Vol. 46 No. 3

DOI: 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2024. 03. 012

侯文轩,华维,郭艺媛,等.夏季青藏高原那曲地区一次对流降水及云微物理的数值模拟 [J].西南大学学报(自然科学版), 2024,46(3):135-146.

夏季青藏高原那曲地区一次对流降水及 云微物理的数值模拟

侯文轩^{1,2}, 华维^{1,3}, 郭艺媛¹, 范广洲¹

 成都信息工程大学 大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室/ 四川省气象灾害预测预警工程实验室,成都 610225;

2. 上海市气象信息与技术支持中心,上海 200030;

3. 中国科学院大气物理研究所 竺可桢一南森国际研究中心, 北京 100029

摘要:利用 NCEP FNL 再分析资料为初始场,通过 WRF 中尺度数值模式(V4.0版)对 2019 年夏季青藏高原那曲 地区一次对流云降水及云微物理特征进行了数值模拟.结果表明:WRF 模式能够较好地再现本次降水的时空特征 和云发展过程.固态水凝物分布高度普遍高于液态水凝物,其中冰和雪主要位于中高层,中低层以霰和云水为主, 低层多为雨水粒子;降水过程中雪、霰和雨水粒子高值中心出现时段与降水峰值时间较好对应,表明本次降水以冰 相过程为主,且雪粒子和霰粒子的贡献最大,其原因为雪粒子通过贝杰龙过程和自身的碰并过程增加,霰粒子则通 过与雪粒子碰并和自身凇附作用不断增长,随着上升气流逐渐减弱,大量霰粒子和部分雪粒子落至0℃层左右融 化形成降水,加之雨水与云水的碰并作用,进一步促进了降水的形成.此外,暖雨过程对降水的直接贡献较小,但 对冰相粒子的形成贡献明显.

关 键 词: 青藏高原; 对流云降水; 云微物理; 数值模拟
中图分类号: P456.7
文献标志码: A
文章编号: 1673-9868(2024)03-0135-12



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Numerical Simulation of A Case of Convective Cloud Precipitation in Summer and Its Micro-Physical Characteristics at Naqu over the Qinghai-Tibet Plateau

HOU Wenxuan^{1,2}, HUA Wei^{1,3}, GUO Yiyuan¹, FAN Guangzhou

收稿日期: 2023-01-01

基金项目:国家自然科学基金项目(42075019);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010203).

作者简介: 侯文轩, 硕士, 主要从事青藏高原云微物理过程研究.

通信作者:华维,博士,教授.

- School of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province/ Engineering Laboratory of Meteorological Disasters Prediction and Early Warning of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
- 2. Shanghai Meteorological Information and Technology Support Center, Shanghai 200030, China;
- Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract: Based on Weather Research and Forecast system mesoscale model (WRF V4.0 version) and the NCEP FNL reanalysis data, a convective cloud precipitation and cloud micro-physical characteristics in Nagu area of the Qinghai-Tibet Plateau in summer of 2019 were simulated. The results show that WRF model can reproduce the spatial and temporal characteristics of precipitation and cloud development process. The distribution height of solid hydrometeors was generally higher than that of liquid hydrometeors, among which ice crystals and snow were mainly located in the middle and upper layers, graupel and cloud water were mainly in the middle and lower layers, and rainwater particles were mostly in the lower layers. In the process of precipitation, the high value centers of snow, graupel and rain particles occurred at the same time as the peak time of precipitation, which shows that the precipitation was dominated by ice phase process, and the contribution of snow particles and graupel particles was the largest. The reason is that snow particles increase through the Bergeron process and their own confluence process, while graupel particles increase through the accretion of snow particles and their own accretion. With the gradual weakening of the updraft, a large number of graupel particles and some snow particles fall to the 0 °C layer and melt to form precipitation. In addition, the confluence of rain and cloud water further promotes the formation of precipitation. Apart from this, the direct contribution of warm rain process to precipitation is small, but the effect on the formation of ice particles is obvious.

Key words: the Qinghai-Tibet Plateau; convective cloud precipitation; cloud micro-physics; numerical simulation

青藏高原(以下简称"高原")是我国大部分江河的发源地,有"亚洲水塔"之称.高原以其特殊的大地形 动力作用和热源驱动作用极大程度地控制了东亚乃至全球水分循环的平均状态^[1-2].在高原独特的高低层 风场配置和急流的引导作用下,对流云团东移出高原是影响我国长江流域降水的重要因子之一^[3-4].夏季 高原强烈的地形加热激发出频繁活跃的对流系统,形成高原上的平均整层上升气流,加之源于低纬海洋的 暖湿气流提供了充足的水汽,导致夏季的高原成为强烈对流活动的区域^[5].因此,研究高原对流云对预报 我国降水具有重要意义.

由于高原地理环境恶劣,气象站点稀疏,常规气象观测资料匮乏,而高原对流云又具有空间尺度小、 生命周期短的特点,这给相关研究带来很大困难,使得对高原云的研究一直存在着较大的不确定性^[6-9].随 着卫星、雷达遥感以及数值模式的飞速发展,学者们对高原云降水的研究有了更深入的了解.江吉喜等^[10] 早在 2002 年就曾利用静止气象卫星(GMS)指出了夏季高原对流云活跃、频繁且强度不大的普遍特征,同 时揭示了高原对流云午后发展的日变化特点.李典等^[11]通过 TRMM 卫星资料结合再分析资料综合分析 了高原对流云特殊的水平和垂直结构,得出云体在水平和垂直方向上分别为零散块状结构和"被挤压" 状态的空间分布特征.朱平等^[12]进一步指出了高原夏季降水主要以深厚的弱对流降水为主.为更深入 了解高原特殊的天气系统,我国自 1979 年开始组织了 3 次大型青藏高原大气科学试验^[13-15].徐祥德 高分辨率的中尺度数值模式能很好地反映复杂地形降水的非线性动力、热力以及微物理过程,因此广 泛应用于云降水过程研究中^[19].中尺度数值天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)数值天气预报模式在各种模式中由于其详细的物理过程以及多样的参数化方案而被广泛应用^[20-21]. 顾小祥等^[22]选用了16种云微物理方案对一次高原切变线暴雨过程进行了数值模拟,发现了高原降水中冷 云降水贡献较大.唐洁等^[23]通过对高原一次对流云降水过程的模拟,发现暖雨过程对降水直接贡献较小, 并指出其对云中霰胚形成有着十分重要的作用.阴蜀城等^[24]进一步揭示了云中水成物各粒子相互转化的 微物理过程.目前通过WRF对高原对流云的研究更多集中于模式验证和降水统计上,而涉及降水过程中 云微物理特征的研究则相对较少.因此,研究高原对流云形成的微物理机制对深入了解高原降水过程有着 十分重要的意义.鉴于此,本研究利用WRF(V4.0版)模式对 2019 年 7 月 14 日高原那曲地区一次对流云降 水过程进行模拟,并对其云微物理结构特征和转化过程进行分析,旨在揭示高原对流云降水的物理机制.

1 资料和方法

1.1 资料来源

本研究所用资料包括:① 美国环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的一日 4 次的 FNL 再 分析资料,空间分辨率为 1°×1°;② 气象大数据云平台提供的全西藏地区自动气象站逐小时降水数据; ③ TIPEX III 设置在那曲气象局内的 Ka 波段毫米波云雷达观测得到的反射率因子等数据;④ 中国气象 数据网提供的风云二号 E 星(FY-2E)观测的相当黑体亮温(Black Body Temperature, TBB)资料.

1.2 试验设计

采用中尺度数值模式 WRF(V4.0版)对青藏高原那曲地区 2019 年夏季 7 月 14 日的一次对流云降水个 例进行模拟.模式初始场和边界场采用 NCEP FNL 资料;模拟采用两层嵌套(9 km 和 27 km)(图 1),模拟 中心位置位于青藏高原那曲地区(35.1°N, 89.7°E),地图投影采用兰伯特投影,垂直方向分为不等距 32 层,顶层气压为 50 hPa,嵌套区域网格格点信息如表 1 所示.云微物理参数化方案选用 Lin 方案^[25],积云 对流参数化方案选用 Grell-Freitas 方案^[26],边界层方案选用 Eta 方案^[27],陆面过程方案选用 Noah 方 案^[28],长波辐射方案选用 Rapid Radiative Transfer Model 方案^[29],短波辐射方案选用 Dudhia 方案^[30].模 式积分步长为 120 s,模式模拟时间从 7 月 14 日 00: 00-24: 00.

模式区域	d01	d02
X,Y方向格点数	134×110	199×142
网格格距	27 km	9 km
左下角母域位置	1×1	30×24
地形资料分辨率	10 m	30 s

表1 嵌套区域网格设置

1.3 异同点

1) 本研究在降水模拟结果的验证上,采用中国气象局的自动气象站点观测资料作为降水"真值",为本 次试验过程提供最可靠的验证资料.





2)本研究在研究对流云发展的模拟结果上,采用 TIPEX III 设置于那曲气象局的 Ka 波段毫米波云雷达的探测资料,作为本次试验过程的实况数据.

3) 本研究通过改动 WRF 模式源代码的方式输出转化源项,在分析高原云微物理结构的基础上,进一步研究本次对流过程中成云致雨的转化机制.

2 天气背景

2019 年 7 月 14 日 00:00-24:00,青藏高原那曲地区发生了一次自西向东的对流性降水天气过程.从 14 日 12 时 500 hPa 高度场(图 2a)上可知,巴尔喀什湖大槽槽前冷空气南下与低纬暖湿气流在高原汇合, 并在那曲地区形成一个闭合低压系统,为本次降水过程提供了动力条件.进一步对水汽通量(图 2b)进行分 析也可发现,高原南侧为水汽通量大值区,低纬地区水汽源源不断涌向高原腹地,在那曲地区形成整个高 原主体的水汽高值中心,其最大水汽含量在 0.6 kg/(m · s)以上,说明本次降水过程中水汽供应充足,有 利于对流系统的形成和发展.

已有研究指出,黑体亮温数据(TBB)能够较好地揭示高原对流云的活动和分布特征,并将 TBB 值≪-32 ℃定义为对流云^[10].采用 FY-2E 观测的 TBB 数据对本次对流云降水过程进行分析(图 3), 图中"○"代表那曲气象站所在位置(31.48°N,92.01°E).由图 3 可见,7 月 14 日 8:00 高原上已有零 星块状云系出现,那曲地区东西两侧云系已有低于-50 ℃的 TBB 值出现,表明此时对流云已经形成;至 中午 12:00,那曲地区对流云发展十分迅速,整个那曲地区已被大片块状对流云系所覆盖,对应的 TBB 值 均已低于-50 ℃,其南侧和东南侧甚至低于-60 ℃,表明此时该区域云顶较高,对流非常旺盛;16:00 对流云系整体东移减弱,那曲上空 TBB 值高于-30 ℃,对流活动开始减弱,云系逐渐消散;20:00 那 曲地区 TBB 值整体达到-20 ℃以上,此时已无明显的对流活动.可见,14 日发生于那曲地区的对流活 动较为旺盛,对流降水主要产生于 12:00-16:00.



图 2 2019 年 7 月 14 日 12:00 500 hPa 位势高度场、风场、整层积分的水汽通量



图 3 2019 年 7 月 14 日 FY-2E 卫星 TBB 空间分布

3 结果和分析

3.1 降水

由 2019 年 7 月 14 日西藏自动气象站降水量和 WRF 模式模拟得到的 24 h 累积降水量空间分布(图 4) 可知,实况降水主要呈现出"西南一东北"横向分布的特点,降水大值中心分别位于高原中部和东北部 (图 4a).从对应的实况模拟场(图 4b)中可发现,模拟结果基本再现了本次降水的"西南一东北"向分布 特征,降水大值区主要位于西藏西部至东北部一线,西藏西南部和东南部也分别存在一个降水大值区, 同时各大值区量级也能够与自动站降水较好吻合,但模拟的雨区范围总体上偏大,其原因可能与高原自 动气象站密度较低,无法获取完整的降水分布有关^[31].



a. 西藏自动站

b. 模拟

图 4 西藏自动气象站(a)与模拟(b)的 2019 年 7 月 14 日 00:00-24:00 高原 24 h 累积降水量空间分布

为进一步验证模式对本次对流云 降水日变化的模拟能力,采用最邻近 插值法将7月14日0:00-24:00模 式模拟结果插值到那曲气象局所在经 纬度,与西藏自动气象站降水小时数 据进行对比(图5).由图5可以发现, 本次对流云降水主要发生在凌晨至清晨 的1:00-7:00和日间的9:00-15:00 两个阶段,模式也基本能够模拟出本次 降水的日变化特征.然而,对于发生于凌 晨至清晨的降水,尽管模拟结果中也有 所体现,但模式对该阶段降水的量级和 逐时演变特征的模拟效果并不理想.进



一步分析可以发现,模式对发生于日间 10:00-16:00 时段的降水具有较好的模拟能力,模式较好地再现 了降水从 9:00 开始发展,至 10:00-11:00 达到峰值,并于 16:00 结束的特征,但对于降水量的模拟略 有误差,两个降水大值时段的表现均低于观测值.

3.2 雷达回波

图 6 为 2019 年 7 月 14 日 00:00-24:00 那曲气象局 Ka 波段毫米波云雷达观测的反射率因子以及模式模 拟的强回波频次与垂直速度分布.从 Ka 波段毫米波云雷达反射率因子的时间一高度分布图(图 6a)来看,反射 率因子对本次天气过程有较好反映,云体发展存在明显的日变化特征,这也与降水实况较一致.进一步选取模 拟的回波强度大于 5dBZ 的回波频次(图 6b)和垂直速度(图 6c)与雷达反射率因子(图 6a)进行对比可知,模拟 值和 Ka 波段毫米波云雷达观测结果相似,其中回波频数最大值出现时间分别为 10:00-12:00 以及 14:00-16:00,而上升气流出现时间与雷达观测回波峰值时间对应,垂直速度可达 50 m/s 以上,之后上升运动逐渐 减弱,表明那曲地区对流活动自上午开始发展,午后发展为对流云体,日落后对流明显减弱,并于夜间逐渐转 为层积云.



图 6 2019 年 7 月 14 日 00:00-24:00 那曲 Ka 波段毫米波云雷达反射率因子、模式模拟的回波频次和垂直速度

综上可见,模式能够较好地刻画本次对流云降水的空间分布和日变化特征,且模拟的回波频次和垂直 速度也能与雷达观测结果和降水实况较好对应.因此,利用 WRF 模式的输出结果对本次对流云降水微物 理过程进行分析具有较高的可行性.

3.3 云微物理结构及转化

3.3.1 云微物理结构

图 7 为模拟的 7 月 14 日 00:00-24:00 那曲地区各相态粒子混合质量比时间—高度分布(图中红色线条 为 0 ℃高度层).由图 7a 可见,冰粒子主要分布于高层 300~100 hPa 范围内,其大值中心位于 250 hPa 附近; 雪粒子(图 7b)分布较广,450~100 hPa 均有存在,但主体位于高层,大值中心主要集中在 200 hPa 左右; 霰粒子(图 7c)和云水粒子(图 7d)则主要出现在中层,其大值中心均位于 450 hPa 高度,其中霰粒子质量比更大,而 云水粒子出现的时间更长;雨水粒子(图 7e)则基本集中于低层,大值中心位于 550 hPa 左右.





就各相态粒子混合质量比的时间演变而言,雨水粒子混合比高值区主要集中于 10:00-13:00,其中 心极值可达到 0.6 g/kg,这与降水产生时间较为吻合,说明高原对流降水于午间开始出现;与此同时,雪 粒子和霰粒子在该时段内均存在大值中心,其极值中心>0.6 g/kg;冰粒子和云水粒子在 10:00-13:00 时段内混合质量比仅为 0.45 g/kg,而二者的大值中心主要分布在 13:00-16:00 时段内,在午后时间段 雨水粒子已基本消散.由此可知,本次对流云降水主要受冰相过程影响,其中雪粒子和霰粒子是天气过程 中冷云水成物的主要组成部分.

3.3.2 云微物理转化过程

云微物理过程实质上是不同水凝物粒子之间的相互转化,因此对降水的形成和发展十分重要^[32].首先 对云微物理结构源项进行分析.Lin方案中共包括6种水生物源汇项^[33],本研究选取对降水贡献较大的雨 水源项、雪源项和霰源项进行分析.雨水源项共4个过程,分别为雪的融化(Msr)、霰的融化(Mgr)、雨水 碰并云水(Ccr)以及云雨的自动转化(Acr).雪源项共5个过程,分别为雪的凝华增长(Svs)、雪的淞附增长 (Ccs)、冰的贝杰龙过程(Bis)、雪碰并冰(Cis)和冰向雪的自动转化(Ais).霰源项共9个过程,其中初生霰 粒子过程(霰胚形成的过程)有4个,分别为过冷雨滴冻结成霰(Frg)、过冷雨滴碰冻雪(Csr)、冰碰冻过冷 雨滴(Cri)和雪向霰的自动转化(Asg). 当霰粒子经过以上过程后,可按照霰的凝华增长(Svg)、霰碰并雪(Csg)、霰碰并冰(Cig)、霰碰并过冷雨滴(Crg)以及霰的凇附增长(Ccg)5类方式增长.

图 8 为 7 月 14 日 12:00 那曲上空雨水、雪和霰源项转化率垂直分布图.由图 8a 可见,雨水主要来自于霰粒子的融化(Mgr),且霰粒子的融化主要发生在 500 hPa,最大转化率达到 7.9 g/(1 000 kg・s),雨水碰并云水(Ccr)和雪的融化(Msr)则是本次降水的次要来源,最大转化率分别为 0.8,0.2 g/(1 000 kg・s).可见,大量 霰粒子与部分雪粒子的融化共同形成雨水粒子,同时雨水与云水的碰并进一步提高了成雨效率.对于雪源项(图 8b),雪粒子主要来源于冰的贝杰龙过程(Bis)和自身的淞附增长(Ccs),并且各过程在不同高度上差异明显,前者主要发生于 450~150 hPa,而后者则集中在 550~300 hPa;雪的凝华增长(Svs)是形成雪粒子的另一重 要途径,其转化过程在 550~150 hPa,而后者则集中在 550~300 hPa;雪的凝华增长(Svs)是形成雪粒子的另一重 要途径,其转化过程在 550~150 hPa 各层均存在,最大值位于 300 hPa,转化率达 0.35 g/(1 000 kg・s).从霰初 生源项的垂直分布(图 8c)可见,霰粒子几乎全部来自于过冷雨滴碰冻雪转化为霰(Csr)这一过程,其最大 转化率发生在 500 hPa,达到 0.29 g/(1 000 kg・s). 霰增长的微物理过程(图 8d)多集中在 600~350 hPa 范围,其中霰自身的淞附作用(Ccg)对霰增长的影响最大,其次为霰碰并雪(Csg),霰碰并过冷雨滴(Crg) 和粒子自身的凝华增长(Svg)贡献相对较小,其最大转化率仅为 0.6,0.5 g/(1 000 kg・s).



图 8 2019 年 7 月 14 日 12:00 那曲地区云微物理过程源项转化率

总体来看,冰相粒子(雪和霰)的增长主要来自于碰并(Ccs, Csr, Ccg, Csg, Crg)和凝华过程(Bis, Svs, Svg),其中云水对冰相粒子的增长起到了重要作用,并通过碰并和凝华形成了大量霰粒子和少量雪粒

子,在500 hPa 附近融化(Mgr, Msr)形成降水,而雨水与云水的碰并作用(Ccr)进一步提升了成雨效率.

进一步对本次降水中的云微物理过程时间变化特征进行分析.由7月14日那曲对流云降水微物理过 程逐时变化曲线可见,相关云物理过程也主要发生在10:00-16:00时段内,与降水产生时段较为一致. 凝华和贝杰龙过程(图9a)中,冰通过贝杰龙过程转化成雪(Bis)的贡献最大,霰的凝华增长(Svg)和雪的凝 华增长(Svs)贡献较小.由图9b可见,冰向雪的自动转化(Ais)最为明显,而云雨的自动转化(Acr)次之, 冰相粒子聚集程度远小于其他过程.此外,冰相粒子聚集过程的变化趋势也与其余过程存在明显差异,表 明聚集过程对降水的作用较小.对于碰连和碰并增长过程(图9c),霰的凇附增长(Ccg)贡献最大,其次为 霰碰并雪(Csg),其余过程贡献较小.对于融化过程(图9c),霰的凇附增长(Ccg)贡献最大,其次为 霰碰并雪(Csg),其余过程贡献较小.对于融化过程(图9d),霰粒子的融化(Mgr)对降水的产生起到了重要 作用,而雪粒子融化(Msr)几乎可以忽略.由此可见,对于本次对流云降水,水汽凝华后形成冰、雪和霰粒 子,其中雪粒子主要依靠冰的贝杰龙过程和碰并过程增长,而霰粒子则通过雪粒子和自身的碰连和碰并作 用增长,随着上升气流的减弱,大量霰粒子和部分雪粒子下落至0℃层附近融化形成降水,且此过程中云 水粒子对雪粒子和霰粒子的形成作用明显.



图 9 2019 年 7 月 14 日 00:00-24:00 那曲地区云微物理过程源项转化率随时间的演变特征

4 结论

采用 WRF 模式(V4.0版)对 2019 年 7 月 14 日青藏高原那曲地区一次对流云降水过程进行了数值模拟,分析了降水特征、云微物理结构以及转化过程,得出以下结论。

1) 对降水量空间分布、日变化特征和雷达回波等量的模拟结果表明,WRF 模式对本次青藏高原那曲 地区的降水过程具有较好的模拟能力,能够基本还原对流云的发展过程.

2) 云微物理结构特征的分析结果表明,固态水凝物的分布高度普遍高于液态水凝物,其中冰和雪主要 分布于中高层,中低层以霰和云水为主,低层多为雨水粒子.此外,雪、霰和雨水粒子的转化主要发生在降 水时段内,表明本次降水以冰相过程为主,且雪粒子和霰粒子贡献较大.

3)本次降水的云微物理转化过程以冰相过程为主,高层雪粒子通过冰的贝杰龙过程增长,中层霰粒子则由雪粒子与过冷水滴的碰并形成,并通过雪粒子和自身碰并作用增长,低层则更多通过自身的凇附过程增加,随着上升气流逐渐减弱,大量霰粒子和部分雪粒子在0℃层附近融化形成降水,而雨水与云水的碰并作用进一步促进了降水的增加.此外,暖雨过程对降水的直接贡献较小,但对冰相粒子的形成作用明显.

参考文献:

- [1] 徐祥德,马耀明,孙婵,等.青藏高原能量、水分循环影响效应[J].中国科学院院刊,2019,34(11):1293-1305.
- [2] 李跃清. 1998 年青藏高原东侧边界层风场与长江暴雨洪水的关系 [J]. 大气科学, 2000, 24(5): 641-648.
- [3] 胡亮,李耀东,付容,等.夏季青藏高原移动性对流系统与中国东部降水的相关关系 [J].高原气象,2008,27(2): 301-309.
- [4] 卓嘎,徐祥德,陈联寿.青藏高原对流云团东移发展的不稳定特征 [J]. 应用气象学报,2002,13(4):448-456.
- [5] 杨伟愚,叶笃正,吴国雄.夏季青藏高原热力场和环流场的诊断分析──Ⅱ:环流场的主要特征及其大型垂直环流场 [J].大气科学,1992,16(3):287-301.
- [6] 胡亮,徐祥德,赵平.夏季青藏高原对流系统移出高原的气象背景场分析 [J]. 气象学报, 2018, 76(6): 944-954.
- [7] 钱正安,单扶民,吕君宁,等.1979年夏季青藏高原低涡的统计及低涡的产生的气候因子探讨[C]//《青藏高原气象 科学实验文集》编辑组.青藏高原气象科学实验文集(二).北京:科学出版社,1984:279-290.
- [8] ZHANG J J, LIAO D X, GEA F, et al. The Advances in Operational Numerical Weather Prediction at National Meteorological Center in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1988, 2(1): 116-126.
- [9] 舒磊,李茂善,华生,等. 青藏高原东部玉树地区雨滴谱特征及云微物理结构分析 [J]. 气象科技进展,2021,11(4): 113-121,134.
- [10] 江吉喜, 范梅珠. 夏季青藏高原上的对流云和中尺度对流系统 [J]. 大气科学, 2002, 26(2): 263-270.
- [11] 李典, 白爱娟, 黄盛军. 利用 TRMM 卫星资料对青藏高原地区强对流天气特征分析 [J]. 高原气象, 2012, 31(2): 304-311.
- [12] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析 [J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [13] 陶诗言, 罗四维, 张鸿材. 1979年 5-8月青藏高原气象科学实验及其观测系统 [J]. 气象, 1984, 10(7): 2-5.
- [14] 陈联寿,徐祥德. 1998 年青藏高原第二次大气科学试验(TIPEX)陆气过程、边界层观测预研究进展 [J]. 中国气象科 学院年报(英文版),1998:20-21.
- [15] 徐祥德,周明煜,陈家宜,等.青藏高原地-气过程动力、热力结构综合物理图象 [J].中国科学(D辑:地球科学), 2001,31(5):428-441.
- [16] 徐祥德,陈联寿. 青藏高原大气科学试验研究进展 [J]. 应用气象学报, 2006, 17(6): 756-772.
- [17] 赵平,李跃清,郭学良,等. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应:第三次青藏高原大气科学试验[J]. 气象学报, 2018,76(6):833-860.

- [18] 常祎. 青藏高原那曲地区夏季云微物理特征和降水形成机制的飞机观测研究 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2019.
- [19] 黄永杰,崔晓鹏.四川一次暴雨事件的主要云微物理过程 [C] //第 31 届中国气象学会年会 S2 灾害天气监测、分析与 预报.北京:科学出版社,2014:240-254.
- [20] MORRISON H, MILBRANDT J A, BRYAN G H, et al. Parameterization of Cloud Microphysics Based on the Prediction of Bulk Ice Particle Properties. Part II: Case Study Comparisons with Observations and Other Schemes [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2015, 72(1): 312-339.
- [21] 孙艺搏,吴小飞. 2014 年 7 月 5 日那曲一次对流降水的数值模拟及组织过程分析 [J]. 高原山地气象研究, 2023, 43(3): 11-20.
- [22] 顾小祥,李国平. 云微物理方案对一次高原切变线暴雨过程数值模拟的影响 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 2019, 41(3): 526-536.
- [23] 唐洁,郭学良,常祎.青藏高原那曲地区夏季一次对流云降水过程的云微物理及区域水分收支特征 [J]. 大气科学, 2018,42(6):1327-1343.
- [24] 阴蜀城,李茂善,刘啸然,等. 2014 年 8 月 7 日那曲地区对流云降水及其云微物理过程的数值模拟 [J]. 高原气象, 2020, 39(1):48-57.
- [25] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model [J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [26] GRELL G A, FREITAS S R. A Scale and Aerosol Aware Stochastic Convective Parameterization for Weather and Air Quality Modeling [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(10): 5233-5250.
- [27] LUONG T, CASTRO C, NGUYEN T, et al. Improvement in the Modeled Representation of North American Monsoon Precipitation Using a Modified Kain-Fritsch Convective Parameterization Scheme [J]. Atmosphere, 2018, 9(1): 31.
- [28] CHEN F, DUDHIA J. Coupling an Advanced Land Surface Hydrology Model with the Penn State NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity [J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569.
- [29] STAMNES K, TSAY S C, WISCOMBE W, et al. Numerically Stable Algorithm for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Multiple Scattering and Emitting Layered Media [J]. Applied Optics, 1988, 27(12): 2502-2509.
- [30] DUDHIA J, MONCRIEFF M W. A Three-Dimensional Numerical Study of an Oklahoma Squall Line Containing Right-Flank Supercells [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46(21): 3363-3391.
- [31] 江志红, 卢尧, 丁裕国. 基于时空结构指标的中国融合降水资料质量评估 [J]. 气象学报, 2013, 71(5): 891-900.
- [32] 史月琴, 楼小凤, 邓雪娇, 等. 华南冷锋云系的中尺度和微物理特征模拟分析 [J]. 大气科学, 2008, 32(5): 1019-1036.
- [33] RENC P, CUIX P. The Cloud-Microphysical Cause of Torrential Rainfall Amplification Associated with Bilis(0604) [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(9): 2100-2111.

责任编辑 包颖

崔玉洁