

# 青藏高原那曲地区一次对流云降水的数值模拟

侯文轩<sup>1</sup>, 华 维<sup>1, 2, 3\*</sup>, 郭艺媛<sup>1</sup>, 黄天赐<sup>1</sup>, 范广洲<sup>1, 3</sup>

(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, 成都 610225;

2. 中国科学院大气物理研究所 竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

3. 南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

**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(V3.9.1 版本)对 2015 年 8 月 26~27 日青藏高原那曲地区一次对流云降水过程进行了模拟, 分析了不同积云对流参数化方案和云微物理参数化方案组合对本次降水过程中降水量、环流场、雷达反射率以及云微物理特征模拟效果的影响。结果表明: WRF 模式能较好地模拟出本次降水的时空变化特征, 但不同参数化方案组合各有优势。总体而言, Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 和 Grell-Freitas + SUB\_YLIN 组合模拟性能最优。本次对流云降水以冰相过程为主, 雪粒子贡献最大, 暖云粒子对降水的影响并不明显。从云微物理过程的时间演变可看出, 性能最好的 SUB\_YLIN 方案能合理模拟降水过程中雪粒子与冰晶粒子间的转换过程, 雪粒子可在凝结过程中释放潜热促使对流运动发展, 也可通过融化过程促进降水发生, 对流层高层冰晶粒子凝华产生的潜热释放亦为深对流的发展创造了有利条件。

**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: P435

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2184.2020.03.003

## 引言

青藏高原(下称高原)是世界上平均海拔最高、面积最大的大地形, 被称之为“世界屋脊”和“第三极”。高原以其强大的动力和热力强迫作用决定了东亚乃至北半球大气环流的平均状态, 成为影响我国极端天气气候的关键区<sup>[1-4]</sup>。夏季, 北半球西风带向北移动, 高原对北半球大气环流的影响由动力作用为主转为以热力作用为主, 并且在高原主体形成强烈的低空螺旋式辐合上升气流, 加之源于低纬海洋的暖湿气流提供了充足的水汽, 使高原上对流云和对流云降水频发, 改变了高原上空大气温湿垂直廓线, 导致高原水热交换和循环异常<sup>[5]</sup>。因此, 开展高原对流云降水研究具有重要意义。

由于高原气候恶劣, 地广人稀, 气象台网极为有限, 且多以常规观测为主, 造成对高原对流云和对流云降水的研究存在困难<sup>[6-9]</sup>。随着卫星、雷达等观测手段的丰富以及数值模式的快速发展, 人们对高原云-降水动力学和云微物理的认识进一步深入。陈隆勋等<sup>[10]</sup>较早利用静止气象卫星揭示了高原夏季对流云系的季节变化以及对流云日变化特征。傅云飞等<sup>[11-12]</sup>发现高原降水多为对流性降水, 其降水云团结构以零星块状水平分布和

“馒头”状垂直分布为主。潘晓和傅云飞<sup>[13]</sup>进一步指出高原夏季降水中深厚弱对流降水最多, 浅薄降水次之, 深厚强对流降水出现最少。大型野外科学考察试验也是开展高原气象研究的重要手段。自 20 世纪 70 年代, 我国已组织了三次大型青藏高原大气科学试验<sup>[14-16]</sup>。徐祥德等<sup>[17]</sup>利用第二次青藏高原大气科学实验获得的雷达观测资料发现高原中部对流云呈水平尺度小、垂直厚度高的柱状单体, 并可在一定条件下突破“暖盖”逆温层形成“爆米花”状云系。汪会和郭学良<sup>[18]</sup>利用第三次青藏高原大气科学试验(TIPEX III)观测资料深入分析了高原深对流的垂直结构和云微物理过程。赵平等<sup>[16]</sup>进一步对 TIPEX III 成果进行了回顾, 指出了高原云-降水物理过程领域的研究重点。

数值模式因能较好刻画云体发展和降水产生过程, 被广泛用于云-降水过程研究中<sup>[19]</sup>。各种模式中, WRF(The Weather Research and Forecasting Model)模式较详细考虑了各类物理过程, 参数化方案相对丰富, 因而应用最为广泛<sup>[20-21]</sup>。研究表明, 就参数化方案对降水模拟的影响而言, 不同类型参数化方案的影响程度各不相同, 云微物理参数化方案、积云对流参数化方案、边界层参数化方案以及陆面过程参数化方案的影响相对突出<sup>[22-24]</sup>, 但总

收稿日期: 2020 - 8 - 22

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1505702); 国家自然科学基金(41775072); 第二次青藏高原科考项目(2019QZKK010203); 四川省杰出青年科技人才项目(2019JDJQ0001)

作者简介: 侯文轩, 硕士生, 主要从事青藏高原云微物理过程的研究。E-mail: 845363028@qq.com

通讯作者: 华维, 教授, 主要从事气候变化和高原气象研究。E-mail: huawei@cuit.edu.cn

体上云微物理参数化方案和积云对流参数化方案的影响最为显著<sup>[25]</sup>。因此, 本文着重分析不同云微物理参数化方案和积云对流参数化方案组合对模式模拟能力的影响, 以获得适用于高原对流云降水模拟的参数化方案组合, 并基于此开展高原云—降水物理过程研究。

鉴于此, 本文利用 WRF (V3.9.1 版本) 模式对 2015 年 8 月 26~27 日高原中部那曲地区一次对流云降水过程进行模拟, 对比分析不同云微物理参数化方案和积云对流参数化方案组合对降水过程的模拟能力, 并对高原对流云降水的微物理过程进行探讨。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料来源

本文所用资料包括: ①美国环境预报中心和美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 提供的一日 4 次的 FNL ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) 再分析资料; ②中国气象数据网提供的中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  逐时降水数据; ③TIPEX III 设于那曲气象局 ( $31.48^\circ\text{N}$ ,  $92.01^\circ\text{E}$ , 海拔 4507m) 的 Ka 波段毫米波云雷达获得的反射率因子、径向速度等雷达观测数据。

### 1.2 试验设计

采用 WRF (V3.9.1 版本) 模式对那曲地区 2015 年 8 月 26~27 日一次对流云降水过程进行模拟。利用 NCEP FNL 资料为背景场, 模拟设置三层嵌套 (3km、9km 和 27km) (图 1), 嵌套中心位于  $31.25^\circ\text{N}$ ,  $92.5^\circ\text{E}$ , 垂直方向

分为不等距 32 层, 模式顶层气压为 50hPa, 模式积分步长为 120s, 模式积分时间为 8 月 26 日 00:00~27 日 12:00, 覆盖本次对流云降水全过程。

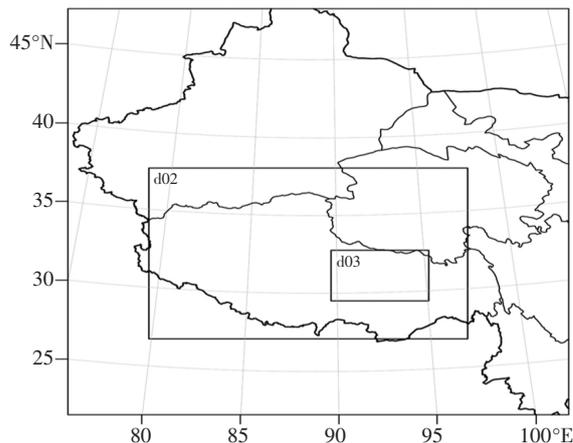


图 1 模式嵌套区域

为突出云微物理参数化方案和积云对流参数化方案对对流云降水模拟的影响, 模拟时保持长波辐射参数化方案 (RRTM)、短波辐射参数化方案 (Dudhia)、边界层参数化方案 (MYJ) 和陆面过程参数化方案 (Noah) 不变, 仅改变模式中的云微物理参数化方案 (Lin、Milbrandt、SUB\_YLIN 和 Thompson) 和积云对流参数化方案 (Grell-Devenyi 和 Grell-Freitas) 以评估不同组合 (8 组) 对本次高原对流云降水过程的模拟能力 (表 1)。

表 1 参数化方案特点

| 方案   | 名称            | 特征  |
|------|---------------|---|
| 云微物理 | Lin           | 计算了较为常见的水汽、云水、雨水、云冰、雪和霰六种物质, 方案相对成熟, 适合理论研究       |
|      | Milbrandt     | 预报量有 7 种水物质, 在水汽、雨水、云水、云冰雪和霰的基础上增加了雹              |
|      | SUB_YLIN      | 仅考虑了水汽、云水、雨水、云冰和雪五种物质, 但考虑了融化强度的预报                |
|      | Thompson      | 相较于其他方案增加对云冰的数浓度、雨滴碰并雪和霰的过程的预报                    |
| 积云对流 | Grell-Devenyi | 对每个格点运行多种积云方案和变量, 再将结果平均反馈到模式中, 云质量通量由静力及动力条件共同控制 |
|      | Grell-Freitas | 相对于 Grell-Devenyi 方案, 该方案主要解决云尺度的平滑问题             |

## 2 天气过程简介

2015 年 8 月 26~27 日, 高原主体出现了一次自西向东的降水过程。从 500hPa 环流形势场 (图 2a) 上可见, 源于巴尔喀什湖大槽槽后的西北冷空气南下至高原与来自孟加拉湾的暖湿气流汇合, 为降水提供了抬升条件和水汽供应。进一步分析可知, 那曲地区存在一闭合等高线, 对应的 500hPa 风场表现为气旋性切变, 表明当地可能受低压系统控制。从水汽通量分布 (图 2b) 也可看出, 那曲地区是整个高原的水汽通量相对高值区, 大值中心位于那曲气象局观测点 (图 2 中黑色圆点) 以东, 中心值达到  $0.6\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , 表明本次过程有较充足的水汽供

应, 有利于对流降水形成。

结合 Ka 波段毫米波云雷达观测结果 (图 3) 可知, 本次降水过程中, 回波强度最大可达 30dBZ, 且云体各高度层上均有回波大值出现, 2km 处有较为明显的  $0^\circ$  层亮带 (图 3a)。由径向速度 (图 3b) 分布也可发现, 强回波区内存在明显的上升和下沉气流, 上升气流主要位于 3~8km 范围内, 对应对流云体中心。而在  $0^\circ$  层亮带以下, 退偏振比 (LDR)  $> 24\text{dB}$ , 说明雨滴集中于该层, 增大了径向速度 (图 3d)。总体来看, 本次降水过程对流发展较为深厚, 表现出典型的“高原夏季降水以深厚的弱对流降水为主”的特点<sup>[26]</sup>。

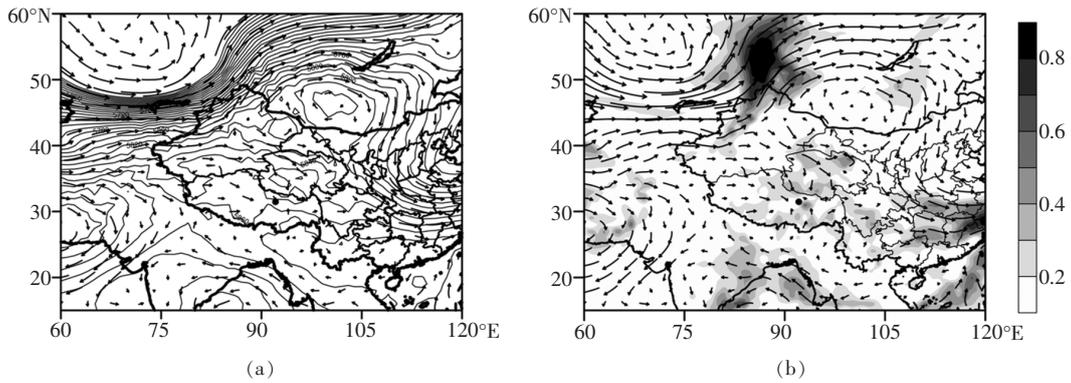


图 2 2015 年 8 月 26 日 12:00(世界时)(a)500hPa 位势高度场(等值线,单位:dagpm)和风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和 (b)整层积分的水汽通量(阴影区,单位: $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

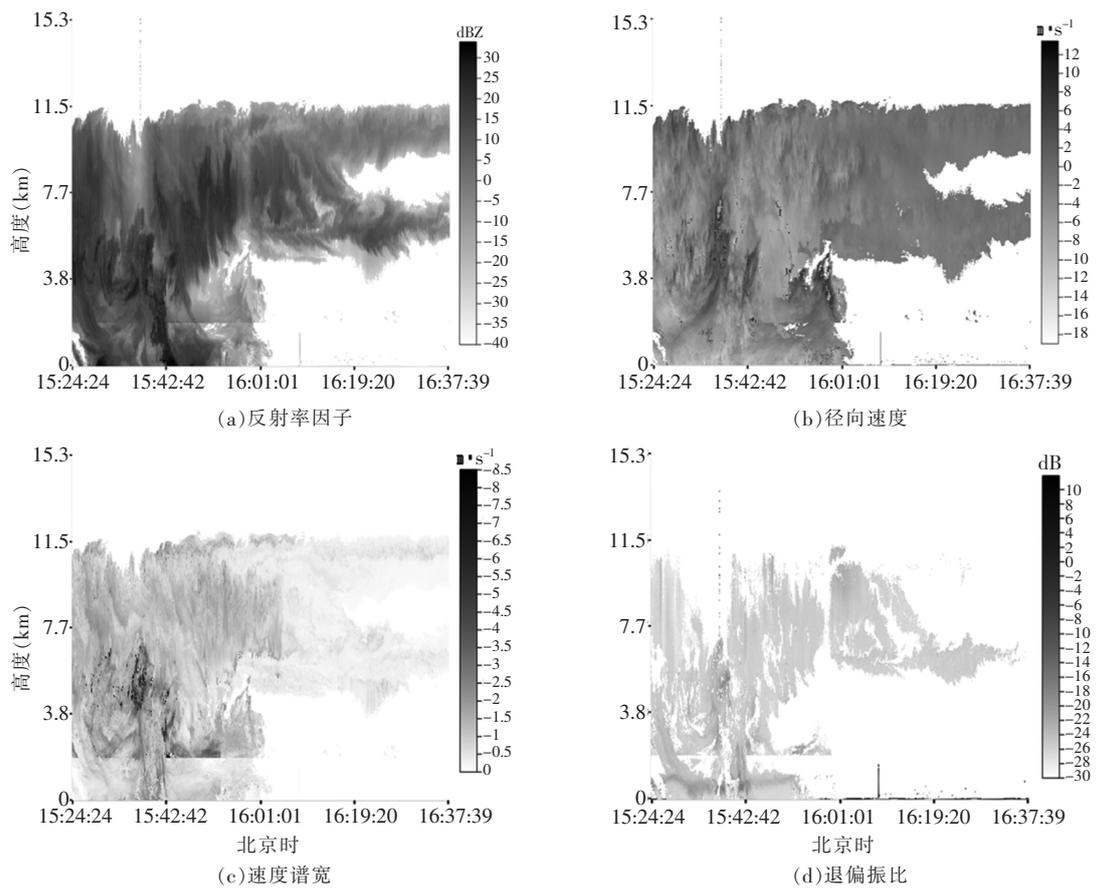


图 3 那曲 Ka 波段云雷达降水模式观测的 2015 年 8 月 26 日 15:24~16:37(北京时间)回波特征:(a)反射率因子(单位:dBZ)、(b)径向速度(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )、(c)速度谱宽(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )和(d)退偏振比(单位:dB)

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 降水

由 8 月 26 日 06:00 ~ 27 日 06:00 中国自动气象站与 CMORPH 融合降水产品与八组方案模拟的 24h 累积降水量空间分布(图 4)可知,实况降水主要表现自西向东的零散块状分布,降水主中心分别位于高原中部和东部(图 4a)。对比实况与模拟降水(图 4b~h)可发现,各组合均可较好模拟出降水的基本空间分布,尤其能够模拟出位于高原中部和东部的降水大值区,但模拟的雨区范围较

明显偏大,这一差异在西藏东北部和中部纳木错最为明显,其原因一方面可能与高原自动气象站密度较低,融合降水产品在高原地区更多依赖于卫星反演结果有关,而卫星反演的高原降水往往与实际降水存在一定偏差<sup>[27]</sup>;另一方面,WRF 中的高原湖泊温度由模式前处理系统采用海面温度插值得到,插值过程未考虑湖泊海拔高度,而造成高原湖泊温度存在误差,引起湖区降水异常偏多<sup>[28]</sup>。从降水量级来看,各组合模拟的结果整体上与实况较为接近。就那曲地区而言,融合产品 24h 累积降水量为 14mm,量级达到中雨,对应模拟结果中 Grell - Devenyi

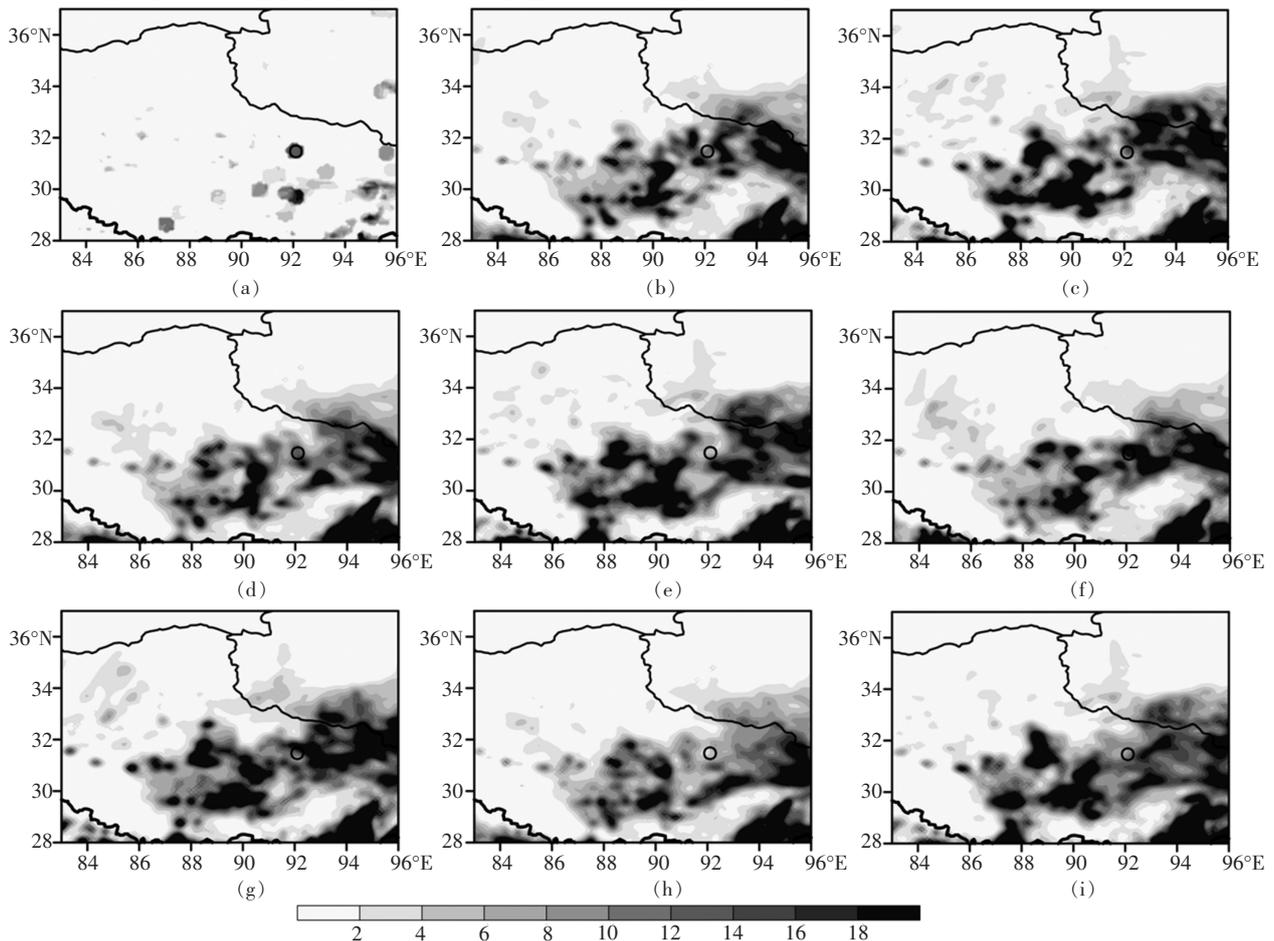


图4 实况与模拟的2015年8月26日06:00~27日06:00(北京时)高原24h累积降水量(单位:mm)空间分布:(a)CMORPH融合实况降水、(b)Grell-Devenyi + Lin、(c)Grell-Freitas + Lin、(d)Grell-Devenyi + Midbrant、(e)Grell-Freitas + Milbrandt、(f)Grell-Devenyi + SUB\_YLIN、(g)Grell-Freitas + SUB\_YLIN、(h)Grell-Devenyi + Thompson和(i)Grell-Freitas + Thompson

+ Lin、+ Milbrandt、+ SUB\_YLIN和Grell-Freitas + Lin、+ SUB\_YLIN五种方案组合能较合理地模拟出那曲站位置的量级,但Grell-Devenyi + SUB\_YLIN组合偏大,Grell-Devenyi + Lin组合偏小,其余组合均在12~14mm左右。总体来看,各组合均能够模拟出雨带自西向东的零散块状分布和降水中心,但各组合模拟能力存在差异,表明选取适合参数化方案对降水模拟的性能具有重要影响。

为验证各组合对降水日变化的模拟能力,采用最邻近插值法将8月26日06:00~27日06:00逐时格点融合降水资料插值到那曲气象局所在位置,并将其与模拟结果进行对比(图5)。图5(a)为Grell-Devenyi积云方案与四种云微物理方案组合的模拟结果。由图可见,四种组合均模拟出发生于午后的降水峰值,其中Grell-Devenyi + SUB\_YLIN组合与融合降水产品的日变化特征最为接近,且降水量也与实况一致,均为4.4mm左右。其余三种组合在量级上远小于实况,降水峰值出现时间也有所推迟。图5(b)为Grell-Freitas积云方案与四种云微物理方案组合的模拟结果。可以发现,相对于Grell-Freitas方案,Grell-Freitas方案模拟的峰值时间均较实

况有不同程度滞后,但量级上更为接近,其中Grell-Freitas + SUB\_YLIN组合的模拟结果与实况最为一致。总体来看,八种组合中,Grell-Devenyi、Grell-Freitas + SUB\_YLIN组合模拟性能最优。此外,Grell-Devenyi积云方案对降水峰值的模拟更接近实况,而Grell-Freitas积云方案对降水量级模拟效果更好。

进一步计算实况与模拟的逐时降水量间的相关系数(表2)可知,各组合与实况间的相关系数均为显著的正相关(通过0.05的显著性检验),但差异明显。四种云微物理方案中,SUB\_YLIN方案与Grell-Devenyi和Grell-Freitas积云对流方案组合的相关系数最高,分别达到0.96和0.95,其次为Lin方案与积云方案的组合,相关系数分别为0.81和0.71,Milbrandt和Thompson云微物理方案模拟能力最差,相关系数均在0.65以下。

### 3.2 相关物理量场

积云对流过程和云微物理过程对降水有重要影响。因FNL资料为逐6h(06:00、12:00、18:00和24:00)资料,故选择与降水峰值出现时间最接近的8月26日12:00以对比分析各组合对相关物理量场的模拟能力。

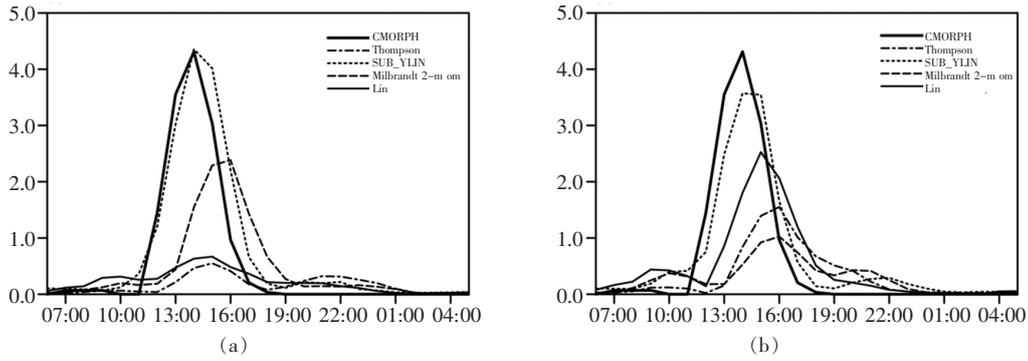


图 5 实况及(a)Grell-Devenyi 和(b)Grell-Freitas 积云对流参数化方案与不同云微物理参数化方案组合模拟的 2015 年 8 月 26 日 06:00~27 日 06:00(北京时间)那曲逐时降水量(单位:mm)时间序列

表 2 不同参数化方案组合模拟结果与实况降水的相关系数

| 方案名称      | Grell - Devenyi | Grell - Freitas |
|-----------|-----------------|-----------------|
| Lin       | 0.81 **         | 0.71 **         |
| Milbrandt | 0.59 *          | 0.40 *          |
| SUB_YLIN  | 0.96 **         | 0.95 **         |
| Thompson  | 0.61 **         | 0.45 *          |

\*\* 和 \* 分别表示通过 0.05 和 0.01 的显著性水平检验

### 3.2.1 水汽通量散度

水汽是产生降水的基本条件之一,而水汽的辐合辐散往往决定着云系和降水的分布。图 6 为 FNL 资料与八种组合模拟的 8 月 26 日 12:00 500hPa 水汽通量散度空

间分布。由 FNL 实况(图 6a)可知 26 日 12:00 高原中东部地区水汽以辐合为主,并且在中部和东北部各存在一个较强的水汽辐合中心,中心值可达  $-0.04 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$  以上。从各组合的模拟结果(图 6b~i)均可以发现,对高原 500hPa 水汽通量散度场的整体空间分布模拟能力较好,但对辐合辐散中心范围和强度的模拟上略有差异,仅 Grell - Freitas 方案分别和 Lin、SUB\_YLIN 方案所构成的两种组合模拟的中心分布与辐合强度均同实况较为一致。总体来看,Grell - Freitas + SUB\_YLIN 组合对水汽通量散度的模拟效果最佳。

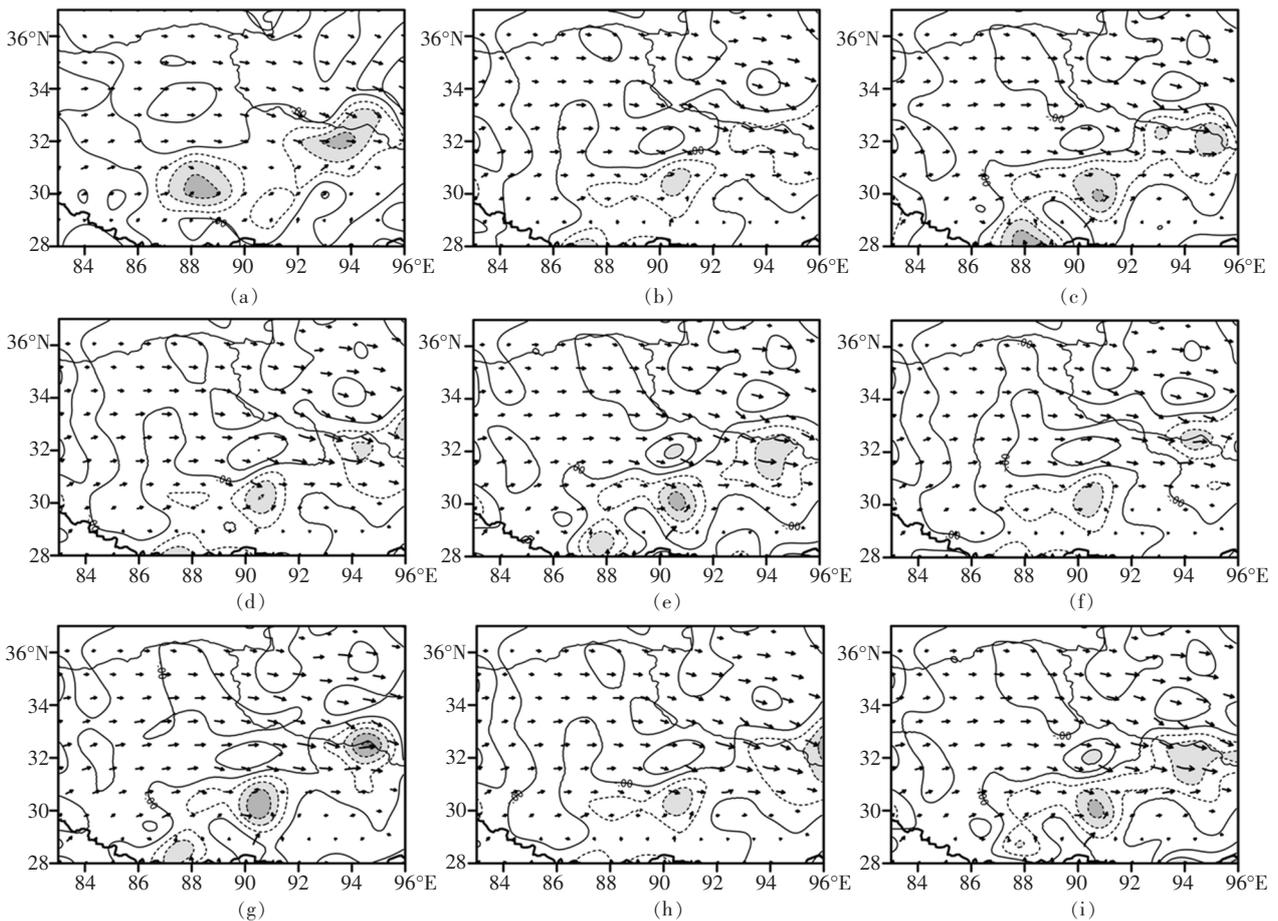


图 6 同图 4,但为 8 月 26 日 12:00 500hPa 水汽通量散度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ )

### 3.2.2 垂直速度

降水的发生还需要强烈而持久的上升运动,上升运动可将低层水汽输送至高空,高空水汽饱和后降落成雨。图7给出了实况和模拟的8月26日12:00垂直速度沿92.1°E的经向剖面分布。由实况(图7a)可见,那曲(31.48°N)上空直至200hPa均为负值分布,表明该地区

存在较强的上升运动。各组合模拟的垂直速度和分布(图7b~i)各不相同,其中Grell-Freitas+Lin、Grell-Devenyi+Milbrandt和Grell-Freitas+SUB\_YLIN三组方案组合能较好模拟出存在于那曲上空的垂直速度负值中心,但仅Grell-Devenyi+Milbrandt组合能模拟出上升运动在200hPa附近消失的特征。

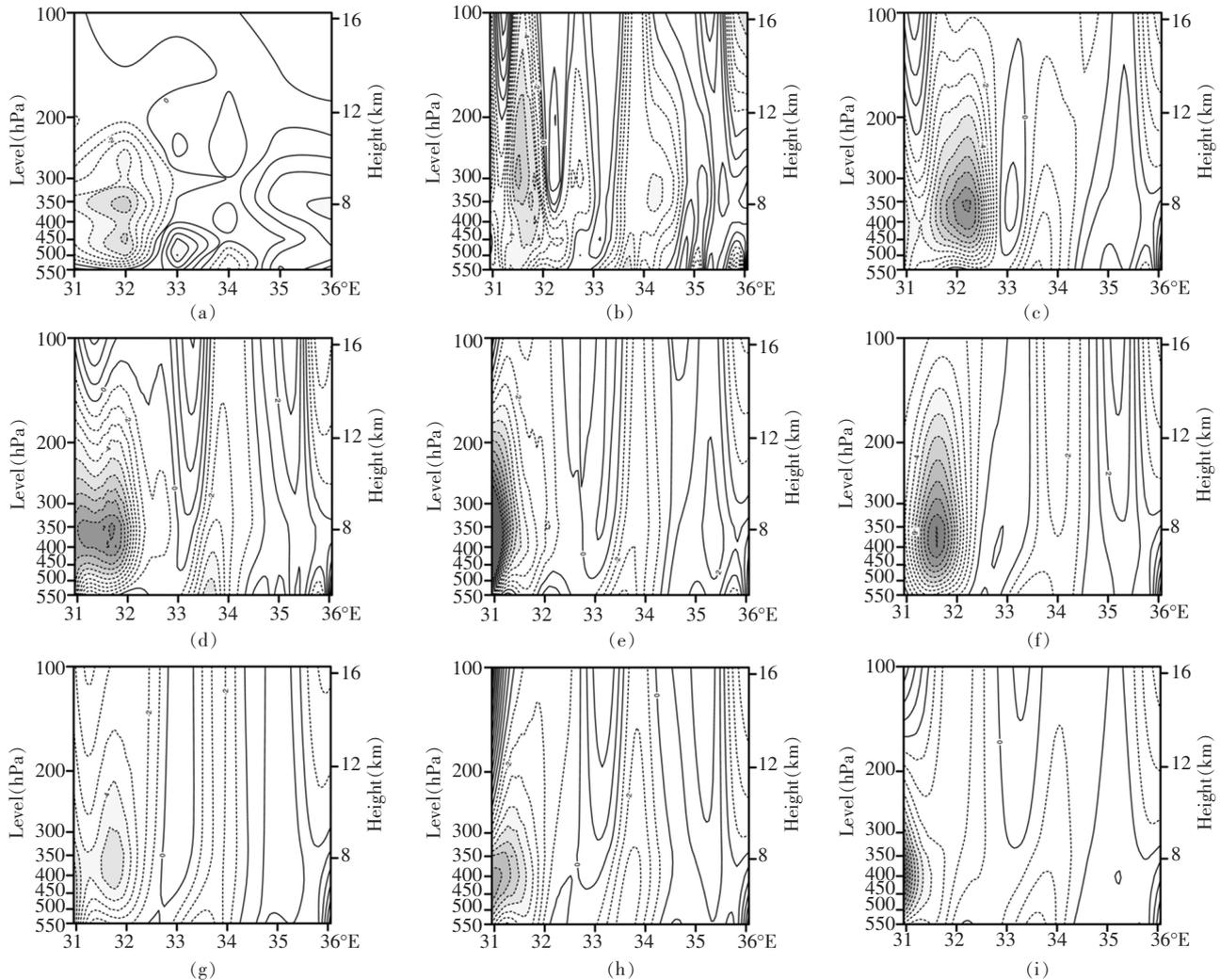


图7 同图4,但为2015年8月26日12时沿92.1°E垂直速度经向剖面(单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

### 3.3 雷达反射率

根据上述分析可知,相较于Grell-Freitas+Mibrant和Grell-Devenyi+Thompson组合,其余六组组合整体上具有较好的模拟能力。因此,进一步选取六组组合模拟的平均垂直速度、回波强度大于5dBZ的频数时间—高度与那曲Ka波段毫米波云雷达观测结果进行对比(图8)。从图(8a)雷达观测结果可以看出,那曲地区对流活动从15:00开始发展,之后在夜间减弱,并逐渐转为层状云系。由图(8b~m)可见,六组组合均可模拟出发生于26日昼间的降水,其中Grell-Devenyi+SUB\_YLIN、Grell-Freitas+Lin、Grell-Freitas+SUB\_YLIN三组组合模拟效果与观测资料最为接近,在垂直速度上均能较

好的模拟出15:00左右出现的上升运动,尤其是Grell-Devenyi+SUB\_YLIN、Grell-Freitas+SUB\_YLIN组合,在回波上能够模拟出云雷达在夜间探测到的回波。其余三组组合在速度的模拟上较观测资料存在不同程度提前,其中Grell-Devenyi+Mibrant与Grell-Freitas+Thompson组合还模拟的回波强度过大。总体来看,六种组合中,Grell-Devenyi+SUB\_YLIN和Grell-Freitas+SUB\_YLIN组合的模拟性能最优,其次为Grell-Freitas+Lin组合。

### 3.4 云中水成物含量

为揭示不同方案组合模拟降水产生差异的原因,同样选取以上六组组合模拟的云中水成物进行分析。

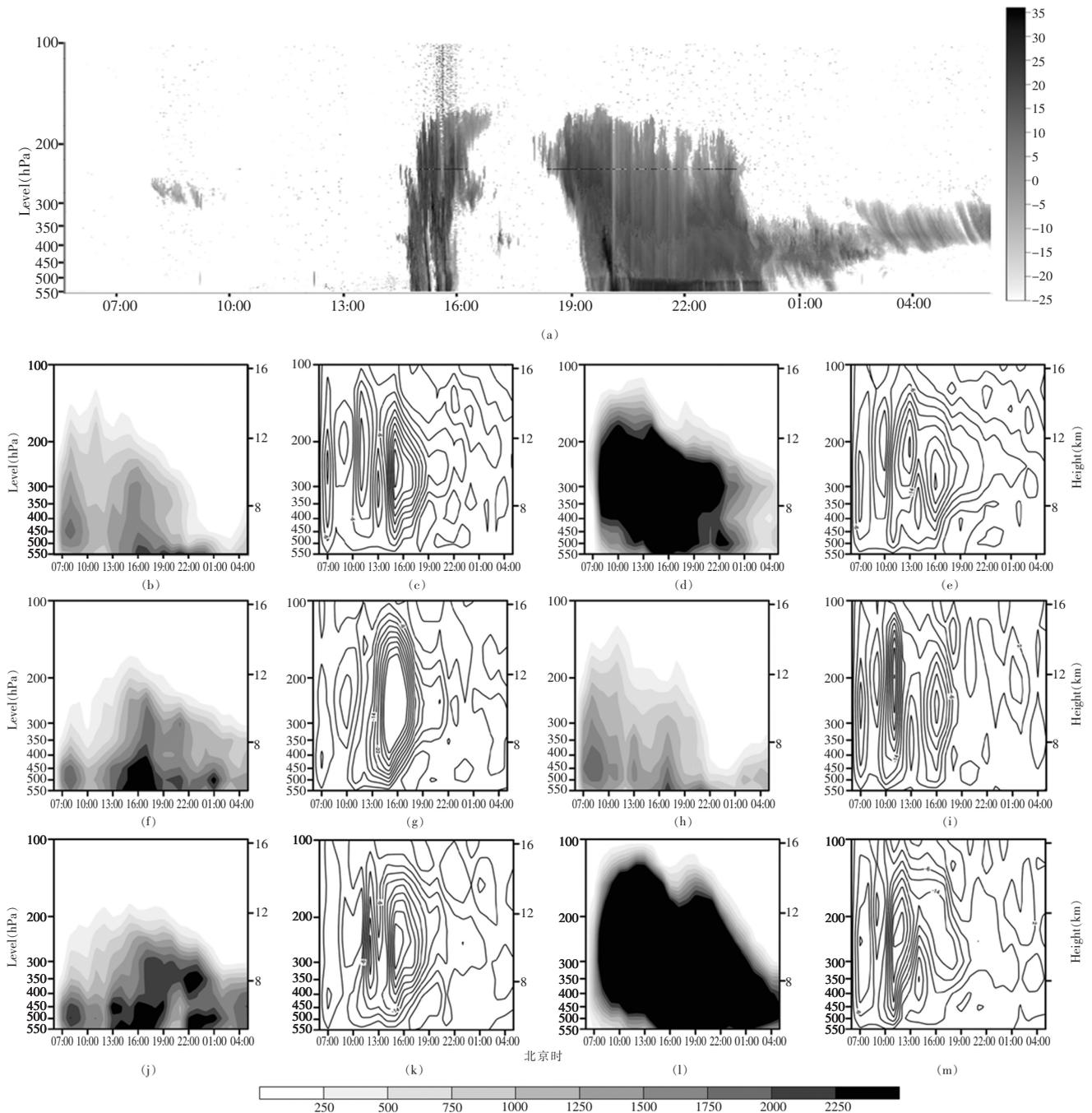


图 8 观测的 2015 年 8 月 26 日 06:00~27 日 06:00(北京时间)那曲 Ka 波段毫米波云雷达反射率(单位: dBZ)和模拟的强回波频次(单位: 次)、垂直速度(单位: m/s)变化特征: (a)Ka 波段毫米波云雷达反射率(实况)、(b)Grell-Devenyi + Lin 强回波频次、(c)Grell-Devenyi + Lin 垂直速度、(d)Grell-Devenyi + Middelbrant 强回波频次、(e)Grell-Devenyi + Middelbrant 垂直速度、(f)Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 强回波频次、(g)Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 垂直速度、(h)Grell-Freitas + Lin 强回波频次、(i)Grell-Freitas + Lin 垂直速度、(j)Grell-Freitas + SUB\_YLIN 强回波频次、(k)Grell-Freitas + SUB\_YLIN 垂直速度、(l)Grell-Freitas + Thompson 强回波频次和 (m)Grell-Freitas + Thompson 垂直速度

图 9 为六组方案组合模拟的云中水成物时间变化曲线。由于 SUB\_YLIN 云微物理方案中未考虑霰粒子,故图 9(b)中仅有四种组合的模拟结果。云中水成物可分为暖云水成物和冷云水成物,其中暖云部分为雨水和云水粒子,冰相过程则包括冰、霰和雪粒子。由图 9(a~c)可知,冰、霰和雪三类冰相过程粒子的变化与降水量之间

存在较好的对应关系,表明本次降水与大多数高原降水类似,冰相过程在高原云系发展和降水产生中起到了重要作用<sup>[29]</sup>。对冰、霰和雪三种粒子进一步对比还可发现,各组合模拟的雪粒子含量均要比冰粒子和霰粒子高一个量级,表明相对于冰粒子和霰粒子,雪粒子对本次降水过程中冷云水成物的贡献最大。

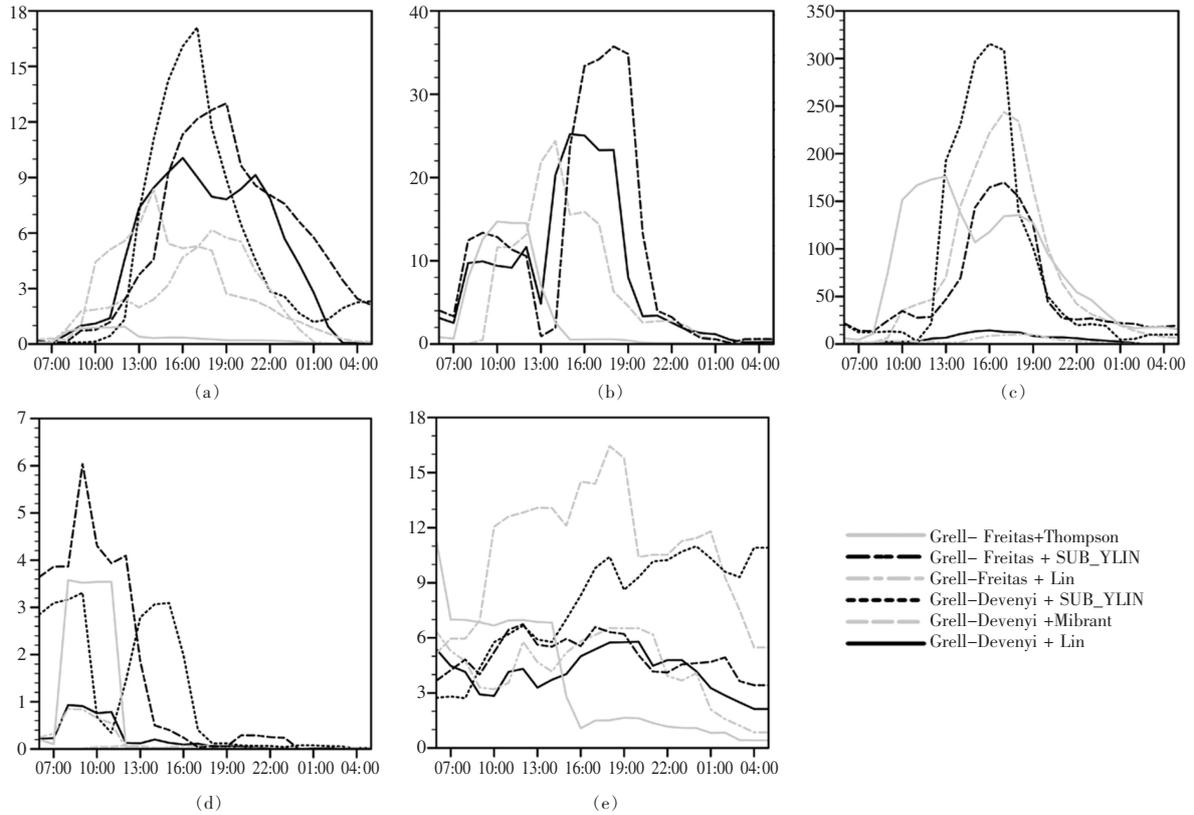


图 9 模拟的 2015 年 8 月 26 日 06:00~27 日 06:00(北京时间)那曲固态液态水凝物混合质量比垂直积分量(单位: $g \cdot kg^{-1}$ ) (a)冰粒子、(b)霰粒子、(c)雪粒子、(d)雨水粒子和(e)云水粒子

图 10 给出了 24h 平均的那曲固态液态水凝物混合质量比垂直廓线。可见,各组合中冰粒子大多分布于对流层中高层,且 200hPa 以上迅速减少,而霰、雪和云水三

种粒子则从 400hPa 开始增长,至 200hPa 附近停止,说明冰粒子在 200hPa 附近转化成霰、雪和云水三种粒子。同时,各参数化方案组合中粒子的转化方式也存在明显差

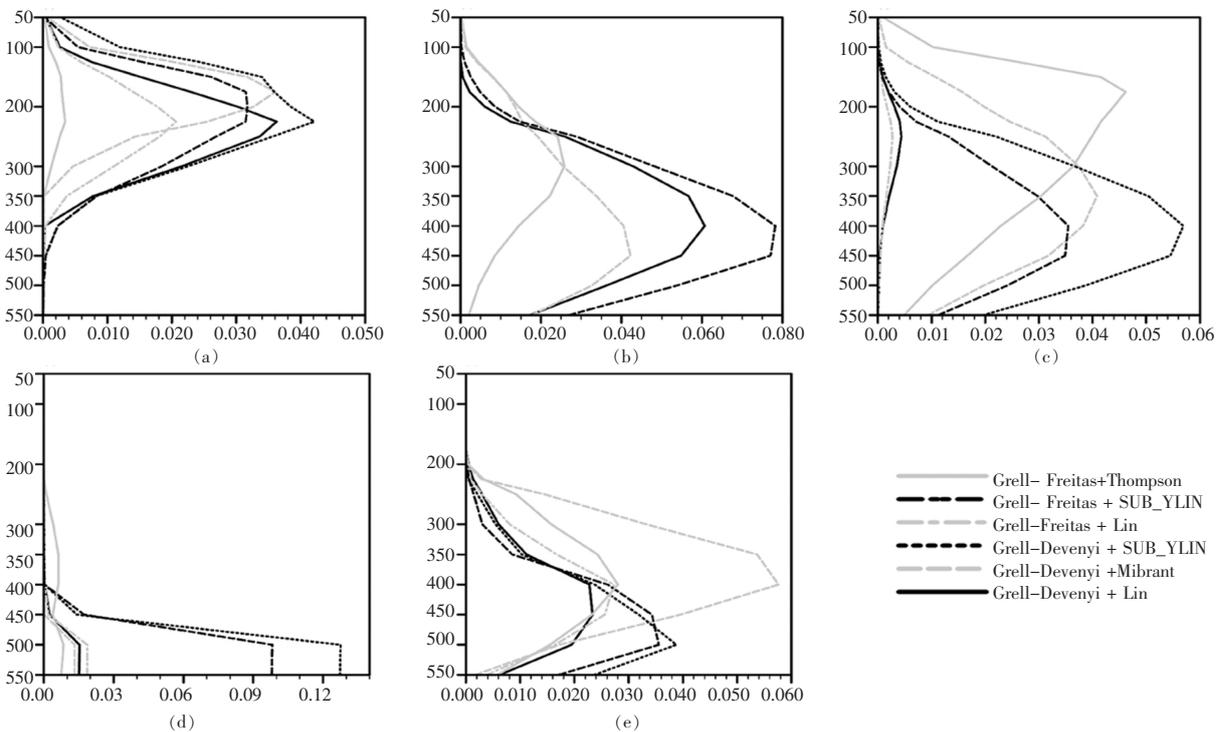


图 10 同图 9,8 月 26 日 06:00~27 日 06:00 24h 平均的那曲固态液态水凝物混合质量比垂直廓线

异, Grell-Devenyi + Lin 和 Grell-Freitas + Lin 组合中冰粒子更多的转化为霰粒子, Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 和 Grell-Freitas + SUB\_YLIN 组合中, 由于 SUB\_YLIN 方案并未考虑霰的影响, 故冰粒子主要转化为雪粒子, 而 Grell-Devenyi + Milbrandt 方案中冰粒子则转化为霰粒子和雪粒子。进一步分析可知, Grell-Devenyi + Lin 和 Grell-Freitas + Lin 组合模拟的霰粒子与 Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 和 Grell-Freitas + SUB\_YLIN 组合模拟的雪粒子都表现为从对流层高层到 400hPa 为增加趋势, 400hPa 以下开始减少, 而雨水粒子开始明显增多的特征。在 Grell-Devenyi + Milbrandt 组合中, 霰粒子和雪粒子分别从 450hPa 和 350hPa 向下开始减少, 这与雨水粒子开始增加高度存在一定差异。对于云水粒子的垂直分布, 仅 Grell-Devenyi + Lin、Grell-Freitas + Lin 和 Grell-Devenyi + Milbrandt 三种组合模拟出云水粒子在 400hPa 附近转化为雨水粒子的特征, 表明上述三种方案组合在降水过程中考虑了暖云的作用。综上, 结合云中水成物粒子时间变化(图 9)来看, Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 和 Grell-Freitas + SUB\_YLIN 组合模拟的转化过程更符合本次降水“雪粒子贡献较大的冰相过程”的特征。

图 11 进一步给出了 8 月 26 日 06:00 ~ 27 日 06:00 那曲雪粒子混合质量比和垂直速度的时间变化特征。由上文观测结果与模拟效果分析已知(图 4 ~ 8), Grell-Devenyi + SUB\_YLIN 和 Grell-Freitas + SUB\_YLIN 组合中的模拟结果与实际最为符合, 该两种组合中雪晶粒子均分布于 200hPa 以下, 且其底端均可达到 500hPa 附近的 0°C 层以下(图 11c ~ e, 图中红线为 0°C 层高度), 说明雪晶粒子的融化是本次降水产生的重要原因。此外, 两组组合中那曲上空的上升运动较强, 垂直速度中心出现在 200hPa 附近, 而雪晶粒子主要集中于垂直速度中心及以下位置, 有利于雪粒子的凝结和潜热的释放。需要注意的是, 200hPa 以上仍存在较强的上升运动, 从时间平均的固态液态水凝物混合质量比垂直廓线分布(图 10)可知, 该高度层主要以冰晶粒子为主, 因此可认为该高度上冰晶粒子凝华所释放的潜热也进一步促进了深对流的发展。总体而言, 本次降水过程中云体主要分布于 200hPa 以下, 雪粒子凝结释放的潜热有利于对流发展, 而其上方少量冰晶粒子凝华释放潜热则进一步增强了上升运动, 加上 0°C 层附近大量雪粒子的融化, 最终形成了本次降水。

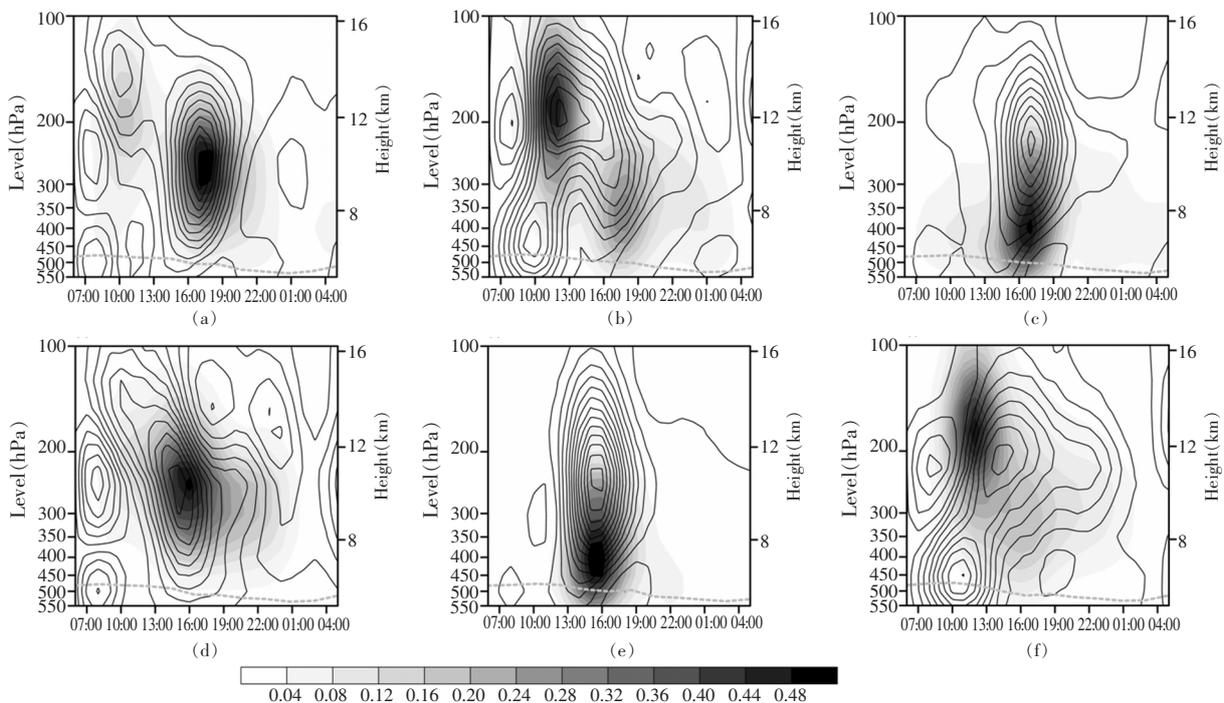


图 11 模拟的 2015 年 8 月 26 日 06:00~27 日 06:00(北京时)那曲雪粒子混合质量比(阴影区, 单位: g/kg)和垂直速度(等值线, 单位: m/s)变化特征(灰色线条为 0°C 层高度)(a)Grell-Devenyi + Lin、(b)Grell-Devenyi + Midbrandt、(c)Grell-Devenyi + SUB\_YLIN、(d)Grell-Freitas + Lin、(e)Grell-Freitas + SUB\_YLIN 和 (f)Grell-Freitas + Thompson

## 4 结论

基于 WRF 模式(V3.9.1 版本)不同积云对流参数化方案和云微物理参数化方案组合对 2015 年夏季高原那

曲地区一次对流云降水过程进行了模拟, 对比分析了不同参数化方案组合对对流云降水和云微物理特征的模拟能力, 得到以下结论:

(1) 各参数化方案组合模拟的降水量空间分布、日

变化特征以及相关系数表明,Grell - Devenyi + SUB\_YLIN 组合对降水日变化的模拟能力最好,Grell - Freitas + SUB\_YLIN 组合模拟对累积降水量和环流场的模拟最为突出。同时,该两组组合也在雷达回波和垂直速度的模拟上表现出最优的模拟能力。综合各模式结果可知,WRF 模式能够较好地模拟高原对流云降水的时空变化特征,但不同组合间也存在一定差异。

(2) 冰相粒子对本次降水的产生具有重要影响,冰相过程中霰、雪和云水三种粒子的变化与降水量之间存在较好的对应关系,而暖云雨水和云水粒子对降水的影响并不明显。此外,雪粒子含量比冰粒子和霰粒子含量大,是本次降水过程中冷云水成物的主要组成部分。

(3) 相较于积云对流参数化方案,不同云微物理参数化方案对降水模拟效果的影响更明显,其原因主要与不同云微物理参数化方案对成云过程中水成物粒子转化的模拟有关。模拟性能最好的两个 SUB\_YLIN 组合合理模拟出雪粒子和冰晶粒子在 200hPa 附近的转换特征。此外,雪粒子在 200hPa 以下大量形成释放的潜热不仅有利于对流活动发展,还可通过融化过程产生降水,而 200hPa 以上冰晶粒子的凝华则进一步增强了深对流的发展。

#### 参考文献

- [1] 叶笃正. 青藏高原感热气泵和亚洲夏季风[C]. 北京: 科学出版社, 1997: 116 - 126
- [2] 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
- [3] 刘新, 李伟平, 许晃雄, 等. 青藏高原加热对东亚地区夏季降水的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(6): 1287 - 1292
- [4] 马耀明, 胡泽勇, 田立德, 等. 青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(2): 207 - 215
- [5] 郑庆林, 梁丰. 青藏高原动力和热力作用对季节转换期全球大气环流影响的数值研究[J]. 热带气象学报, 1999, 15(3): 56 - 66
- [6] 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产生的气候因子探讨[A]. 青藏高原气象科学试验文集(二)[C]. 北京: 科学出版社, 1984: 279 - 290
- [7] Zhang J J, Liao D X, Ge A 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
- [8] 钟晓平, 杨淑群, 朱远琼. 青藏高原东部地区中尺度对流复合体的降水特征[J]. 高原气象, 1994, 13(2): 1 - 9
- [9] 张鸿发, 郭三刚, 张义军, 等. 青藏高原强对流雷暴云分布特征[J]. 高原气象, 2003, 22(6): 558 - 564
- [10] 陈隆勋, 宋玉宽, 刘骥平, 等. 从气象卫星资料揭示的青藏高原夏季对流云系的日变化[J]. 气象学报, 1999, 57(5): 549 - 560
- [11] 傅云飞, 李宏图, 白勇. TRMM 卫星探测青藏高原谷地的降水云结构个例分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 98 - 106
- [12] 傅云飞, 刘奇, 白勇, 等. 基于 TRMM 卫星探测的夏季青藏高原降水和潜热分析[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(1): 8 - 18
- [13] 潘晓, 傅云飞. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析[J]. 高原气象, 2015, 34(5): 1191 - 1203
- [14] 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
- [15] 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、边界层观测研究进展[J]. 中国气象科学院年报(英文版), 1998: 20 - 21
- [16] 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
- [17] 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), 2001, 31(5): 428 - 441
- [18] 汪会, 郭学良. 青藏高原那曲地区一次深对流云垂直结构的多源卫星和地基雷达观测对比分析[J]. 气象学报, 2018, 76(6): 996 - 1013
- [19] 杨洁帆, 雷恒池, 胡朝霞. 一次层状云降水过程微物理机制的数值模拟研究[J]. 大气科学, 2010, 34(2): 275 - 289
- [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]. J. Atmos. Sci, 2015, 72(1): 312 - 339
- [21] Kain J S. The Kain - Fritsch convective parameterization: An update[J]. J of Appl Meteor, 2004, 43(1): 170 - 181
- [22] 陈炯, 王建捷. 边界层参数化方案对降水预报的影响[J]. 应用气象学报, 2006, 17(S1): 11 - 17
- [23] 马严枝, 陆昌根, 高守亭. 8. 19 华北暴雨模拟中微物理方案的对比试验[J]. 大气科学, 2012, 36(4): 836 - 838
- [24] 周彦均, 高志球, 濮梅娟, 等. 不同的边界层参数化方案对江淮一次暴雨过程数值试验研究[J]. 大气科学学报, 2019, 42(4): 591 - 601
- [25] Isidora J, Gallus W A J, Segal M, et al. The impact of different WRF model physical parameterizations and their interactions on warm season MCS rainfall[J]. Weather Forecasting, 2005, 20(6): 1048 - 1060
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Maussion F, Scherer D, Finkelnburg R, et al. WRF simulation of a precipitation event over the Tibetan Plateau, China—An assessment using remote sensing and ground observations[J]. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2011, 15(6): 1795 - 1817
- [29] 陈玲, 周筠珺. 青藏高原和四川盆地夏季降水云物理特性差异[J]. 高原气象, 2015, 34(3): 621 - 632

## Numerical Simulation of a Convective Cloud Precipitation at Naqu on the Tibetan Plateau

HOU Wenxuan<sup>1</sup>, HUA Wei<sup>1,2</sup>, GUO Yiyuan<sup>1</sup>, HUANG Tianci<sup>1</sup>, FAN Guangzhou<sup>1,3</sup>

(1. School of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Nansen – Zhu Interbarional Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on Weather Research and Forecast system mesoscale model (WRF V3.7.1 version) and the NCEP FNL reanalysis data, a case of convective cloud precipitation at Naqu over the Tibetan Plateau during August 26 – 27, 2015 was simulated with two cumulus parameterization schemes (Grell – Devenyi and Grell – Freitas) and four cloud microphysical parameterization schemes (Lin, Milbrandt, SUB\_YLIN and Thompson) and the effects of different parameterization scheme combinations on the precipitation, atmospheric circulation field, radar reflectivity and cloud microphysical process are analyzed and compared. The results showed that WRF model has successfully simulated the spatial – temporal pattern and variation of this precipitation case with the performance varies with different parameterization scheme combinations and the parameterization scheme combinations of Grell – Devenyi + SUB\_YLIN and Grell – Freitas + SUB\_YLIN works best in the simulation of this case in general. Meanwhile, the results from simulation also reveal that the ice process dominated by snow particles played a critical role in the development of clouds and precipitation, while the warm cloud particles have small effect on precipitation. Furthermore, it can be seen from the form the temporal variation of cloud microphysical property that the best – performing SUB\_YLIN scheme can reasonably simulate the conversion process between snow particles and ice crystal particles during precipitation, can reasonably reproduce the conversion between snow particles and ice particles during precipitation process and the snow particles can not only release latent to promote the development of convective movement during the condensation process but also promote the precipitation through melting. In addition, the release of latent heat from the condensation of ice particles in the upper troposphere also creates favorable conditions for the development of deep convection.

**Key words:** Tibetan Plateau, convective cloud precipitation, cloud microphysics, numerical simulation