

雷达资料同化对一次飑线过程的模拟影响

邹玮¹ 沈晗¹ 袁慧玲^{1*}

¹ 南京大学大气科学学院/中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京, 210023

摘要 雷达资料同化能够改善强对流天气的预报,但是不同的模式方案配置会得到不同的结果。本文针对中国南部 2018 年 3 月 4 日一次飑线过程,以全球预报模式 GFS 分析场为背景场,采用中尺度区域气象预报模式 ARPS 3DVAR 系统同化多普勒雷达径向速度,用云分析处理反射率数据,考虑同化间隔、频次、云分析中不同参数调整,采用 1h 同化窗口,设计不同同化方案,最后用天气研究与预报模式 WRF 进行预报,研究雷达资料同化对飑线系统触发及发展机制的影响。结果表明,同化间隔过短时,由于模式热动力变量没有平衡产生虚假回波,同化间隔过长时,系统触发和发展的特征普遍偏弱;采用 12min 间隔同化得到了最好的初始场,并且同化频次越高得到的降水预报结果越好。此外,ARPS 云分析能大大改善初始场,减少模式自调整时间,其中湿度调整、温度调整、雨水调整及水汽调整对系统动力过程和水凝物初始场分布都有较大的影响,而垂直速度相关参数调整影响较小。

关键词 飑线 雷达观测 数据同化 云分析 水凝物

Impact of Radar Data Assimilation on A Squall Line

Zou Wei¹ Shen Han¹ Yuan Huiling¹

¹ School of Atmospheric Sciences and Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstracts Radar data assimilation can improve the forecasts of severe convective weather, but different model configurations will generate different results. This paper studies a squall line process occurred in southern China on March 4, 2018. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) Three-Dimensional Variational data assimilation system (3DVAR) is applied to assimilate Doppler radar radial velocity, and cloud analysis is used to process radar reflectivity data. Considering the assimilation interval, frequency and different parameter adjustments in cloud analysis, different assimilation schemes are designed by adopting the 1h assimilation window. Using the Global Forecast System (GFS) analysis field as the background field, the weather research and forecasting (WRF) model is used to investigate the influence of radar data assimilation on the triggering and development mechanism of the squall line system. The results show that when the assimilation interval is too short, false echoes are generated due to the imbalance of the model thermodynamic variables. When the assimilation interval is too long, the characteristics of the system

*资助项目 国家重点研发计划 (2018YFC1507405, 2017YFC1502703)

作者简介 邹玮, 女, 1996 年出生, 硕士研究生, 主要从事灾害性天气预报及资料同化方面研究。E-mail: were_mercy@163.com

通讯作者 袁慧玲, E-mail: yuanhl@nju.edu.cn

39 triggering and development are generally weak. The best initial field is achieved by
40 the 12min interval assimilation, and the higher the assimilation frequency, the better
41 the precipitation forecast results. In addition, ARPS cloud analysis can greatly
42 improve the initial field and reduce the model spin-up time. Among them, humidity
43 adjustment, temperature adjustment, rainwater adjustment, and water vapor
44 adjustment have greater impact on the dynamic process of the system and the initial
45 field distribution of the hydrometeors, while the adjustment of parameters related to
46 vertical velocity has less impact.

47

48 **Key words:** Squall line, Radar observation, Data assimilation, Cloud analysis,

49 Hydrometeor

50

51 1 引言

52 飏线是由多个雷暴单体组成的线状强对流系统，在其发展期间不断有新的回
53 波生成与减弱，生命史短，空间尺度小，但其突发性强，发生发展强度大，移动
54 快，往往造成不可估量的灾害。因此研究提高飏线系统的预报对防灾减灾有重要
55 意义。

56 国内外诸多学者基于不同角度对飏线系统进行了深入研究。从统计角度，
57 Bluestein and Jain (1985) 基于雷达反射率数据将美国俄克拉荷马州的春季飏线
58 分为断裂线型 (Broken line)、后向建立型 (Back building)、断裂区域型 (Broken
59 areal) 及嵌入区域型 (Embedded areal)。Meng et al. (2013) 统计了发生在中国
60 东部地区的 96 个飏线个例，指出国内飏线垂直风切变弱，环境场湿度大。从飏
61 线结构角度，Zhang et al. (2012) 提出干线附近是强对流天气的高发地带，冷涡
62 后的横槽引导冷空气南下触发飏线生成。Ahasan and Debsarma (2015) 发现高层
63 副热带急流能加强垂直风切变，从而触发强对流系统的生成。Thorpe et al. (1982)
64 指出垂直风切变是对流单体长时间维持的原因。Yang and Houze (1995) 用 2D
65 非静力模式模拟了一次飏线过程，提出冰相微物理过程对尾向入流的结构很重
66 要，修改水成物类型、冰相微物理方案以及环境湿度对风暴结构有明显影响。
67 Dawson and Xue (2004) 通过复杂云分析处理卫星及雷达数据提高了对弓形回波
68 的位置预报。Adams-Selin et al. (2013) 采用天气研究与预报模式 (Weather
69 Research and Forecast Model, 简称 WRF) 中的 8 种微物理方案对一次飏线个例

70 进行敏感性试验, 结果表明含霰方案降水量峰值远远小于含雹方案, 但前者产生
71 了更强的大风。Bryan and Morrison (2012) 探讨了不同水平分辨率对飊线模拟
72 的影响, 指出水平分辨率越粗, 则系统发展越慢, 且产生更多降水。张建军等
73 (2016) 采用 ARPS 模式针对一次飊线过程进行了二维数值模拟, 指出低层水汽
74 的能量释放直接影响了冷池前沿的动力结构, 从而改变飊线强度模拟。周围等
75 (2018) 利用 WRF 模拟了华东地区的一次飊线过程, 提出位势散度对飊线过程
76 降水有较好的指示意义。

77 前人从不同角度对飊线进行了深入探讨, 但如何利用这些特征对其进行精
78 准预报仍是当前一大难题, 利用观测资料及数值模式提升极端天气预报能力是当
79 前国际发展的趋势(张小玲等, 2018)。高时空分辨率的雷达信息可以模拟强对
80 流系统的四维精确的结构, 但是雷达径向速度和反射率不是模式常规变量, 因此
81 许多研究致力于将雷达资料同化进入模式预报初始场。目前常用方法有集合卡尔
82 曼滤波(Ensemble Kalman Filter, 简称 EnKF) (Tong and Xue, 2005; Aksoy et
83 al., 2009; Wang et al., 2013a)、四维变分(Four-Dimensional Variational, 简称
84 4DVAR) (Xu, 1996; Sun and Crook, 1997, 1998; Sun, 2005; Sun and Zhang,
85 2008; Wang et al., 2013b)。近年来, 越来越多学者试验混合同化, 并得到了较
86 好的预报结果(Houtekamer and Mitchell, 1998; Hamill and Snyder, 2000; Gao and
87 Stensrud, 2014; Tai et al., 2017; Kong et al., 2018; Pan et al., 2018)。然而
88 以上方法要求的计算资源条件非常高。三维变分(Three-Dimensional Variational,
89 简称 3DVAR) 是目前世界上区域业务数值预报中主要的模式初始化系统(孙娟
90 珍等, 2016), 相较其他方法, 3DVAR 计算快速, 分析结果稳定, 通过循环同
91 化可以加入天气系统随时间变化的信息, 因此如何最优化利用 3DVAR 同化雷达
92 资料以提高模式预报初始场具有至关重要的意义。考虑到变分系统能直接在代价
93 函数中应用观测变量, 通过最小化代价函数得到较为准确的分析场, 美国俄克拉
94 荷马大学的风暴分析及预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms,
95 CAPS) 研发了中尺度区域气象预报模式(Advanced Regional Prediction System,
96 简称 ARPS) 3DVAR 系统, 并针对一次龙卷个例进行探讨, 结果表明该系统极
97 大地改善了模式预报结果(Xue et al., 2003)。

98 此外，初始场中云水信息对强对流系统的数值预报至关重要。ARPS 云分析
99 系统基于美国国家海洋和大气管理局预报实验室研发的局地分析和预报系统
100 (Local Analysis and Prediction System, LAPS) 中的云分析模块 (Albers et al.,
101 1996) 进行了修改，该模块包含了多种调整参数，直接处理雷达反射率数据，反
102 演出热力场和微物理场。有少量研究对部分参数进行了探讨，如 Hu and Xue
103 (2007) 的研究表明云分析中潜热温度调整方案适用于较长的同化间隔。Zhao
104 and Xue (2009) 发现若不进行水汽调整，则 Ike 台风的预报强度会被大大削弱。

105 同化雷达资料能改善强对流天气的预报，但是不同同化实验设置对系统初始
106 和预报场有不同影响。Hu et al. (2006) 运用 ARPS 3DVAR 系统和复杂云分析研
107 究一次龙卷个例，发现间隔 10min 同化雷达资料能抓住雷暴发展前 3h 的主要特
108 征。Dong and Xue (2013) 设计了不同同化方案对台风个例进行预报，结果表明
109 30min 间隔和 10min 间隔实验结果类似。Pan and Wang (2019) 探讨了不同同化
110 间隔对模式平衡，结果表明 20min 的间隔更易使模式达到平衡。

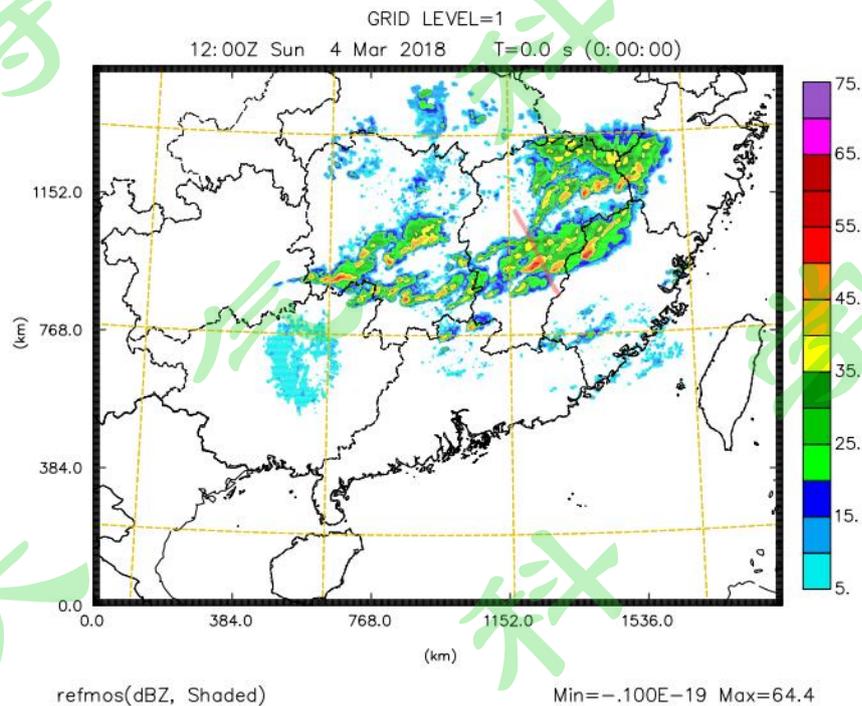
111 随着国内强对流天气过程发生频率增加，提高其预报精确度至关重要，但是
112 前期研究多集中于探讨飊线发生发展机制，而鲜有研究针对如何提高飊线降水预
113 报，以及深入讨论雷达资料同化和复杂云分析系统中不同参数对飊线触发及发展
114 机制的影响。因此本文选取 2018 年 3 月 4 日发生在中国南部的一次典型飊线过
115 程，基于 ARPS 3DVAR 同化系统对雷达资料做同化分析，结合 WRF 数值模式
116 模拟此次飊线过程，以期积累更多国内雷达资料同化提升飊线预报的经验。不同
117 于以往文章只采用了少量雷达数据，本文采用了遍布湖南等省的共 13 部雷达观
118 测数据，区域覆盖了此次飊线的发生发展范围。不仅如此，考虑到在同化方法中，
119 ARPS 复杂云分析系统能改善云微物理场的分布，但其对初始场及预报场的具体
120 修改效果研究较少，尤其对雨水调整参数和垂直速度相关参数鲜有探讨，因此本
121 文基于此角度进行了深入研究。

122

123 2 方法与实验设计

124 2.1 个例回顾

125 从 2018 年 3 月 3 日 (UTC) 开始, 连续有三段飚线过程在华中、华南区域
126 不断生成, 最后一段飚线从 3 月 4 日 1500UTC 由零散回波开始发展, 1700UTC
127 时于湖南南部及江西中部地区形成完整弓形结构 (图 1), 之后逐渐加强东移。
128 系统在 1900UTC 发展到最强, 最大回波达到 71dBZ, 此时横跨湖南、江西、福
129 建、浙江四个省, 最强小时降水量超过了 40mm。随后飚线向东南方向移动并且
130 逐渐减弱, 最终飚线于 3 月 5 日 0400UTC 移到广东北部后, 其线性结构完全消
131 散。这次强对流过程造成 58.5 万人受灾, 14 人死亡, 直接经济损失达 9.3 亿元。

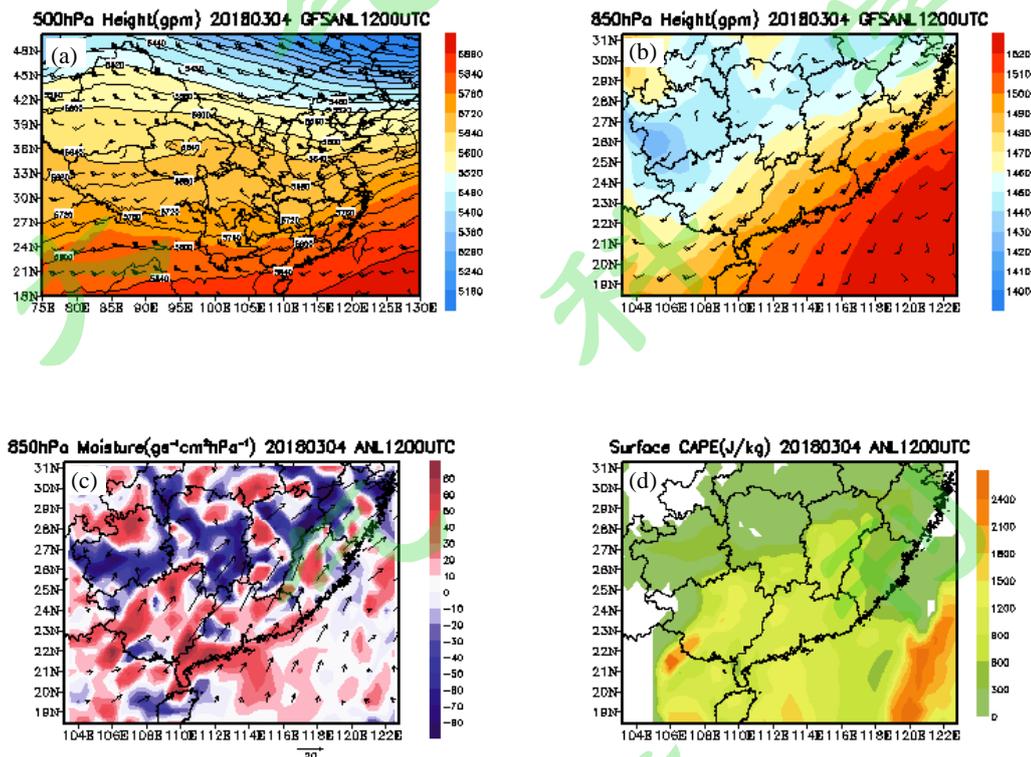


132
133 图 1 2018 年 3 月 4 日中国南部 13 部新一代天气雷达 1700UTC (协调世界时,
134 下同) 组合反射率因子拼图 (填色, 单位: dBZ, 红色实线表示垂直于飚线移动
135 方向的垂直剖面)

136 Fig.1 Composite mosaic radar reflectivity of 13 new generation weather radars in
137 Southern China (shaded area, unit: dBZ). The solid red line indicates a cross section
138 perpendicular to the moving direction of the squall line at its mature stage (at 1700
139 UTC 4 March 2018).

141 本文基于美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction,
142 简称 NCEP) 全球预报模式 (Global Forecast System, 简称 GFS) 每日发布的分

143 析场数据探讨此次过程的环流背景。2018年3月4日1200UTC(飊线发生前3h),
 144 湖南等省位于高空300hPa急流轴风核的左前象限(图略),500hPa(图2a)有
 145 一支高空槽位于湖南中部上空(27°N,110°E),高空盛行西南偏西气流。850hPa
 146 (图2b)湖南中北部出现一个低空切变线,并有强低涡发展,构建了水汽通道
 147 (图2c),水汽在湖南、江西等地大量辐合,高空急流出口区的正涡度区与低
 148 空急流大风核左前方上下重叠。但是此次过程的不稳定能量比较低(图2d),
 149 Takemi(2007)提出静力稳定度才是决定飊线强度的控制参数,只有在环境静力
 150 稳定度均匀一致时,对流有效位能(Convective Available Potential Energy,简称
 151 CAPE)才能很好地表征对流系统的发生发展。因此高低空急流之间相互配置,
 152 高空槽与低空切变线触发了此次强对流天气过程,再加上充足的水汽来源,增强
 153 了此次过程的对流活动。根据丁一汇等(1982)对中国飊线的分类,此次飊线属
 154 于槽前型。



155
 156 图2 2018年3月4日1200UTC风场(风矢箭头,单位: m s^{-1})和位势高度
 157 (黑色等值线,单位: gpm): (a) 500hPa; (b) 850hPa; (c) 850hPa水汽
 158 通量散度(填色, $\text{gs}^{-1}\text{cm}^2\text{hPa}^{-1}$)和水汽通量(矢量箭头); (d) 地面对流有效
 159 位能CAPE(填色, J kg^{-1})

160 Fig.2 Distribution of geopotential height (black contours, unit: gpm) and wind
161 barbs (unit: m s^{-1}) at (a) 500hPa and (b) 850hPa; (c) moisture flux divergence (shaded
162 area, unit: $\text{gs}^{-1}\text{cm}^2\text{hPa}^{-1}$) and its corresponding moisture flux (vectors), where negative
163 values represent horizontal mass convergence; and (d) convective available potential
164 energy (CAPE) (shaded area, unit: J kg^{-1})

165 2.2 模拟实验设计

166 本文运用 WRFV3.7 数值模式进行积分预报, 使用 3km 水平格点分辨率, 区
167 域水平格点设置为 620×460 , 覆盖了系统发展及传播的整个区域 (图 4), 垂直
168 层数为 60 层, 模式顶层气压为 50hPa, 模拟未采用嵌套。利用 3 月 4 日 1200UTC
169 的 GFS 分析场作为预报初始背景场, 控制实验 (CNTL) 中模式预报了 18h 至 3
170 月 5 日 0600UTC, 总体设置了四组同化试验 (图 3), 使用 ARPS 3DVAR (Gao
171 et al., 2002) 分析雷达径向风 (V_r) 数据, 并通过 ARPS 包含的复杂云分析模块
172 (Brewster, 1996, 2002; Zhang et al., 1998) 处理雷达反射率 (Z) 数据。第一
173 组试验仅同化了 3 月 4 日 1200UTC 一个时次, 在此基础上进行 18h 的预报, 该
174 部分由三个试验组成, 即仅同化 V_r (Exp1 V_r), 以及仅分析 Z (Exp1 Z), 最后
175 同时同化 V_r 和 Z (Exp1All), 旨在探讨 V_r 和 Z 对飏线系统初始场和预报场的
176 影响。为了考察模式直接同化与自调整 (spin-up) 后再同化的区别, 设计了
177 ExpSPstart 试验, 先通过 WRF 模式积分 3h 至 1500UTC, 再利用 ARPS 同化
178 1500UTC 单次时刻的雷达资料。为了探讨模拟飏线过程的最优循环同化方案,
179 另外三组试验均先用 WRF 模式从 1200UTC 积分 2h 至 1400UTC 后, 在
180 1400-1500UTC 同化窗口内进行循环同化 (表 1 和表 2); 其中, 第二组试验讨
181 论不同同化时间间隔方案: 1h (Exp2All1h2t)、30min (Exp2All30m3t)、12min
182 (Exp2All12m6t)、6min (Exp2All6m11t)。第三组试验以 12 min 为间隔讨论
183 不同同化次数的影响, 分别同化 2 次 (Exp3All12m2t)、4 次 (Exp3All12m4t)
184 以及 6 次 (Exp2All12m6t), 其中 Exp3All12m2t 同化了 1448、1500UTC 的资料,
185 Exp3All12m4t 同化了 1424、1436、1448、1500UTC 的资料。

186 ARPS 云分析模块包含多种微物理调整参数, 该模块在处理雷达反射率数据
187 时, 首先给定云内达到湿绝热上升后生成液态含水量时的反射率阈值, 利用反射

188 率方程进行反演计算，从而判断出水成物类型，并基于模式背景场的相对湿度进
189 行云内湿度场调整，结合给定的云微物理方案进行水汽调整，最后依据选择的温
190 度调整方案进行温度场调整。雨水调整过程可以分别采用 Kessler (Kessler et al.,
191 1995) 和 Ferrier (Ferrier et al., 1994) 方案，后者考虑了冰相过程。Qrlimit 参数
192 是分析场中的雨、雪及雹的最大输出混合比，Frac_qr_2_qc 参数调整初始场中雨
193 水/冰向云水转换的比例。温度调整主要有云内凝结潜热释放方案 (LH) 和湿绝
194 热廓线调整方案 (MA)，LH 主要基于云水/冰的潜热释放调整分析场内的温度，
195 MA 考虑了湿空气块上升时的温度变化，因此后者更能表征对流单体中的物理状
196 态。垂直速度调整参数可以调整积云及层状云内垂直速度，其中积云内最大垂直
197 速度由云高与 Wmhr_Cu 参数的乘积决定，因此，改变 Wmhr_Cu 参数间接调整
198 了积云内的最大垂直速度。在第二组和第三组试验中，云分析调整参数开关均打
199 开，为了讨论不同参数对分析场水成物的影响，基于第二组试验的最优结果开展
200 了第四组试验 (表 2)。首先，分别关闭水汽调整 (Qcopt=0, Exp4AllQC0)、
201 湿度调整 (Qvopt=0, Exp4AllQV0)、温度调整 (Ptopt=0, Exp4AllPT0)、雨
202 水调整 (Qropt=0, Exp4AllQR0)、垂直速度调整 (Wopt=0, Exp4AllW0)。其
203 次，探讨温度调整中 LH 方案 (Ptopt=3, Exp4AllPT3) 和 MA 方案 (Ptopt=5,
204 Exp2All12m6t)，以及雨水调整中 Kessler (Qropt=1, Exp4AllQR1) 和 Ferrier
205 (Qropt=2, Exp2All12m6t) 计算方案的影响。最后，将雨水向云水转换比例参
206 数 Frac_qr_2_qc (Exp4Allqr2qc) 从 0 增大至 0.4，将 Wmhr_Cu 参数增大 10 倍
207 (Exp4AllwmhrCu)，将 Qrlimit 参数 (Exp4Allqlmt) 缩小 10 倍；针对以上每个
208 参数各设置了敏感性试验，第四组试验中循环同化设置和第二组试验中的
209 Exp2All12m6t 试验相同。循环同化雷达资料后利用 WRF 模式从 1500UTC 开始
210 积分 15h。所有试验采用的物理方案保持一致，云微物理方案采用 WDM6 (Lim
211 and Hong, 2010)，长波辐射方案采用 RRTM 方案 (Mlawer et al., 1997)，短
212 波辐射方案采用 Dudhia 方案 (Dudhia, 1989)，边界层方案采用 MYJ 方案 (Janjic,
213 2002)，陆面方案采用 Noah 方案 (Chen et al., 1996)；由于分辨率足够高，因
214 此没有使用积云参数化方案。采用湖南、江西、广西共 12 部 S 波段新一代多普
215 勒雷达及 1 部 C 波段雷达的反射率和径向风数据，采用 ARPS 中的 88d2arps 模

216 块对雷达观测数据进行质量处理, 并使用 ARPS 后处理模块生成雷达拼图作为观
 217 测对比。

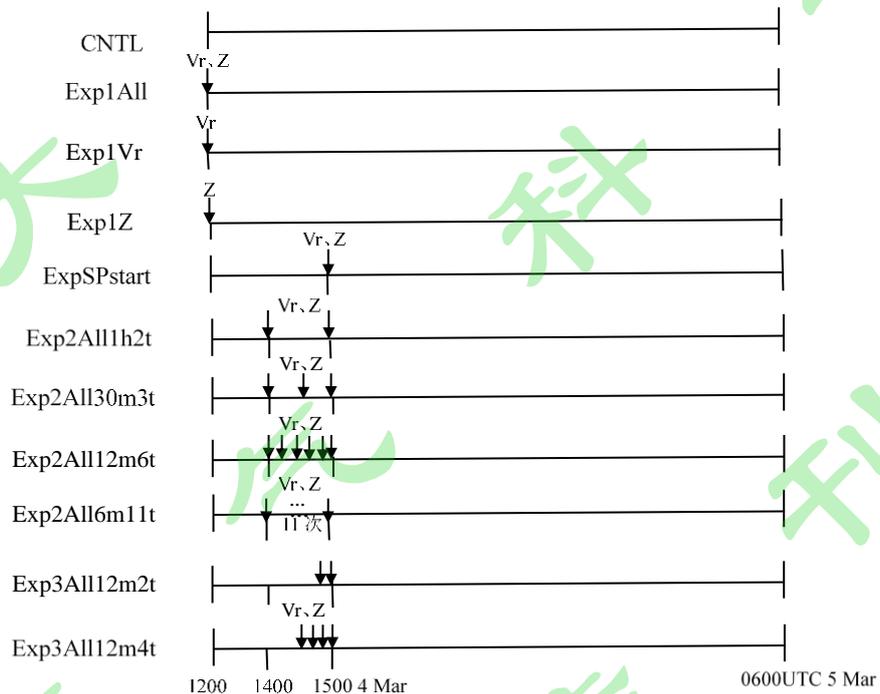
218 表 1 第一组、第二组和第三组同化试验设计列表

219 Table 1. List of different data assimilation experiments.

实验名称	同化初始时刻	Vr	Z	间隔(min)	同化次数
CNTL	-	-	-	-	-
Exp1All	1200UTC	Vr	Z	-	1
Exp1Vr	1200UTC	Vr	-	-	1
Exp1Z	1200UTC	-	Z	-	1
ExpSPstart	1500UTC	Vr	Z	-	1
Exp2All1h2t	1500UTC	Vr	Z	60	2
Exp2All30m3t	1500UTC	Vr	Z	30	3
Exp2All12m6t	1500UTC	Vr	Z	12	6
Exp2All6m11t	1500UTC	Vr	Z	6	11
Exp3All12m2t	1500UTC	Vr	Z	12	2
Exp3All12m4t	1500UTC	Vr	Z	12	4

220

221



222

223

224

225

226

227

图 3 同化试验流程图

Fig 3. Flowchart of different data assimilation experiments

表 2 云分析参数敏感性试验设计

Table 2. List of different cloud analysis experiments.

实验名称	Ptopt	Qcopt	Qvopt	Qropt	Wopt	Qrlimit	Wmhr_Cu	Frac_qr_2_qc
Exp2All12m6t	5	1	1	2	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllPT0	0	1	1	2	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllPT3	3	1	1	2	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllQC0	5	0	1	2	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllQV0	5	1	0	2	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllQR0	5	1	1	0	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllQR1	5	1	1	1	1	0.005	0.0005	0
Exp4AllW0	5	1	1	2	0	0.005	0.0005	0
Exp4Allqrlmt	5	1	1	2	1	0.0005	0.0005	0
Exp4AllwmhrCu	5	1	1	2	1	0.005	0.005	0
Exp4Allqr2qc	5	1	1	2	1	0.005	0.0005	0.4

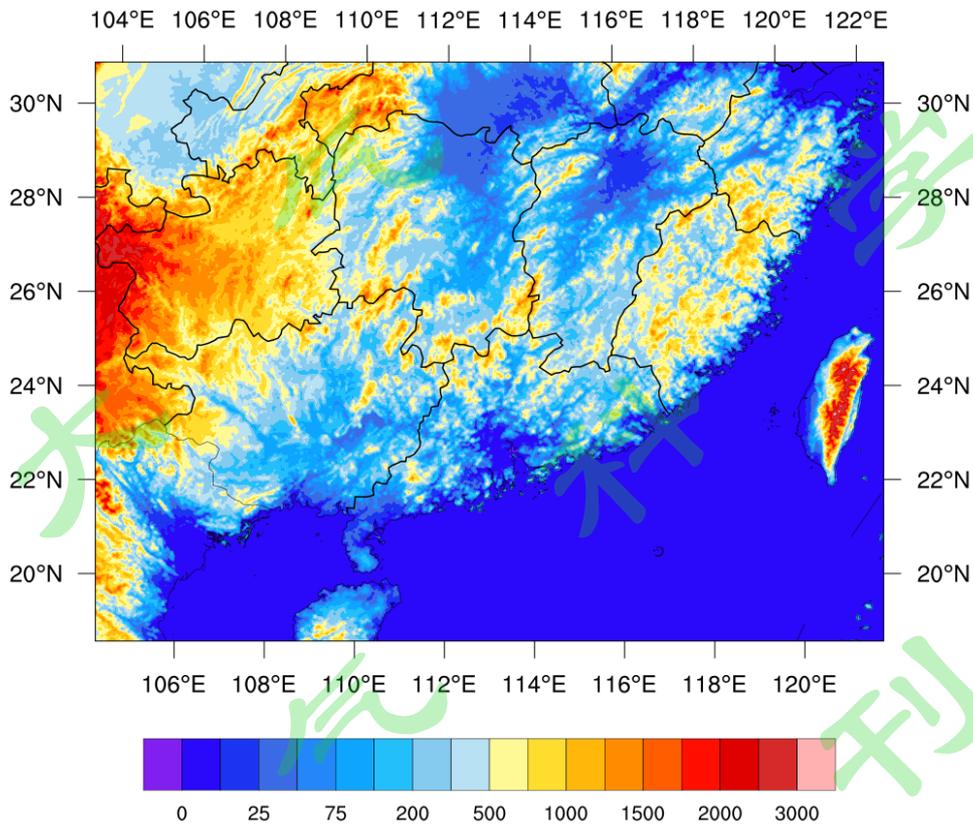


图 4 模式区域设置 (填色为地形高度, 单位: 米)

Fig.4 The model domain with the 3-km horizontal resolution. The elevation is shaded (unit: m).

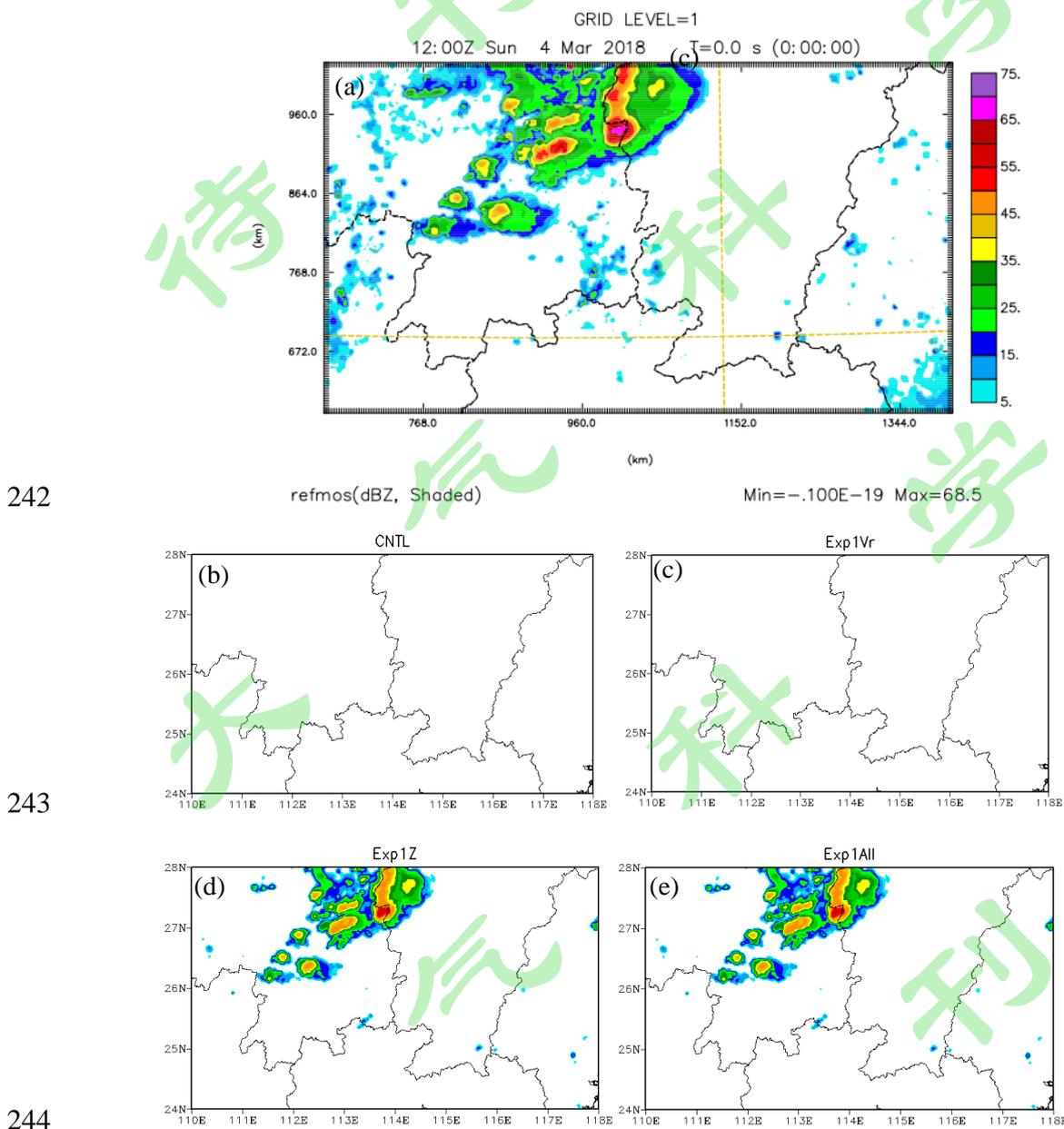
3 试验结果与讨论

3.1 Vr 和 Z 对飢线系统的影响

首先考察 Z 及 Vr 对初始场中组合反射率的影响, 初始时刻回波主体位于江

西省与湖南省的交界处, 湖南南部有零散回波块 (图 5a), CNTL (图 5b) 和

238 Exp1Vr (图 5c) 均未能模拟出对流回波, Exp1Z (图 5d) 和 Exp1All (图 5e)
 239 较准确地模拟出了对流回波的结构及位置, 并且精准预报出了最强回波带的强
 240 度, Exp1All 和 Exp1Z 试验结果差别很小, 表明利用复杂云分析系统同化 Z 后明
 241 显改善了模式预报初始场。



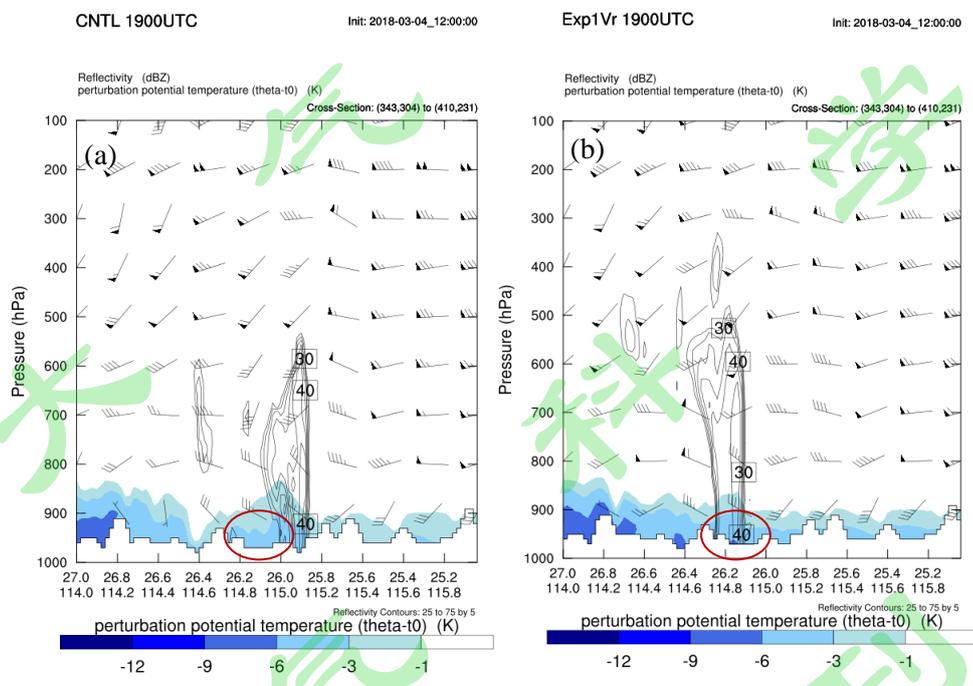
245 图 5 2018 年 3 月 4 日 1200UTC 组合反射率 (填色, 单位: dBZ): (a) 中国
 246 南部 13 部新一代多普勒天气雷达组合反射率因子拼图, (b) CNTL 试验, (c)
 247 Exp1Vr 试验, (d) Exp1Z 试验, (e) Exp1All 试验

248 Fig.5 Distribution of composite reflectivity (shaded area, unit: dBZ) at 1200 UTC
249 4 March 2018: (a) composite mosaic radar reflectivity of 13 new generation weather
250 radars in Southern China, (b) CNTL, (c) Exp1Vr, (d) Exp1Z, and (e) Exp1All

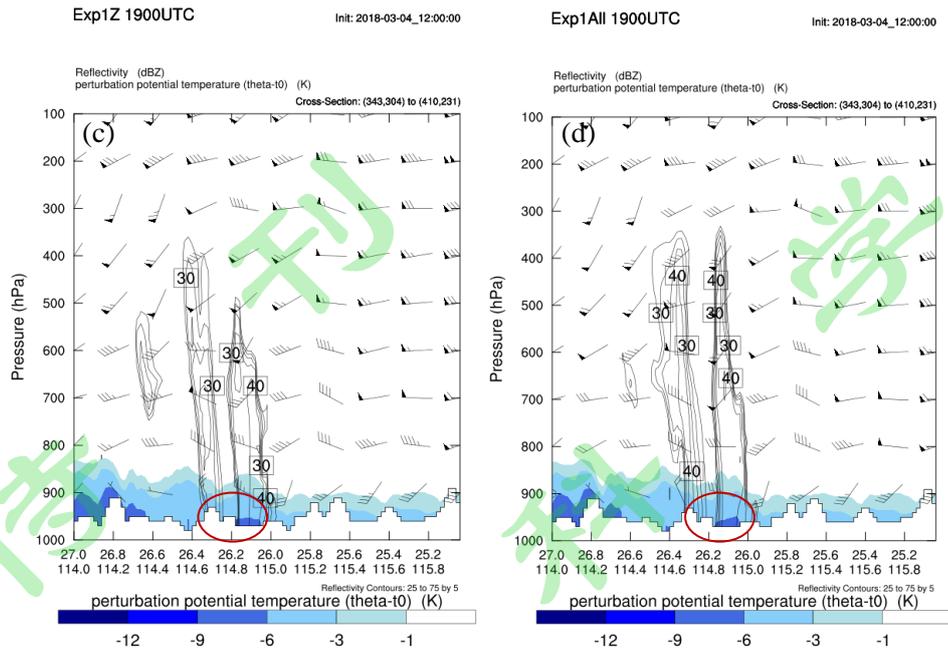
251
252 1h 后回波向东南向移动 (图略), Exp1All 和 Exp1Z 预报的回波结构与位置
253 和观测一致, 最大值为 55dBZ, 接近实际观测 (59.9dBZ), 且其预报出了系统
254 东南向的移动。CNTL 仍在调整阶段, 没有预报出系统, Exp1Vr 预报出了主体
255 回波结构, 但是回波位置偏差很大, 位于江西中部, 并且强度远远弱于观测。综
256 上所述, 在飊线系统的预报中, 由于 Z 改善了初始场的水凝物信息, 明显减少
257 了模式自调整时间, 使初始场和预报场与实际观测十分接近, 这也表明复杂云分
258 析系统能较明显改善对飊线系统的模拟。在 4h 后, Exp1Vr 中飊线结构得到了较
259 好的发展, 生成的系统位置及反射率强度与另外两组同化试验 (Exp1All 和
260 Exp1Z) 近乎一致, 并接近于观测, 说明同化 Vr 后通过模式的动力调整, 改善
261 了系统预报。CNTL 试验中回波大值区较同化后的试验偏弱, 且仍未预报出位于
262 湖南的零散块状回波, 但 CNTL 试验预报的飊线主体弓形回波结构与几组同化
263 试验趋于一致 (图略), 表明云分析的作用在此次飊线过程中只能维持 3-4h。相
264 较而言, ExpSPstart 试验得到的组合反射率强度以及结构与观测更为接近 (图略),
265 所以让模式先自行调整生成较为平衡的初始场, 在此基础上再进行同化会得到更
266 好的预报结果, 因此本文之后的循环同化试验均先让模式自调整 2h 后再进行同
267 化。

268 郑淋淋等 (2016) 提出垂直风切变减弱了强对流系统中上升气流与下沉气流
269 的相互干扰, 有利于系统的加强维持, Rotunno et al. (1988) 经过数值模拟试验
270 也证实了 RKW (Rotunno-Klemp-Weisman) 飊线维持机制, 即当冷池与垂直风
271 切变强度相当时最利于系统的发展传播。飊线是准二维结构分布系统, 在雷达回
272 波上主要呈现狭窄带状分布, 考虑到本文的飊线个例主要向东南方向发展移动,
273 为了使全文较一致, 本文垂直于飊线, 平行于其移动方向截取了一个剖面
274 (114°E-116°E, 25°N-27°N)。如图 1 红色实线所示, 该剖面经纬度跨度相对较
275 大, 延展范围包含了从飊线弓形结构初始形成时 (1700UTC) 到强烈发展

276 (1900UTC) 整个阶段。考察爬线发展最强时刻 (1900UTC) 雷达资料同化对系
 277 统动力场和温度场的影响 (图 6)。700-1000hPa 层, Exp1Vr 的切变值达到 24m/s,
 278 属于强垂直风切变, 而 CNTL 仅为 12m/s, Exp1Z 为 16m/s, 仅为中等强度, 由
 279 此可知 Vr 通过改善系统动力场为对流系统的组织发展提供了有利条件。根据
 280 James et al. (2006) 定义, 扰动温度低于-1K 时可以定义为冷池。如图 6 中红色
 281 圆圈内所示, 爬线系统前沿在 26.0°N, 115.0°E 处旺盛发展, Exp1All 及 Exp1Z
 282 中对流单体发展后方 (26.2° N, 114.8° E), 近地面产生了较为深厚的冷池,
 283 扰动温度低于了-9K, Exp1Vr 的最大扰动值也达到了-6K, 但是冷池较浅, 相较
 284 之下 CNTL 冷空气下沉产生的变温最弱。因此同化 Vr 和 Z 有效改善了爬线热动
 285 力场, 从而促进其发生发展。



286



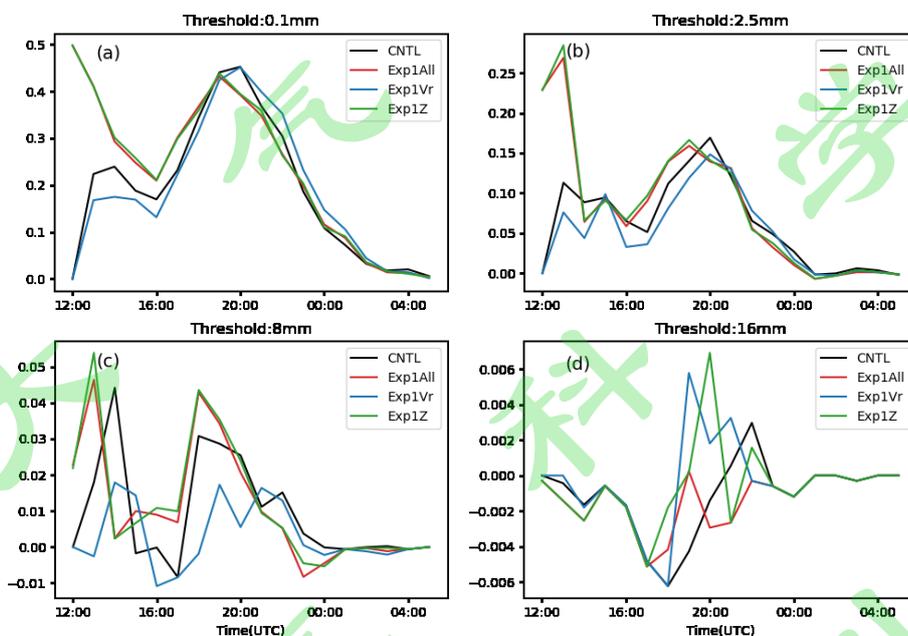
287
 288 图 6 2018 年 3 月 4 日 1900UTC 扰动位温（填色，单位：K）、组合反射率
 289 （黑色等值线，单位：dBZ）及水平风垂直风切变（黑色风羽，单位： m s^{-1} ）沿
 290 114°E - 116°E ， 25°N - 27°N 的剖面分布：（a）CNTL 试验，（b）Exp1Vr 试验，（c）
 291 Exp1Z 试验，（d）Exp1All 试验

292 Fig.6 The cross sections (along 114°E - 116°E ， 25°N - 27°N) of temperature
 293 perturbation (shaded area, unit: K), composite reflectivity (black contours, unit: dBZ)
 294 and vertical wind shear (black wind barbs, unit: m s^{-1}): (a) CNTL, (b) Exp1Vr, (c)
 295 Exp1Z, and (d) Exp1All at 1900 UTC 4 March 2018

296
 297 采用公平技巧评分（Equitable Threat Score，简称 ETS）定量考察同化雷达数
 298 据对爬线系统降水预报的影响，选定不同的每小时降水量阈值：0.1mm、2.5mm、
 299 8mm，16mm，分别对应小雨、中雨、大雨、暴雨。总体来看（图 7），Exp1All
 300 和 Exp1Z 的评分走向较为一致，在 1300UTC 时，Exp1Z 甚至略高于 Exp1All，
 301 针对不同量级降水，两者评分均为最高，但在 2h 后急剧下降，而后又呈 U 型结
 302 构上升，这是因为模式动力场和热力场不断调整 and 平衡的原因（Zhao and Xue,
 303 2009），两个试验在预报时段内整体表现较好。对不同阈值，Exp1Vr 初始阶段
 304 评分最低，符合客观分析结果，仅同化 Vr 并不能在一开始就调整出回波；但是
 305 在 2h 后评分不断升高，尤其是对于小雨和暴雨量级，Exp1Vr 在对流发展强烈阶
 306 段（1900UTC）评分最高。分析垂直速度剖面（图略），发现 Exp1Vr 对流发展
 307 区域垂直速度增强，加入 Vr 信息改善了动力结构，因此更能维持系统对流活动
 308 的发展，提高后期降水预报。Xue et al.（2014）也指出径向速度和 3DVAR 的动

309 力约束对低层的中尺度涡旋比较重要,只同化反射率则不能预报出中尺度气旋的
 310 强度,因此对系统之后的维持起的作用相对于 Vr 较小。CNTL 一开始评分很较
 311 低,经过了 4h 的平衡调整后评分也逐渐升高,但整体评分仍低于 Exp1All 和
 312 Exp1Z。在 3 月 5 日 0000UTC 后几个实验结果趋于一致,这表明雷达数据的影
 313 响在这之后开始消散。综上,从定量分析的角度也可以看出由于 Z 改善了初始
 314 场中水凝物分布,因此在模式预报前几个小时,Exp1Z 的评分较高;而 Vr 主要
 315 对系统动力进行了改善,从而更能维持强对流发展,因此 Exp1Vr 的评分虽然一
 316 开始不高,但在之后逐步上升,并且从该实验也可看出同化雷达信息后明显缩短
 317 了模式自调整时间。

ETS score



318

319 图 7 第一组试验(见表 1)从 2018 年 3 月 4 日 1200UTC 至 3 月 5 日 0600UTC
 320 不同阈值下每小时累积降水量 ETS 评分: (a) 0.1, (b) 2.5, (c) 8, (d) 16 mm
 321 h^{-1}

322 Fig.7 ETS scores of predicted hourly accumulated rainfall at the thresholds of (a)
 323 0.1, (b) 2.5, (c) 8, and (d) 16 mm h^{-1} for Exp1 (See Table 1) from 1200 UTC 4 March
 324 to 0600 UTC 5 March 2018.

325

326 3.2 不同同化方案设计

327

3.2.1 不同同化间隔

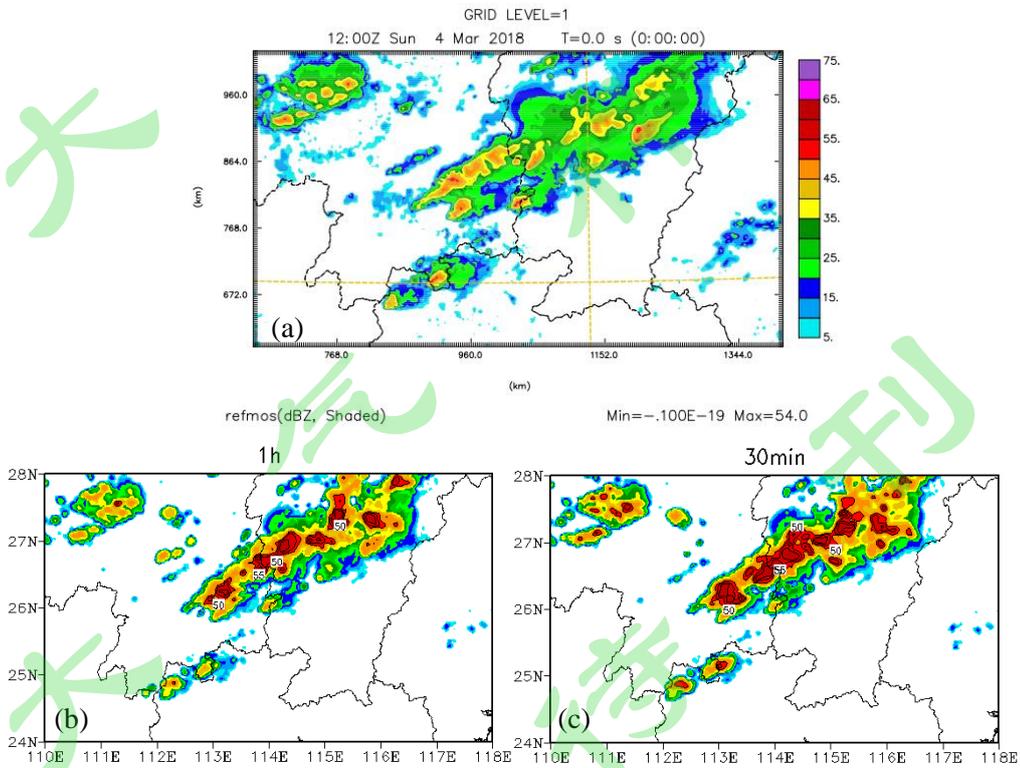
328

同化 Vr 和 Z 均对系统有正效应的影响，并且由 ExpSPstart 得到让模式先自
329 调整一定时间后得到的初始场更与实际相符合，因此在第二组试验中，同时同化
330 两种数据，设计不同的循环同化方案，选择爬线系统预报的最优方案。

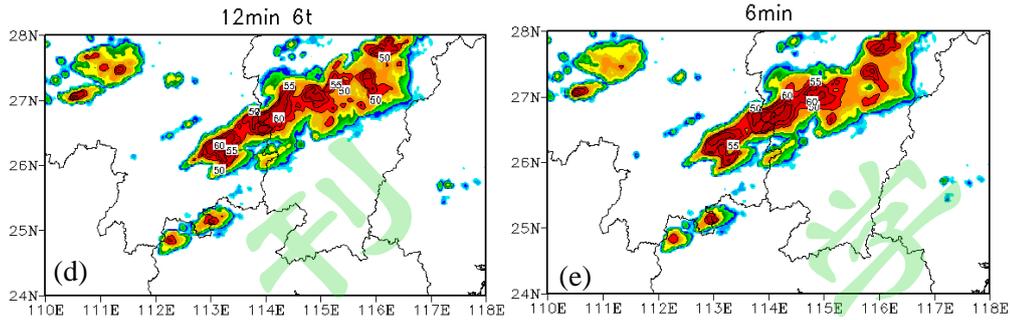
331

考察初始场（1500UTC），回波主体位于江西，湖南和广东西北部有零散回
332 波单体，最强回波值达到 54dBZ（图 8a）。几个实验均准确模拟出了回波结构，
333 Exp2All1h2t（图 8b）和 Exp2All30m3t（图 8c）模拟的回波最大值为 55dBZ，与
334 观测接近，但是最大值位于西南回波带上，其余地方均为 50dBZ，尤其对于东北
335 带回波模拟相对较弱。Exp2All12m6t 模拟的回波最大值为 60dBZ，虽然有所高
336 估，但是大值区出现的位置与观测对应，且在西南带和东北带上大值均为 55dBZ，
337 与雷达拼图相符合。Exp2All6m11t 的模拟结果与 12min 间隔近似，但前者未模
338 拟出湖南西北部零散回波的分布。总体来看，循环同化雷达数据大大改善了回波
339 的初始结构，不同间隔时间对于回波强度、大值区分布及其中小回波的分布有较
340 大影响。

341



342



343

344

345

346

347

348

349

350

351

352

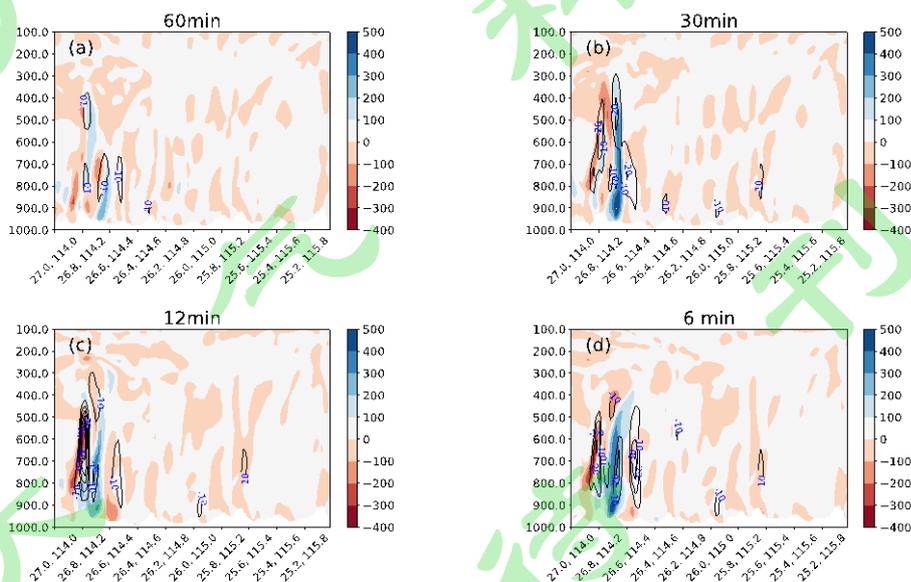
353

354

355

图 8 同图 5，但是为第二组试验的初始场 1500UTC
Fig.8 Same as Fig.5, but for the second set of experiments.

1h 预报中（图略），回波分为三块：位于湖南西北部的爬线后部回波、位于广东西北部边界的零散回波、跨越湖南南部至江西省弓形结构回波，最大反射率为 59.2dBZ，回波主体有多个大值区，系统东南移动方向新的回波不断生成。不同间隔同化实验均较准确地预报出了回波结构，Exp2All1h2t 和 Exp2All30m3t 只预报出了一个 60dBZ 的大值中心，接近观测，但是新生回波位置稍偏北，Exp2All12m6t 预报的最大反射率偏强，为 65dBZ；但是较准确地预报出了爬线移动前方新回波生成以及宽广的回波范围，并且系统移动速度与观测更为一致。Exp2All6m1t 预报的强度以及结构都与观测接近，但产生了较多的虚假回波。



356

357

358

359

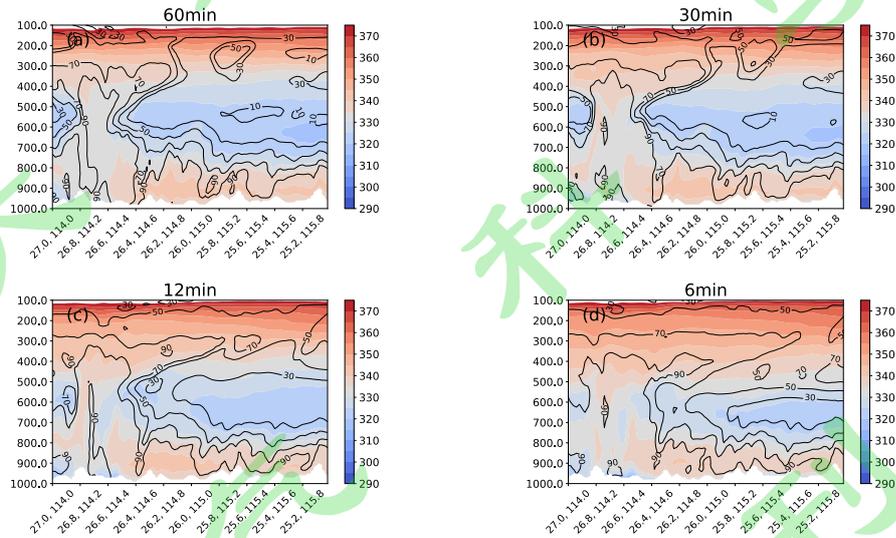
360

图 9 2018 年 3 月 4 日 1600UTC 不同同化间隔下绝对涡度（填色，单位： 10^{-5} s^{-1} ）及垂直 P 速度（黑色等值线，单位： Pa s^{-1} ）沿 $114^{\circ}\text{E}-116^{\circ}\text{E}$ ， $25^{\circ}\text{N}-27^{\circ}\text{N}$ 的剖面分布：（a）1h，（b）30min，（c）12min，（d）6min

361 Fig.9 The cross sections (along 114°E-116°E, 25°N-27°N) of absolute vorticity
 362 (shaded area, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity on p coordinate (black contours, unit:
 363 Pa s^{-1}) with different assimilation intervals: (a) 1h, (b) 30min, (c) 12min, and (d) 6min
 364 at 1600 UTC 4 March 2018.

365

366 由 RKW 机制可知当近地面冷池产生的负涡度与低层垂直风切变产生的正涡
 367 度大小相当时最有利于飏线系统的发展。在飏线触发阶段（1600UTC），
 368 Exp2All1h2t（图 9a）垂直上升运动很弱，垂直 P 速度最大只有 10Pa/s，
 369 Exp2All30m3t（图 9b）也仅达到了 20Pa/s，且负涡度较弱，不利于系统进一步
 370 发展。Exp2All12m6t（图 9c）低层产生了很强的正涡度，表明有较强低空垂直
 371 风切变，冷池出流加强了单体上升运动，最大垂直 P 速度达到了 50Pa/s，对流活
 372 动最高伸展至 300hPa，并且飏线移动前方正负涡度强度相当，利于新单体发展。
 373 Exp2All6m11t（图 9d）移动前方（26.6° N，114.4° E）产生了具有强上升速度
 374 的新对流单体，因此组合反射率预报偏强，产生许多虚假回波。



375

376 图 10 2018 年 3 月 4 日 1600UTC 不同同化间隔下相当位温（填色，单位：
 377 K）及相对湿度（黑色等值线，单位：%）沿 114°E-116°E，25°N-27°N 的剖面分
 378 布：（a）1h，（b）30min，（c）12min，（d）6min

379

380 Fig.10 The cross sections (along 114°E-116°E, 25°N-27°N) of equivalent
 381 Potential Temperature (shaded area, unit: K) and relative reflectivity (black contours,
 382 unit: %) with different assimilation intervals: (a) 1h, (b) 30min, (c) 12min, and (d)
 383 6min at 1600 UTC 4 March 2018.

383

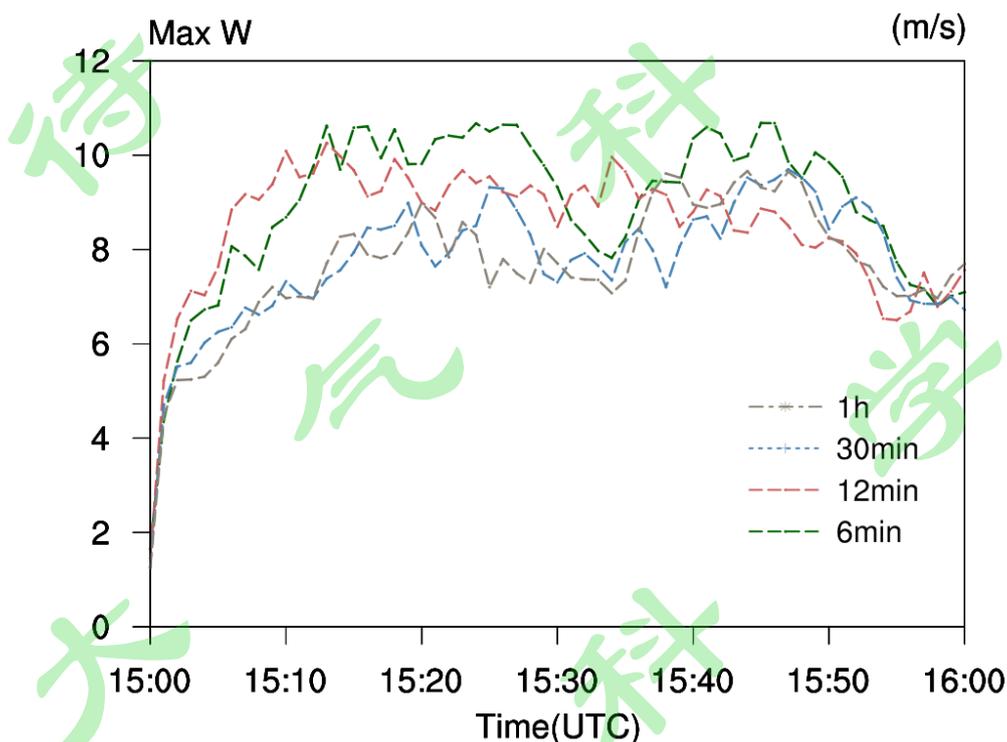
384 低层湿环境有利于飚线系统的发生发展，相对于国外飚线，国内飚线低层湿
385 度往往更大（Meng et al., 2013）。几个实验中单体前方高层均有大范围的干冷
386 空气入侵（图 10），低层有暖湿气流，产生下暖上冷的不稳定层结，但是
387 Exp2All1h2t 中（图 10a）对流单体发展区域整层空气温度为 330K，相对较低。
388 Exp2All30m3t（图 10b）中相对湿度达到 90%的范围较小，但低层冷池温度相对
389 较高。Exp2All6m11t（图 10d）冷池较强，低至 300K，但其冷空气范围更小。
390 而 Exp2All12m6t（图 10c）系统对流上升造成潜热释放，因此在单体对流区域垂
391 直方向上形成了一条暖湿通道，从低层到 500hPa 相对湿度都达到了 90%，并且
392 在近地面冷池很强，相对位温低至 310K。总体而言，同化间隔时间越长，预报
393 的热力条件以及湿度条件是相对较弱的，因此产生的系统强度也偏弱。

394 从动力角度分析不同同化方案对初始场的改善，分析 300hPa（图略）和 850hPa
395 辐合辐散场，Exp2All1h2t 和 Exp2All30m3t 模拟的辐合辐散场均偏弱。
396 Exp2All12m6t 和 Exp2All6m11t 模拟出了尾流低压，中心位势高度为 1360gpm，
397 低空切变线北部风速更大，飚线系统前面的西南风速达到 28m/s。结果表明同化
398 雷达资料后，通过改善高低空风场，模拟出触发飚线生成的低空切变线，得到了
399 更好的对流活动发展条件，从而提高预报，而同化间隔越短，初始场动力触发机
400 制越强。

401 考虑到此次个例在 1700UTC 完全形成弓形回波的结构，然后开始发展加强，
402 因此接下来考察该时刻下不同同化方案对系统垂直风切变的模拟（图略）。
403 Exp2All1h2t 中近地面冷池强度较弱，低空垂直风切变为 16m/s。Exp2All30m3t
404 新生成的单体后方近地面冷池也有所加强，但是低空垂直风切变很弱。
405 Exp2All12m6t 和 Exp2All6m11t 中近地面冷池均很强，扰动位温达到了 -9K，低
406 空垂直风切变达到了 20m/s，并且与回波近似垂直。

407 从定量的角度考虑，考虑对不同降水量级的 ETS 评分（图略），Exp2All12m6t
408 和 Exp2All6m11t 的评分是最高的，但是分数下降较快，只维持了 3h 的同化效果，
409 而后评分开始再次升高，表明通过 Vr 对系统动力场的改善，在模式动力及热力
410 相互适应调整后提高了降水预报。Exp2All1h2t 在不同降水量级下评分都是最差
411 的，30min 次之。总体而言，12min 间隔得到了最好的降水预报结果。

412 由以上结论可知，并不是同化间隔越短得到的分析场及预报场结果越好，
413 6min 间隔生成了很多虚假回波，这是因为模式在短时间内没有调整到稳定状态，
414 因此在此基础上接连同化不能生成较好的分析场。参考 Pan et al. (2019)，本文
415 通过 1h 预报内最大垂直速度的变化表征模式自调整的的稳定特征（图 11），其中
416 1h 和 30min 间隔产生的垂直速度均偏小，而 6min 间隔迟于 12min 间隔调整到稳
417 定状态，因此并不是同化间隔时间越短越好。



418
419 图 11 2018 年 3 月 4 日第二组试验在 850hPa 位势高度上初始 1h 预报时段 1500
420 UTC 至 1600UTC 每分钟最大垂直速度随时间的变化（单位： $m s^{-1}$ ）

421 Fig 11. Maximum vertical velocity (unit: $m s^{-1}$) per minute from 1500 UTC to
422 1600 UTC at 850hPa on March 4, 2018

423 3.2.2 不同同化次数

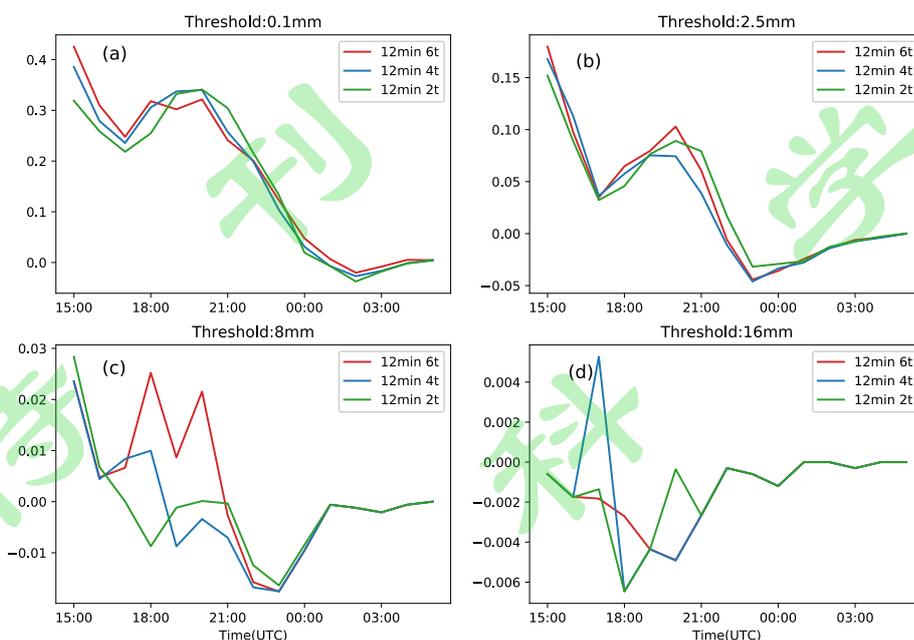
424 第二组实验结果表明 12min 为最优间隔同化时间，基于此结论对同化次数进
425 行探讨。对反射率初始场及 1h 预报场进行分析（图略），发现同化次数越少得
426 到的对流回波越弱。深入研究其动力结构（图略），也可以发现，同化次数越少，
427 产生的垂直对流活动是较弱的，并且 Exp3All12m2t 在对流正旺盛发展区域有下
428 沉运动。考虑对热力场的影响（图略），Exp3All12m2t 在对流发展区域，整层
429

430 大气温度均较低，低层相对湿度仅达到 70%。增加同化次数，Exp3All12m4t 由
431 于对流上升运动释放凝结潜热，对流发展区域从近地面到中层温度相对较高，
432 低层相对湿度增大，达到了 90%，因此同化次数的增多也能改善飑线发展的热力
433 条件。考虑几组试验高空辐散场分布，Exp3All12m2t 和 Exp3All12m4t 相对于
434 Exp3All12m6t 的高空辐散结构更加分散，并且相对偏弱。850hPa 位势高度场上，
435 Exp3All12m2t 系统后部低压中心最弱，随着同化次数增加，系统尾流低压逐渐
436 增强，切变线的位置南移。不仅如此，Exp3All12m2t 和 Exp3All12m4t 产生的低
437 空垂直风切变和冷池强度明显比 Exp3All12m6t 弱（图略）。

438 定量分析同化次数对降水预报的影响（图 12），结果表明，对于小雨和中雨
439 量级，同化次数越多得到的评分越高，对于大到暴雨的降水评分反之，这可能是
440 同化次数越多在初始时刻对天气系统加强明显，造成大值降水与实际观测相较在
441 一定程度上偏强；2h 后 Exp3All12m6t 评分明显高于 Exp3All12m2t 和
442 Exp3All12m4t，表明同化次数越多，降水预报越能得到改善。

443 由于 ETS 评分并未考虑降水空间分布情况，仅根据格点之间预报和观测的相
444 互对应进行评判，因而随着模式分辨率的增大，评分误差也会相应增大，因此本
445 文进一步采用分数技巧评分（Fraction Skill Score，简称 FSS）对第三组试验预报
446 结果进行评估。FSS 评分结果与 ETS 评分结果几乎一致，针对小雨和中雨量级
447 （图 13a、b），同化次数越多，对系统初始及发展时刻的降水预报结果越好，
448 而对大到暴雨量级（图 13c、d），系统发展阶段的 FSS 评分相对较低。与 ETS
449 评分有所差异的是，对中雨量级的降水，三组实验最初几个小时的评分差异较小；
450 对大雨量级的降水，Exp3All12m6t 初始几个小时评分较低，但在系统强烈发展
451 阶段，评分远高于另外两组试验。

ETS score



452

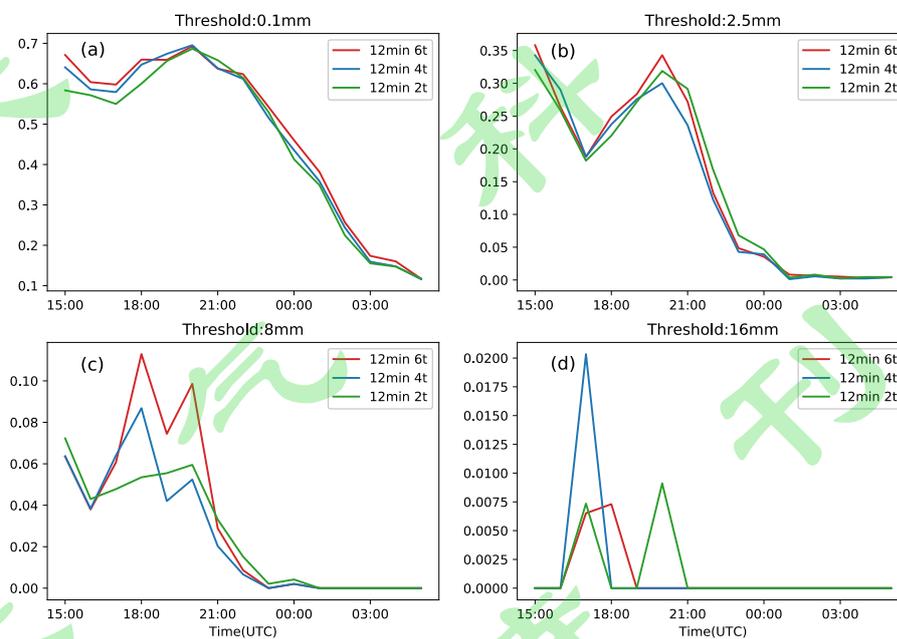
453

454

455

图 12 同图 7，但是为第三组试验结果
Fig.12 Same as Fig.7, but for the third set of experiments.

FSS score



456

图 13 第三组试验(见表 1)从 2018 年 3 月 4 日 1200UTC 至 3 月 5 日 0600UTC

不同阈值下每小时累积降水量 FSS 评分: (a) 0.1, (b) 2.5, (c) 8, (d) 16 mm

459

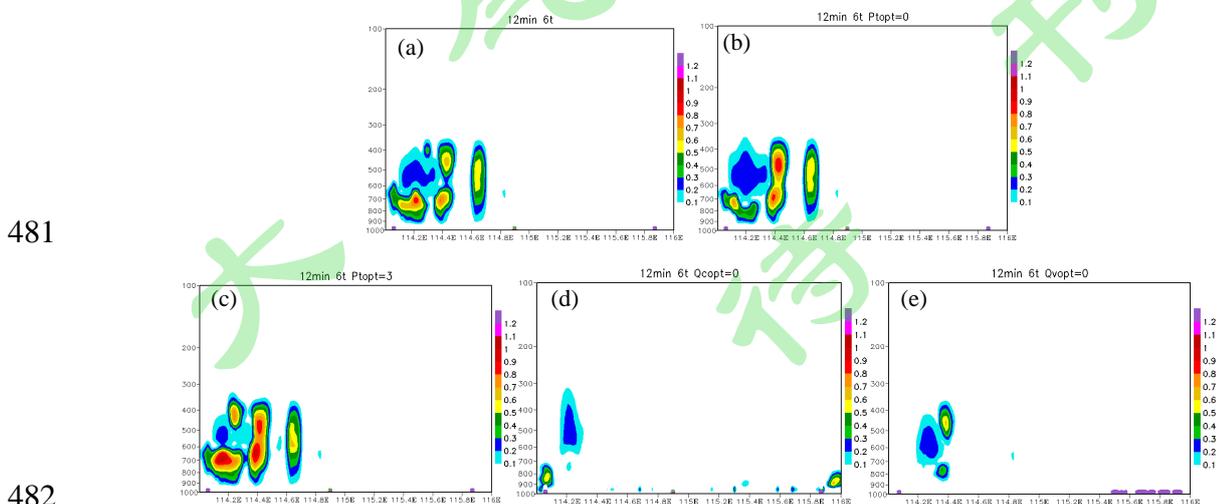
h^{-1}

460 Fig.13 FSS scores of predicted hourly accumulated rainfall at the thresholds of (a)
461 0.1, (b) 2.5, (c) 8, and (d) 16 mm h⁻¹ for the third set of experiments (See Table 1)
462 from 1200 UTC 4 March to 0600 UTC 5 March 2018.

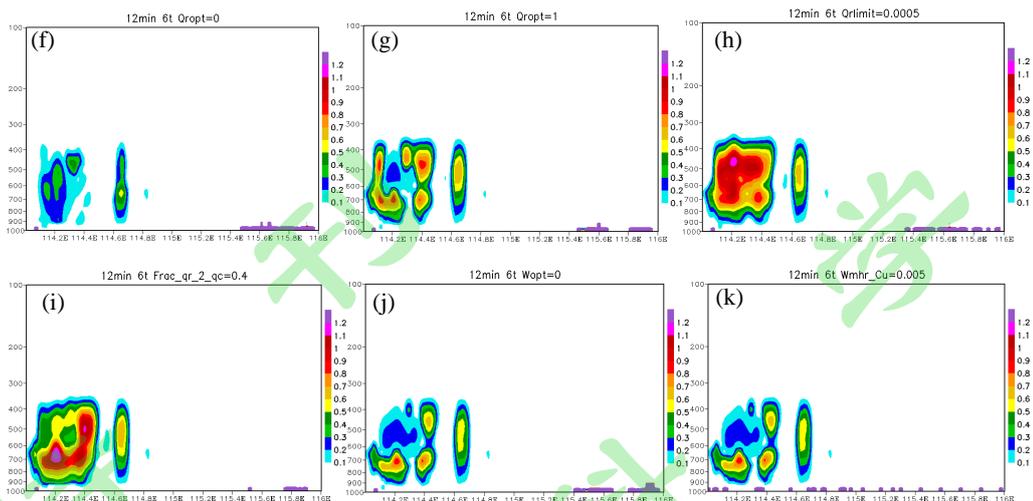
463 4 云分析参数敏感性试验

464 分析初始场水凝物分布，Exp2All12m6t（图 14a）中云水混合比极大值位于
465 700hPa，爬线移动前方 400-800hPa 云水含量充足，利于对流发展。若分别关闭
466 水汽（图 14d）、湿度（图 14e）、雨水调整（图 14f），分析场中云水过少。若
467 减小雨水/冰上限分析值（Qrlimit）（图 14h），由于雨水/冰输出量受到限制，
468 增大了高层云水含量，极大值位于 500hPa 以上，达到 1.2g/kg。若增大雨水/冰至
469 云水转换率（Frac_qr_2_qc）（图 14i），则更多雨水向云水转换，因此分析场中
470 云水混合比明显增多。若通过潜热方案（LH）调整温度场（图 14c），由于循环
471 同化过程中生成的水凝物通过凝结释放加入了过多潜热，造成更强的对流运动，
472 因此在 400hPa 出现了云水极大值。而由于湿绝热廓线方案（MA）考虑了气块
473 上升过程中的温度变化，因此产生的云水混合比分布高度不会过高（图 14a）。
474 改变垂直速度相关参数，几乎未对初始场中云水含量产生影响（图 14j、k）。

475 雨水调整相关参数直接影响了初始场中的雨水及云冰混合比，若关闭湿度及
476 雨水调整，雨水混合比大幅增加（图略），云冰含量降低。减小雨水/冰上限分
477 析值（Qrlimit）和增大雨水/冰至云水转换率（Frac_qr_2_qc），均使分析场中雨
478 水含量明显减少，因此高空中由于温度过低，云水直接转换为云冰，导致云冰混
479 合比增大（图略）。其余云分析参数对液态水含量影响较小。
480



483



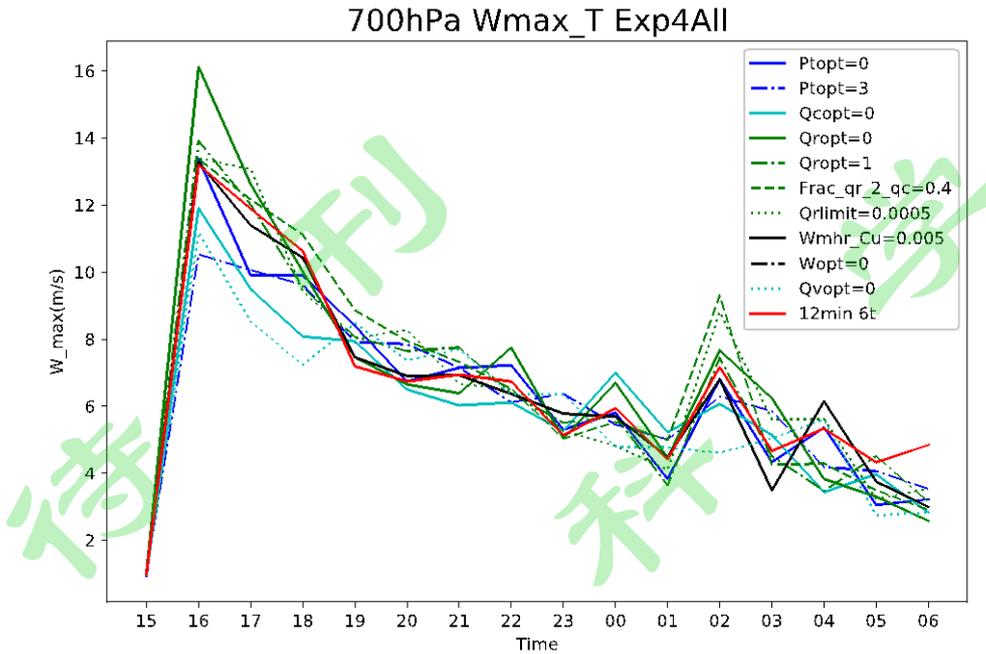
484

485 图 14 2018 年 3 月 4 日 1500UTC 云水混合比沿 114°E-116°E, 25°N-27°N 的剖面
 486 分布 (填色, 单位: g kg^{-1}): (a) Exp2All12m6t, (b) Ptopt=0, (c) Ptopt=3,
 487 (d) Qcopt=0, (e) Qvopt=0, (f) Qropt=0, (g) Qropt=1, (h) Qrlimit=0.0005,
 488 (i) Frac_qr_2_qc=0.4, (j) Wopt=0, (k) Wmhr_Cu=0.005

489 Fig.14 The cross sections (along 114°E-116°E, 25°N-27°N) of cloud water
 490 mixing ratio (shaded, g kg^{-1}) with different assimilation intervals: (a) Exp2All12m6t,
 491 (b) Ptopt=0, (c) Ptopt=3, (d) Qcopt=0, (e) Qvopt=0, (f) Qropt=0, (g)
 492 Qrlimit=0.0005, (i) Frac_qr_2_qc=0.4, (j) Wopt=0, and (k) Wmhr_Cu=0.005 at 1600
 493 UTC 4 March 2018.

494

495 通过分析系统最大垂直速度 (W_{\max}) 表征不同云分析参数对动力结构的影
 496 响 (图 15), 当不进行水汽调整、温度调整、湿度调整时, W_{\max} 偏小, 不进
 497 行雨水调整也会引起最大垂直速度的较大差异; 而直接关掉垂直速度调整参数对
 498 系统整体模拟最初几个小时影响不大, 但在 2h 后 W_{\max} 有所下降, 整体来看垂
 499 直速度调整参数影响较小, 这可能是因为通过初始场水成物潜热释放过程仍能产
 500 生强对流活动。在 4h 后几个试验趋于一致, 这表明云分析作用随后逐渐消失。
 501 因此云分析调整参数不仅对水成物初始场有影响, 对系统动力场也有较大改善。



502

503 图 15 2018 年 3 月 4 日 1500UTC 至 3 月 5 日 0600UTC 700hPa 高度不同云参数敏
504 感性试验每小时最大垂直速度随时间的分布

505 Fig.15 Hourly maximum vertical velocity ($m s^{-1}$) at 700hPa from 1500 UTC 4
506 March to 0600 UTC 5 March 2018.

507

508 检验不同云分析参数对降水预报的影响（图略）表明，对小雨、中雨及大雨
509 量级而言，若不进行湿度调整，则评分会大幅降低。温度调整方案对降水预报影
510 响仅次于湿度调整，针对本次个例，温度调整中 MA 方案对小雨和中雨量级的
511 降水预报较好，LH 方案对大雨及暴雨预报的评分较高，这是因为 LH 方案释放
512 了较多潜热，在系统发展后期更能维持对流发展。如果不进行雨水调整，则评分
513 在 2h 后下降明显，使用 Kessler 方案在大雨和暴雨量级得到了更高的评分，这是
514 由于在此次对流个例中，主要是液相粒子作用。对于大雨，若不进行垂直速度调
515 整，在 2h 后评分降低，但对于其他降水量级，垂直速度相关参数的影响都较弱，
516 表明垂直参数对于仍能在一定程度上增强对流。

517

518 5 总结与讨论

519 本文利用 ARPS 的三维变分模块（ARPS 3Dvar）、复杂云分析模块及 WRF
520 模式，针对华南一次春季飊线过程展开研究，讨论飊线触发及其发展机制及预报
521 的可行性。得出以下结论：

- 522 (1) 雷达反射率数据同化主要是改善了初始场的水凝物分布,而雷达径向速度
523 数据同化主要改善了飑线系统动力结构的预报。径向速度数据同化使
524 WRF 模式在此过程积分后期更有利于维持对流系统的发展,从而提高降
525 水预报准确性。雷达反射率数据同化大大减少了 WRF 模式自适应
526 (spin-up) 时间,经过 2 小时左右的自行调整后,预报结果更加合理可靠。
- 527 (2) 不同同化时间间隔的对比试验表明,12 分钟同化间隔的预报效果最优。
528 模拟的冷池和垂直风切变较强,且相当位温和相对湿度分布结果更有利于
529 飑线系统发展;客观 ETS 和 FSS 评分结果也定量表明,12 分钟同化间隔
530 产生的降水预报效果最佳。在 12 分钟同化间隔固定条件下,同化次数越
531 多得到的降水预报结果越好。这表明雷达实况数据经过合理时间间隔的多
532 次融合,可以使预报结果更好。
- 533 (3) 复杂云分析参数主要对水凝物初始场进行调整,其中水汽、雨水调整对系
534 统初始场影响较大,而垂直速度调整影响相对较小。由于改善水成物分布,
535 模拟的强对流系统发展后期潜热释放更利于对流上升运动增强,使飑线系
536 统内的云水及冰晶粒子增加。同时,云分析参数对系统动力结构也有一定
537 影响,湿度调整、温度调整和水汽调整对最大垂直速度的模拟结果影响较
538 大,雨水调整则对系统动力结构模拟结果有较大影响。

539 本文工作仅是针对一次飑线过程,得到的结果有一定的局限性,考虑到不同
540 个例发生发展机制的不同,今后应该对更多实际飑线过程进行研究。同时,云分
541 析的主要作用是改善模式中初始场水凝物等气象要素的分布,使其更接近于实
542 况,进而改善短时预报质量;对于较长时间的降水预报,微物理方案的合理设置
543 更为关键,因此,如何利用云分析方案与微物理方案合理搭配来提高降水预报效
544 果,也是值得深入探讨的问题。

545

546 参考文献:

- 547 Adams-Selin R D, Van den Heever S C, Johnson R H. 2013. Sensitivity of bow-echo
548 simulation to microphysical parameterizations [J]. Wea. Forecasting, 28(5):
549 1188-1209. doi:10.1175/WAF-D-12-00108.1
- 550 Ahasan M N, Debsarma S K. 2015. Impact of data assimilation in simulation of
551 thunderstorm (squall line) event over Bangladesh using WRF model, during

552 SAARC–STORM Pilot Field Experiment 2011. *Nat. Hazards*, 75: 1009–1022.
553 doi:10.1007/s11069-014-1369-z

554 Aksoy A, Dowell D C, Snyder C, et al. 2009. A multicase comparative assessment of
555 the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part I:
556 Storm-scale analyses [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(6): 1805-1824.
557 doi:10.1175/2008MWR2691.1

558 Albers S C, Mcginley J A, Birkenheuer D, et al. 1996. The Local Analysis and
559 Prediction System (LAPS): Analyses of clouds, precipitation, and temperature
560 [J]. *Wea. Forecasting*, 11(3): 273-287.
561 doi:10.1175/1520-0434(1996)011<0273:TLAAPS>2.0.CO;2

562 Bluestein H B, Jain M H. 1985. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe
563 squall lines in Oklahoma during the Spring[J]. *J. Atmos. Sci.*, 42(16), 1711-1732.
564 doi: 10.1175/1520-0469(1985)042<1711:FOMLOP>2.0.CO;2

565 Brewster K. 1996. Application of a Bratseth analysis scheme including Doppler radar
566 data. Preprints, 15th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Norfolk, VA,
567 Amer. Meteor. Soc., 92–95.

568 Brewster K. 2002. Recent advances in the diabatic initialization of a non-hydrostatic
569 numerical model. Preprints, 15th Conf on Numerical Weather Prediction, 21st
570 Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM,
571 J6.3.

572 Bryan G H, Morrison H. 2012. Sensitivity of a simulated squall line to horizontal
573 resolution and parameterization of microphysics [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140(1),
574 202-225. doi:10.1175/MWR-D-11-00046.1

575 Chen F, Mitchell K, Schaake J, et al. 1996. Modeling of land-surface evaporation by
576 four schemes and comparison with FIFE observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 101:
577 7251-7268. doi:10.1029/95JD02165

578 丁一汇, 李鸿洲, 章名立, 等. 1982. 我国飚线发生条件的研究[J]. *大气科学*,
579 6(01):18-27. Ding Yihui, Li Hongzhou, Zhang Mingli, et al. 1982. A Study on
580 the genesis conditions of squall-line in China [J]. *Chinese Journal of*
581 *Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 6(01): 18-27.
582 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.01.03

583 Dawson D T, Xue M. 2004. Impact of mesoscale data, cloud analysis on the explicit
584 prediction of a MCS during IHOP 2002. Extended Abstracts, 20th Conf. on
585 Weather Analysis and Forecasting, 16th Conf. on Numerical Weather Prediction,
586 Seattle, WA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, P1.36. doi:10.1.1.80.2774

587 Dong J, and Xue M. 2013. Assimilation of radial velocity and reflectivity data from
588 coastal WSR-88D radars using an ensemble Kalman filter for the analysis and
589 forecast of landfalling hurricane Ike (2008) [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*,
590 139(671):467-487. doi:10.1002/qj.1970

591 Dudhia J. 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon
592 experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. *J. Atmos Sci.*, 46(20):
593 3077-3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

594 Ferrier B S. 1994. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I:
595 Description[J]. *J. Atmos. Sci.*, 51(2): 249-280.
596 doi:10.1175/1520-0469(1994)051<0249:ADMMPF>2.0.CO;2

597 Gao J, Xue M, Brewster K, Carr F, Droegemeier K. 2002. New development of a
598 3DVAR system for a nonhydrostatic NWP model. *Conference on Weather*
599 *Analysis and Forecasting [J]. Amer. Meteor. Soc.*, 339-342.

600 Gao J, Stensrud D J. 2014. Some observing system simulation experiments with a
601 hybrid 3DVAR system for storm-scale radar data assimilation [J]. *Mon. Wea.*
602 *Rev.*, 142(9): 3326-3346. doi:10.1175/MWR-D-14-00025.1

603 Hamill T M, and Snyder C. 2000. A hybrid ensemble Kalman filter–3D variational
604 analysis scheme [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 128(8): 2905-2919.
605 doi:10.1175/1520-0493(2000)128<2905:AHEKFV>2.0.CO;2

606 Houtekamer P L, and Mitchell H L. 1998. Data assimilation using an ensemble
607 Kalman filter technique [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126(3): 796-811.
608 doi:10.1175/1520-0493(1998)126<0796:DAUAEK>2.0.CO;2

609 Hu M, Xue M, Brewster K. 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D
610 Level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms.
611 Part I: Cloud analysis and its impact [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(2): 675-698.
612 doi:10.1175/MWR3092.1

613 Hu M, and Xue M. 2007. Impact of configurations of rapid intermittent assimilation
614 of WSR-88D radar data for the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic
615 thunderstorm case [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135(2): 507-525.
616 doi:10.1175/MWR3313.1

617 James R P, Markowski P, Fritsch J M, et al. 2006. Bow echo sensitivity to ambient
618 moisture and cold pool strength [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(3): 950-964.

619 Janjic Z I. 2002. Nonsingular implementation of the Mellor–Yamada level 2.5 scheme
620 in the NCEP meso model. *NCEP Technical Note*, 437: 61.

621 Kessler E. 1995. On the continuity and distribution of water substance in atmospheric
622 circulations[J]. *Atmos. Res.*, 38: 109-145. doi:10.1016/0169-8095(94)00090-Z

623 Kong R, Xue M, Liu C. 2018. Development of a hybrid En3DVar data assimilation
624 system and comparisons with 3DVar and EnKF for radar data assimilation with
625 observing system simulation experiments [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146(1): 175-198.
626 doi:10.1175/MWR-D-17-0164.1

627 Lim K S, Hong S Y. 2010. Development of an effective double-moment cloud
628 microphysics scheme with prognostic Cloud Condensation Nuclei (CCN) for
629 weather and climate models [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(5): 1587-1612.
630 doi:10.1175/2009MWR2968.1

631 Meng Z, Yan D, Zhang Y. 2013. General features of squall lines in East China [J].
632 *Mon. Wea. Rev.*, 141(5): 1629-1647. doi:10.1175/MWR-D-12-00208.1

633 Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. 1997. Radiative transfer for
634 inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the
635 longwave[J], *J. Geophys. Res.*, 102: 16663-16682. doi:10.1029/97JD00237

636 Pan Y, Xue M, Zhu K, et al. 2018. A prototype regional GSI-based EnKF-variational
637 hybrid data assimilation system for the rapid refresh forecasting system:
638 Dual-resolution implementation and testing results. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(5):
639 518-530. doi:10.1007/s00376-017-7108-0

640 Pan Y, Wang M. 2019. Impact of the assimilation frequency of radar data with the
641 ARPS 3DVar and cloud analysis system on forecasts of a squall line in southern
642 China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 36: 160-172. doi:10.1007/s00376-018-8087-5

643 Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1988. A theory for strong, longlived squall
644 lines [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45(3): 463-485.
645 doi:10.1175/1520-0469(1988)045<0463:ATFSL>2.0.CO;2

646 孙娟珍, 陈明轩, 范水勇. 2016. 雷达资料同化方法:回顾与前瞻[J]. *气象科技进*
647 *展*, 6(03): 17-27. Sun Juanzhen, Chen Mingxuan, Fan Shuiyong. 2016. Radar
648 data assimilation methods: Review and future perspective [J]. *Advances in*
649 *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 6(01): 18-27.
650 doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2016.03.002

651 Sun J, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
652 observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and
653 simulated data experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (12): 1642-1661.
654 doi:10.1175/1520-0469(1997)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2

655 Sun J, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar
656 observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments
657 of an observed Florida convective storm [J]. *J. Atmos. Sci.*, 55(5): 835-852.
658 doi:10.1175/1520-0469(1997)054<1642:DAMRFD>2.0.CO;2

659 Sun J, 2005. Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed
660 during STEPS [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133(4): 793-813. doi:10.1175/MWR2887.1

661 Sun J, and Zhang Y. 2008. Analysis and prediction of a squall line observed during
662 IHOP using multiple WSR-88D observations [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (7):
663 2364-2388. doi:10.1175/2007MWR2205.1

664 Tai S, Liou Y, Sun J, et al. 2017. The development of a terrain-resolving scheme for
665 the forward model and its adjoint in the Four-Dimensional Variational Doppler
666 Radar Analysis System (VDRAS) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(1): 289-306.
667 doi:10.1175/MWR-D-16-0092.1

668 Takemi T. 2007. Environmental stability control of the intensity of squall lines under
669 low - level shear conditions [J]. *J. Geophys. Res.*, 112.

670 Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. 1982. Two-dimensional convection in
671 non-constant shear: A model of mid-latitude squall lines [J]. *Quart. J. Roy.*
672 *Meteor. Soc.*, 108: 739. doi:10.1002/qj.49710845802

673 Tong M, and Xue M. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar
674 data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments [J]. *Mon. Wea.*
675 *Rev.*, 133 (7): 1789-1807. doi: 10.1175/MWR2898.1

676 Wang H, Sun J, Fan S, et al. 2013a. Indirect assimilation of radar reflectivity with
677 WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events

678 [J]. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 52(4):889-902.
679 doi:10.1175/JAMC-D-12-0120.1

680 Wang H, Sun J, Zhang X, et al. 2013b. Radar data assimilation with WRF 4D-Var.
681 Part I: System development and preliminary testing [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141(7):
682 2224-2244. doi:10.1175/MWR-D-12-00168.1

683 Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The Advanced Regional Prediction
684 System(ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data
685 assimilation[J]. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 82: 139-170.

686 Xue M, Hu M, Schenkman A D, et al. 2014. Numerical prediction of the 8 May 2003
687 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the
688 assimilation of WSR-88D data [J]. *Wea. Forecasting*, 29(1): 39-62.
689 doi:10.1175/WAF-D-13-00029.1

690 Xu Q. 1996. Generalized adjoint for physical processes with parameterized
691 discontinuities. Part I: Basic issues and heuristic examples [J]. *J. Atmos. Sci.*,
692 53(8): 1123-1142. doi:10.1175/1520-0469(1996)053<1123:GAFPPW>2.0.CO;2

693 Yang M H, Houze R A Jr. 1995. Sensitivity of squall-line rear inflow to ice
694 microphysics and environmental humidity[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123(11),
695 3175-3193. doi:10.1175/1520-0493(1995)123<3175:SOSLRI>2.0.CO;2

696 张建军, 王咏青, 钟玮. 2016. 飚线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J].
697 *大气科学*, 40(04): 689-702. Zhang Jianjun, Wang Yongqing, Zhong Wei. 2016.
698 Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines [J].
699 *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 40(04):689-702.

700 郑淋淋, 邱学兴, 钱磊. 2019. 同化雷达反射率资料对一次飚线过程的模拟研究[J].
701 *气象*, 45(01):73-87. Zheng Linlin, Qiu Xuexing, Qian Lei. 2019. Simulation
702 study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data [J].
703 *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 45(01):73-87.
704 doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.007

705 张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 2018. 中国强对流天气预报业务发展[J]. *气象科技进展*,
706 8: 8-18. Zhang Xiaoling, Yang Bo, Sheng Jie, et al. 2018. Development of
707 operations on forecasting severe convective weather in China [J]. *Adv. Meteor.*
708 *Sci. Technol. (in Chinese)*, 8: 8-18.

709 周围, 包云轩, 冉令坤, 王勇. 2018. 一次飚线过程对流稳定度演变的诊断分析[J].
710 *大气科学*, 42(02):339-356. Zhou Wei, Bao Yunxuan, Ran Lingkun, Wang Yong.
711 2018. Diagnostic analysis of convective stability evolution during a squall line
712 process [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,
713 42(2):339-356. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1712.17126

714 Zhang J, Carr F, and Brewster K. 1998. ADAS cloud analysis. Preprints, 12th Conf.
715 on Numerical Weather Prediction, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 185-188.
716 doi:

717 Zhang J.1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite
718 observation[D], Ph. D. dissertation, School of Meteorology, University of
719 Oklahoma, 194 pp.

- 720 Zhao K, Xue M. 2009. Assimilation of coastal Doppler radar data with the ARPS
721 3DVAR and cloud analysis for the prediction of Hurricane Ike (2008) [J].
722 Geophys. Res. Lett., 36(12): L12803. doi:10.1029/2009GL038658
723 Zhang Y, Ding Z, Huang X. 2012. Analysis on formation reason of a squall line
724 weather in the Yellow River and Huaihe River Basins[J]. Meteor. Environ. Sci.,
725 3(9): 11-14. doi:CNKI:SUN:MEVR.0.2012-09-005

气 科 学
风 学
气 科 学
风 学 刊
气 学 刊