基于对流云/层状云划分的云分析方法改进*

陈锋*　董美莹　冀春晓

(浙江省气象科学研究所，杭州 310008)

摘要

本文基于实况融合降水和雷达反射率因子，采用模糊逻辑法提出了一个新的对流云/层状云判别方法，进而改进了 GSI (Gridpoint Statistical Interpolation)同化系统中的云分析方案(简称 CUST 方案)。以 2019 年 6 月 19 日影响浙江的一次梅雨过程为例，利用 WRF (Weather and Forecast Research)模式与 GSI 同化系统开展了逐小时循环同化试验，分析了 CUST 方案对降水的模拟改进作用和可能影响过程，并与其他方案进行了对比，探讨了 CUST 方案的应用效果。结果表明：(1)新提出的 CUST 方案可较为准确地划分对流云和层状云，以此作为判别因子改进 GSI 同化系统中的云分析方案切实可行。(2) CUST 方案在对流区域采用对流云分析方案，在非对流区域采用层云分析方案，减小了单纯对流云方案在非对流区域的空报现象、以及单纯层云方案在强对流区域的漏报现象，有效提升了短时降水的模拟能力。(3) CUST 方案对模式起报初期(6 小时甚至 3 小时内)的改进效果较为明显，且对小雨量级的改进幅度要大于大雨量级。(4)与基于地表感热和潜热通量确定的对流尺度速度作为对流判据的混合云分析方案(简称 CSW 方案)相比，CUST 方案基于实况资料划分的对流云/层状云更为合理，模拟的降水结果占优，说明 CUST 方案方法有较好的应用前景。

关键词：云分析；对流云层状云划分；降水；数值模拟

文章编号：2019240C

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.19240

*收稿日期：　2020-09-18；网络预出版日期：CCYY-MM-DD

作者简介：陈锋，男，博士，主要从事数值模式及资料同化研究，E-mail: fchen_zj@163.com

资助项目：浙江省科技计划项目(2017C03035)；浙江省气象科技计划项目(2018ZD01, 2017ZD04)

1 引言

模式中湿物理过程对降水预报有着至关重要的作用。而在模式背景场中，云水物质往往与实况差异较大，尤其是传统的“冷启动”方式生成的初始场，一般仅包含温度场、湿度场、气压场和水平风场，而云水物质等非绝热参数则需要通过模式积分逐步调整生成(Donner, 1988; 王瑾和刘黎平, 2009)。这种模式“起转(spin-up)”问题会导致初期模式降水明显滞后于实况出现，造成较大偏差。

近年来，利用卫星及多普勒雷达资料的开展复杂云分析应用，为解决模式“起转”问题提供了很好的途径。复杂云分析是以模式预报或初始分析场为背景场，基于物理定理和经验关系建立观测资料与背景场中各要素之间的关系，更新构建更符合实际的网格尺度初始云水物理场，以缓解数值模式云水物质的起转问题，从而改进模式预报结果的一种方法(Albers et al., 1996; Zhang et al., 1998)。比如：Lin et al. (1993)利用 LAPS (Local Analysis and Prediction System)系统开展资料融合及云分析，改进了初始场信息并明显改善了短时(0-6 小时)降水的预报结果。Zhang et al. (1998)和 Zhang (1999)借鉴 LAPS 云分析系统，发展了 ADAS (ARPS (Advanced Regional Prediction System) Data Assimilation System)系统(其中的云分析模块又被称为 ARPS 对流云方案)，并通过分析吸收雷达反射率因子，改进了模式初始场中的云过程、水凝物及其混合比。Xue et al. (2003)利用 ADAS 系统证明了雷达资料的引入能有效缩短模式的起转时间。Hu et al. (2006)改进了 ADAS 云分析系统，并利用雷达反射率资料反演了初始场中的云水物质，并调整了云内温湿，有效改进了模式对龙卷风暴单体的模拟。Weygandt et al. (2006)提出了直接基于云内格点物理量进行云水、云冰含量估计的云分析方案，并在 RUC 系统(Rapid Update Cycle, Benjamin et al., 2004, 2007; Alexander et al., 2010)中得到应用(被称为 RUC 层云方案)。近年来应用广泛的 GSI (Gridpoint Statistical Interpolation, Hu et al., 2015)系统则包含了 ARPS 对流云方案和 RUC 层云方案，但因缺乏对流判据，无法同时使用。

在国内，也有较多学者利用 LAPS、ADAS、RUC 等云分析方案开展研究(盛春岩等, 2006; 屈右铭等, 2010; 胡金磊和郭学良, 2013; 程兴宏等, 2014; 王洪等, 2015; 薛谌彬等, 2017)。业务上，以北京和上海气象局为代表的业务单位研制了各类快速更新循环同化数值预报系统 (陈敏等, 2011; 雷蕾等, 2012; 陈葆德等,

2013; 邱金晶等, 2015)，这类系统针对强对流短时临近预报而设计，但在模式起转过程中或多或少都存在一定问题。朱立娟(2012)利用 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)短时临近预报模式系统开展检验时发现，该系统中的 ADAS 云分析模块计算的水凝物含量比卫星观测值偏高。李佳等(2017)也在上海的业务系统应用过程中发现了类似的问题，并分析这种初始水凝物偏高与模式物理方案的不协调，是引起积分初始阶段模式调整剧烈和降水量偏大的根本原因。造成水凝物分析结果偏高的主要原因与 ARPS 对流云方案的设计有关：该方案是针对于深对流系统设计的，在非对流格点上使用该方案分析会导致分析所得的水凝物含量偏高。因此，李佳等(2017)根据地表感热和潜热通量确定对流尺度速度作为对流判据，在 ADAS 中增加了层云方案，对不同类型的格点分别采用对流云方案和层云方案计算云水云冰，显著减轻了模式初始阶段的云水云冰过量问题，提高了降水的预报能力。然而，该方法提出的对流判据的准确性依赖于模式对感热和潜热通量模拟的准确性。

目前，较为常用的对流云-层状云划分一般考虑地面降水强度(Churchill and Houze, 1984; Caniaux et al., 1994)，上升速度(Tao and Simpson, 1989; Tao et al., 1993, 2000; Xu, 1995; Houze, 1997)，相对湿度(Tao et al., 1993; Chin, 1994; Alexander and Cotton, 1998)，雷达反射率(Steiner et al., 1995)等因素，其中地面降水强度和雷达反射率相对易于观测和获取。Lang 等(2003)对比了六种不同划分方案后指出，不同方案间的定性划分结果是一致的。因此本文拟采用地面降水强度和雷达反射率作为判别因子，构建一种基于观测数据的对流云-层状云划分方法，并将其应用于 GSI 云分析系统中。针对 2019 年梅雨期间的一次混合云降水过程，分别采用纯层云方案(ST 方案)、纯对流云方案(CU 方案)、基于地表感热潜热通量确定对流尺度速度作为对流判据的混合方案(CSW 方案)、以及本文新提出的基于地面降水强度和雷达反射率划分对流云/层状云作为判据的混合方案(CUST 方案)，进行循环同化对比试验，通过对流格点分布、云水云冰物质变化和降水的分析，探讨新方案对云分析结果和降水预报的影响。本文的内容安排如下：第 2 节介绍了云分析方法的改进及个例，第 3 节概述了观测数据和数值试验设计方案。改进后的云分析方法的验证及其对模拟结果的影响在第 4 节进行了分析。第 5 节是结论与讨论。

2 云分析方法改进和个例选取

2.1 GSI 云分析系统

云分析是使用观测资料和模式的初始分析场，通过物理定律和经验关系，构造出网格尺度的初始云水物理场，以缓解数值模式云水物质的起转问题，使模式积分的早期结果更接近于实况(Albers et al., 1996; Zhang et al., 1998)。其本思路是：首先利用观测计算云覆盖区域，在区域内计算云凝结物(云冰和云水)含量；再利用反射率因子计算水物质(雨，雪和雹)含量；进而调节温度和水汽场。目前，GSI 中同时包含了两个较为成熟的方案：ARPS 对流云方案和 RUC 层云方案。对于云凝结物(云冰和云水)含量的计算，ARPS 对流云方案的计算在云内，即将云从云底到云顶细分为多层，逐层通过计算温度、气压和饱和水汽压求得饱和水汽混合比，然后计算相邻两层饱和水汽混合比之差作为基本的云水和云冰的增量或减量，最后依据环境温度分离云冰和云水含量；而 RUC 层云方案的计算在模式层上，先分别计算格点液面和冰面的饱和水汽混合比，再根据温度确定权重求取格点上云滴粒子混合比的加权平均，最后按温度权重系数分离出云水和云冰。对于水物质(雨，雪和雹)含量的计算，ARPS 对流云方案和 RUC 层云方案均是在先确定降水类型后，再根据不同的微物理方案(如 KRY(Kessler, 1969)或 Lin(Ferrier, 1994)或 Thompson(Thompson, et al., 2004))计算云内雨、雪和雹粒子的含量。对于云内的温度调节，ARPS 对流云方案采用湿绝热过程，将云从云底到云顶细分为多层，利用 Smith-Feddes 方案(Albers et al., 1996)计算得到的每层云内温度计算位温，进而计算与模式背景位温差并根据垂直速度进行适当调整；而 RUC 层云方案采用干绝热过程，在模式层上直接计算位温并进行调整。对于水汽调节，ARPS 对流云方案同时根据格点雷达发射率观测和云量调整；而 RUC 层云方案则根据云量进行调整。总的来说，ARPS 对流云方案与 RUC 层云方案的最大区别在于：RUC 层云方案的计算不考虑云的垂直结构即垂直方向的联系，而直接以模式层格点的物理量来估计云凝结物含量和调整云内温度；ARPS 对流云方案的设计主要用于深对流系统，而 RUC 方案更适用于层状云降水系统。

2.2 基于对流云/层状云划分的云分析方案改进

GSI 云分析系统在结合背景场和观测资料完成三维云场的构造后(即确定云

底、云高与网格云量)，首先进行云滴粒子质量浓度的估计。由于缺乏对流判据，原始系统在计算云水云冰含量时，只能选择 ARPS 对流云方案或 RUC 层云方案中的一种，这显然与实际情况有较大差异。李佳等(2017)根据地表感热和潜热通量确定对流尺度速度(convective-scale velocity)作为对流判据，来划分对流云和层状云(简称为 CSW 方案)，但由于感热和潜热均来自于模式模拟，划分结果存在模式依赖性，与实况存在一定差距。因此，本文对云分析方案的改进，主要在于引入一个基于可靠实况的对流云/层状云判别因子，认为在同一云分析格点中同时存在一定概率的对流云/层状云，通过判别因子可计算出每个网格点中属于对流云/层状云的概率(以下简称占比概率)，对不同性质的对流云或层状云分别采用 ARPS 对流云方案或 RUC 层云方案来分析，最终按占比概率加权得到云水、云冰的混合比。区别于 CSW 方案中以绝对阈值划分对流云和层状云，新方案由于采用概率来描述每个格点中对流云和层状云的占比，因此所求得的云水、云冰的混合比在空间上的变化相对 CSW 方案较为平缓一些。新方案中，对流云/层状云的占比概率计算较为关键，这里选择易于观测和获取的地面降水强度和雷达反射率作为判别因子，采用模糊逻辑法来实现对对流云和层状云的识别(简称为 CUST 方案)。具体步骤如下：

⑴候选识别参数的获取。为便于业务运行，这里选取国家气象信息中心研制的中国多源降水融合系统 2.1 版本(CMPAS, CMA multisource precipitation analysis system, AS-Hourly V2.1)中的三源融合降水(潘旸等, 2015; 2018)和中国气象局气象探测中心研制的雷达反射率拼图数据作为判别因子。CMPAS 降水数据融合了 CMORPH(CPC MORPHing technique)卫星降水估测资料、雷达 QPE 降水资料和地面站点降水资料，实时提供 1h、5km 分辨率的降水产品。雷达反射率拼图数据是在对单部雷达基数据做了定标、质控后，将全国天气雷达组网拼图的资料进行网格化、重叠区域处理，最终生成全国 10 分钟、1km 分辨率的反射率拼图产品。

⑵候选识别参数统计特征的获取。由于不同的降水过程和不同的降水发展阶段，对流云和层状云对应的候选参数值(CMPAS 降水值和雷达反射率值)的大小会有变化。理想的统计特征应该来自大量样本，这里选取 2019 年 5 月-7 月的数据进行统计：首先选取统计时间段内的小时强对流样本(观测站点小时雨强大于

20 mm h^{-1})，共有 11493 个站次；其次从 CMPAS 和雷达反射率格点数据中提取出对应的降水值和反射率值；分别制作这些 CMPAS 降水和雷达反射率样本的分布概率密度函数和累计概率密度函数(如图 1 所示)；最后选取 90%和 50%的累积概率对应的候选参数值作为对流发生的上下阈值。从图 1 分析可以看到，CMPAS 降水的上下阈值分别为 8 mm h^{-1} 和 16 mm h^{-1}，雷达反射率的上下阈值为 26 dBz 和 38dBz。Churchill and Houze(1984)指出，划分对流云和层状云的降水阈值可随不同情况从 10 mm h-1 到 25 mm h-1 不等；Steiner et al. (1995)也认为雷达反射率超过 40dBz 的点都应该是对流性降水。与已有研究相比，本研究得到的候选参数阈值应该是恰当的。

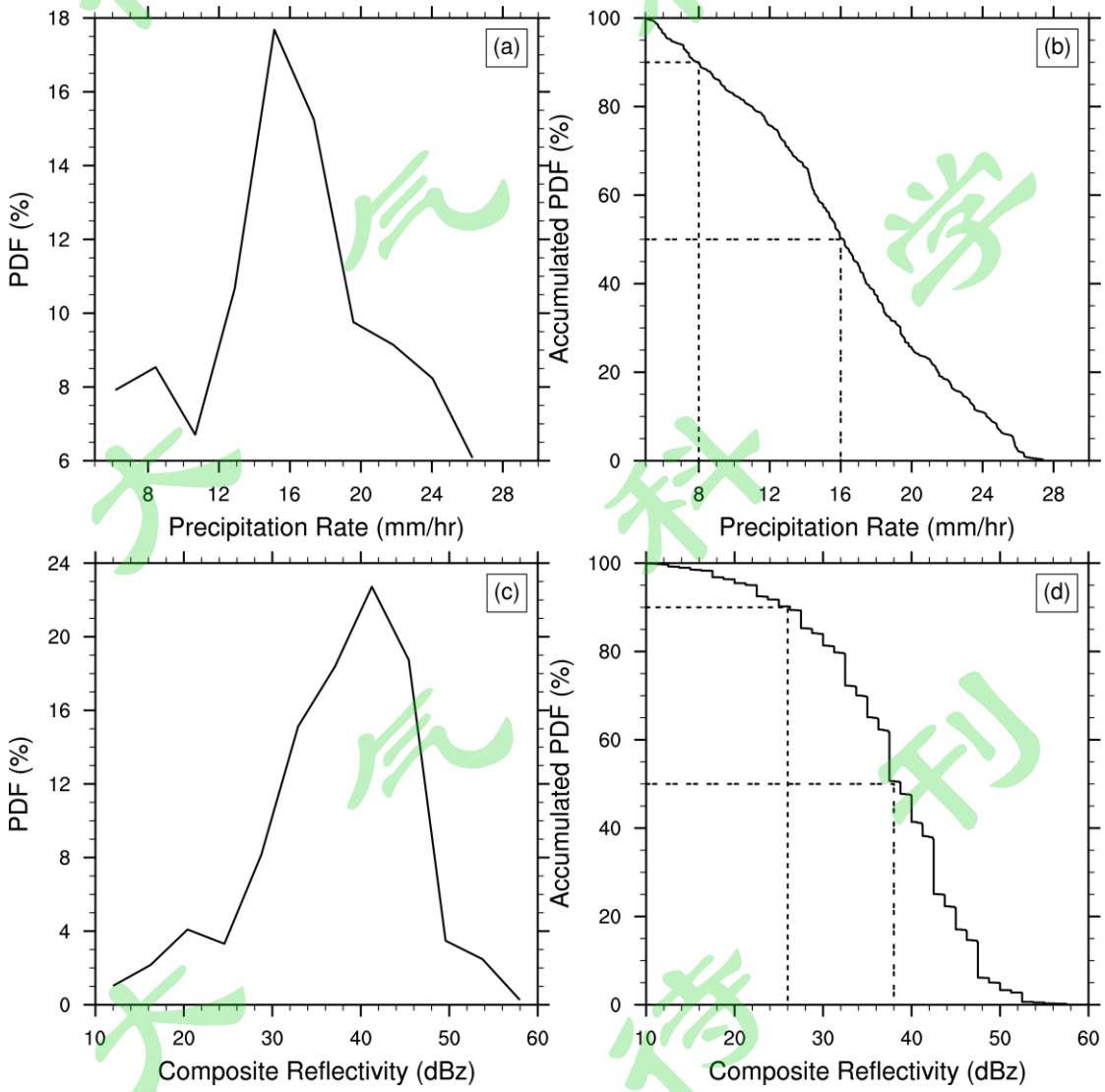


图 1 对流云/层状云划分的：(a) CMPAS 降水的分布概率密度；(b)CMPAS 降水的累积概率密度；(c)雷达反射率的分布概率密度；(d)雷达反射率的累积概率密度

Fig.1 Probability density function of (a) CMPAS precipitation and (c) Radar reflectivity,

and accumulated probability density function of (b) CMPAS precipitation and (d) Radar reflectivity for the stratiform cloud and convective cloud

⑶识别方法。由于候选参数存在相互交叉部分，选取一组固定参数阈值不能适用于各种情况下的层状云和对流云识别，因此，这里选用模糊逻辑法(Fuzzy Logic Method, 曹俊武等, 2005; 肖艳姣和刘黎平, 2007)来实现。模糊逻辑法不追求云类型的具体的识别参数量值，而是将识别参数分为各种等级，根据宽松的分级原则，求得较为合适的结果，具有较强的扩充性和兼容性。这里采用基本形式为 T 函数的隶属函数系对这两个识别参数进行模糊化。首先，利用由节 2(2)中获取的候选参数上下阈值，可最终获得对流云的模糊基函数(图 2)，根据这两个模糊基函数可知：某个格点中，CMPAS 降水小于 8 mm h^{-1}(雷达反射率小于 26dBz)时，该处属于对流云的概率为 0% (即全部为层状云)；CMPAS 降水大于 16 mm h^{-1}(雷达反射率大于 38dBz)时，该处属于对流云的概率为 100% (即全部为对流云)；处于两者之间时，该处属于对流云的概率随线性变化。具体的表达式如下：

$$T_{i,j} = \begin{cases} 0, & x \le x_1 \\ (x_2 - x)/(x_2 - x_1), & x_1 < x < x_2 \\ 1, & x \ge x_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中x_1, x_2为候选参数的上下阈值，T_{ij}为第 j 个识别参数对第 i 类云的贡献。

最终，该处对流云/层状云的占比概率为：

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} w_j T_{ij}, \quad (2)$$

其中，P_i为该处第 i 类云(对流云或层状云)的占比概率，w_j为第 j 个识别参数的权重，且$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$，这里 CMPAS 降水和雷达组合反射率两个识别参数的权重都取 0.5。

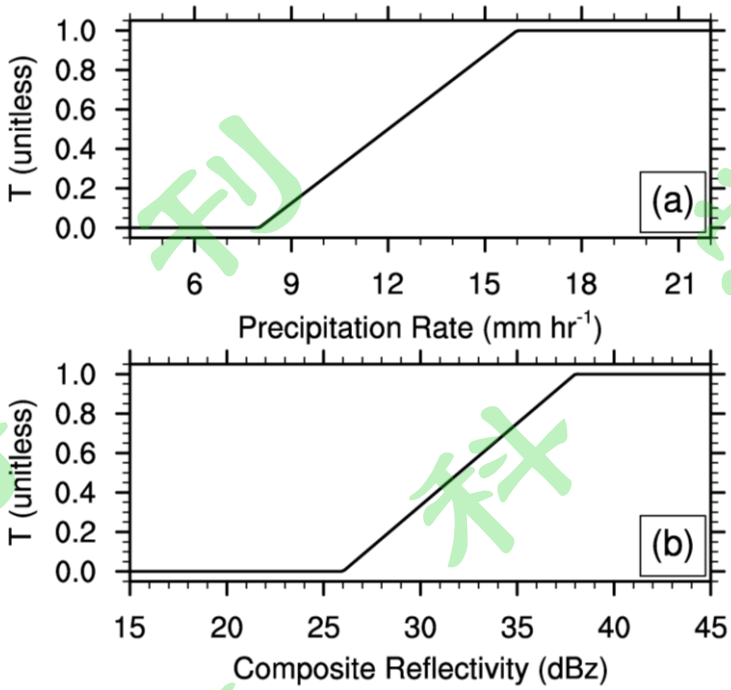


图 2 基于 T 函数的识别参数的模糊基函数

Fig. 2 Fuzzy setting based on T function for the separation parameters

2.3 个例选取

选取 2019 年 6 月 19 日的一次梅雨过程作为试验个例。6 月 17 日到 21 日受低空切变线影响，浙江省出现连续强降雨天气，强降雨较为稳定，主要集中在浙中北地区，部分有暴雨局部大暴雨。浙江省快速更新同化业务系统(邱金晶等, 2015)提前 6 小时预报出了此次降水过程，对东西向雨带的分布有较好的预报能量，6 小时的累计降水在 30-60 mm，略小于实况，但对临近预报的降水量偏大，特别在起报后 0-1 小时浙西北及绍兴宁波地区，有空报强降水落区(图略)，这与朱立娟(2012)和李佳等(2017)指出的问题是一致的。

3 数值试验方案设计

3.1 试验配置

试验以浙江省快速更新同化业务系统(邱金晶等, 2015)的系统框架为基础，选用 WRF-ARW V3.7.1(http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users [2020-05-07],

Skamarock et al., 2008)作为预报模式，GSI-3DVAR V3.4(Hu et al., 2015)作为资料同化系统，研究区域以为(117°E，32°N)为中心，两层嵌套网格，分辨率分别为 9km 和 3km，网格数分别为 265×265 和 205×187，网格参数与业务版本相同(图 3)，微物理方案采用 Thompson 方案(Thompson et al., 2008)，辐射传输方案采用 RRTMG 方案 (Iacono et al., 2008)，表层方案采用修正的 Monin-Obukhov 方案 (Jiménez et al., 2012)，边界层方案采用 YSU 方案(Hong et al., 2006)，陆面方案采用 Noah 方案(Chen and Dudhia, 2001)，不采用积云参数化方案。试验从 2019 年 6 月 19 日 08 时(BJT)冷启动，初始背景场资料由 NCEP 提供的 Global Forecast System (GFS) 模式每 3h 间隔的 0.5°×0.5° 实时预报资料 (www.nco.ncep.noaa.gov/pmb/products/gfs [2020-05-07])通过 WPS 初始化模块插值获取，其他时刻同化的背景场则由本系统上一时次的 1h 预报场提供，侧边界全部由 NCEP GFS 提供，具体流程如图 4 所示。

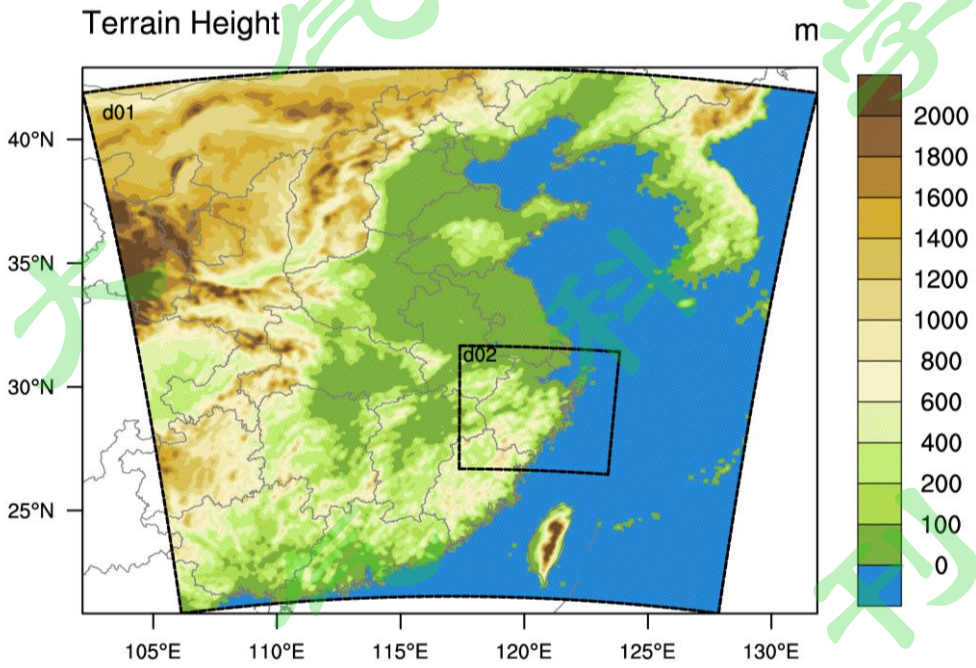


图 3 浙江快速更新同化系统的模拟区域

Fig.3 Study area of Zhejiang WRF-ADAS Rapid Refresh System

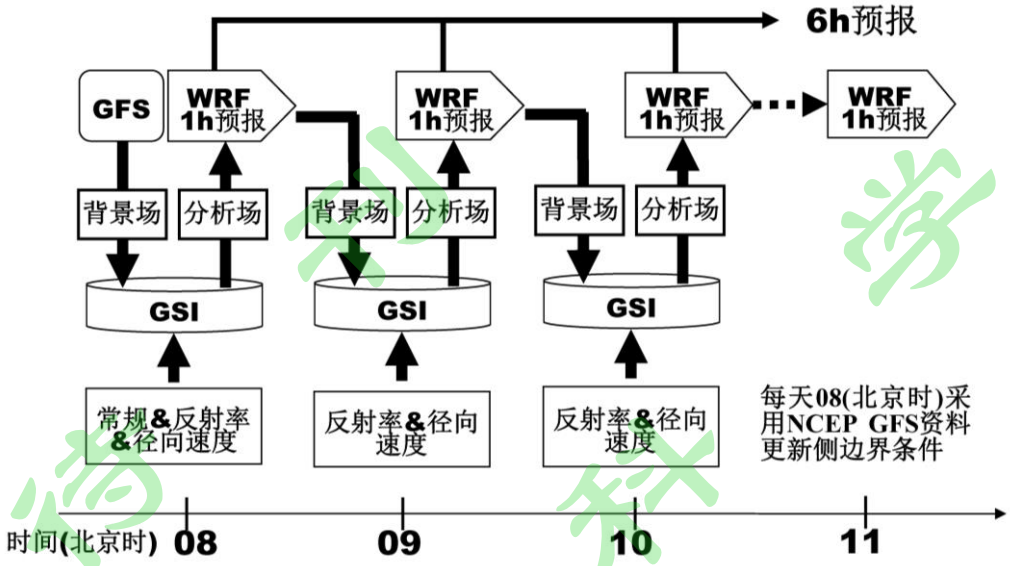


图 4 循环同化流程示意图

Fig.4 The flowchart of cycling assimilation system

3.2 观测资料

本研究用于同化的观测资料包括常规资料、多普勒雷达资料和风云卫星二级产品数据。常规资料主要来自于 NCEP 提供的 Global Data Assimilation System (GDAS, www.emc.ncep.noaa.gov/gmb/gdas [2020-05-07])观测数据，包括地面天气站点报(SYNOP)、机场地面报(METAR)、船舶和浮标观测(SHIP+BUOY)、全球 GTS 探空观测数据(Rawinsonde)、飞机报文观测(AMDAR)、卫星云导风(SATWND)等常规观测资料。雷达基数据资料主要来自于浙江省气象信息网络中心提供的浙江省内的 8 部多普勒 SA/SB 波段雷达的观测数据，包括衢州、丽水、金华、杭州、湖州、宁波、台州、舟山，其观测要素为雷达反射率因子和径向速度。风云卫星数据来自于国家卫星气象中心风云卫星遥感数据服务网，包括风云 4A 卫星的云检测、云顶高度、云顶气压和云顶温度资料。另外，浙江省及其周边区域约 4000 多个地面自动站的小时降水将用于验证模拟效果，其站点平均空间分辨率为 6-7km。已有研究表明，在较高空间密度情况下，不同插值方法对结果影响有限(Ikeda et al., 2010; 许娈等, 2017)。因此，在定量评估降水时，本研究采用简单易行的反距离权重方法将站点数据插值到模式格点上。

3.3 试验设计

为探讨新改进的混合云分析方案对本次过程预报的影响，本研究设计了 4 个数值试验，分 2 组分析(见表 1)：

⑴层云方案试验(ST)：WPS 从 GFS 资料插值处理得到 2019 年 6 月 19 日 08 时的插值场作为初始背景场，并在 08 时由 GSI-3DVAR 同化 GDAS 常规资料和雷达径向速度，采用 RUC 层云方案进行云分析，然后以得到的分析场作为初始场，向前积分预报 6 小时至 14 时。此后的循环，均以前 1h 的预报场作为背景场，由 GSI-3DVAR 同化雷达径向速度并采用 RUC 层云方案进行云分析，然后以得到的分析场作为初始场，向前积分预报 6 小时。

⑵对流云方案试验(CU)：同 ST 试验，但采用的是 ARPS 对流云方案做云分析。

⑶新改进的混合云分析方案试验(CUST) ：同 ST 试验，但采用的是基于 CMPAS 降水和雷达反射率的模糊逻辑法的混合云分析方案做云分析。

⑷基于对流尺度速度的云分析方案试验(CSW) ：同 ST 试验，但采用的是基于地面感热和潜热通量的对流尺度垂直速度法的混合云分析方案做云分析。

将 ST、CU 和 CUST 试验作为第一组试验，用于对比改进后的混合云分析方案与纯层云方案和纯对流云方案的差异及其对模拟结果的影响。将 CSW 与 CUST 试验作为第二组试验，用于比较不同对流云/层状云划分方案对云分析结果及模拟结果的影响。

表 1 数值试验配置方案

试验组	试验名称	云分析方案	对流判别方法	备注
第一组	ST	RUC 层云方案	无	对比三个方案，分析改进后的混合云分析方法对模拟结果的影响
	CU	ARPS 对流云方案	无	
	CUST	混合云分析方案	基于 CMPAS 降水和雷达反射率的模糊逻辑法	
第二组	CSW	混合云分析方案	基于地面感热和潜热通量的对流尺度垂直速度法	对比两个方案，分析不同判别方法对模拟结果的影响
	CUST	混合云分析方案	基于 CMPAS 降水和雷达反射率的模糊逻辑法	

4 模拟结果分析

为探讨不同云分析方案对模拟结果的影响，本文主要从云分析结果的差异、不同云分析方案对降水模拟结果的影响这两个方面开展对比分析。

4.1 对流云/层状云划分方法检验

在改进的云分析方案中，对流云和层状云的划分起到了至关重要的作用。图 5 给出了 2019 年 6 月 19 日 09:00BJT 时刻，分别根据 CMPAS 降水、雷达反射率和同时考虑两者的模糊逻辑法划分得到的对流云占比概率的分布。表 2 给出了三种划分方法与实况对流云(实况小时降水大于 20 mm h^{-1} 的站点)分布的定量统计结果，可以看到采用模糊逻辑方法的准确率最高(0.95)，仅根据 CMPAS 降水划分的方法次之(0.94)，仅根据雷达反射率划分的方法最低(0.92)。模糊逻辑方法有效较低了仅根据雷达反射率划分时带来的空报现象(空报率从 0.52 下降到 0.09)，同时也降低了仅根据 CMPAS 降水划分时带来的漏报现象(漏报率从 0.73 下降到 0.56)，与实况更为一致。换而言之，虽然三种划分方法均识别出了浙中北地区东西向的强对流区域，但是仅依据 CMPAS 降水划分的对流云分布明显偏小，而仅依据雷达反射率划分的对流云分布明显偏大，依据模糊逻辑法划分的对流云，既包含了主要强对流区域，也覆盖了强对流周边区域，对流云面积大小较为恰当。

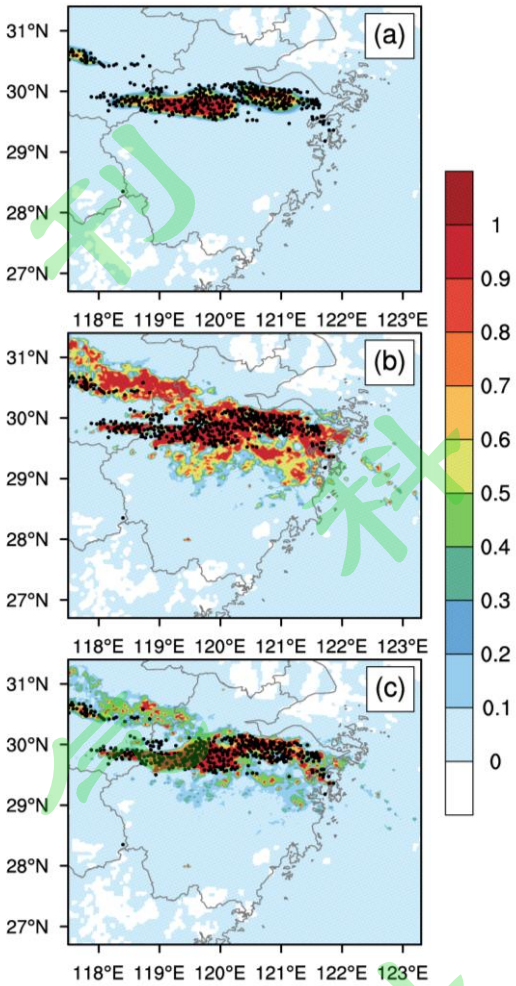


图 5 不同方法划分的对流云占比概率的分布：(a)仅根据 CMPAS 降水划分；(b)仅根据雷达反射率划分；(c)采用模糊逻辑方法划分。黑点表示观测降水大于 20mm h^{-1} 的站点

Fig.5 The proportion of convective region from three different separation techniques: (a) CMPAS precipitation method; (b) Radar reflectivity method; (c) Fuzzy logical method. Black points refer the observation stations whose precipitation larger than 20 mm h^{-1}

表 2 对流云/层状云划分方法检验统计

划分方法	准确率	空报率	漏报率
仅根据 CMPAS 降水划分	0.94	0.00	0.73
仅根据雷达反射率划分	0.92	0.52	0.29
采用模糊逻辑方法划分	0.95	0.09	0.56

4.2 对云水、云冰分析的影响

不同方案对分析结果的影响表现在对云水、云冰含量的反演。图 6 给出了 2019 年 6 月 19 日 09:00BJT 时刻 ST 试验、CU 试验及 CUST 试验分析得到的云水、云冰垂直累积量的水平分布。可以看到，三个试验分析得到的云水云冰物质主要呈东西向分布在浙中北部及安徽东南部，这与雷达反射率和强对流区域的分布是一致的(图 5b)。但三个试验分析得到的云水云冰含量大小有较大差距，其中：ST 试验的分析结果最小，在整个区域内均处于 0.2-2 kg m^{-2}；CU 试验的分析结果最大，在整个降水区域内都存在不低于 4 kg m^{-2} 的云水云冰总量；而 CUST 试验的分析结果介于 ST 试验和 CU 试验之间，在判定为对流云的区域，保留了 CU 试验对流特征，云水云冰总量在 4-14 kg m^{-2}，而在判定为层状云的区域，保留了 ST 试验的层云特征，云水云冰总量在 0.2-4 kg m^{-2}。

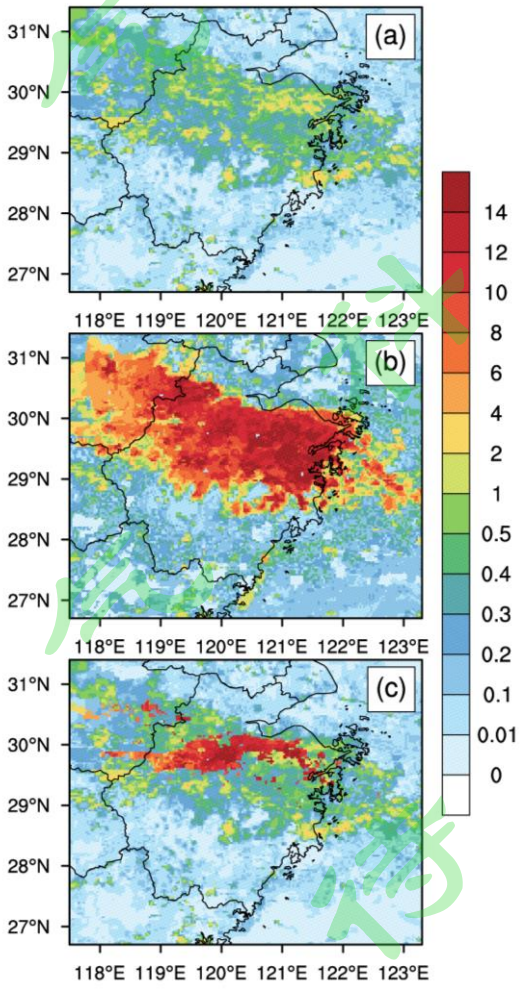


图 6 不同云分析方案分析得到的 2019 年 6 月 19 日 09 时的云冰、云水垂直累积

水平分布(单位：kg m^{-2})：(a)ST 试验；(b)CU 试验；(c)CUST 试验

Fig.6 Horizontal distributions of vertically integrated cloud ice and cloud water from different cloud analyses method: (a) ST method; (b) CU method; (c) CUST method

图 7 进一步给出了 2019 年 6 月 19 日 09:00BJT 时刻 ST 试验、CU 试验及 CUST 试验分析得到的区域格点平均云水、云冰混合比的垂直分布。可以看到，三个试验分析得到的云水均分布在 11 km 以下，云冰均分布在 6km 以上，在 6-11km 是云水云冰共存的区域，但从量值上来看有较大差异。ST 试验分析的云水云冰含量最低，云水含量约为 CU 试验的 1/4，云冰含量约为 CU 试验的 1/10；而 CUST 试验分析的云水云冰含量居于 ST 试验和 CU 试验之间。从峰值来看，ST 试验云水云冰含量的峰值分别出现在 5km 和 8km 处，CU 试验的峰值出现位置略高于 ST 试验，分别出现在 6.5km 和 11km 处，而 CUST 试验居于两者之间。另外，无论是从云水云冰的水平分布(图 6)，还是从垂直分布(图 7)上，都可以明显看到 ST 试验分析得到的云水物质分布连成一片，阶梯变化较小，而 CU 试验则相对梯度更大。这是由于 RUC 层云方案计算始终在模式层上，加上在计算云物质总量的事后附加了上限，云分析得到的云水物质场梯度不明显；而 ARPS 对流云方案将云从云底到云顶细分为多层，计算每层云水物质场的分布后再插值到模式层，因此分析得到的云水物质量值较大且梯度相对明显。CUST 试验依据对流判别因子，融合了 RUC 层云方案和 ARPS 对流云方案，在强对流区分析的云水云冰含量高，保留了对流特性，而在非对流区云水云冰含量低，保留了层云特性。新方案使分析得到的云水云冰含量的空间分布相对更为合理。

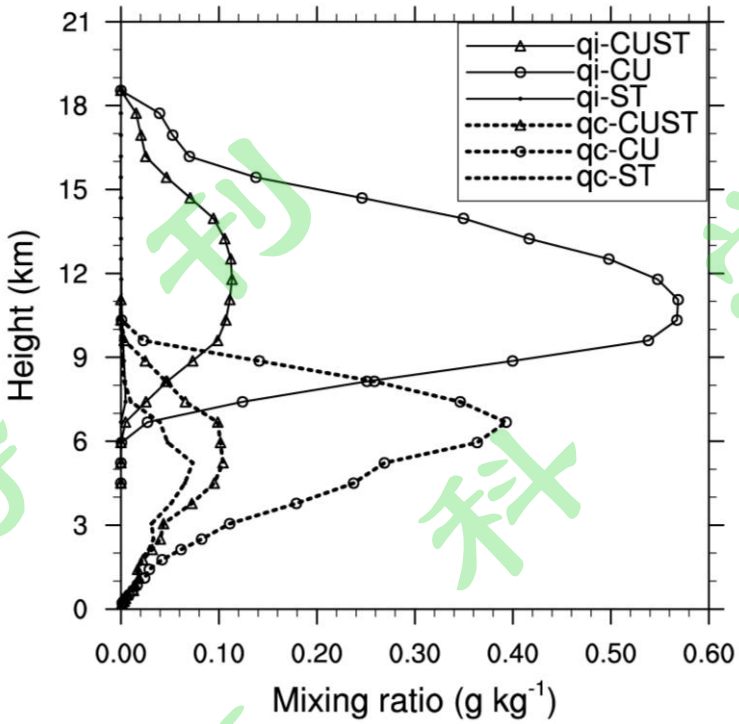


图 7 不同云分析方案分析得到的格点平均云冰(qi)和云水(qc)混合比垂直分布(单位: g kg^{-1})

Fig. 7 Vertical distributions of grid averaged cloud ice (qi) and cloud water (qc) mixing ratios from different cloud analyses method

4.3 对降水的影响

初始云水物质场的变化，将直接影响短时降水的模拟。由图 8 可见，三个试验模拟的 2019 年 6 月 19 日 09:00BJT 起报的 1 小时累计降水分布形态相似，均呈东西向分布，但在量级上 ST 试验降水最小，CU 试验最大，CUST 试验居于两者之间。从降水差异图上可以看到，CUST 试验比 ST 试验在浙中北部强对流区域模拟了更多的降水(图 8e)，而比 CU 试验在非强对流区域模拟了较少的降水(图 8f)。这表明，新方案能在保留 ARPS 对流云方案在强对流区域的强降水模拟的同时，较大程度改进了该方案在非对流区域的偏湿、降水偏大的不足。

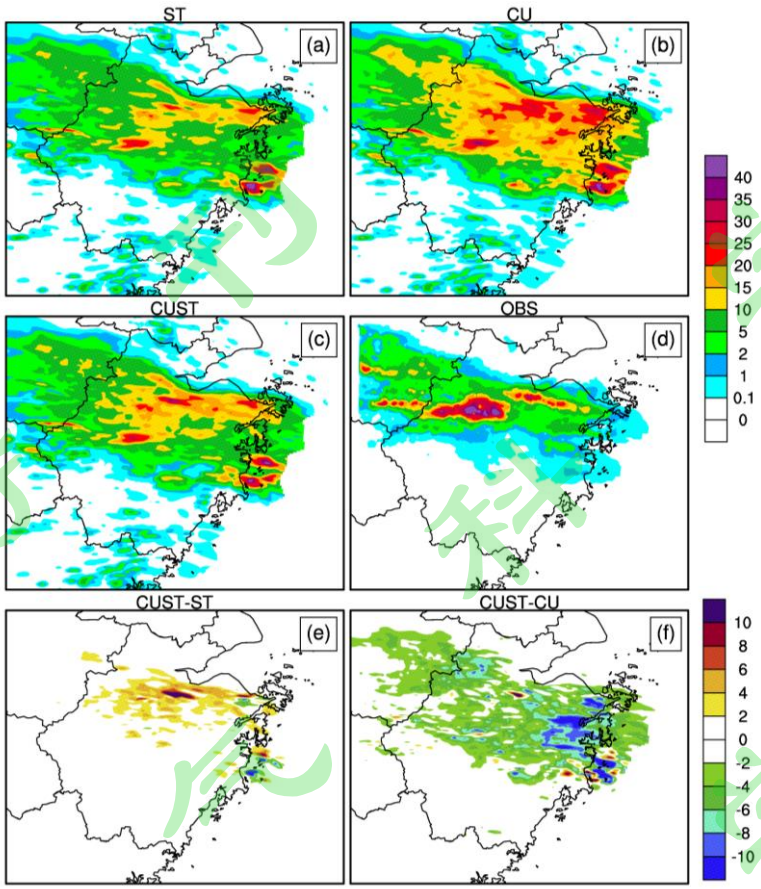


图 8 观测及模拟的 2019 年 6 月 19 日 10 时的 1 小时累计降水量: (a) ST 试验；(b)CU 试验；(c) CUST 试验；(d) 观测；(e) CUST 试验与 ST 试验的差异；(f) CUST 试验与 CU 试验的差异

Fig.8 Observed and simulated hourly accumulated precipitation at 10:00 BJT 19 June 2019: (a) ST run; (b) CU run; (c) CUST run; (d) Observation; (e) CUST run mines ST run; (f) CUST run mines CU run

对起报后 3 小时内逐 10 分钟累计降水进行的定量评估显示，新方案对模拟结果的改进明显(图 9)。ST、CU 和 CUST 试验模拟降水的小雨量级(≥0.1 mm)的平均 ETS 评分分别为 0.315，0.294 和 0.318；大雨量级(≥3.0 mm)的平均 ETS 评分分别为 0.018，0.022 和 0.027。这是由于 ST 试验中 RUC 层云方案分析的对流区域云水云冰偏小，导致 ST 试验对大雨量级预报 ETS 评分较低；CU 试验中 ARPS 对流云方案分析的非对流区域云水云冰物质过多，导致 CU 试验对小雨量级预报 ETS 评分较低；而 CUST 试验结合两者优势，所以对小雨量级降水预报的 ETS 评分明显高于 CU 试验，而对大雨量级降水预报的 ETS 评分明显高于 ST 试验，取得了综合评分最好的结果。需要指出的是，云分析对降水的影响主要集

中在模式起报的初始时期(6 小时甚至 3 小时内)，新方案对模式结果的改进也主要出现在模式起报初始阶段。这和王洪等(2015)、李佳等(2017)的结论是一致的。

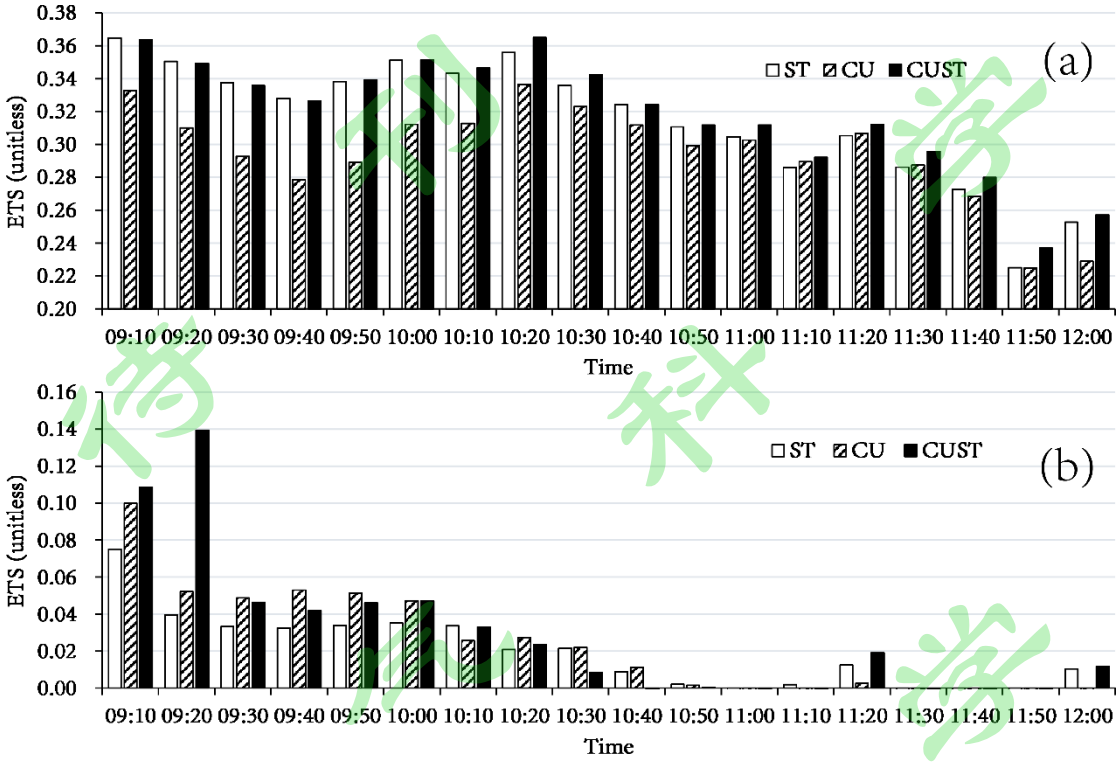
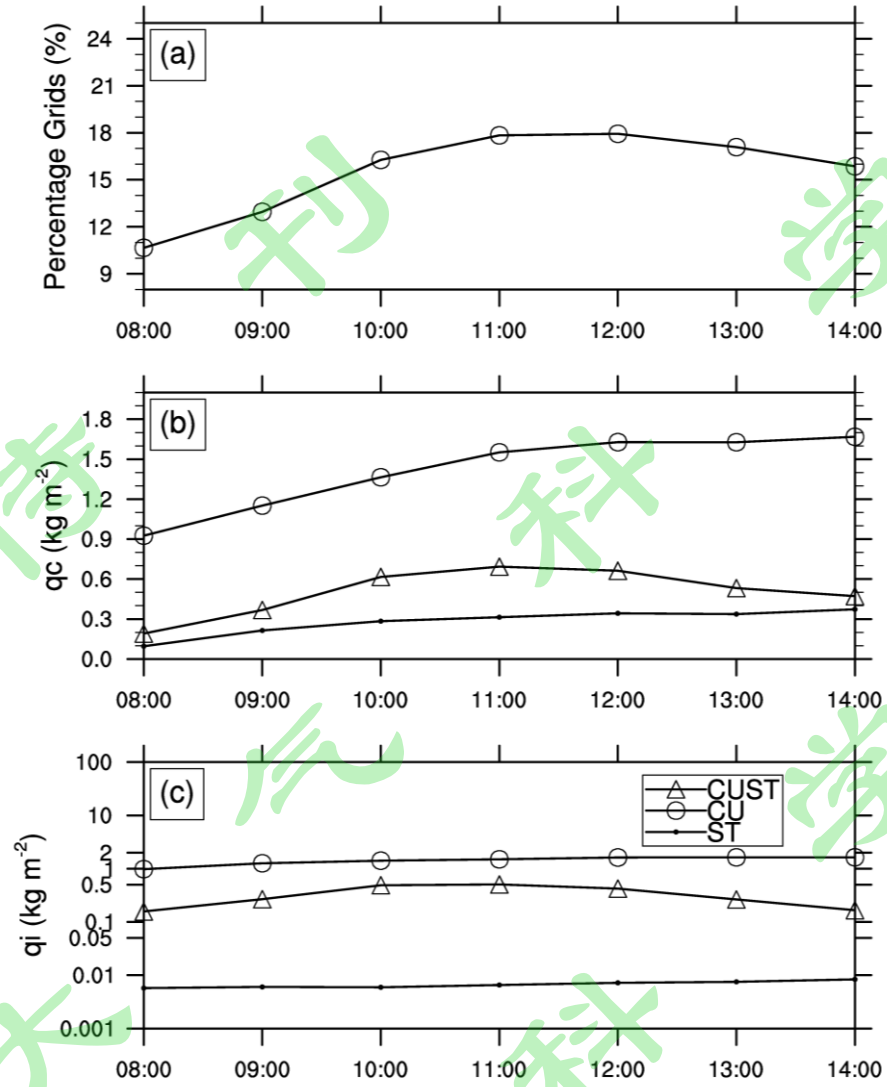


图 9 各试验模拟的 2019 年 6 月 19 日 09-12 时逐 10 分钟累计降水的 ETS 评分: (a)≥0.1 mm; (b)≥3.0 mm

Fig.9 Equitable Threat Score (ETS) for 10-minute accumulated precipitation of three different simulations from 09:00 BJT to 12:00 BJT 19 June 2019: (a)≥0.1 mm; (b)≥3.0 mm

4.4 循环同化结果分析

图 10(a)给出了 2019 年 6 月 19 日 08:00 BJT 至 14:00BJT 的逐小时循环试验中每次分析得到的对流格点(对流云概率大于 50%的格点)占区域总格点数的比例变化。可以看到，CUST 试验分析得到对流格点的比例在 10%-20%不等，这与此次过程中梅雨锋上对流活动强弱有关。图 10(b)显示，ST 试验分析得到的云水含量最小，在 0.1-0.4 kg m^{-2} 之间略有变化；CU 试验分析得到的云水含量最大，在 0.9-1.7 kg m^{-2} 间变化，几乎比 ST 试验大一个量级；而 CUST 试验分析的云水含量在 ST 和 CU 试验之间，且与对流格点的比例变化趋势相一致。三个试验分析得到的云冰含量情况与云水类似(图 10(c))。



353

354 **图 10** 2019 年 6 月 19 日 08:00 BJT 至 14:00BJT 的逐小时循环试验中：(a)CUST

355 方案分析得到的对流格点数目占总格点数目的比例；(b)三种方案分析的云水垂

356 直累积区域平均；(c)三种方案分析的云冰垂直累积区域平均

357 **Fig. 10** (a)Percentage convective grids in total cloud analysis grids with CUST method;

358 (b)Averaged vertically integrated cloud water (qc); (c) Averaged vertically integrated

359 cloud ice (qi) of cycling experiments with each analysis methods from 08:00 BJT to

360 14:00 BJT 19 June 2019

361 对起报后 6 小时的逐小时累计降水开展定量评估显示，新方法对模拟结果有

362 一定程度的优势(图 11)。在小雨量级，CUST 试验的 ETS 得分明显高于 CU 试

363 验，而空报率(False Alarm, FAR)明显低于 CU 试验。这说明原有 ARPS 对流云方

364 案会使模式对小雨量级的降水有较大程度的空报，而 CUST 试验增加引入层云方

案，可有效降低小雨空报率。而在大雨量级，CUST 试验的 ETS 评分和 FAR 评分虽然也优于 ST 试验和 CU 试验，但其优势并不十分明显。这说明新方案对小雨量级的改进程度相比大雨量级要更为明显。此外，也有一种可能是本次个例的对流区域范围较小，导致新方案比层云方案的优势未能充分体现。

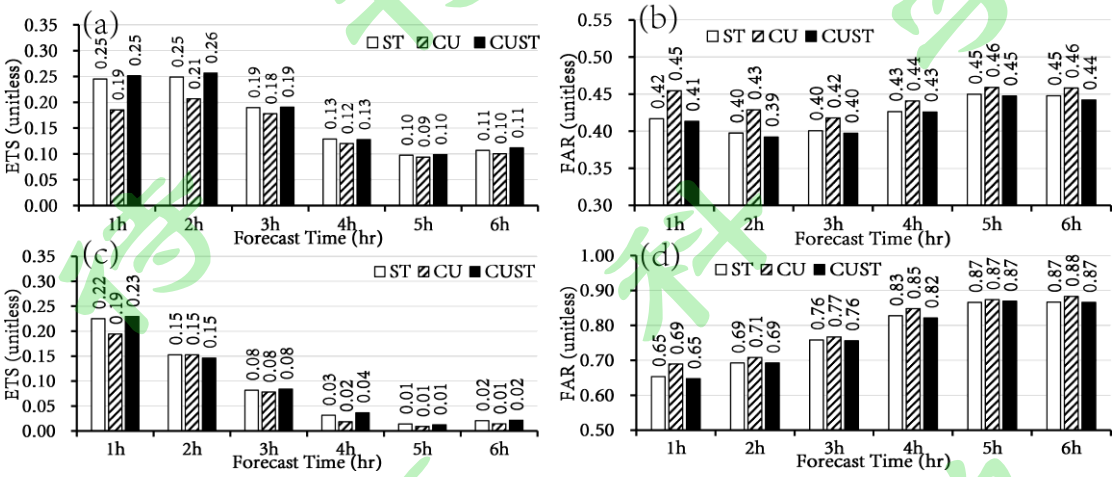


图 11 2019 年 6 月 19 日 08:00 BJT 至 14:00BJT 的逐小时循环试验中各方案模拟的 1 小时累计降水的平均(a)ETS 评分(≥0.1 mm); (b)FAR 空报率(≥0.1 mm); (c) ETS 评分(≥3.0 mm); (d)FAR 空报率(≥3.0 mm)

Fig. 11 Averaged (a) ETS (≥0.1 mm); (b) False Alarm (≥0.1 mm); (c) ETS (≥3.0 mm); (d) False Alarm (≥3.0 mm) of cycling experiments with each analysis methods from 08:00 BJT to 14:00 BJT 19 June 2019

4.5 与 CSW 方法的比较

为进一步探讨新方案的优劣，这里将新方案与李佳等(2017)中提出的 CSW 方案进行对比。在 CSW 方案中，当$\left[J_s/c_p + 0.61\bar{T}J_q/L\right]/\bar{\rho} > 0$时，判断为对流格点；当$\left[J_s/c_p + 0.61\bar{T}J_q/L\right]/\bar{\rho} \le 0$时，判定为非对流格点；其中$\rho$为空气密度，$c_p$为干空气定压比热，$L$是凝结潜热，$J_s$为感热通量(向上为正)，$J_q$为潜热通量(向上为正)。本文中的潜热和感热均从上一循环的模式 1 小时预报场获取，图 12(a, b)显示，在主要降水区域潜热和感热均在-50~50 W m^{-2}，根据 CSW 方案计算得到的对流区域主要分布在安徽东南部、浙江中部和海上大部区域(图 12(c))，与实况出现的强对流区域存在一定的差距。而 CUST 试验采用的混合方案是以实际融合

分析降水和雷达组合反射率为判据，分析得到的对流区域与实况较为一致(图12(d))。

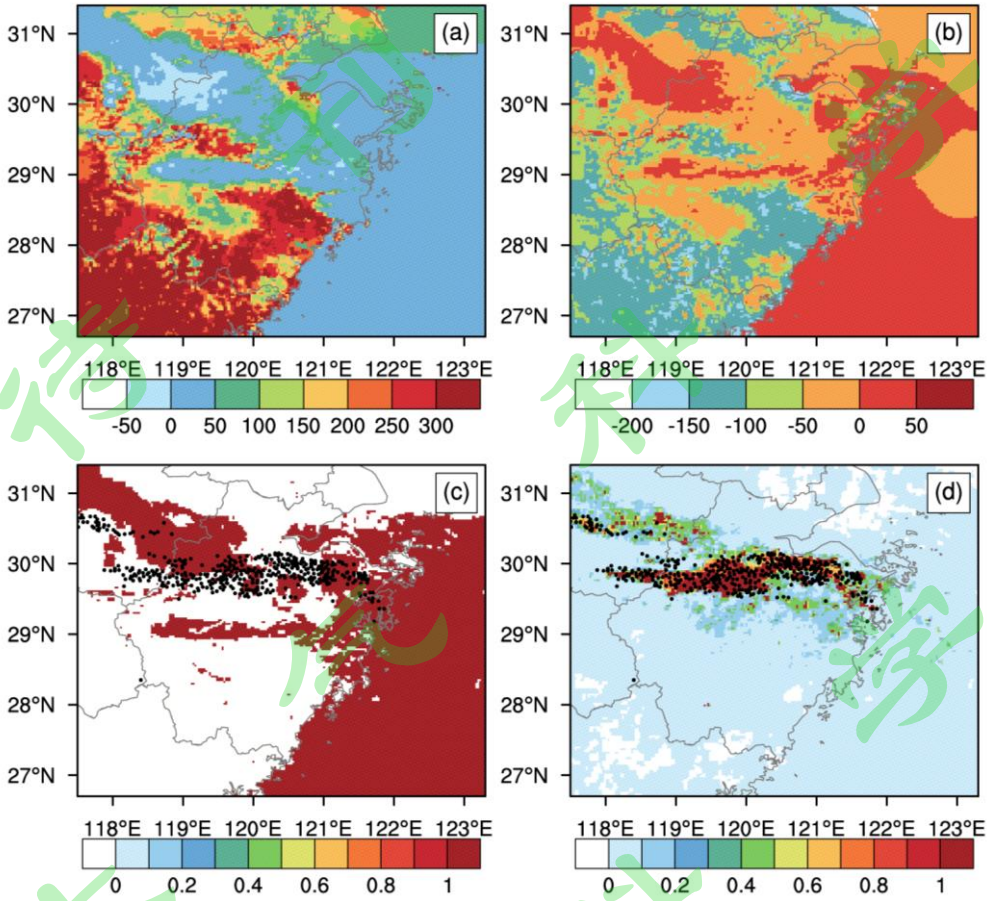


图 12 2019 年 6 月 19 日 09:00 BJT 时刻预报系统的：(a)上一次循环模式预报的潜热(单位：W m^{-2})；(b)上一次循环模式预报的感热(单位：W m^{-2})；(c)采用 CSW 方案分析得到的对流云占比概率的分布；(d)采用 CUST 方案分析得到的对流云占比概率的分布。黑点表示观测降水大于 20mm h^{-1} 的站点

Fig.12 (a)the latent heat flux from the last cycle; (b)the sensible heat flux from the last cycle; (c)the proportion of convective region with the CSW method; (d) the proportion of convective region with the CUST method obtained from ZJWARRS at 09:00 BJT 19 June 2019. Black points refer the observation stations whose precipitation larger than 20 mm h^{-1}

图 13(b,c)给出了 CSW 试验和 CUST 试验分析得到的云水云冰含量分布。可以看到，虽然两个试验分析的云水云冰都集中在浙中北雨区，但与对流格点分布的相关性较大。CSW 试验分析的云水云冰含量主要分布于安徽东南部及浙江宁波地区，而 CUST 试验分析的云水云冰主要分布于杭州绍兴宁波地区的东西向区

域。对比实时雷达回波(图 13(a))，CUST 试验分析的云水云冰含量的空间分布更具有可靠性。

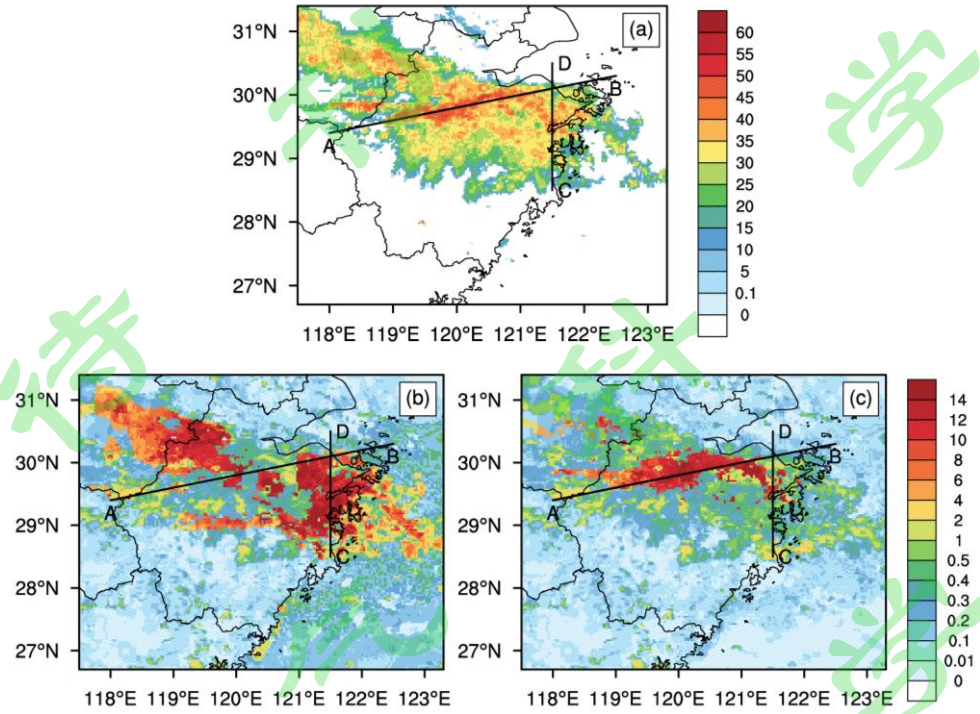
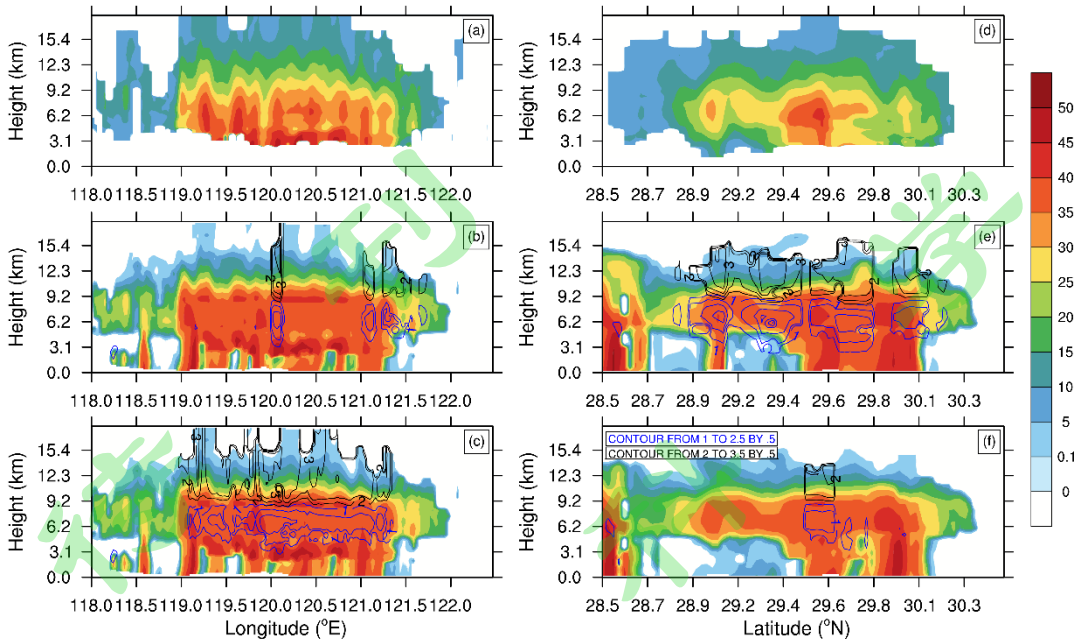


图 13 2019 年 6 月 19 日 09:00 BJT 时刻的: (a)雷达反射率拼图(单位：dBz); (b)基于 CSW 方案分析得到的云冰、云水垂直累积水平分布(单位：kg m^{-2}); (c) 基于 CUST 方案分析得到的云冰、云水垂直累积水平分布(单位：kg m^{-2})

Fig.13 Horizontal distributions of (a) radar reflectivity (units: dBz); (b) vertically integrated cloud ice and cloud water with CSW method (units: kg m^{-2}); (c) vertically integrated cloud ice and cloud water with CUST method (units: kg m^{-2})

沿雷达回波最强区域(直线 AB)及其近似垂向区域(直线 CD)分别取两个剖面作进一步分析。由于 CSW 试验对直线 AB 区域对流区域的漏报，其分析的云水云冰含量明显偏小(图 14(b))，沿剖面的分布情况也与实况回波分布(图 14(a))相差较大，而 CUST 试验分析的云水云冰含量较大且分布更为合理(图 14(c))。对于直线 CD 区域， CSW 方法存在对 CD 区域对流的误判，导致其分析的云水云冰含量明显偏大，而 CUST 分析的相对更为合理(图 14(d-f))。



417

418 **图 14** 2019 年 6 月 19 日 09:00 BJT 时刻沿图 13 中直线 AB(左列)和直线 CD(右列)
419 的垂直剖面: (a, d)观测的雷达反射率因子; (b, e)CSW 方案分析的反射率因子(填
420 色)、云水(蓝色等值线)、云冰(黑色等值线); (c, f)CUST 方案分析的反射率因子(填
421 色)、云水(蓝色等值线)、云冰(黑色等值线)

422 **Fig. 14** Vertical section along the line AB (left) and line CD (right) of (a) observed radar
423 reflectivity (shaded); (b) analyzed radar reflectivity(shaded), cloud water(blue contour),
424 and cloud ice (black contour) with CSW method; (c) analyzed radar reflectivity(shaded),
425 cloud water(blue contour), and cloud ice (black contour) with CUST method

426 图 15 给出了 CSW 试验及 CUST 试验模拟的 2019 年 6 月 19 日 10:00 BJT 时
427 刻 1 小时累计降水及其差异。对比实况观测可以看到，CSW 在安徽东南部、天
428 目山区、及宁波地区存在明显的降水高估现象，而在杭州地区的强降水中心附近
429 存在明显的低估。CUST 试验对于上述降水高估和低估的区域，均存在一定程度
430 的改善(图 15(d))，这与云水云冰物质的改进区域是一致的，说明 CUST 试验对降
431 水的修正主要是由云分析方案对云水云冰物质分析的改进造成的。

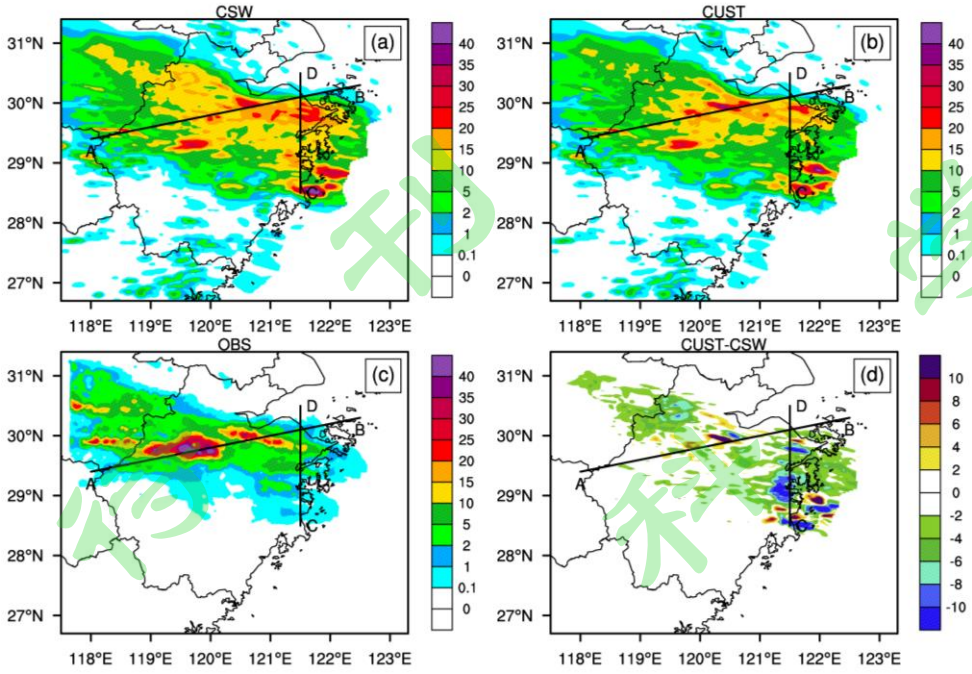


图 15 观测及模拟的 2019 年 6 月 19 日 10 时的 1 小时累计降水量: (a) CSW 试验；(b)CUST 试验；(c) 观测；(d) CUST 试验与 CSW 试验的差异

Fig.15 Observed and simulated hourly accumulated precipitation at 10:00 BJT 19 June 2019: (a) CSW run; (b) CUST run; (c) Observation; (d) CUST run mines CSW run

对模式起报后前 3 小时的逐十分钟降水定量评估可以看到(图 16)，CUST 试验对小雨以上(≥0.1 mm)量级降水的 ETS 评分比 CSW 试验有一定程度的提高，而 FAR 评分则有一定程度的下降。这说明由于新方案基于实况融合降水和雷达反射率划分的对流云-层状云比 CSW 基于模式前 1h 预报的感热潜热计算得到的划分更为合理，分析得到的云水云冰含量量级和分布也更接近实况，因此其模拟的降水评分也更高。这进一步证明了新方案的合理性。

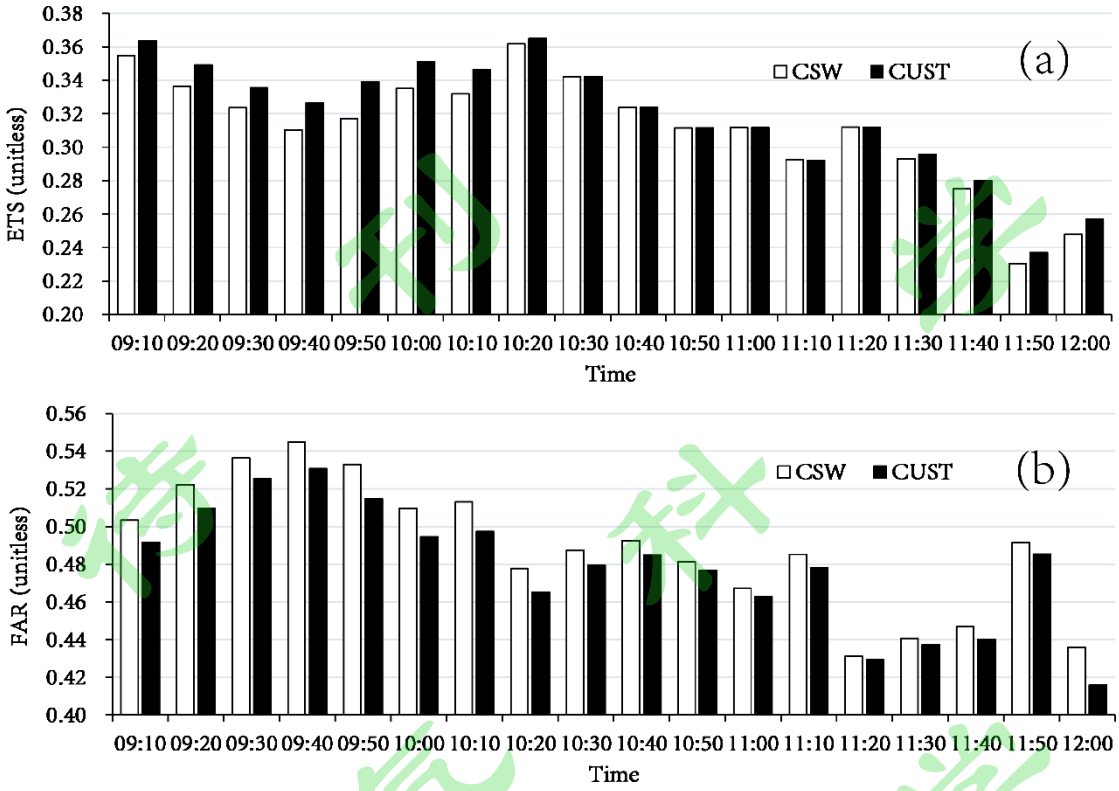


图 16 CSW 试验和 CUST 试验模拟的 2019 年 6 月 19 日 09-12 时逐 10 分钟累计降水(≥0.1 mm)的 ETS 评分和 FAR 评分

Fig.16 Equitable Threat Score (ETS) and False Alarm (FAR) for 10-minute accumulated precipitation (≥0.1 mm) of CSW-run and CUST-run from 09:00 BJT to 12:00 BJT 19 June 2019

5 结论与讨论

本文选取了实况融合降水和雷达反射率因子作为划分对流云和层状云的判别因子，分析了两个判别因子的阈值范围，并采用模糊逻辑法提出了一个新的对流云/层状云判别方法，基于该划分方法改进了 GSI 同化系统中的云分析方案。通过多组数值试验的对比，分析改进前后的云分析方案对 2019 年 6 月 19 日浙江一次梅雨降水过程模拟的影响，探讨了新方案的合理性和对模式预报的改进效果。主要结论如下：

(1) 基于实况融合降水(CMPAS)和雷达组合反射率，采用模糊逻辑法提出的对流云/层状云判别方法，可较为准确地划分对流云和层状云，以此作为判别因子改进 GSI 同化系统中的云分析方案切实可行。

(2) 个例试验表明，单纯的对流云分析方案会明显高估非对流区域的云水云冰含量，导致模式积分前期降水量偏大；而单纯的层云分析方案恰好相反，会明显低估对流区域的云水云冰含量，导致强降水区雨量偏小。引入对流云/层状云判别因子后，新的云分析方案综合了对流云分析方案和层云分析方案，在对流区域采用对流云分析方案，在非对流区域采用层云分析方案，减小了单纯对流云方案在非对流区域的空报现象、以及单纯层云方案在强对流区域的漏报现象，有效改进了降水的模拟。

(3) 改进后的云分析方案，对模式预报初期(6 小时甚至 3 小时内)的改善效果较为明显，且对小雨量级的降水改进幅度要优于大雨量级。

(4) 与 CSW 方法相比，改进后的云分析方案基于实况资料划分的对流云/层状云更为合理，模拟的降水结果更优，说明该方法有较好的应用潜力。

综上所述，基于对流云/层状云划分的混合云分析方法的改进能有效提高模式对降水的模拟性能。但需要指出的是，与 CSW 方法相比，CUST 方案需要更多的观测(或再分析)资料，业务应用时需要统筹配合；CUST 方案中的识别参数阈值也会受到样本数目、天气过程和区域差异的影响，可能需要进一步通过细分季节和区域、增加样本数量等方法提高对参数阈值的适用性。此外，CUST 方案对小雨量级改进较大而对大雨量级改进不明显，这一结论可能会受到个例选取的影响，对于有些受水汽条件影响更大的个例模拟，CUST 方法对大雨量级的降水的改进也许也会较大，这有待今后更多研究的开展和验证。

参考文献：

Albers S C, McGinley J A, Birkenheuer D L, et al. 1996. The Local Analysis and Prediction System (LAPS): Analyses of clouds, precipitation, and temperature. Wea Forecasting, 11(3): 273-287.

Alexander C R, Weygandt S S, Smirnova T G, et al. 2010. High Resolution Rapid Refresh (HRRR): Recent enhancements and evaluation during the 2010 convective season. 25th Conference on Severe Local Storms. Denver: American Meteorological Society.

Alexander G D, Cotton W R. 1998. The use of cloud-resolving simulations of mesoscale convective systems to build a mesoscale parameterization scheme. J. Atmos. Sci., 55, 2137-2161.

Benjamin S G, Dévényi D, Weygandt S S, et al. 2004. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. Mon Wea Rev, 132(2): 495-518.

Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2007. From the radar enhanced RUC to the WRF-based Rapid Refresh. 22nd Conference on Weather Analysis and Forecasting, 18th Conference on Numerical Weather Prediction. Park City: American Meteorological Society.

Caniaux G, Redelsperger J L, Lafore J P. 1994. A numerical study of the stratiform region of a fast-moving squall line. Part I: General description and water and heat budgets. J. Atmos. Sci., 51, 2046-2074.

Chen F, Dudhia J. 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. Mon Wea Rev, 129(4): 569-585.

Chin H N S. 1994. The impact of the ice phase and radiation on a midlatitude squall line system. J. Atmos. Sci., 51, 3320-3343.

Churchill D D, Houze R A J. 1984. Development and structure of winter monsoon cloud clusters on 10 December 1978. J. Atmos. Sci., 41, 933-960.

Donner L J. 1988. An initialization for cumulus convection in numerical weather prediction models. Mon Wea Rev, 116: 377-385.

510 Ferrier B S. 1994. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I:
511 Description. J. Atmos. Sci., 51, 249-280.
512 Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit
513 treatment of entrainment processes[J]. Mon Wea Rev, 134(9): 2318-2341.
514 Houze R A. 1997. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological
515 paradox? Bull. Amer. Meteor. Soc., 78, 2179-2196.
516 Hu M, Shao H, Stark D, et al. 2015. Gridpoint statistical interpolation advanced user's
517 guide version 3.4.0.0[EB/OL]. Developmental Testbed Center, (2015-07).
518 http://www.dtcenter.org/com-
519 GSI/users/docs/users_guide/AdvancedGSIUserGuide_v3.4.0.0.pdf [2020-05-07].
520 Hu M, Xue M, Brewster K. 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II
521 data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part I:
522 Cloud analysis and its impact. Mon Wea Rev, 134(2): 675-698.
523 Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived
524 greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models[J]. J
525 Geophys Res, 113(D13): D13103, doi: 10.1029/2008JD009944.
526 Ikeda, K., et al. 2010. Simulation of seasonal snowfall over Colorado, Atmos. Res., 97:
527 462–477, doi:10.1016/j.atmosres.2010.04.010.
528 Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al. 2012. A revised scheme for the WRF
529 surface layer formulation[J]. Mon Wea Rev, 140(3): 898-918.
530 Kessler E. 1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric
531 circulations. Meteorological Monographs, American Meteorological Society,
532 32(10): 84.
533 Lang S, Tao W K, Simpson J, Ferrier B. 2003. Modeling of convective-stratiform
534 precipitation processes: Sensitivity to partitioning methods, J. Appl. Meteorol., 42,
535 505-527.
536 Lin Y P, Ray P S, Johnson K W. 1993. Initialization of a modeled convective storm
537 using Doppler radar derived fields. Mon Wea Rev, 121: 2757-2775.
538 Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced
539 research WRF version 3[R]. NCAR Technical Note, NCAR/TN-475+STR,

Boulder, Colorado, USA: National Center for Atmospheric Research.

Steiner M, Houze R A J, Yuter S E. 1995, Climatological characterization of three-dimensional storm structure from operational radar and rain gauge data. J. Appl. Meteor., 34, 1978-2007.

Tao W K, Lang S, Simpson J, Olson W S, Johnson D, Ferrier B, Kummerow C, Adler R. 2000. Vertical profiles of latent heat release and their retrieval for TOGA COARE convective systems using a cloud resolving model, SSM/I, and ship-borne radar data. J. Meteor. Soc. Japan, 78, 333-355.

Tao W K, Simpson J. 1989. Modeling study of a tropical squall-type convective line. J. Atmos. Sci., 46, 177-202.

Tao W K, Simpson J, Sui C H, Ferrier B, Lang S, Scala J, Chou M D, Pickering K. 1993. Heating, moisture, and water budgets of tropical and midlatitude squall lines: Comparisons and sensitivity to longwave radiation. J. Atmos. Sci., 50, 673-690.

Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Monthly Weather Review, 132, 519-542.

Thompson, Gregory, Paul R. Field, Roy M. Rasmussen, William D. Hall. 2008. Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part II: Implementation of a New Snow Parameterization. Mon. Wea. Rev., 136: 5095–5115. doi:10.1175/2008MWR2387.1

Weygandt S S, Benjamin S G, Dévényi D, et al. 2006. Cloud and hydrometeor analysis using metar, radar, and satellite data within the RUC/Rapid-Refresh model, 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. Atlanta: American Meteorological Society.

Xu K W. 1995. Partioning mass, heat, and moisture budgets of explicitly simulated cumulus ensembles into convective and stratiform components. J. Atmos. Sci., 52, 1-23.

Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS) storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. Meteor Atmos Phys, 82: 139-170.

570 Zhang J. 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite
571 observations. PhD Thesis, University of Oklahoma, 194 pp, [Available from
572 School of Meteorology, University of Oklahoma, Norman OK 73019].
573 Zhang J, Carr F H, Brewster K. 1998. ADAS cloud analysis. Preprints, 12th Conference
574 on Numerical Weather Prediction. American Meteorological Society, Phoenix, AZ,
575 pp 185-188.
576 曹俊武, 刘黎平, 葛润生. 2005. 模糊逻辑法在双线性偏振雷达识别降水例子相
577 态中的研究. 大气科学, 29(15): 827-836. Cao J W, Liu L P, Ge R S. 2005. A
578 study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on
579 polarimetric radar measurement. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in
580 Chinese), 29(15): 827-836.
581 陈葆德, 王晓峰, 李泓, 等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述. 气象科技
582 进展, 3(2): 29-35. Chen B D, Wang X F, Li H, et al. 2013. An overview of the key
583 techniques in rapid refresh assimilation and forecast. Adv Meteor Sci Technol (in
584 Chinese), 3(2): 29-35.
585 陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发
586 生潜势预报的指示性能初探. 气象学报, 69(1): 181-194. Chen M, Fan S Y,
587 Zheng Z F, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the
588 BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential
589 forecast. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 69(1): 181-194.
590 程兴宏, 刘瑞霞, 申彦波, 朱蓉, 彭继达, 杨振斌, 徐洪雄. 2014. 基于卫星资料
591 同化和 LAPS-WRF 模式系统的云天太阳辐射数值模拟改进方法. 大气科学,
592 38(3): 577-589. CHENG Xinghong, LIU Ruixia, SHEN Yanbo, ZHU Rong,
593 PENG Jida, YANG Zhenbin and XU Hongxiong. 2014. Improved Method of Solar
594 Radiation Simulation on Cloudy Days with LAPS-WRF Model System Based on
595 Satellite Data Assimilation. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
596 38(3): 577-589.
597 胡金磊, 郭学良. 2013. 基于雷达资料的云分析在冰雹云短时预报中的应用. 气
598 象科技, 41(4): 682-689. Hu J L, Guo X L. 2013. Application of cloud analysis
599 with radar data in hail cloud nowcasting. Meteorological Science and Technology

(in Chinese), 41(4): 682-689.

雷蕾, 孙继松, 王国荣, 等. 2012. 基于中尺度数值模式快速循环系统的强对流天气分类概率预报试验. 气象学报, 70(4): 752-765. Lei L, Sun J S, Wang G R, et al. 2012. An experimental study of the summer convective weather categorical probability forecast based on the rapid updated cycle system for the Beijing area (BJ-RUC). Acta Meteor Sinica (in Chinese), 70(4): 752-765.

李佳, 陈葆德, 黄伟, 张旭. 2017. 对流尺度数值预报中的云物理初始化方法改进及个例试验. 气象学报, 75(5): 771-783. Li J, Chen B D, Huang W, Zhang X. 2017.C Cloud physics initialization for convection-scale NWP: Scheme improvements and a case study. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(5): 771-783.

潘旸, 谷军霞, 徐宾, 沈艳, 韩帅, 师春香. 2018. 多源降水数据融合研究及应用进展. 气象科技进展, 8(1): 143-152. Pan Y, Gu J X, Xu B, Shen Y, Han S, Shi C X. 2018. Advances in multi-source precipitation merging research. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(1): 143-152.

潘旸, 沈艳, 宇婧婧, 熊安元. 2015. 基于贝叶斯融合方法的高分辨率地面-卫星-雷达三源降水融合试验. 气象学报, 73(1): 177-186. Pan Y, Shen Y, Yu J J, Xiong A Y. 2015. An experiment of high-resolution gauge-radar-satellite combined precipitation retrieval based on the Bayesian merging method. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 73(1): 177-186.

邱金晶, 陈锋, 董美莹, 余贞寿. 2015. 浙江省快速更新同化系统的建立与检验评估. 气象科技进展, 5(6): 6-12. Qiu J J, Chen F, Dong M Y, Yu Z S. 2015. Establishment and evaluation of Zhejiang WRF-ADAS rapid refresh system. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 5(6): 6-12.

屈右铭, 陆维松, 蔡荣辉, 等. 2010. GRAPES-Meso 云分析系统的设计与试验. 气象, 36(10): 37-45. Qu Y M, Lu W S, Cai R H, et al. 2010. Design and experiment of GRAPES-Meso cloud analysis system. Meteor Mon (in Chinese), 36(10): 37-45.

王洪, 王东海, 万齐林. 2015. 多普勒雷达资料同化在“7.21”北京特大暴雨个例

629 中的应用. 气象学报, 73(4): 679-696. Wang H, Wang D H, Wan Q L. 2015.
630 Application of assimilating Doppler weather radar data in the “7.21” Beijing
631 excessive storm. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 73(4): 679-696.
632 王瑾, 刘黎平. 2009. CINRAD/CD 雷达反射率因子同化对中尺度数值模式云微物
633 理场调整的分析. 高原气象, 28(1): 173-185. Wang J, Liu L P. 2009. Assimilation
634 of Microphysical Adjustments Using Reflectivity of CINRAD/CD Doppler Radar
635 for Meso-Scale Model. Plateau Meteorology (in Chinese), 28(1): 173-185.
636 盛春岩, 浦一芬, 高守亭. 2006. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的
637 影响. 大气科学, 30(1): 93-107. SHENG Chun-Yan, PU Yi-Fen and GAO Shou-
638 Ting. 2006. Effect of Chinese Doppler Radar Data on Nowcasting Output of
639 Mesoscale Model. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(1):
640 93-107.
641 肖艳姣, 刘黎平. 2007. 三维雷达反射率资料用于层状云和对流云的识别研究.
642 大气科学, 31(4): 645-654. Xiao Y J, Liu L P. 2007. Identification of stratiform
643 and convective cloud using 3D radar reflectivity data. Chinese Journal of
644 Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(4): 645-654.
645 许娈, 董美莹, 陈锋. 2017. 基于逐时降水站点资料空间插值方法对比研究[J]. 气
646 象与环境学报, 33(1):34-43. Xu L, Dong M Y, Chen F. 2017. Comparison study
647 of spatial interpolation methods based on hourly precipitation data from automatic
648 weather stations. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 33(1):34-
649 43.
650 薛谌彬, 陈娴, 吴俞, 徐星生, 高勇. 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的
651 应用. 大气科学, 41(4): 673-690. XUE Chenbin, CHEN Xian, WU Yu, XU
652 Xingsheng and GAO Yong. 2017. Application of Radar Data Assimilation in Local
653 Severe Convective Weather Forecast. Chinese Journal of Atmospheric Sciences
654 (in Chinese), 41(4): 673-690
655 朱立娟. 2012. GRAPES 短临预报的云初始场形成与雷达 VAD 质控的关键技术研
656 究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 145pp. Zhu L J. 2012. The key technology
657 research on cloud initial field and radar VAD quality control for GRAPES
658 nowcasting [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 145pp (in

659 Chinese).

660

661

Improvement of Cloud Analysis Method based on Convective-Stratiform Cloud Partition

Chen Feng*, Dong Meiyin, Ji Chunxiao

(Zhejiang Institute of Meteorological Sciences)

Abstract

A new convective-stratiform separation technique, which is based on the CMPAS (CMA multisource precipitation analysis system) hourly precipitation and radar reflectivity mosaics data, by using the fuzzy logic method, is developed to improve the cloud analysis scheme in GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) assimilation system (referred to as CUST scheme). The improved scheme was tested in a severe Mei-yu rain occurred on 19 June 2019 in Zhejiang Province. Several hourly-cycle assimilation experiments were carried out using with the WRF(Weather and Forecast Research) model and GSI assimilation system, to analyze the impact of the new scheme on the precipitation simulation by comparing the new scheme to other schemes. The results show that: (1) The new convective-stratiform separation technique divided the convective / stratiform cloud accurately, and can be used as the discriminating factor to improve the cloud analysis scheme in the GSI assimilation system. (2) The CUST scheme adopt the convective cloud analysis scheme in the convective region, and the stratiform cloud analysis scheme in the non-convective region, which reduced the false alarm rate in the simple convective cloud scheme and the underestimate in the simple stratiform cloud scheme, effectively improved the simulation ability of short-term precipitation. (3) The CUST scheme shown obvious improvement on the initial stage of the model (within 6 hours or even 3 hours), and the improvement of small rain level is greater than that of the heavy rain. (4) Compared with the hybrid cloud analysis scheme (referred to as CSW scheme) based on the convective scale velocity determined by the surface sensible heat and latent heat flux, the CUST scheme shown more reasonable result on the convective / stratiform cloud partition and precipitation simulation, which indicated a good application prospect.

691 **Key words**: cloud analysis; Convective–Stratiform partition; precipitation; numerical
692 simulation