm）, temperature(shaded, unit: K), wind（vector, unit: m/s）, and wind jet (shaded area, wind speed over 20 m/s) at 500 hPa. (b)geopotential height (blue contour, unit：dagpm)，wind（vector, unit: m/s）, specific humidity（shaded，unit：g/kg）at 850 hPa. (c) surface pressure（blue contour，unit：hPa)，wind（vector，unit：m/s）and temperature（shaded，unit：K）on 1200 UTC 19 April 2020 based on the ERA5 reanalysis data.

2.3 模式设计和观测资料

本文采用 WRF4.1.5 中尺度模式对本次暴雪天气过程进行数值模拟，模式为

单层，模拟区域如图 3，空间分辨率为 3km，格点数为 500×530，中心为（46.5°N，124°E），垂直方向为 51 层，模式层顶为 50hPa。采用分辨率为 0.25°×0.25°的 ERA5 再分析资料为初始和边界条件，模拟的初始时刻为 2020 年 2 月 19 日 00 时，模拟时长为 36 个小时，每隔 1 小时输出一次结果。为了研究模式不同微物理方案对这次大范围暴雪天气过程的影响，选择了 Thompson(8)、Morrison(10)、WDM6(16)、NSSL(18)、SBM fast (bin, 30)五种云微物理过程方案进行数值模拟，Thompson(8)、Morrison(10)、WDM6(16)、NSSL(18)这四个方案属于 bulk 方案，除云微物理方案不同外，均采用 YSU 边界层方案，Noah 陆面过程方案，不采用积云对流参数化方案，RRTM 长波辐射方案，Dudhia 短波辐射方案。为了验证本次实验模拟的效果，采用地面气象站数据以及雷达基数据进行验证。

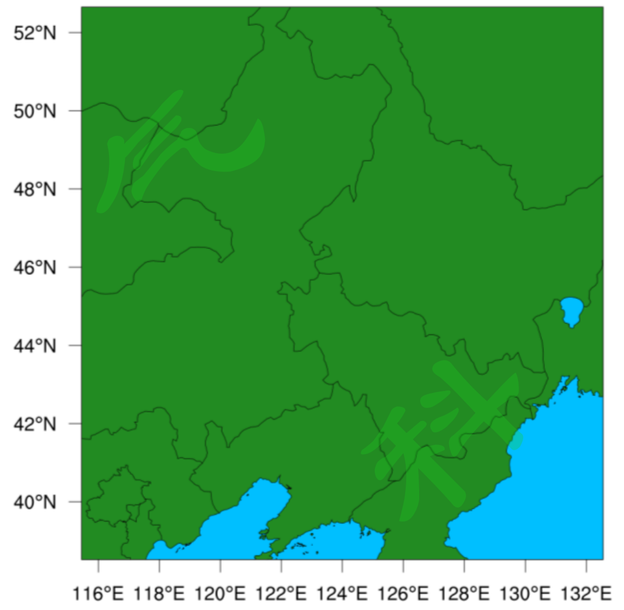

图 3 模拟区域

Fig.3 Model domain for numerical simulation

表 1 模式设计

Table 1 Mode parameterization scheme setting

模式设置	Domain 1
水平分辨率	3km
水平格点数	500×530
垂直层数	51
模式顶气压	50hPa

积云参数化方案	/
边界层方案	YSU
路面过程方案	Noah
长波辐射方案	RRTM
短波辐射方案	Dudhia
云微物理方案	Thompson(8)、Morrison(10)、WDM6(16)、NSSL(18)、SBM fast (bin, 30)

表 2 微物理参数化方案的混合比和数浓度

Table 2 Mixing ratio and number concentration of the five microphysical parameterization schemes

mp_physics	Scheme	Mass Variables	Number Variables
8	Thompson	Qc Qr Qi Qs Qg	Ni Nr
10	Morrison 2-mom	Qc Qr Qi Qs Qg	Nr Ni Ns Ng
16	WDM6	Qc Qr Qi Qs Qg	Nn** Nc Nr
18	NSSL 2-mom+CCN	Qc Qr Qi Qs Qg Qh	Nr Ni Ns Ng Nh Nn Vg
30	HUJI fast(bin)	Qc Qr Qs Qg Qi	Nc Nr Ns Ni Ng Nn

3 模拟结果验证

为了分析不同的微物理参数化方案对这次暴雪天气过程模拟的效果，本文主要对不同微物理参数化方案模拟得到的雷达组合反射率、降水水平分布分布以及雷达反射率垂直分布与实况进行对比。

3.1 雷达反射率

天气雷达是利用云雾、雨、雪等降水粒子对电磁波的散射和吸收作用，从而可探测到降水的空间分布和铅直结构，雷达观测的反射率因子能很好地反映大气中的水物质含量，所以利用不同的云微物理参数化方案模拟的雷达反射率与雷达基数据进行比较。此次大范围暴雪天气过程从 2020 年 4 月 19 日 02 时左右开始生成并不断向东发展，到 19 日 20 时左右发展成熟，并开始慢慢消散，持续时间大概 36 个小时左右。本次实验重点关注的区域是降雪量比较大的地区，其位置

如图 1 所示，分别选取了该区域内对流系统生成、发展和成熟三个阶段进行分析。

总体上，5 种微物理参数化方案模拟的雷达反射率在时间和空间上分布基本一致。实测的雷达最强回波时间是 19 日 20 时（图 4a3），而模拟的最强回波时间是 19 日 21 时（图 4b3、c3、d3、e3、f3），较观测晚了约 1 小时。图 4 为不同的微物理方案模拟不同时次的雷达回波与实测的雷达回波对比图。图 4（a1、a2、a3）是雷达实况，由于雷达资料的不全，只有少数的几个自动站，因此实况的雷达数据只覆盖部分地区。第一列为主要关注区域的对流初生时刻，第二列为对流发展时刻，第三列为对流成熟时刻。5 种微物理方案模拟的雷达回波范围明显比实况偏大，但是雷达回波中心强度和落区基本与实况一致，强回波中心大于 45dBZ，在内蒙古的东侧有一个发展强烈且范围广的对流系统，从地面天气形势图（图 2c）可知，该地区受强低压中心控制，低压中心在该地区停留将近两天（图略），这与强对流系统持续时间一致。该对流系统导致扎兰屯、齐齐哈尔、白城等区域大范围、高强度、持续时间长的降雪过程。从整个过程看，bin 方案模拟的强回波中心与实况相比偏弱（图 4f1、f2、f3），而 Morrison 模拟的雷达回波中心偏强（图 4c1、c2、c3）。与 bin 方案相比，bulk 方案模拟的回波结构较松散，单体相对孤立，组织化程度较差。从整个时间周期上看（图略），雷达回波在 20 日 12 时左右基本消散，而 bulk 方案模拟的雷达回波中心还有 30dBZ 左右，bin 方案的回波强度基本消散，因此 bin 方案的发展周期比 bulk 方案的短，更与实况一致。

不同的微物理参数化方案模拟的雷达回波的水平分布差异较小，因此也对比了观测和模拟的雷达反射率垂直结构分布，各剖面的位置如图 4 紫色框对角线位置。4 月 19 日 14 时（图 5a1），黑龙江省、内蒙古与吉林的交界地带有几个初生的对流单体，回波中心强度在 35dBZ 以下，悬垂在 850hPa~600hPa 之间。5 种微物理方案模拟的雷达回波剖面（图 5b1、c1、d1、e1、f1）基本都与实况一致。但是 NSSL 方案模拟的回波底偏低，WDM6 方案模拟的回波顶偏低。随着对流系统的发展（图 5b1），对流单体的水平宽度以及垂直高度不断扩大，多对流中心发展并开始合并，强回波中心最高可达到 45dBZ， 5 种微物理方案（图 5b2、c2、d2、e2、f2）均模拟出了多单体逐步发展合并的特征，且其形态基本与实况一致，但是 WDM6（图 5d2）和 NSSL（图 5e2）方案模拟的强回波中心与实况

相比偏弱，在 21 时（图 5a3），对流系统发展达到最强，中心回波强度达到 50dBZ，Thompson（图 5b3）和 Morrison(图 5c3)均模拟出 50dBZ 的强回波中心。但是 Morrison 模拟的回波形态比较宽广，更与实况一致。从整个过程上看，Morrison 模拟的回波强度、范围和形态更与实况一致，bin 与 bulk 方案相比，模拟的单体更多，这可能这主要是因为 bin 方案将粒子群分档处理，没有捆绑不同粒子类型运动，更能描述出不同档位粒子相互作用。

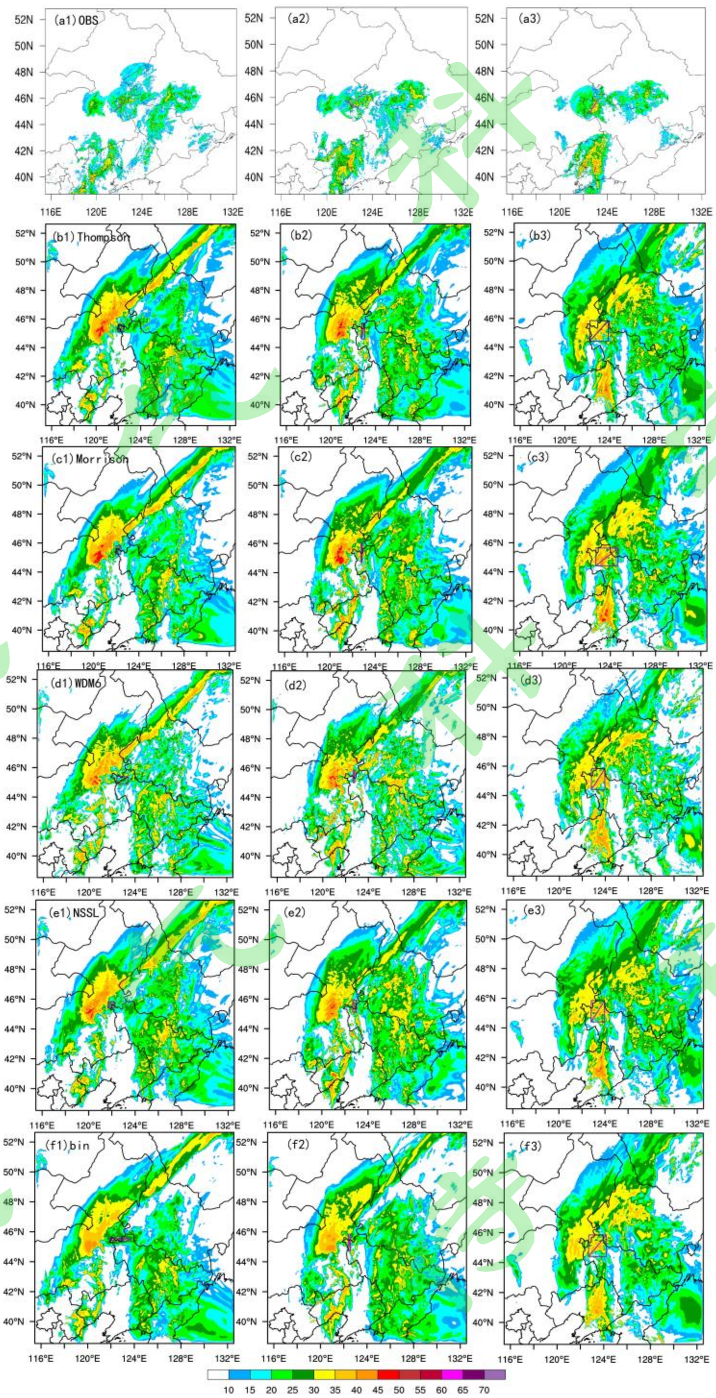

图 4 实测（a1(4 月 19 日 15:00)、a2(4 月 19 日 17:00)、a3(4 月 19 日 20:00)）和模拟的雷达

组合反射率（单位：dBZ），其中（b1（4 月 19 日 14:00）、b2（4 月 19 日 16:00）、b3（4 月 19 日 21:00））为 Thompson 方案(其他方案的时间下同)，（c1、c2、c3）为 Morrison 方案，（d1、d2、d3）为 WDM6 方案、（e1、e2、e3）为 NSSL 方案、（f1、f2、f3）为 bin 方案。紫色对角线和方框分别表示下文剖面位置和区域平均的范围。

Fig.4 Observed (a1(1500 UTC 19 April 2020)、a2(1700 UTC 19 April 2020)、a3(2000 UTC 19 April 2020)) and Simulated radar composite reflectivity (units: dBZ), b1(1400 UTC 19 April 2020)、b2(1600 UTC 19 April 2020)、b3(2100 UTC 19 April 2020) is Thompson(the time of other schemes is the same below), (c1, c2, c3) is Morrison, (d1, d2, d3) is WDM6, (e1, e2, e3) is NSSL, (f1, f2, f3) is bin. The purple diagonal lines and the purple boxes indicate the slice lines of cross sections and the averaging area in the following analysis, respectively.

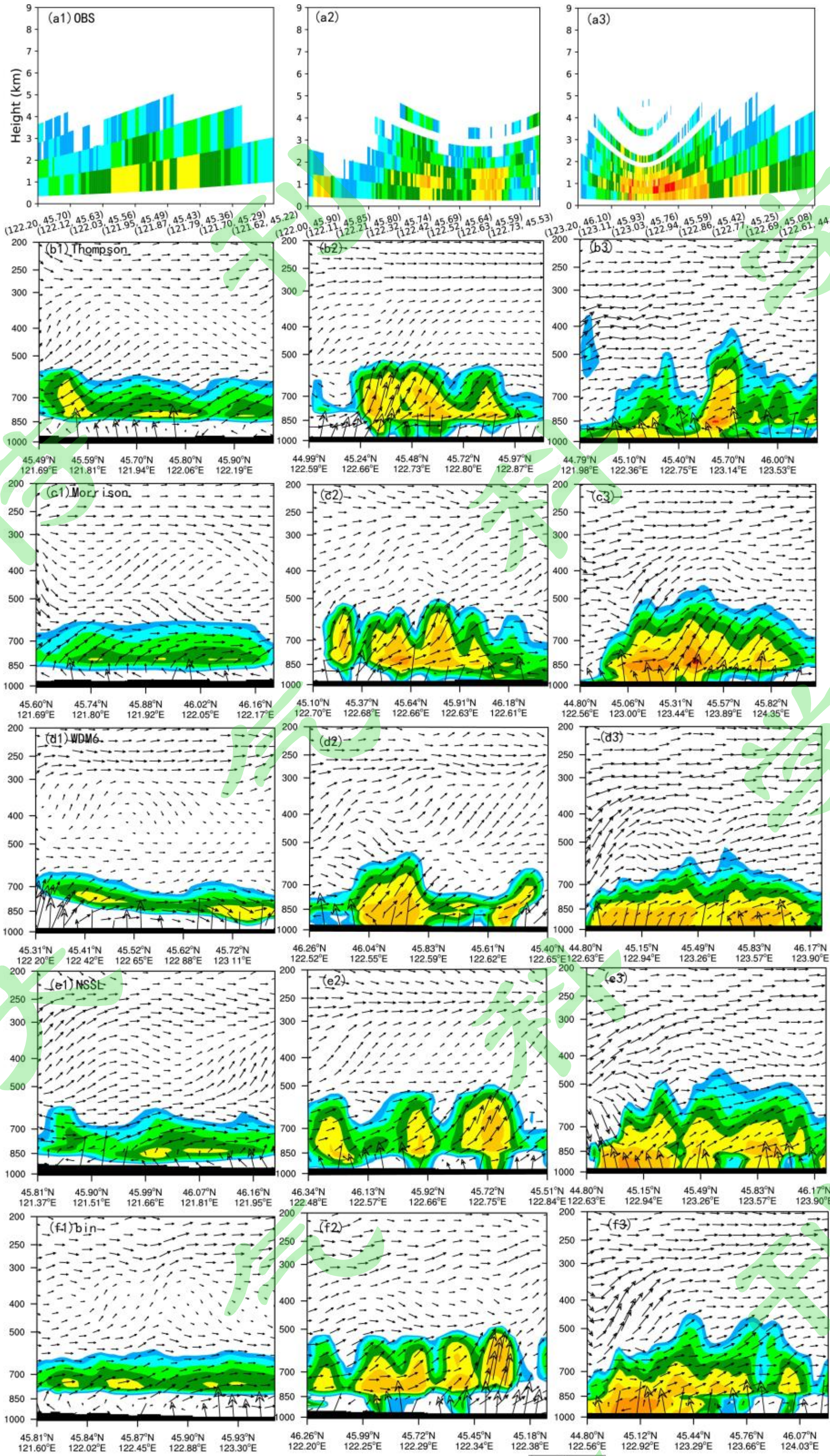

图 5 实测和微物理参数化方案模拟的雷达反射率垂直剖面（单位：dBZ）和风场（箭矢：单位 m/s）（其垂直速度风矢扩大了 50 倍，下同），时间和剖面的位置如图 4 所示

Fig.5 Observed and simulated vertical cross section of radar composite reflectivity and winds (vector, unit: m/s）, (vertical vector speed is magnified by 50, The same below). The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4. (units: dBZ).

3.2 地面累计降水分布

本文在对比雷达回波的同时，对降水的分布情况也进行了对比。由于不同微物理参数化方案对水物质的组成和分布描述不同，会导致模式对降水的模拟产生差异，5 种微物理参数化方案模拟得到的 6 小时累计降水量与站点实况降水观测的对比如图 6 所示，其中图 6（a1、a2、a3）是地面自动站降水分布情况。在初期降水带主要呈东北-西南走向（图 6a1），由地面天气形势图（图 2c）可知，我国内蒙古、黑龙江、吉林三省交界地带受低压中心控制，强低压中心在此停滞不前，南部受强劲的西南风影响，在西南风不断加强和推进作用下，降水带逐渐呈南北走向（图 6a2），最后呈西北-东南走向（图 6a3），最后移出我国区域，持续时间 30 个小时左右。从图 6 可知 5 种微物理参数化方案模拟的降水量分布、雨带走势、强度基本与实况一致，基本模拟出了强降水中心和发展的走势，但是模拟的强度中心（>12.8mm）和范围明显比实况要大。与此同时，也对比 5 个方案模拟的 24 小时累计降水量，从降水量分布情况（图 7）来看，5 个微物理参数化方案模拟的 24 小时累计降水量的强度和落区与实况基本一致，WDM6 方案模拟的强降水（>25.6mm）中心的强度和范围明显比实况偏大。

为了定量评价不同微物理参数化方案对这次暴雪天气过程的模拟结果，选取了东北 258 个地面自动站的 1 小时累计降水均值资料对模式的模拟能力进行客观定量评价。其结果如图 8 和表 3 所示，4 月 19 日 22 时左右，降水达到峰值，但是模拟的降水峰值与实况相比提前了 1 小时左右。19 日 23 时以前，模式模拟的降水量级与实况一致，但是 23 时以后出现了较大偏差，模拟降水的明显比实况偏高。从表 3 的相关系数和均方根误差结果来看，相关系数最大的是 Morrison 方案，达到 0.9591，均方根误差最小的是 Thompson 方案，为 0.0640。可以认为本次过程中 Thompson 和 Morrison 方案整体优于其他方案。从 24 小时累计降水（图 7）主观检验上看，Morrison 方案的强降水中心（>25.6mm）范围比 Thompson 方案的小，更与实况一致，因此综合客观定量评价和主观检验，Morrison 方案对此次降雪过程的模拟更好。

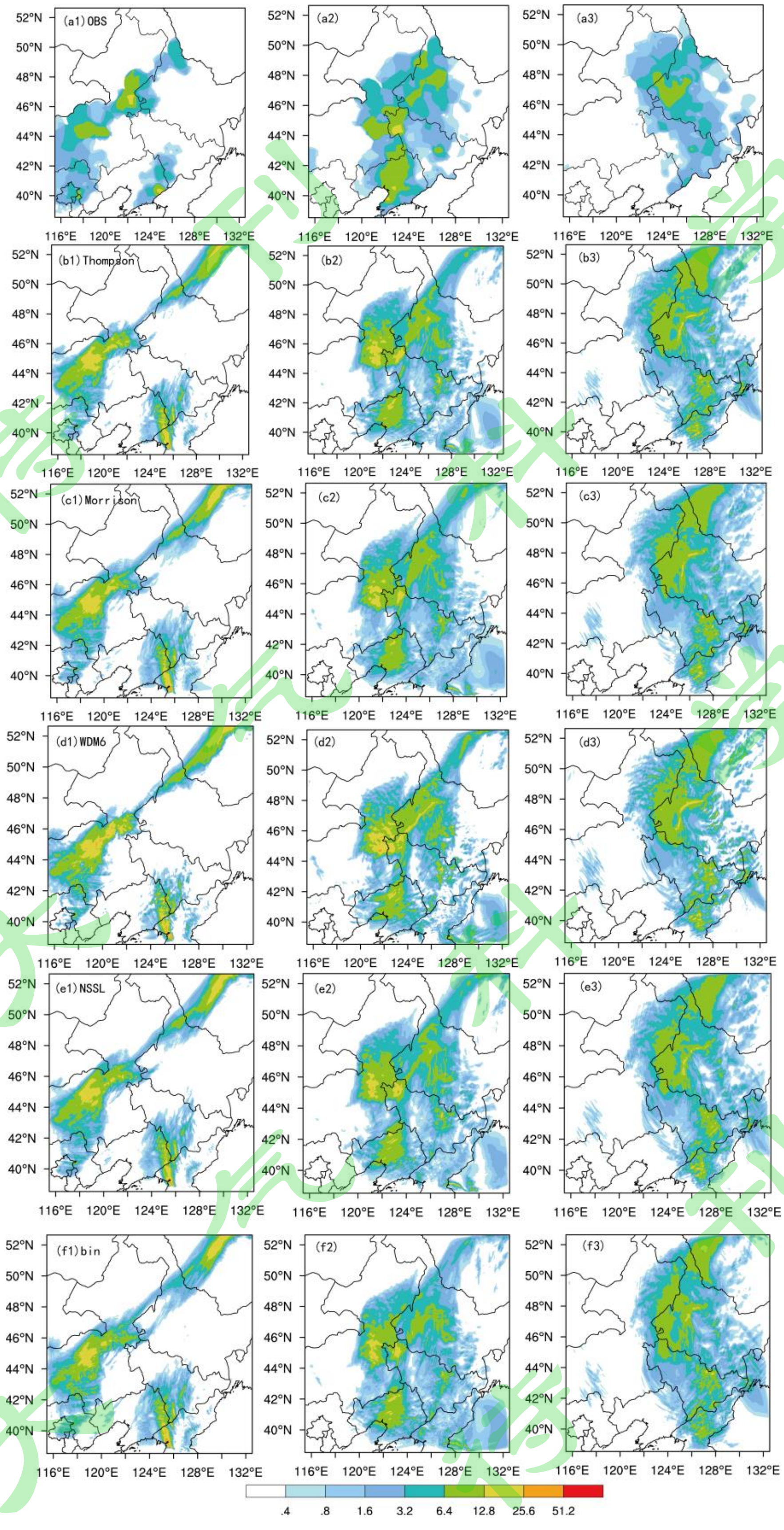

图 6 观测和模拟的 6 小时累计降水（单位：mm），其中（a1、b1、c1、d1、e1、f1）为 2020 年 4 月 19 日 10：00-16：00，（a2、b2、c2、d2、e2、f2）为 2020 年 4 月 19 日 20:00-4 月

20 日 02:00，（a3、b3、c3、d3、e3、f3）是 2020 年 4 月 20 日 06:00-12:00

Fig.6 Observed and simulated spatial distribution of the 6h accumulated rainfall during 0600 -1600 UTC 19 (a1, b1, c1, d1, e1, f1), 1600 UTC 19 -0200 UTC 20（a2, b2, c2, d2, e2, f2）, and 0200 UTC 20 -1200 UTC 20（a3, b3, c3, d3, e3, f3）(units: mm)

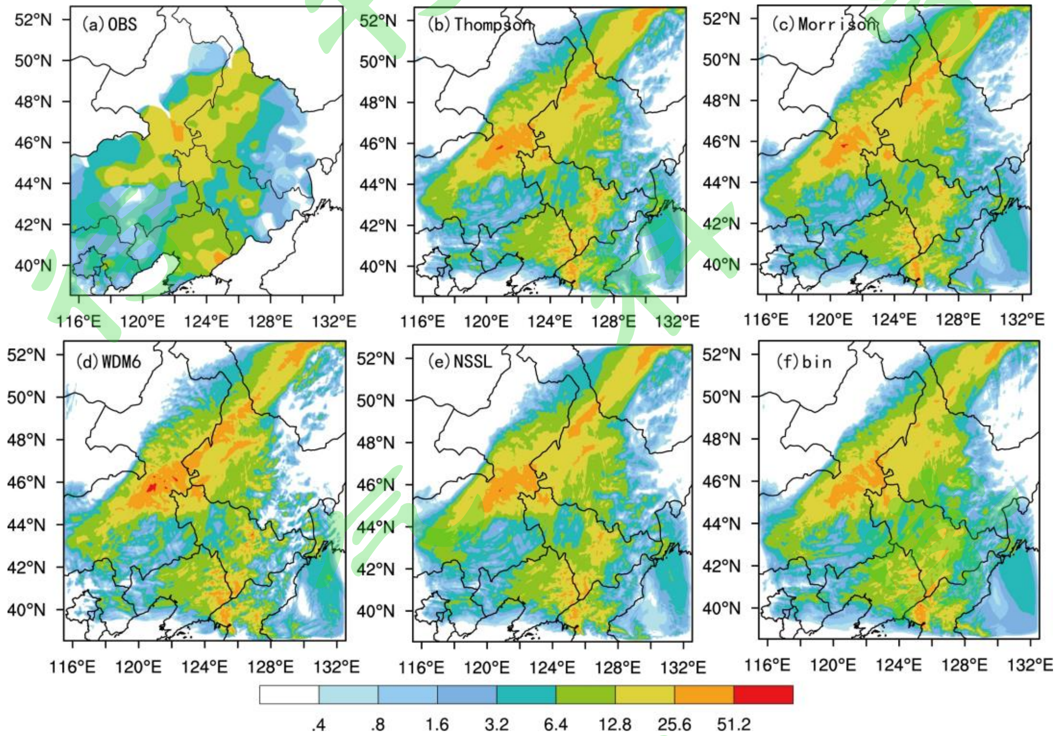

图 7 实况与不同微物理参数化模拟的 24 小时累计降水量（单位：mm），时间为 2020 年 4 月 19 日 06 时-20 日 06 时

Fig.7 Observed and simulated spatial distribution of the 24h accumulated rainfall during 0600 UTC 19 April 2020-0600 UTC 20 April 2020 for simulation. (units: mm)

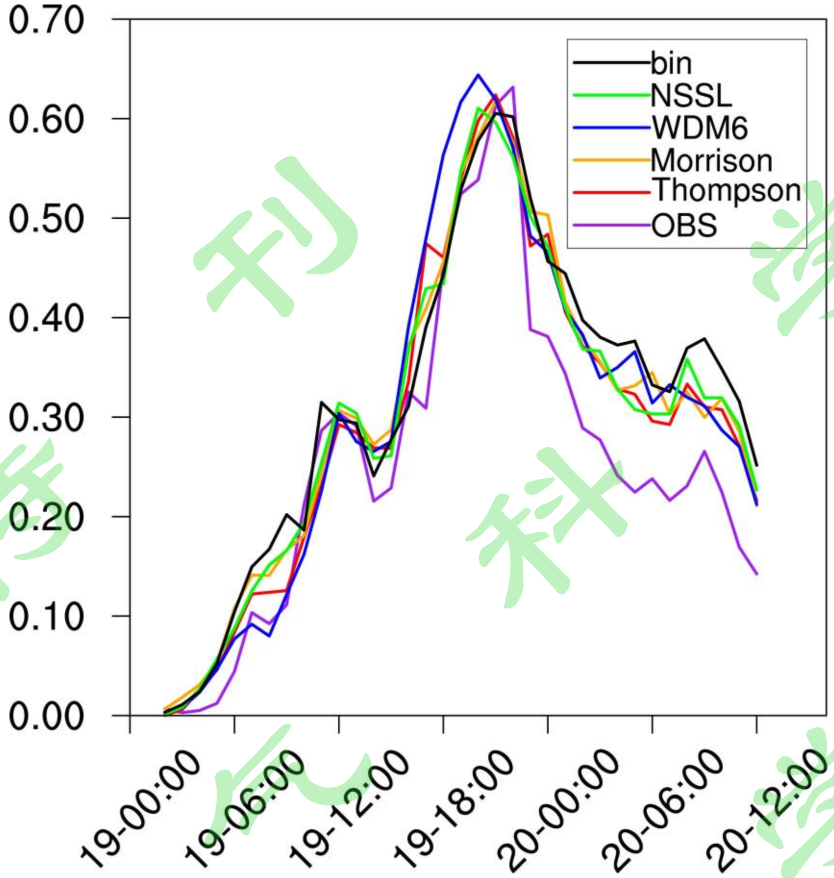

图 8 东北 258 个地面自动站与不同微物理参数化模拟的平均 1 小时累计降水量时间演变(单位：mm）

Fig.8 Temporal evolution of average 1-hour accumulated rainfall at 258 automatic ground stations in Northeast China and simulated by different microphysical parameterization. (units: mm)

表 3 1 小时累计降水量统计评估

Table 3 1-hour accumulated rainfall statistical assessment.

方案	Thompson	Morrison	WDM6	NSSL	bin
相关系数（corr）	0.9577	**0.9591**	0.9510	0.9567	0.9410
均方根误差（Rmse）	**0.0640**	0.0685	0.0749	0.0675	0.0816

4 微物理参数化方案对云内热动力的影响

云中的动力和热力场能为云中的微物理过程提供背景流场，并影响云和降水粒子的数浓度、初始尺度谱以及相应的物理性质，规范了微物理过程进行的速率和持续的时间，以及最终降水物的尺度。反过来，云中的微物理过程对热动力有很好的反馈作用。通过凝结、蒸发、凝华等过程改变水汽分布，相变潜热的释放

和吸收，为云动力过程提供了重要的热源和热汇。因此对云微物理结构进行分析需要对云内热动力结构进行分析。图 9 是 5 个微物理参数化方案模拟的区域平均垂直速度场和风场结构的剖面。充足的水汽输送和旺盛的上升运动是降水产生的基本条件，上升运动可使水汽从未饱和状态达到饱和状态，从而有利于降水形成。从图中的风场结构看，该地区主要吹偏南风，可以从南方带来暖湿的水汽，有利于降水的形成。通常降雪过程的对流较弱，因此总体上模拟的垂直速度量级都在 2m/s 以下。5 个微物理参数化方案模拟垂直速度场都以上升运动为主，300hPa 以上垂直速度基本接近 0。在整个对流过程中，对流发展阶段（图 9a2、b2、c2、d2、e2）的上升运动达到最强，到了成熟阶段（图 9a3、b3、c3、d3、e3），强对流已经变弱并逐步消散，但是 Morrison 方案模拟的带状强上升运动中心仍然比较强，说明 Morrison 方案模拟的强上升运动持续时间比其他方案更长，这与 Morrison 方案模拟的降水量（图 8）在 19 日 16 时-21 时这段时间内比其他方案偏高是相对应的。

图 10 为涡度场的垂直剖面，从涡度场可知，随着对流系统的发展，正涡度不断加强，范围也不断向高层发展，说明辐合上升运动不断加强。总体上低层涡度为正，为辐合区，中层涡度为负，为强的辐散区，这种低层辐合，高层辐散的环境配置有利于强对流系统的形成发展，有利于降水形成（宗志平，2006）。刘宁微（2006）分析了 2003 年 3 月辽宁的暴雪过程，指出低空辐合和高空辐散，导致上升运动的加强以及低层正涡度的产生和维持而产生的垂直方向上水汽凝结是该暴雪过程的形成机制，5 个微物理参数化方案模拟的涡度都体现了这个特征。Thompson 方案（图 10a3）和 NSSL 方案（图 10d3）模拟的低层正涡度（>0.0008）延伸高度更高，说明辐合上升运动更强，这与 Thompson 方案和 NSSL 方案的雷达回波顶较高是一致的。在初始阶段（图 10a1、b1、c1、d1、e1），正涡度中心在 850hPa 附近发展，随着对流系统的发展（图 10a2、b2、c2、d2、e2），正涡度中心开始向高层发展，达到 500hPa 附近，正涡度中心伴随着有负涡度中心，到了成熟阶段（图 10a3、b3、c3、d3、e3），正涡度中心已经逐渐消散。在对流发展阶段，5 个微物理参数化方案在 600hPa 以下均有波列分布，但是 bin 方案的波列结构更细小、数量更多、更明显，这主要是因为 bin 方案将粒子群分档处理，没有捆绑不同粒子类型运动，更能细致描述出不同粒子的下沉拖曳作用。

图 11 是扰动位温和总水凝物混合比的垂直分布图，扰动位温是三个对流发展阶段（初生、发展、成熟）分别与模式初始时刻（19 日 00 时）的差值。从扰动位温来看，5 种方案都模拟出了负-正-负的位温结构，即在低层（700hPa 以下）扰动位温为负值，在中层（700-500hPa）扰动位温为正值，在中高层（500-300hPa）扰动位温为负值，5 种微物理参数化方案模拟的扰动位温差异不明显。随着对流系统的发展，扰动位温不断加强，Thompson 方案模拟的成熟阶段（图 11a3）的扰动位温在低层发展最强烈，说明该方案模拟的冷池强度最强，更有利于对流系统发展。水凝物主要分布在 500hPa 以下的中低层区，不同的微物理参数化方案模拟的总水凝物分布与垂直速度是对应的，垂直上升运动中心对应着水凝物的混合比最大值中心，强上升运动的延伸高度和宽度对应着水凝物的延伸高度和宽度。

为了更细致的描述整个对流过程的垂直速度、涡度以及扰动位温特征，选取了部分区域进行区域的最大最小垂直速度、涡度以及平均扰动位温随时间演变特征统计（图 12），不同微物理参数化方案所选取的区域位置如图 4（b3、c3、d3、e3、f3）所示。从图中可知，各方案的垂直速度、涡度和扰动位温走势基本一致，涡度的走势与垂直速度的走势基本一致，从整体上看，19 日 10 时左右，WDM6 方案模拟的最大垂直速度（图 12a1）和最大涡度（图 12b1）与其它方案相比明显偏高，到了 11 时~20 时左右，其最大垂直速度又明显比其他方案偏小，这主要是因为在 11 时~20 时这段时间，WDM6 方案模拟的降水（图 8）明显比其他方案高，比较大的降水引起粒子的下沉拖曳作用，使得其垂直上升运动明显降低。本次暴雪过程主要发生在 19 日 16 时~20 日 03 时，并不是发生在对流运动最强烈的时段，而是发生在垂直速度极值和涡度极值都趋于变小的时段，说明相对静稳的环境，可能更有利于降雪发生。从平均扰动位温分布走势图来看（图 12c），从 19 日 00 时开始，扰动位温不断增加，到 19 日 06 时，达到最大值，开始维持在一个稳定的数值，到了 19 日 16 时，扰动位温开始逐步下降，到 20 日 03 时以后又开始回升，扰动位温下降的时间段对应着强降雪时段（图 8），所以气温的冷却作用可能是此次暴雪天气过程的形成的机制之一。从整个过程来看，bin 方案和 Morrison 方案的扰动位温最大，Thompson 方案的扰动位温最小。

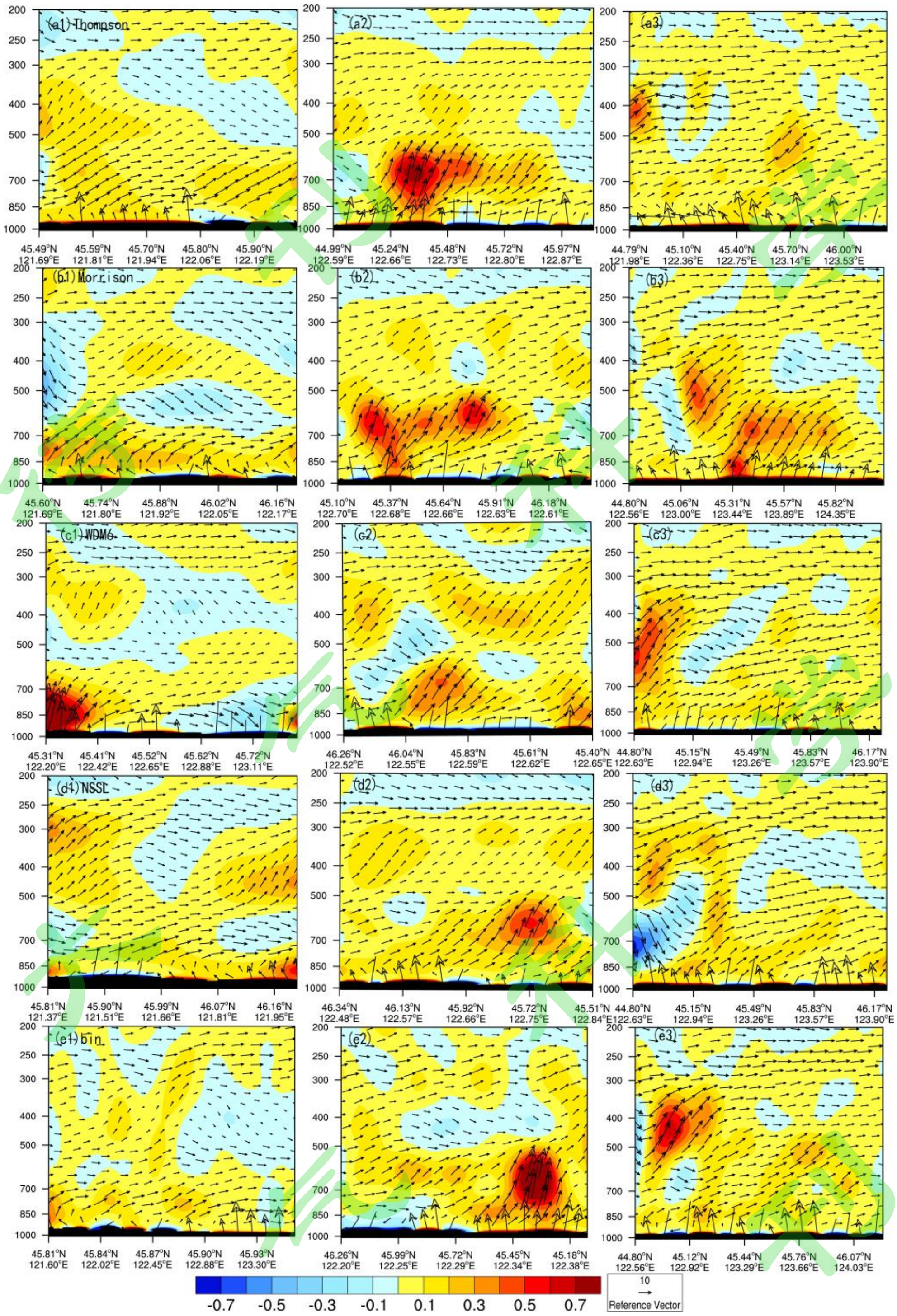

图 9 五种方案模拟的垂直速度 (填色，单位：m/s)、风场（箭矢，单位：m/s），时间如图 4

Fig.9 Vertical cross sections of the vertical velocity (shaded, units: m/s) and winds (vectors, units: m/s) simulated by different microphysical parameterization, The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4.

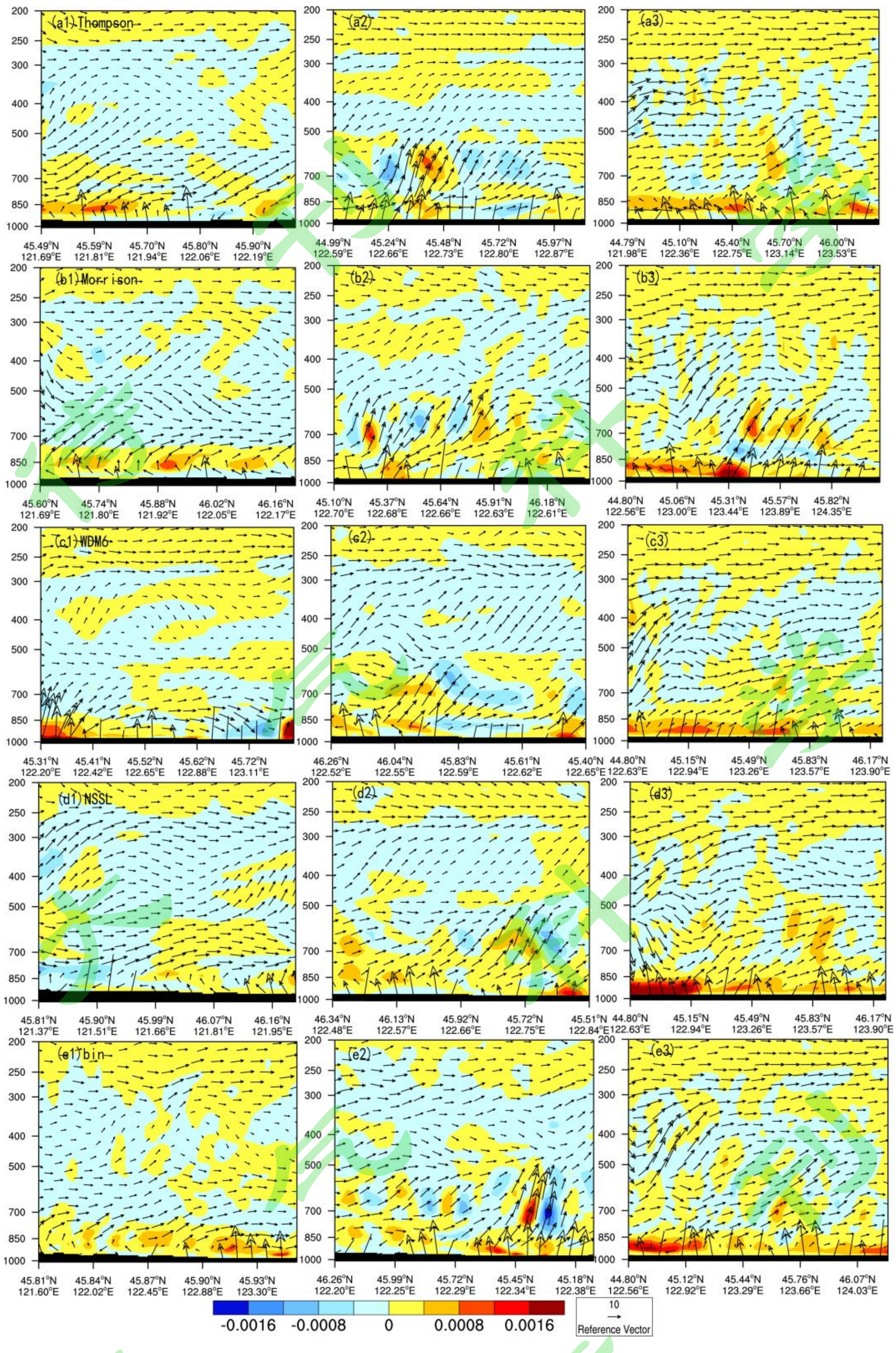

图 10 微物理参数化方案模拟的涡度场（填色，单位：$10^{-5}1\ s^{-1}$）和风场（箭矢）垂直剖面，时间和剖面位置如图 4

Fig.10 Vertical cross sections of the vorticity field (shaded, units: $10^{-5}1\ s^{-1}$) and wind field（vector, unit：m/s）simulation by different microphysical parameterization. The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4.

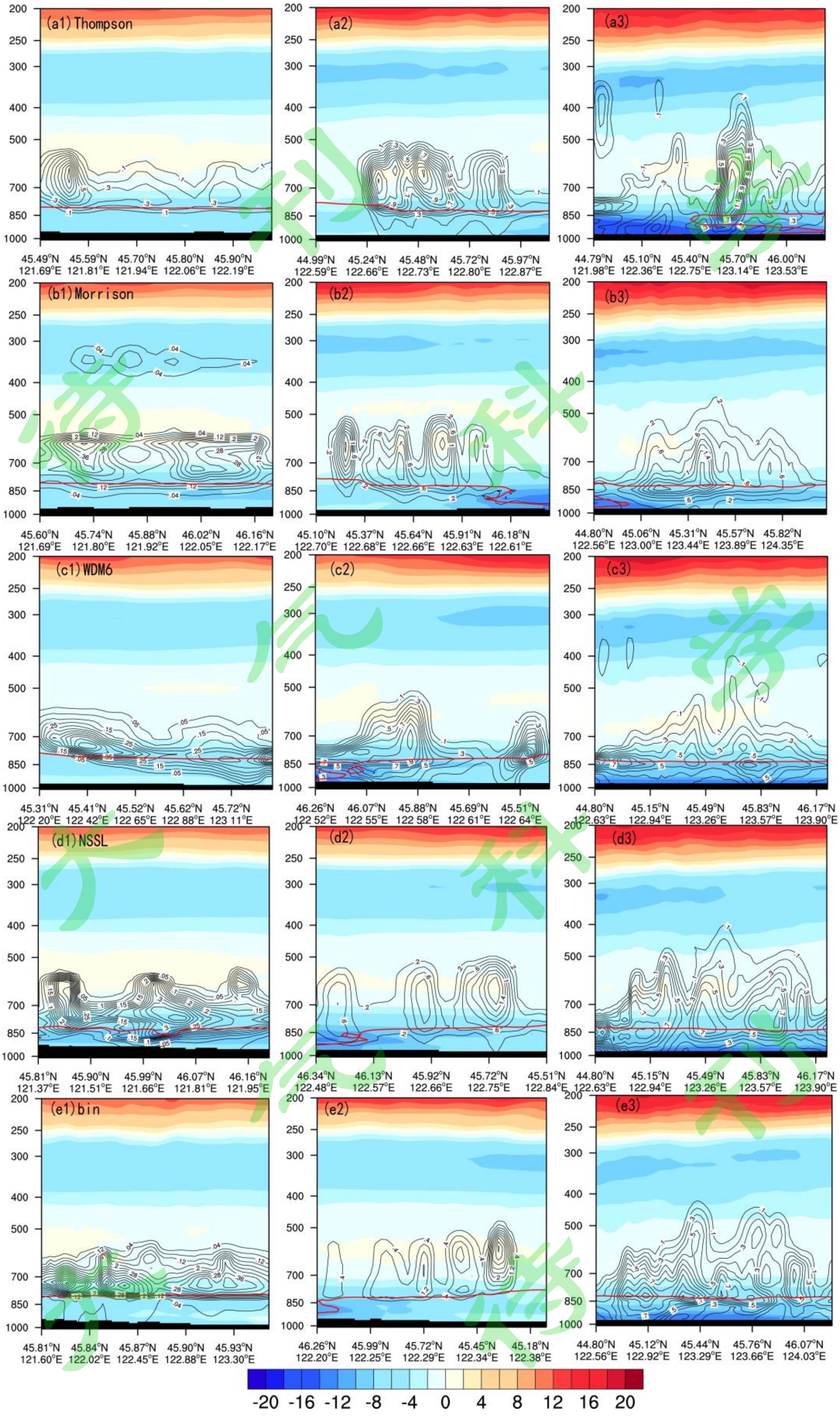

图 11 不同方案模拟的扰动位温(填色，单位：K)和总水凝物混合比(等值线，单位：g/kg)的垂直剖面，红色实线为0℃等温线，时间和剖面位置如图 4

Fig.11 Vertical cross sections of potential temperature perturbation (shaded, units: K) and total mixing ratio (contours, units: g/kg). The red solid lines represent the 0℃ isotherms. The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4.

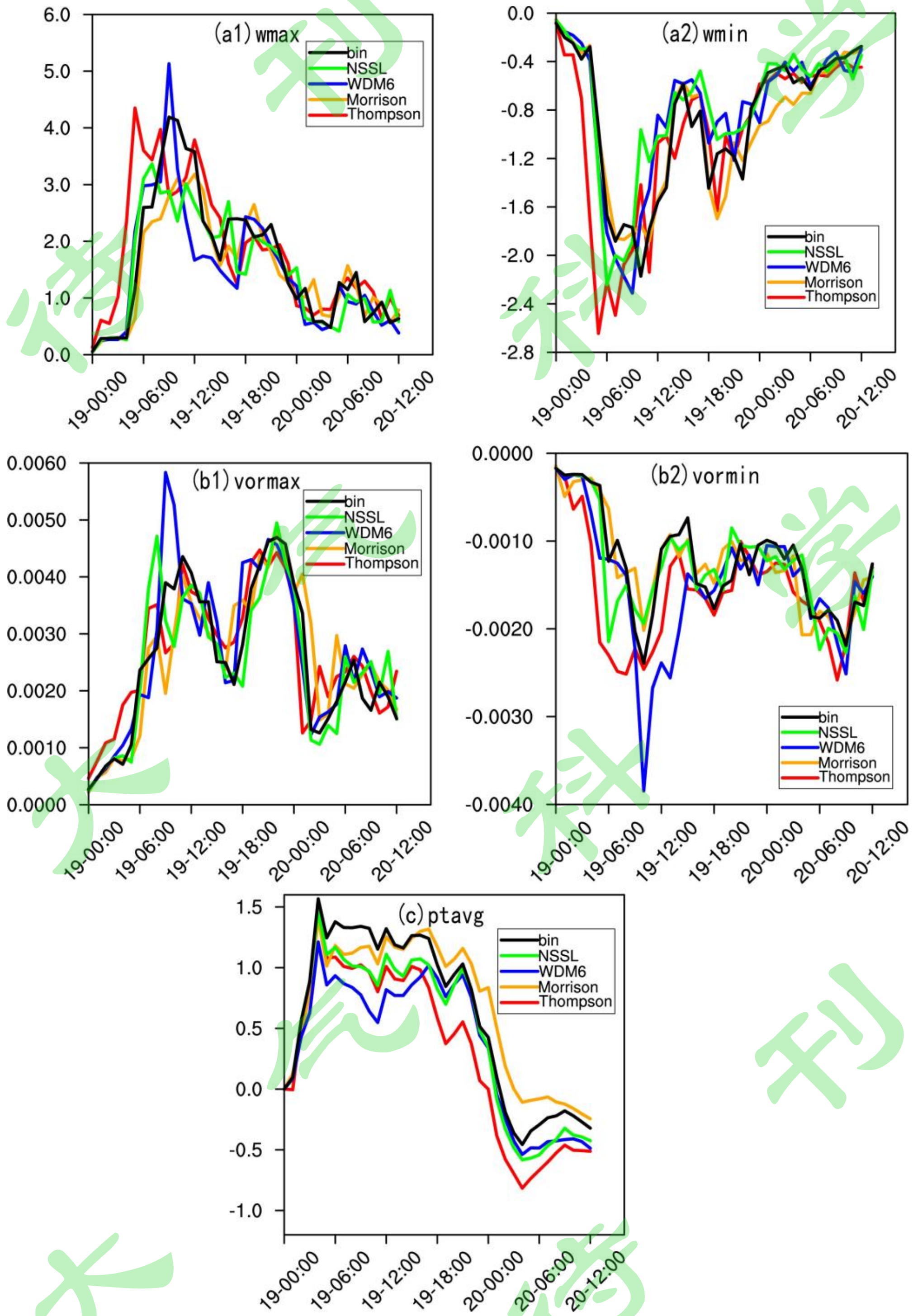

图 12 不同微物理参数化方案模拟的垂直速度(a1、a2)、涡度(b1、b2)和扰动位温(c)时间演变

Fig.12 Temporal evolution of vertical velocity(a1, a2)、vorticity (b1, b2)and potential temperature perturbation (c) simulated by different microphysical parameterization.

5 微物理参数化方案对水凝物的影响

5.1 水凝物的垂直廓线

云微物理过程中，水成物的分布在很大程度上反映了微物理过程中水汽与降水粒子之间相互转换的热力动力过程（许广，2017），对云微物理过程特别是水成物的分析有助于了解降水过程的机制。从图 13 可看出，5 种微物理参数化方案模拟的水凝物含量和分布存在较大差异，从整体的水凝物混合比可知，所有的微物理参数化方案中，占比最大的都是雪粒子，这与本次个例是暴雪天气过程相对应。冰晶主要集中在 8km 附近，3km 为雪粒子最大层，2km 为霰粒子最大层，1.5km 为云水最大层，雨水主要分布在 2km 以下的暖区。对于雪、霰、云水以及雨水的模拟，各方案模拟的廓线除了在量级上有区别外，其分布高度基本一致，而对冰晶的模拟，各方案模拟的廓线不管在强度和分布高度上都存在很大的差异，说明不同的微物理参数化方案对冰晶粒子的描述存在很大差异。

通常雷达反射率与大气中的雨、雪、霰等水凝物有关，其中雨水粒子的反射率最强，雪粒子的反射率最弱。5 种微物理参数化方案均模拟出了大气低层的雨水粒子（图 13e1、e2、e3），但是 WDM6 方案模拟的雨水粒子明显比其他方案的高，这是造成 WDM6 方案模拟的反射率剖面在低层（850hPa 以下）比其他方案高且深厚的原因。NSSL 方案模拟的雨水粒子伸展高度最高，造成 NSSL 方案模拟的雷达回波伸展高度也高。从雪粒子的整个时空分布来看，总体上 bin 方案模拟的雪粒子量级在对流初生阶段和发展阶段比其他方案偏高，但是在成熟阶段与其它方案基本一致。Thompson 方案模拟的雪粒子量级在成熟阶段，其低层的雪粒子明显比其他方偏高，说明 Thompson 方案模拟的地面降雪量最大。而霰粒子的空间分布各方案模拟的正好与雪粒子相反，bin 和 Morrison 方案模拟的雪粒子偏高，而模拟的霰粒子含量最低，WDM6 方案模拟的雪粒子偏低，而模拟的霰粒子含量偏高。云水粒子主要集中在 2km 高度附近，在对流初生阶段（图 13d1）和对流发展阶段（图 13d2），各方案模拟的云水粒子含量和高度出现较大偏差，但到了成熟阶段（图 13d3），各方案模拟的云水粒子不管是在量级还是在分布高度上基本一致。从模拟的冰晶粒子分布来看，各方案存在很大的差异，WDM6 方案模拟的冰晶粒子含量最高，且其延伸范围广，从低层至高层 9km 附近均有

冰晶粒子存在。Morrison 方案和 NSSL 方案模拟的冰晶粒子含量也较高，但是两个方案模拟的冰晶粒子分布高度存在很大区别，Morrison 方案主要集中在 8km 的高层，而 NSSL 方案主要集中在 3km 的中低层，bin 和 Thompson 方案模拟的冰晶粒子含量最少。从整个时间演变上看，在对流系统初生和发展阶段，总体上各方案模拟的水凝物在量级和分布高度上都存在较大的差距，到了成熟阶段，各方案模拟的水凝物趋于一致。

图 14 是数浓度的垂直廓线，由于 WDM6 方案只预报出了雨水和云水数浓度，Thompson 方案只预报了冰晶和雨水数浓度，NSSL 方案没有预报出云粒子，因此我们只给出了各个方案预报出的水凝物数浓度。从模拟的水凝物数浓度来看，各方案存在很大的差异。Morrison 模拟的冰晶、雪粒子以及霰粒子等固态水凝物的数浓度都很大，基本都大于其他方案，从云水的数浓度分布来看，WDM6 方案远大于 bin 方案，NSSL 方案和 WDM6 方案模拟的雨水远大于其他方案，bin 方案模拟的水凝物数浓度与其它方案相比都很弱。

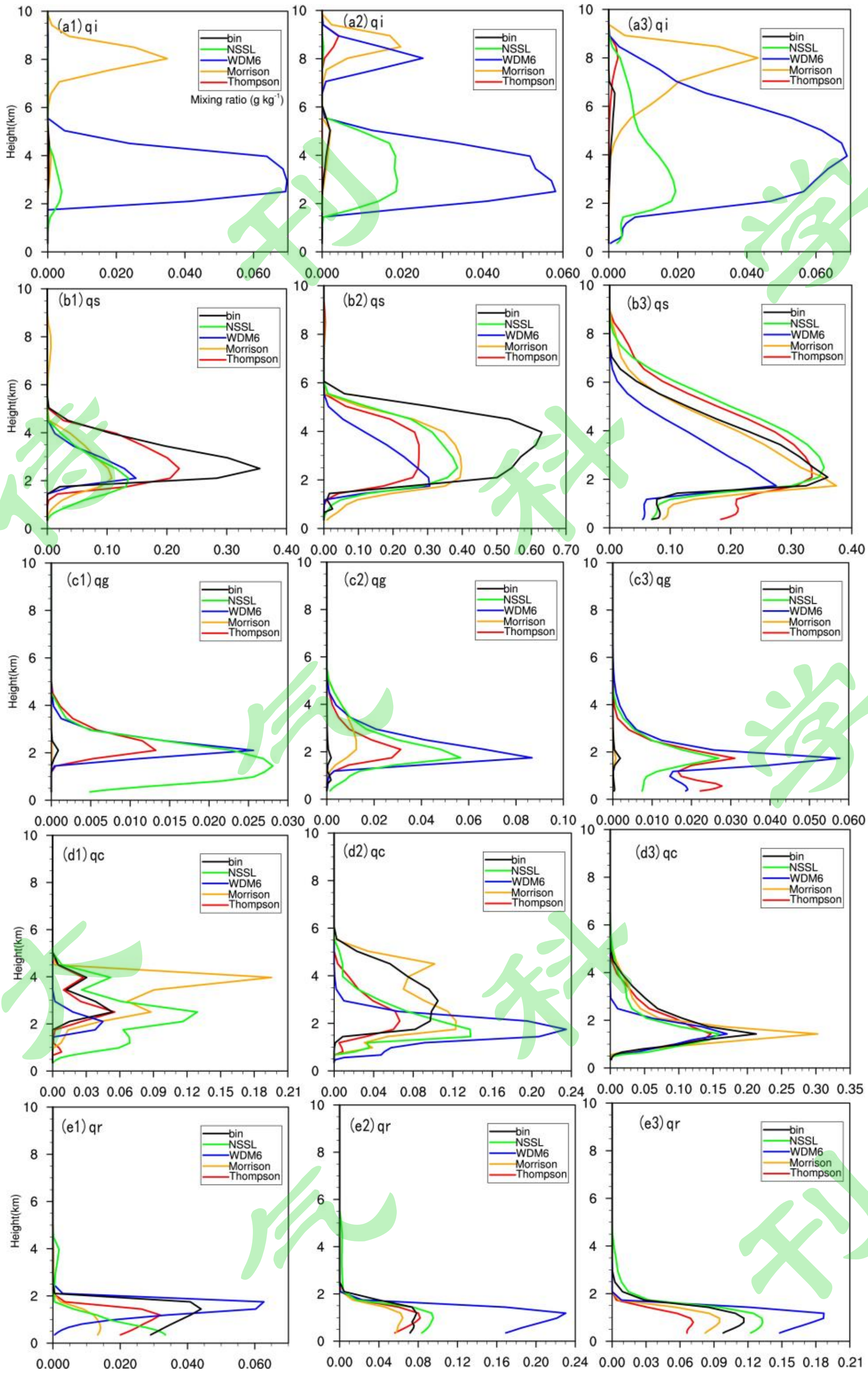

图 13 区域平均的水凝物混合比垂直廓线（单位：g/kg），（a1、a2、a3）冰晶，（b1、b2、b3）雪，（c1、c2、c3）霰，（d1、d2、d3）云水，（e1、e2、e3）雨水，时间和位置如图 4

Fig.13 Vertical profiles of the mean mixing ratio of (a1, a2, a3) ice, (b1, b2, b3) snow, (c1, c2, c3) graupel, (d1, d2, d3) cloud water, and (e1, e2, e3) rain water (units: g/kg). The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4.

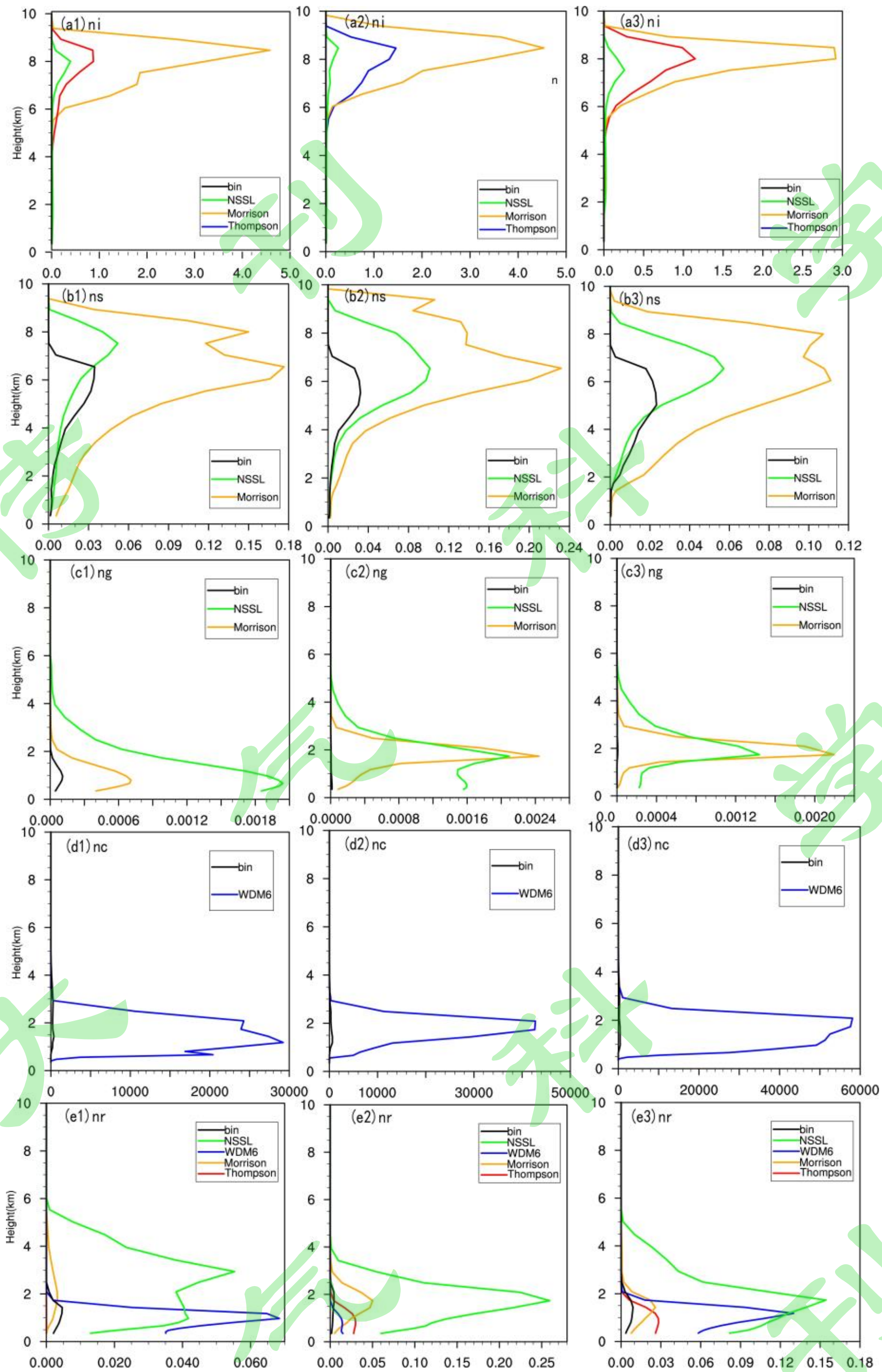

图 14 区域平均的水凝物数浓度垂直廓线（单位：$10^5 kg^{-1}$），（a1、a2、a3）冰晶，（b1、b2、b3）雪，（c1、c2、c3）霰，（d1、d2、d3）云水，（e1、e2、e3）雨水，时间和位置如图 4

Fig.14 Vertical profiles of the mean mixing ratio of (a1, a2, a3) ice, (b1, b2, b3) snow, (c1, c2, c3) graupel, (d1, d2, d3) cloud water, and (e1, e2, e3) rain water. The analysis time and the locations of cross sections are denoted in Fig.4 (units: $10^5 kg^{-1}$).

5.2 水凝物的时间-高度剖面

不同的微物理参数化方案对水凝物的模拟在时间层上也存在较大差异（图15），对于云粒子，各方案模拟的强度基本一致，Morrison 方案模拟的云顶高度比其他方案偏低。对于冰晶粒子和雪粒子，其分布范围较广，出现多个极值中心，从时间轴上看，NSSL 方案模拟的冰晶粒子出现时间比别的方案要晚了 1 个小时，Thompson 方案在 4 月 19 日 12 时-13 时没有模拟出冰晶。Thompson 方案模拟的雪粒子在 19 日 18 时已经开始延伸到地面，而其他方案模拟的雪粒子在 19 时左右才开始延伸到地面，说明 Thompson 方案模拟地面最早降雪时间比比其他方案模拟早了 1 个小时。对于雨水粒子的模拟，雨水主要集中在上升气流前侧的低层，5 个方案模拟的雨水持续时间基本一致，开始降雨和结束时间也基本一致，但是 bin 方案模拟的最强降雨时间比其他方案晚了 1 小时左右。对于霰粒子的模拟，除了在强度上存在较大差异外，在时间周期上也存在较大差异，bulk 方案模拟的霰粒子在 19 日 07 时开始有霰粒子，而 bin 方案在 12 时才有霰粒子，晚了将近 5 个小时；19 日 23 时，霰粒子基本消失，但是 WDM6 方案模拟的霰粒子在 20 日 02 时左右才全部小时，晚了将近 3 小时，说明 WDM6 方案模拟的霰粒子在强度上大于其它方案，时间周期上也比其它方案长。bin 方案和 Morrison 方案模拟的霰粒子在强度上比其他方案弱，持续时间也比其他方案短。

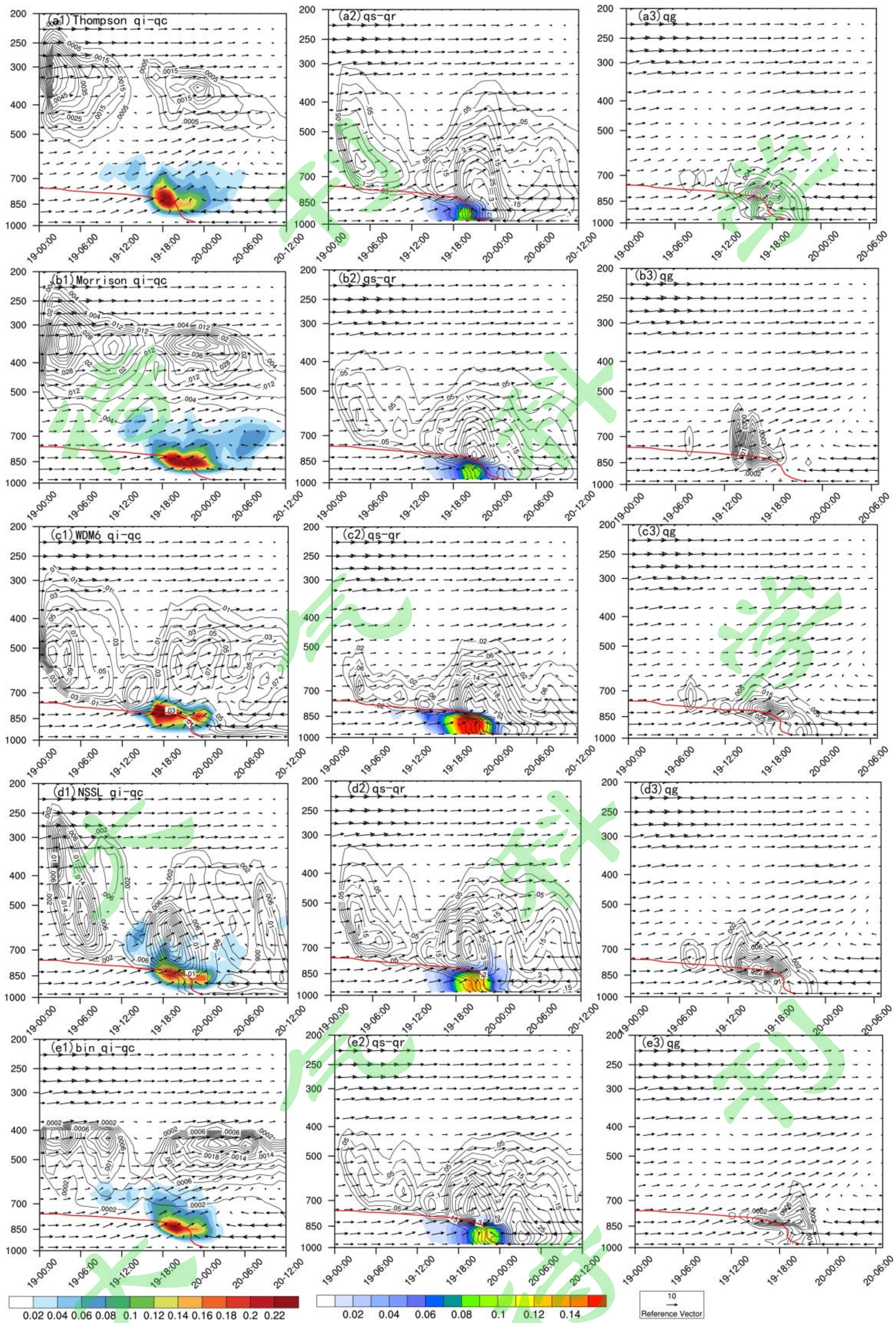

图 15 不同微物理参数化方案模拟的水凝物混合比的时间-高度剖面分布，（a1、b1、c1、d1、e1）云水混合比（qc，填色）和冰晶混合比（qi，等值线）；（a2、b2、c2、d2、e2）雨水混合比（qr，填色）和雪粒子混合比（qs，等值线）；（a3、b3、c3、d3、e3）霰粒子混合比（qg，

等值线)；（单位：g/kg，红色线为 0℃线）

Fig.15 Time-height cross sections of the (a1, b1, c1, d1, e1) mean cloud water mixing ratio (qc, shaded) and mean cloud mean ice mixing ratio (qi, contours), (a2, b2, c2, d2, e2) mean rain water mixing ratio (qr, shaded) and mean snow mixing ratio (qs, contours), (a3, b3, c3, d3, e3) mean graupel mixing ratio (qg, contours) of different microphysical parameterization scheme. (units: g/kg, the red solid lines represent the 0℃ isotherms)

6 结论

通过对 2020 年 4 月 19 日-20 日发生在我国东北地区的一次大范围暴雪天气过程进行不同微物理参数化方案（Thompson、Morrison、WDM6、NSSL、bin）的数值模拟，探究不同微物理过程对暴雪天气过程的影响。比较了 5 种微物理参数化方案模拟的雷达反射率、地面降水量，动热力过程以及微物理场特征。进而了解不同微物理参数化方案对我国东北地区的适应性问题，以期为改进微物理参数化方案提供一定的参考。本文得出的结论如下：

（1）不同微物理参数化方案都较好的模拟出了这次暴雪天气过程的形态和特征，但是 Morrison 方案模拟的效果更好。总体上 bulk 方案模拟的雷达回波结构较松散，单体相对孤立，组织化程度较差，bin 方案模拟的雷达回波中心与实况相比明显偏弱。从模拟的雷达回波剖面上看，Morrison 模拟的回波强度、范围和形态更与实况一致。综合主观检验和相关系数、均方根误差统计分析，Morrison 方案模拟的降水量较其他参数化方案更好。因此，Morrison 方案更好的模拟出了本次降雪过程。

（2）尽管不同方案模拟的降水量、雷达回波等差异不明显，但是模拟的云内动力及微物理结构存在明显差别，主要表现在不同云微物理方案模拟的垂直速度和水凝物的时空分布上。bin 方案在 600hPa 高度以下存在明显的涡度波列，这主要是因为 bin 方案将粒子群分档处理，没有捆绑不同粒子类型运动，更能细致描述出不同粒子的下沉拖曳作用，更与实况一致。在强降雪发生前，WDM6 方案模拟的最大垂直速度明显比其它方案强，但到了强降雪阶段，其最大垂直速度又明显比其它方案偏小，这主要是因为 WDM6 方案模拟的降水明显比其它方案高，比较大的降水引起粒子的下沉拖曳作用，使得其垂直上升运动明显降低。

（3）不同方案模拟的雪、霰、云水以及雨水粒子较为接近，而对冰晶的模拟不管在量级还是在分布范围上都存在很大的差异。WDM6 和 NSSL 方案，冰晶分布较其他方案更接近 0℃融化层及以下，甚至达至地面。从整个时间演变上看，在对流系统初生和发展阶段，总体上各方案模拟的水凝物混合比在量级和分布高度上都存在较大的差距，到了成熟阶段，各方案模拟的水凝物混合比趋于一致，这与垂直速度和涡度的演变特征是一致的。

（4）bin 方案和 bulk 方案的模拟差异主要体现在霰粒子和冰晶的模拟，其模拟的量级远小于 bulk 方案，且 bin 方案模拟的水凝物数浓度也远小于 bulk 方案。从水凝物的时间演变特征来看，bin 方案模拟的最强降雨时间比其它方案晚了将近 1 小时，最早降霰时间也比 bulk 方案晚了将近 5 个小时，总体上 bin 方案模拟的霰粒子在强度上比其它方案弱，持续时间也比其它方案短。理论上，bin 方案对粒子变化的描述更与实况一致，与自然图像更接近，但是在这次暴雪天气过程中，bin 方案模拟的雷达回波和降水量不如 bulk 方案，其优势并没有体现出来，且在强度、空间分布上都不如 bulk 方案。

本次研究是基于不同微物理方案对 2020 年 4 月的一次大范围暴雪天气过程进行的数值模拟结果，其研究结论还需要更多的暴雪天气个例进行验证和支撑，特别是局地性的暴雪天气过程是否会得出同样的结论还需要进行进一步的验证。由于本次研究没有双偏振雷达实际观测资料，因此不能对云内细致的动热力和水凝物与实况进行比较。未来的工作将基于偏振雷达的高精度观测资料进行细致地对比分析不同微物理方案模拟的云水粒子的时空分布及三维结构，探讨云微物理影响降雪的可能机制。

参考文献(References)

Adams-Selin RD, van den Heever SC, Johnson RH. 2013. Sensitivity of bow echo simulation to microphysical parameterizations[J]. Weather and Forecasting: 28: 1188-1209.

Alcimoni Nelci Comin, Vanúcia Schumacher, Flávio Justino, et al. 2018. Impact of different microphysical parameterizations on extreme snowfall events in the Southern Andes, Weather and Climate Extremes,Volume 21, Pages 65-75,ISSN 2212-0947.

Khain A P, Beheng K D, Heymsfield A, et al. 2015. Representation of microphysical processes in cloud-resolving models: Spectral (bin) microphysics versus bulk parameterization[J]. Reviews of Geophysics, 53(2):247-322.

崔锦, 周晓珊, 阎琦, 等. 2014. WRF 模式不同微物理过程对东北降水相态预报的影响[J].气象与环境学报, 30(05):1-6. CUI Jin, ZHOU Xiao-shan, YAN Qi，et al. 2014. Impact of different microphysical processes of WRF model on precipitation phase forecasting in Northeast China ［J］. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 30(5):01-06.

Fan J, Liu YC, Xu KM, et al. 2015. Improving representation of convective transport for scale-aware parameterization: 1. Convection and cloud properties simulated with spectral bin and bulk microphysics[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 120: 3485–3509.

Fan J, Han B, Varble A, et al. 2017. Cloud-resolving model inter comparison of an MC3E squall line case. Part 1: Convective updrafts[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 122:9351-9378.

刘宁微. 2006. “2003.3”辽宁暴雪及其中尺度系统发展和演变[J].南京气象学院学报, (01):129-135. Liu Ningwei. 2006. Snowstorm on March 1-2, 2003 and the Development and Evolution of Its Mesoscale System in Liaoning Province[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), (01):129-135.

孟雪峰, 孙永刚, 姜艳丰. 2012. 内蒙古东北部一次致灾大到暴雪天气分析[J].气象, 38(07):877-883. MENG Xuefeng, SUN Yonggang, JIANG Yanfeng. 2012. Weather Analysis on a Disastrous Heavy Snow in Northeast of Inner Mongolia on November 20,2010[J]. Meteorology Monthly (in Chinese), 38(07):877-883.

Morrison H, Milbrandt JA. 2011. Comparison of two moment bulk microphysics schemes in idealized supercell thunderstorm simulations[J]. Monthly Weather Review, 139: 1103-1130.

林文实, 孟金平, 蒙伟光, 等 .2009. 华北暴雪的云微物理参数化方案的比较模拟[J].气象科学, 29(02):2150-2156. Lin Wenshi, Meng Jinping, Meng Weiguang, et al. 2009. Numerical Simulation about A Heavy Snowfall Event in North China: the Sensitivity of Cloud Microphysical Parameterization Schemes[J]. Scientia meteorologica sinica (in Chinese), 29(02):2150-2156.

史月琴, 楼小凤. 2006. 显式云物理方案的研究进展[J].气象科技, 34(5): 513-520. Shi Yueqin, Lou Xiaofeng. 2006. Progress in Researches on Explicit Cloud Microphysical Schemes[J]. Meteorological Science and Technology, 34(5): 513-520.

Khain AP, Lynn B, Shpund J. 2016. High resolution WRF simulations of Hurricane Irene: Sensitivity to aerosols and choice of microphysical schemes. Atmospheric Research:167:

129-145.

Parvin Ghafarian. 2021. Impact of physical parameterizations on simulation of the Caspian Sea lake-effect snow, Dynamics of Atmospheres and Oceans,Volume 94, 101219, ISSN 0377-0265.

秦华锋，金荣花. 2008. “0703”东北暴雪成因的数值模拟研究[J].气象, (04):30-38. Qin Huafeng Jin Ronghua. 2008. Numerical Simulation Study of the Cause of Snow storm Process in Northeast of China on March 3-5 of 2007[J]. Meteorology Monthly (in Chinese), (04):30-38.

Qian QF, Lin YL, Luo YL, et al. 2018. Sensitivity of a simulated squall line during southern China monsoon rainfall experiment to parameterization of microphysics[J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres: 123: 4197-4220.

滕方达，李得勤，蒋大凯，等. 2020.微物理过程参数化方案对辽宁一次暴雪的数值模拟差异分析[J].气象学报,78(04):608-622. Teng Fangda, Li Deqin, Jiang Dakai, et al. 2020. Comparative analysis of simulations on a heavy snow event in Liaoning province using different cloud microphysical parameterization schemes. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78（4）:608-622.

王焕毅，张翘，李冰，等. 2017. 本溪市大雪和暴雪天气特征与预报分析[J].现代农业科技, (20):194-195. Wang Huanyi, Zhang Qiao, Li Bin, et al. Analysis on Weather Characteristics and Forecast of Heavy Snow and Snowstorm in Benxi City [J]. Modern Agricultural Science and Technology (in Chinese), (20):194-195.

许焕斌，段英. 1999. 云粒子谱演化研究中的一些问题[J].气象学报,(04):450-460. Xu Huanbin, DuanYing. 1999. Some Question in Studying the Evolution of Size Distribution Spectaum of Hydrometeor Particles[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), (04):450-460.

许广，费建芳，黄小刚，等. 2017. 一次飑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(03):283-292. XU Guang, FEI Jianfang, HUANG Xiaogang, et al. 2017. Simulation experiments of cloud microphysical parameterization schemes on a squall line and its genesis analysis[J]. Scientia meteorologica sinica (in Chinese), 37(03):283-292.

尹金方，王东海，翟国庆.2014.区域中尺度模式云微物理参数化方案特征及其在中国的适用性[J].地球科学进展.29(2): 238-249. Yin Jinfang, Wang Donghai, Zhai Guoqing. 2014. A Study of Characteristics of the Cloud Microphysical Parameterization Schemes in Mesoscale Models and Its Applicability to China[J]. Advances in Earth Science (in Chinese). 29(2): 238-249.

Yin Lei, Ping Fan, Mao Jiahua. 2017. A comparative study between bulk and bin microphysical schemes of a simulated squall line in East China[J]. Atmospheric Science Letters,18(5).

Lei Yin, Fan Ping, Jiahua Mao. 2019. Impact of cloud microphysical processes on the simulation of a hailstorm in East China[J]. Atmospheric Research ,219(5).

Wu D, Dong QX, Xi BK, et al. 2013. Impacts of microphysical scheme on convective and stratiform characteristics in two high precipitation squall line events[J]. Journal of Geophysical Research Atmosphere: 118: 119 135.

宗志平，刘文明. 2004. 2003 年华北初雪的数值模拟和诊断分析[J].气象,(11):3-8. Zong Zhiping, Liu Wenming. 2004. Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of the First Snow in North China, 2003[J]. Meteorology Monthly (in Chinese), (11):3-8.