DOI：10. 11714/acta. snus. ZR20260131

CMA-GFS对一次西南涡强降水低估的模式偏差诊断*

王蕾，张莉，徐国强，胡江林

灾害天气科学与技术全国重点实验室 / 中国气象局地球系统数值预报中心 / 中国气象局地球系统数值预报重点开放实验室，北京 100081

摘　要：2025年6月29—30日，四川东北部发生了一次伴随西南涡快速发展的持续性强降水过程。中国气象局全球同化预报系统（CMA-GFS）较好地预报了此次强降水过程及主要落区，但明显低估了大暴雨范围和峰值强度。本研究利用降水观测、ERA5再分析资料和CMA-GFS业务预报资料，从环流形势、涡度收支、视热源（Q_1）、垂直环流结构和整层水汽收支等方面分析了模式预报偏差。结果表明，CMA-GFS未能准确预报西南涡的快速发展，低涡强度明显偏弱。800 hPa附近散度项的正贡献偏小，低层正涡度增长不足；低层辐合较分散，上升运动偏弱，涡度向上传输不足；Q_1偏弱，非绝热加热对上升运动和低层辐合的反馈不足，不利于西南涡垂直结构的发展和维持。强降水区东南侧整层水汽输送偏弱，南侧水汽输入不足，北侧输出偏多，导致区域净水汽输入明显偏低。上述动力、热力和水汽偏差共同削弱了低层辐合拉伸、低涡发展、暖湿气流卷入和非绝热加热之间的正反馈，是模式低估强降水强度和范围的主要原因。敏感性试验表明，减弱对流参数化中的动量混合作用后，低层散度项、中低层垂直输送项、Q_1、区域净水汽输入和降水均有所增强；修正水汽输入路径上的初始湿度偏差后，目标区水汽输入和降水增加；两者共同调整时改善最为明显。研究结果可为CMA-GFS西南涡强降水预报偏差诊断及相关物理过程改进提供参考。

关键词：西南涡；强降水；CMA-GFS模式；偏差诊断

中图分类号：P45　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2097－0137（XXXX）XX－0001－12

Diagnosing the underestimation of a southwest-vortex heavy precipitation event by CMA-GFS

Wang Lei, *Zhang Li*, *Xu Guoqiang*, *Hu Jianglin*

State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology / CMA Earth System Modeling and Prediction Centre / Key Laboratory of Earth System Modeling and Prediction, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China

Abstract: A persistent heavy precipitation event associated with the rapid development of a southwest-vortex occurred over northeastern Sichuan Province on 29−30 June 2025. CMA-GFS reasonably captures the occurrence and general location of the event but markedly underestimates the areal extent of torrential rainfall and its peak intensity. Using precipitation observations, ERA5

* **收稿日期：**2026－05－18　　**录用日期：**2026－09－08　　**网络首发日期：**XXXX－XX－XX
基金项目：中国气象局能力提升联合研究专项（22NLTSZ006）；
西藏自治区科技计划项目（XZ202403ZY0011）；中国气象局创新发展专项（CXFZ2025J010）；
灾害天气科学与技术全国重点实验室自主研究课题（2025QZC12）
作者简介：王蕾（1989年生），女；**研究方向：**数值模式诊断评估；E-mail：leiwang@cma.gov.cn
通信作者：张莉（1978年生），女；**研究方向：**数值模式诊断评估；E-mail：zhangli@cma.gov.cn

全文阅读
ZR20260131

reanalysis data, and CMA-GFS operational forecasts, we analyzed forecast biases in circulation patterns, vorticity budget, apparent heat source (Q_1), vertical circulation structure, and the vertically integrated moisture budget. The results show that CMA-GFS fails to reproduce the rapid development of the southwest-vortex and substantially underestimates its intensity. The positive contribution of the divergence term near 800 hPa is too weak, resulting in insufficient low-level positive vorticity growth. Low-level convergence is less organized, ascent is weaker, and upward vorticity transport is reduced. Q_1 is also underestimated and is poorly coordinated with low-level convergence and ascent, preventing the development of a deep vertical structure. Vertically integrated moisture transport southeast of the heavy-rainfall region is too weak. Insufficient inflow from the south and excessive outflow to the north lead to a marked reduction in regional net moisture input. These dynamical, thermodynamic, and moisture biases weaken the positive feedback loop involving low-level convergence and stretching, vortex development, entrainment of warm and moist air, and diabatic heating, thereby contributing to the underestimation of both the intensity and spatial extent of heavy precipitation. Sensitivity experiments show that reducing convective momentum mixing enhances the low-level divergence-term, lower-to-middle-tropospheric vertical vorticity transport, Q_1 regional net moisture input, and precipitation. Correcting the initial moisture bias along the moisture-inflow pathway also increases moisture input and precipitation over the target region, while the combined adjustment yields the greatest improvement. These results provide useful guidance for diagnosing CMA-GFS forecast biases in southwest-vortex-related heavy precipitation and for improving the representation of the relevant physical processes.

Key words: southwest-vortex; heavy precipitation; CMA-GFS; forecast diagnosis

西南地区地形复杂，是我国暴雨和持续性强降水的高发区之一。在东亚夏季风盛期，西南暖湿气流沿高原东侧北上，在高原槽东移和中低层扰动发展影响下，易形成西南涡并引发强降水。西南涡是影响我国西南地区降水的重要中尺度天气系统，其发生发展受地形动力作用、大尺度环流背景和热力反馈等多种因素影响。西南涡路径和强度变化复杂，强降水的落区和强度预报也具有较大不确定性，是复杂地形区数值天气预报的难点之一。

西南涡暴雨的形成和发展涉及地形、环流、水汽及非绝热加热等多种过程。西风受高原阻挡后发生绕流和分支，在四川盆地背风坡一侧形成辐合；边界层摩擦和垂直涡管伸展有利于低涡生成（李国庆等，1976；Wang et al.，2014；李跃清等，2016；李国平等，2018）。西南涡生成初期通常较浅，其后能否继续发展还受高原槽等大尺度系统演变的影响。水汽主要由南侧暖湿气流输送，进入低涡附近后辐合上升，与强降水的发生和维持密切相关（段海霞等，2008；康岚等，2011；何光碧，2012；Zhou et al.，2024）。降水形成后，凝结潜热释放会改变中低层加热和垂直运动（周春花等，2023；Zhou et al.，2024）。Xu et al.（2025）指出，中尺度重力波能够通过改变散度场影响上升运动和水汽辐合。对于四川盆地西南涡，Wu et al.（2022）讨论了地形、潜热释放以及拉伸、倾斜和涡度垂直输送的作用；Zhou et al.（2024）则重点分析了环流背景、暖湿条件和动力抬升。现有研究虽已较充分地讨论了实际天气过程中西南涡的动力和热力特征，但从业务模式预报偏差出发进行过程诊断的工作仍相对较少。

中国气象局全球同化预报系统（CMA-GFS）是我国自主研发的全球中期数值天气预报系统，近年来在动力框架、垂直坐标、资料同化和物理过程等方面进行了多次升级（苏勇等，2020；张红亮等，2022；Shen et al.，2023；张进等，2023；王凡等，2024）。目前模式对大尺度环流已具有较好的预报能力，但在复杂地形区对中尺度低涡及区域性强降水的预报仍存在不足。已有CMA-GFS评估工作涉及降水、环流场及相关物理量的预报偏差（王蕾等，2024；张欣等，2026），但对于西南涡强降水，低涡发展偏差与非绝热加热、水汽输送之间的关系尚缺少针对性分析。鉴于此，本研究重点关注上述预报偏差在强降水发展阶段的具体表现及其联系。

强降水预报误差可能与初始场、模式分辨率、地形表达及物理过程参数化等多方面因素相关。

初始场中水汽、温度、风场及中尺度扰动的刻画会影响后续环流演变和降水预报，因此资料同化质量是提高降水预报能力的重要基础（Bauer et al.，2015）。模式动力框架、网格分辨率和地形表达也会影响低涡、切变线、急流及地形强迫等中尺度过程的模拟，复杂地形区的分辨率不足或地形平滑可能削弱低层辐合和地形抬升，进而影响强降水的强度和分布（Fritsch et al.，2004；Sun et al.，2014；Bauer et al.，2015）。此外，积云对流、云微物理、边界层等物理参数化过程对热量、水汽和动量的垂直输送具有重要影响，并进一步作用于低层风场、上升运动、非绝热加热和降水过程（Arakawa，2004；Morrison et al.，2020；Chen et al.，2026）。因此，对具体强降水个例进行模式偏差诊断，有助于确定影响预报的主要过程，并为后续敏感性试验提供依据。

2025年6月29—30日，四川东北部发生了一次伴随西南涡快速发展和维持的持续性强降水过程，CMA-GFS对此次降水明显低估。本研究利用地面站和融合降水观测资料、ERA5再分析资料、CMA-GFS业务预报资料及敏感性试验，分析降水演变和环流背景，并从涡度收支、视热源（Q_1）、垂直环流结构和整层水汽收支等方面诊断模式偏差，重点分析低涡发展、非绝热加热和水汽输送偏差与降水低估之间的联系。在此基础上，通过敏感性试验检验主要偏差环节对降水预报的影响，为CMA-GFS西南涡强降水预报偏差分析和模式改进提供参考。

1　数据和方法

1.1　研究数据

降水观测采用国家气象信息中心发布的国家级地面观测站数据（孙超等，2018）和中国区域逐小时降水融合产品（水平分辨率为5 km）（潘旸等，2018）；同时使用全球降水测量任务综合多卫星反演降水产品，空间分辨率为0.1°（Huffman et al.，2023）。再分析资料采用欧洲中期天气预报中心第五代再分析资料ERA5，时间分辨率为1 h，水平分辨率为0.25°，包括等压面资料与地面资料（Hersbach et al.，2020）。

模式资料采用CMA-GFS V4.2于2025年6月29日20:00（北京时，下同）起报的业务预报数据，水平分辨率为0.125°（张进等，2023）。敏感性试验基于同期CMA-GFS业务模式开展。为便于比较，将ERA5资料双线性插值至CMA-GFS模式网格。

1.2　涡度收支和视热源（Q_1）诊断方法

本研究采用涡度收支方程分析西南涡发展过程（张小玲等，2000）。忽略摩擦作用时，涡度局地变化可分解为：

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t}=-\left[u\frac{\partial \zeta}{\partial x}+v\left(\frac{\partial f}{\partial y}+\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)\right]-\omega\frac{\partial \zeta}{\partial P}-\left(f+\zeta\right)\nabla\cdot\boldsymbol{V}-\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial P}-\frac{\partial \omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial P}\right),\tag{1}$$

其中$-\left[u\frac{\partial \zeta}{\partial x}+v\left(\frac{\partial f}{\partial y}+\frac{\partial \zeta}{\partial y}\right)\right]$为水平平流项，$-\omega\frac{\partial \zeta}{\partial p}$为垂直输送项，$-\left(f+\zeta\right)\nabla\cdot\boldsymbol{V}$为散度项，$-\left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial P}-\frac{\partial \omega}{\partial y}\frac{\partial u}{\partial P}\right)$为扭转项；$\boldsymbol{V}$为水平风矢量（m/s），$u$和$v$分别为纬向和经向风分量（m/s），$\omega$为气压坐标垂直速度（Pa/s），$\zeta$为相对涡度（$s^{-1}$），$f$为科氏参数（$s^{-1}$），$x$和$y$分别为纬向和经向距离（m），$P$为气压（Pa）。

Q_1按照Yanai et al.（1973）的方法计算：

$$Q_1=c_p\left[\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{V}\cdot\nabla T+\left(\frac{P}{P_0}\right)^{\frac{R}{c_p}}\omega\frac{\partial \theta}{\partial P}\right],\tag{2}$$

其中T为温度（K），θ为位温（K），R为干空气气体常数，取287 J·kg^{-1}·K^{-1}；c_P为干空气定压比热，取1 004.841 6 J·kg^{-1}·K^{-1}，P_0为参考气压，取1 000 hPa，t为时间（s）。

1.3　水汽收支诊断方法

通过计算研究区域4个边界的整层水汽通量分析区域水汽收支。其中，东、北边界正值表示水汽流出，西、南边界正值表示水汽流入。各边界整层水汽通量按照丁一汇（2005）的方法计算：

$$F_{\mathrm{E}}=\int_{\varphi_{\mathrm{S}}}^{\varphi_{\mathrm{N}}}Q_{\lambda_{\mathrm{E}}}a\mathrm{d}\varphi,\tag{3}$$

$$F_{\mathrm{W}}=\int_{\varphi_{\mathrm{S}}}^{\varphi_{\mathrm{N}}}Q_{\lambda_{\mathrm{W}}}a\mathrm{d}\varphi,\tag{4}$$

$$F_{\mathrm{S}}=\int_{\lambda_{\mathrm{W}}}^{\lambda_{\mathrm{E}}}Q_{\varphi_{\mathrm{S}}}a\cos\varphi_{\mathrm{S}}\mathrm{d}\lambda,\tag{5}$$

$$F_{\mathrm{N}}=\int_{\lambda_{\mathrm{W}}}^{\lambda_{\mathrm{E}}}Q_{\varphi_{\mathrm{N}}}a\cos\varphi_{\mathrm{N}}\mathrm{d}\lambda,\tag{6}$$

其中φ和λ分别为纬度和经度，φ_{N}、φ_{S}、λ_{E}和λ_{W}分别表示研究区域北、南边界纬度和东、西边界的经度；a为地球半径，取6.37×10^6 m；$Q_{\lambda_{\mathrm{E}}}$、$Q_{\lambda_{\mathrm{W}}}$、$Q_{\varphi_{\mathrm{S}}}$和$Q_{\varphi_{\mathrm{N}}}$分别表示通过东、西、南和北边界的整层水汽通量。整层水汽通量Q的计算公式（Trenberth，1991）为：

$$Q_{\mathrm{u}}=\frac{1}{g}\int_{P_{\mathrm{top}}}^{P_{\mathrm{surface}}}qu\mathrm{d}P,\tag{7}$$

$$Q_{\mathrm{v}}=\frac{1}{g}\int_{P_{\mathrm{top}}}^{P_{\mathrm{surface}}}qv\mathrm{d}P, \tag{8}$$

$$Q=\sqrt{{Q_{\mathrm{u}}}^{2}+{Q_{\mathrm{v}}}^{2}}, \tag{9}$$

其中Q_{u}和Q_{v}分别为纬向和经向整层水汽通量分量，q为比湿(kg/kg)，g为重力加速度(m/s^2)，P_{surface}为表面气压，P_{top}为积分上边界气压。考虑到高层水汽含量较少，积分上边界取10 hPa。

2 结果与讨论

2.1 个例介绍及CMA-GFS模式降水预报

2025年6月29—30日，四川东北部出现持续性强降水。此次强降水过程发生在高原槽东移和西南涡发展背景下，29日00:00至30日20:00四川多地累积降水达到特大暴雨量级，其中南溪区最大，为300.6 mm。过程期间，四川盆地低层维持西南气流，高原槽前抬升和西南涡环流为降水持续提供了有利的动力和水汽条件。

以2025年6月29日20:00起报的CMA-GFS预报为例，评估其对6月29日20:00至30日20:00累积降水的预报能力(图1)。观测中，四川东北部出现大范围大暴雨，雨带总体呈西南—东北向分布。CMA-GFS预报的主要降水落区与观测较为一致，四川东北部也预报出大暴雨中心，但大暴雨范围明显偏小，降水强度总体偏弱。

图2给出了图1黑框区域内平均3 h累积降水的演变。观测降水在夜间开始增强，30日上午至中午明显加强，并于14:00前后达到峰值。CMA-GFS基本预报出降水的发生、增强和减弱过程，但各时段降水量普遍偏小，其中30日11:00和14:00偏差较为明显，14:00低估最为突出。

为进一步比较强降水时段的空间分布，图3给出了30日08:00—11:00和11:00—14:00 2个时段的3 h累积降水。08:00—11:00，观测中四川东北部形成西南—东北向强降水带，大范围降水超过50 mm，雨带较为连续(图3a)。CMA-GFS预报的雨带位置和走向与观测基本一致，但强度明显偏弱，未出现50 mm以上降水(图3c)。11:00—14:00，观测降水进一步增强，四川东北部降水大范围超过50 mm，局地超过100 mm，是此次过程降水最强的时段(图3b)。同期CMA-GFS预报降水反而减弱，仅少数地区达到25 mm，强降水范围和中心强度均明显不足，雨带也较观测分散(图3d)。

2.2 环流背景

为比较强降水峰值阶段的环流演变及模式预报偏差，本研究给出了30日08:00、11:00及14:00的700 hPa风场、比湿、相对涡度及500 hPa高度场

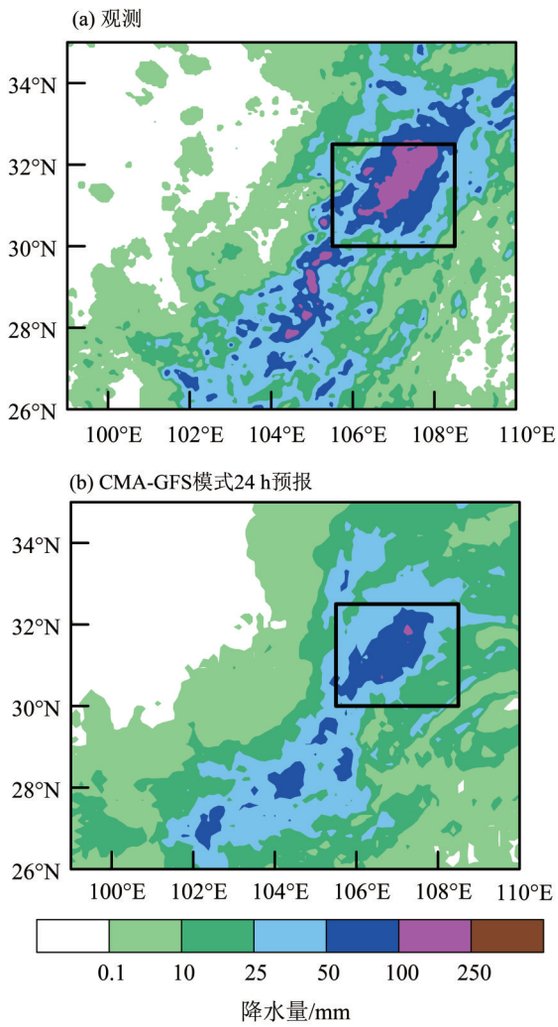


图1 观测与CMA-GFS 24 h累积降水对比

Fig. 1 Comparison of 24 h accumulated precipitation between observations and CMA-GFS

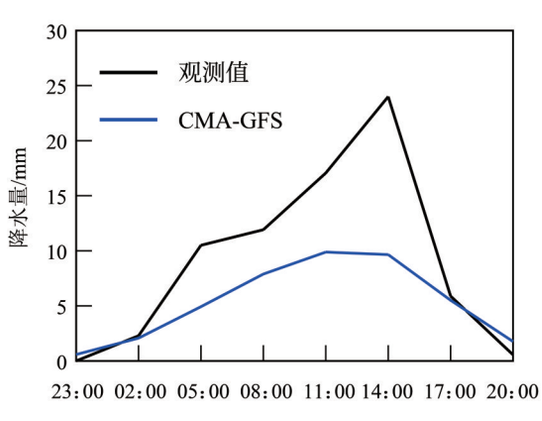


图2 观测与CMA-GFS区域平均3 h累积降水演变

Fig. 2 Time evolution of area-averaged 3 h accumulated precipitation from observations and CMA-GFS

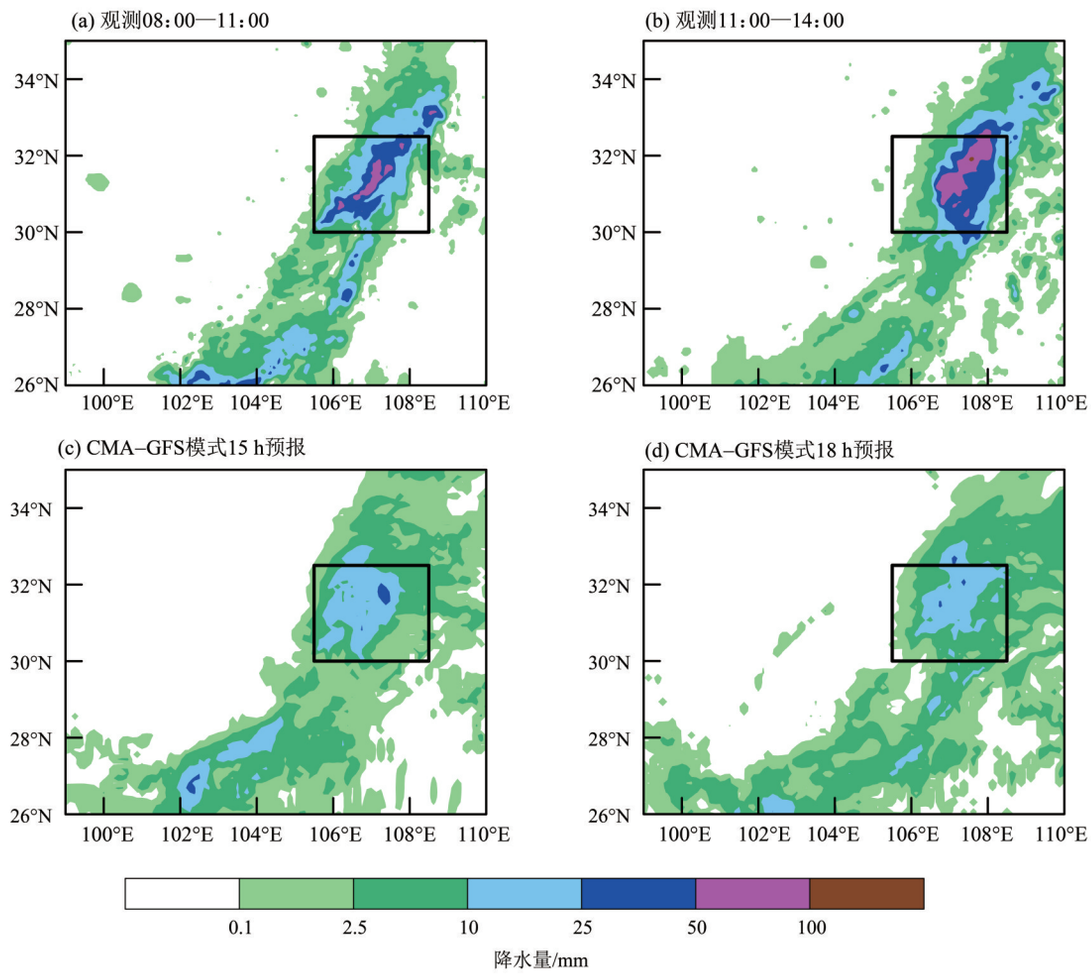


图3　观测与CMA-GFS 3 h累积降水对比

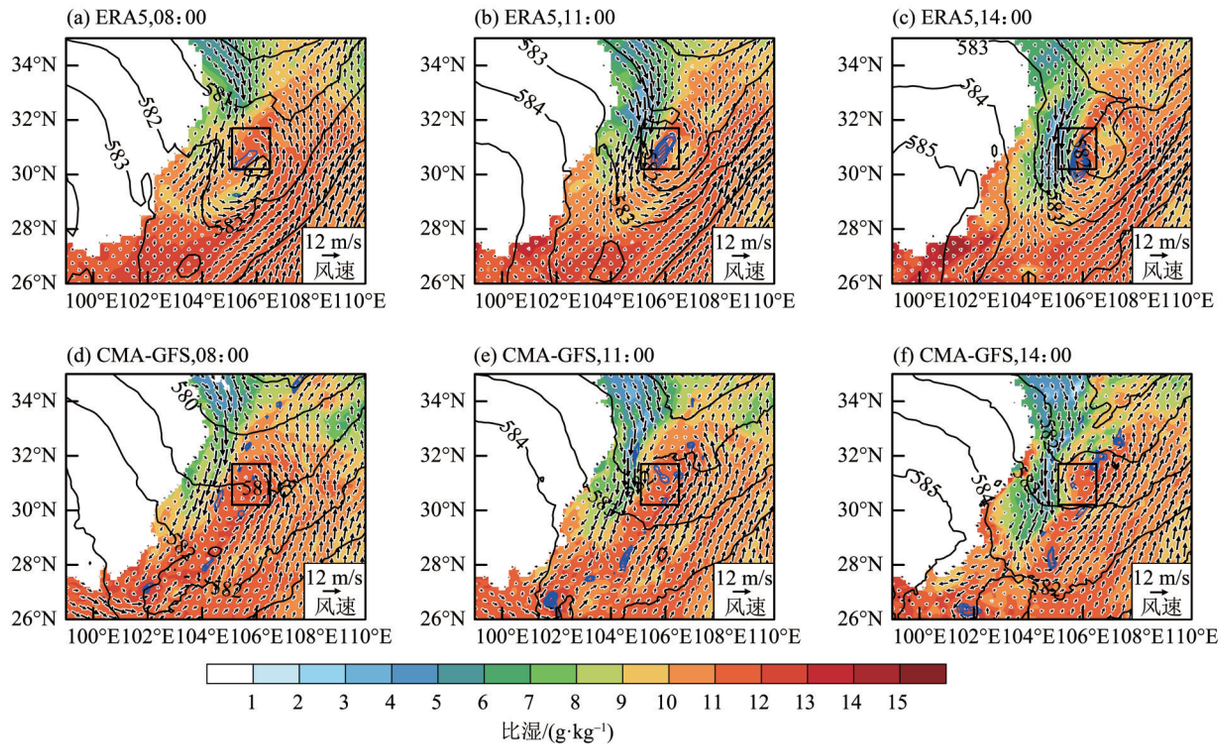
Fig. 3　Comparison of 3 h accumulated precipitation between observations and CMA-GFS

（图4）。ERA5显示，08:00四川盆地东部位于高原槽前，700 hPa已形成较清晰的气旋性环流和正涡度中心，最大相对涡度为35.124×10^{-5} s^{-1}。正涡度中心附近伴有明显的西南气流；强降水区东南侧比湿大范围超过12 g/kg，西南气流与高湿区共同构成西南—东北向的水汽输送通道。11:00，西南涡明显加强，700 hPa最大相对涡度增至48.755×10^{-5} s^{-1}，涡度中心与比湿高值区基本重合，低涡东北侧水汽辐合也较明显。与此同时，500 hPa高原槽继续东移，槽前高度梯度增大。至14:00，西南涡继续维持并略有增强，最大相对涡度达到50.813×10^{-5} s^{-1}，西南—东北向的水汽输送仍较明显。

CMA-GFS预报出了500 hPa高原槽和700 hPa西南气流的基本形态，但西南涡明显弱于ERA5（图4d~f）。30日08:00，700 hPa气旋性环流较弱，正涡度中心偏小且较分散，比湿高值区的范围也偏小；500 hPa槽线的位置和形态与ERA5存在一定差异。到11:00，ERA5中的西南涡已明显增强，而CMA-GFS正涡度中心仍较弱，强降水区东南侧比湿及西南侧暖湿水汽输送均偏弱。14:00这一差异仍然存在，模式中的低涡未出现ERA5所示的明显增强，高湿区范围和强度也较小。由此可见，大尺度环流背景的预报偏差相对较小，主要差异集中在西南涡发展及其附近的水汽条件。

2.3　涡度收支和Q_1诊断

根据公式（1）和（2），对ERA5和CMA-GFS的涡度收支及Q_1进行逐层诊断（图5）。ERA5中，30日08:00约800 hPa的散度项表现为正贡献，低层辐合产生的拉伸作用促进局地正涡度增长；500 hPa附近垂直输送项的正贡献较强，正涡度向中层输送较为明显。此时，Q_1在300~850 hPa范围内为明显正值，与垂直输送项正贡献所在高度基本对应，反映出上升运动与非绝热加热的垂直配置较好。至11:00，中低层散度项的正贡献进一步增强，垂直输送项在500~600 hPa附近达到最大，Q_1仍在中低层维持较大的正值。低层和中层净涡度倾向均为正，表明此



填色为700 hPa比湿，矢量为700 hPa风场，蓝色实线为相对涡度，黑色实线为500 hPa高度场。相对涡度单位为10^{-5} s^{-1}，30 ×10^{-5} s^{-1}以上等值线间隔为5×10^{-5} s^{-1}，位势高度单位为dagpm。

图4 ERA5与CMA-GFS环流场对比

Fig. 4 Comparison of circulation fields between ERA5 and CMA-GFS

时西南涡处于明显发展阶段，与图4中低涡快速加强的演变一致。

08:00，CMA-GFS在800 hPa附近散度项的正贡献偏小，500 hPa附近垂直输送项也弱于ERA5，Q_1整体偏弱且正值层厚度偏小。至11:00，ERA5中低层散度项和中层垂直输送项明显增强，而CMA-GFS中相应贡献仍较弱，Q_1也明显偏小。低层辐合拉伸和涡度垂直输送不足，加之非绝热加热偏弱，使模式中的西南涡发展明显弱于ERA5。

2.4 垂直环流结构

为进一步分析低层散度项和中层垂直输送项偏差对应的垂直环流结构，图6给出了沿31°N的垂直速度、散度及Q_1剖面。

ERA5显示，30日08:00，106°E附近已经形成较清晰的低层辐合、高层辐散结构（图6a）。900~700 hPa为明显辐合区，500~300 hPa以辐散为主，其间伴有由850 hPa向上延伸至400 hPa的连续上升运动。Q_1在850~400 hPa为明显正值，与主要上升区位置基本对应。该垂直结构与图5中低层散度项和中层垂直输送项的正贡献相一致。至11:00，低层辐合、高层辐散及深厚上升运动仍然维持，Q_1正值区也与上升区对应较好（图6b）。

与ERA5相比，CMA-GFS的垂直环流结构明显偏弱（图6c、d）。08:00，模式低层辐合较为零散，中高层辐散范围和强度均偏小；上升运动主要集中在700~500 hPa，垂直范围较窄，连续性也较差。Q_1正值区较弱且分布分散，与低层辐合和上升运动的对应关系不如ERA5明显。至11:00，模式中强上升中心和Q_1大值区较ERA5明显偏东。106°E附近虽有低层辐合和高层辐散，但强度均较弱，上升运动也明显不足。CMA-GFS未能再现ERA5中较强且连续的深厚垂直环流结构，与图5中散度项、垂直输送项及Q_1偏弱的结果一致。

2.5 水汽输送和收支

图7比较了30日11:00 ERA5与CMA-GFS的整层水汽通量及区域水汽收支。ERA5中，强降水区南侧有1条较明显的西南—东北向水汽输送带（图7a），南边界是区域水汽输入的主要通道；水汽主要从东、西边界流出，北边界输出较弱，区域内保持净水汽输入。CMA-GFS虽预报出西南气流和水汽输送的大致方向（图7b），但强降水区东南侧水汽通量偏小。定量收支也显示，模式从南边界输入的

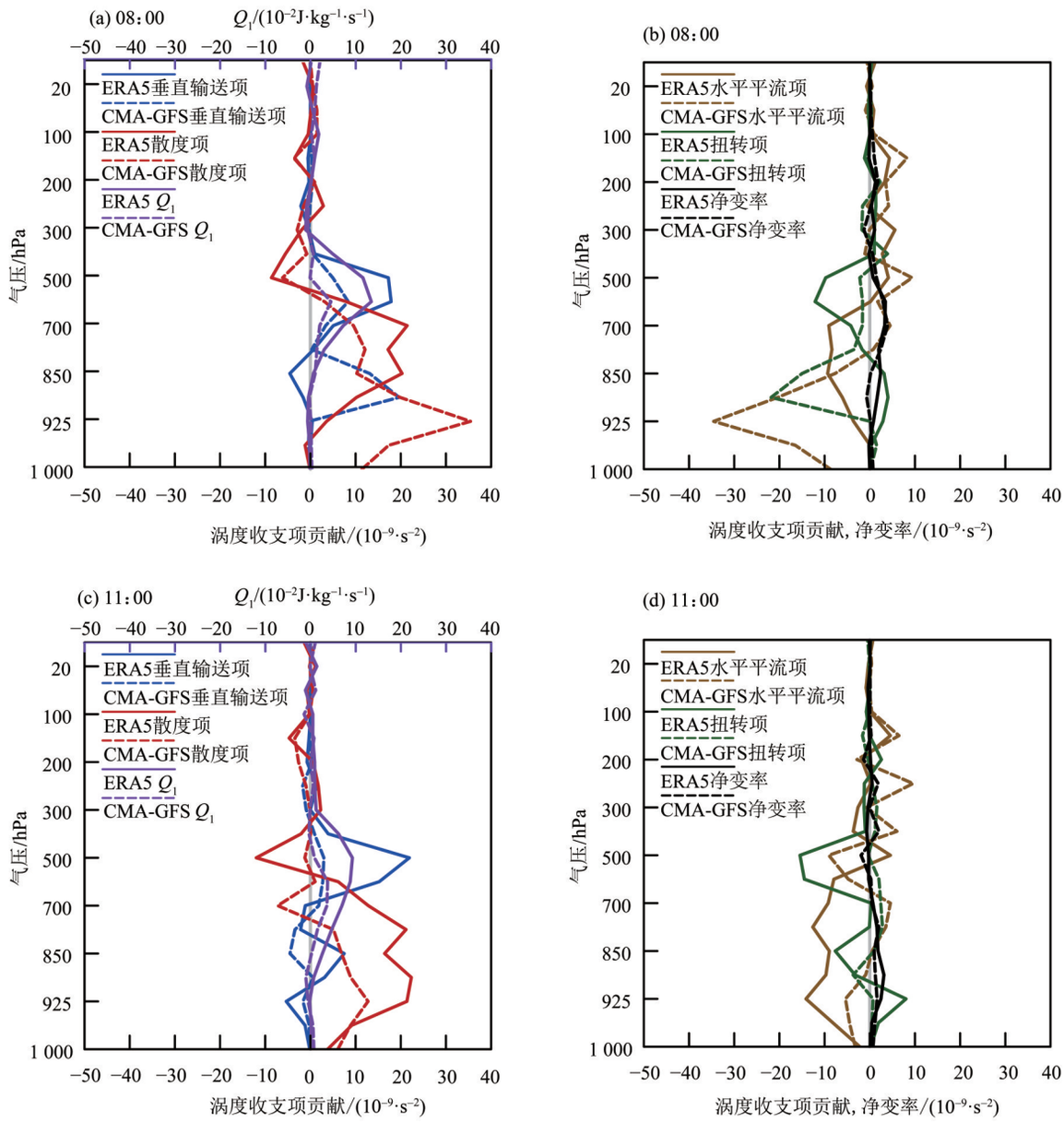


图 5　ERA5 与 CMA-GFS 涡度收支及 Q_1 垂直廓线对比

Fig. 5　Comparison of vertical profiles of the vorticity budget and Q_1 between ERA5 and CMA-GFS

水汽少于ERA5，而北边界输出偏多，因此区域净水汽输入明显减少。

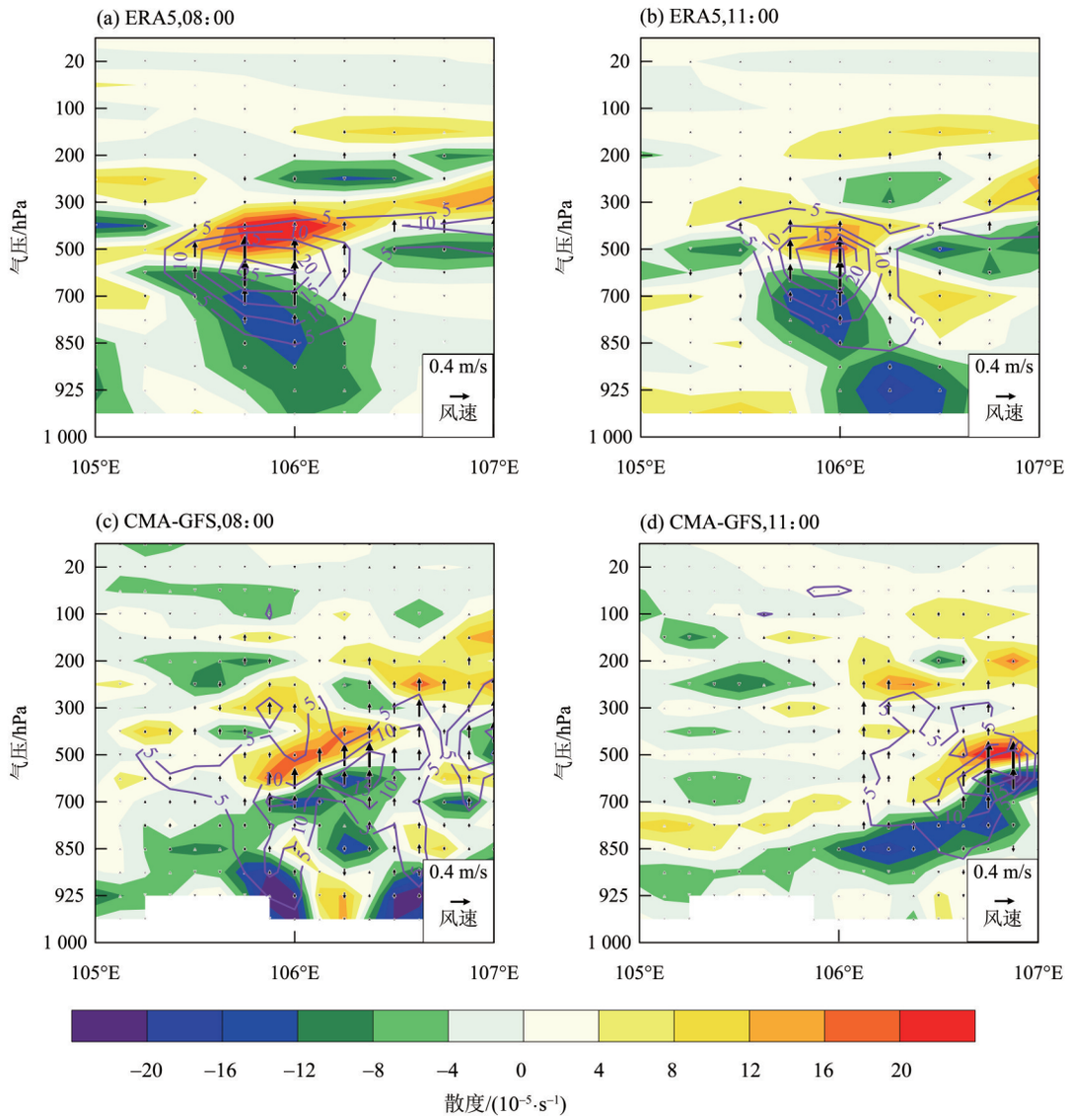
2.6　敏感性试验

前文指出，CMA-GFS 中低层辐合拉伸、涡度垂直输送和非绝热加热均偏弱，同时还存在水汽输入不足的问题。针对这些偏差，本研究设置了 3 组敏感性试验，分别调整低层动力条件、水汽条件以及二者的共同作用，评估降水预报的响应。

积云对流参数化除影响热量和水汽输送外，还可通过动量混合改变环境风场和垂直切变，从而影响低层辐合和中尺度涡旋发展（Tulich，2015；Yang et al.，2022）。Han et al.（2011）指出，对流诱发的压力梯度力可抵消部分积云动量输送产生的动量交换。基于此，EXP1 保持初始场、动力框架及其他物理过程设置不变，将对流参数化方案中的动量混合作用减小至业务设置的 10%，考察低层风场、低涡发展及降水的响应。

针对业务预报中强降水区南侧比湿偏低和水汽输送不足的问题，EXP2 利用 ERA5 修正初始场中 105.5°E—108.3°E、26.0°N—32.5°N 区域的比湿负偏差，用于评估入流水汽变化对降水、Q_1 和低涡发展的影响。EXP3 同时采用 EXP1 和 EXP2 的调整方案，分析动力和水汽条件共同改变后的预报响应。

图 8 给出了 3 组敏感性试验的 24 h 累积降水预



矢量表示垂直速度(m/s)，紫色实线为Q_1(10^{-2} J·kg^{-1}·s^{-1})。

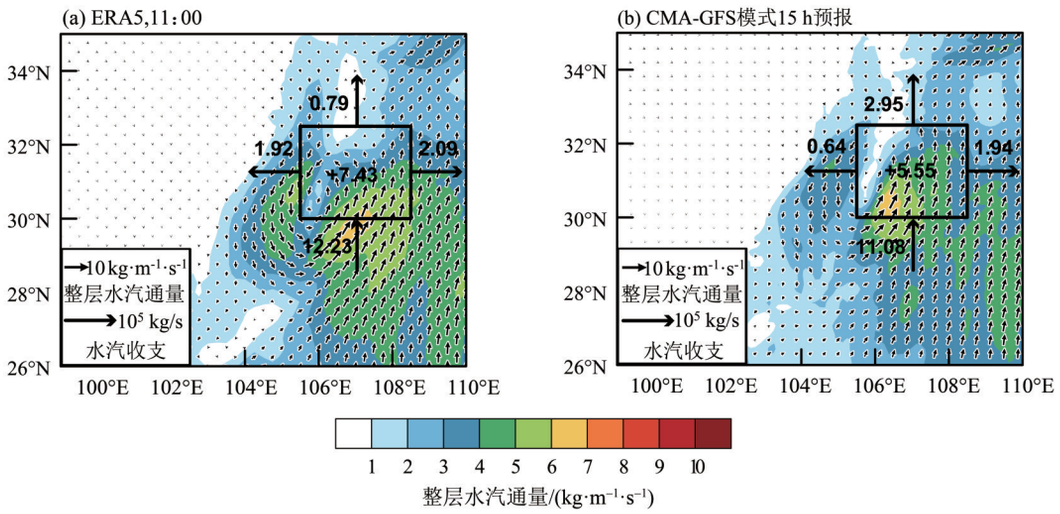
图 6　ERA5 与 CMA-GFS 垂直环流结构对比

Fig. 6　Comparison of vertical circulation structures between ERA5 and CMA-GFS

报。与业务预报相比，EXP1 中强降水区降水量级有所增大，EXP2 中强降水也有所增强。EXP3 中降水增强最为明显，强降水中心和雨带连续性较各单项试验进一步改善。

为进一步分析降水增强对应的动力和热力变化，图 9 给出 30 日 11:00 业务预报和敏感性试验区域平均散度项、垂直输送项和Q_1垂直廓线。与业务预报相比，EXP1 中低层散度项正贡献明显增强，中低层垂直输送项也有所增加，表明减弱对流动量混合后，低层辐合拉伸和正涡度向上传输均有加强，有利于低涡垂直发展。Q_1在 850~400 hPa 也明显增大，且与垂直输送项增强的高度较为对应，表明减弱动量混合后，低层辐合、上升运动、非绝热加热和涡度垂直发展之间的耦合有所改善。EXP2 对低层散度项有一定增强作用，但垂直输送项和Q_1增强有限，说明单独修正入流水汽虽能够增加降水，但对于有效建立深厚上升和涡度垂直输送结构的改善有限。EXP3 中低层散度项、垂直输送项和Q_1均表现出更为一致的增强，说明当低层动力结构与水汽供应同时改善时，更易建立低层辐合、涡度垂直输送与非绝热加热之间的耦合。

图 10 进一步给出了敏感性试验 30 日 11:00 的整层水汽通量和区域水汽收支。EXP1 中强降水区南侧水汽输入增强，北侧输出减弱，区域净水汽输入增加，说明低层动力结构调整后，低涡环流对暖湿气流的卷入和汇聚能力有所增强。EXP2 中区域



黑框为水汽收支计算区域，细矢量为整层水汽通量，参考矢量为10 kg·m^{-1}·s^{-1}，黑色粗箭头及其数值为各边界水汽收支，单位为10^5 kg/s。

图7　ERA5与CMA-GFS整层水汽输送及区域水汽收支对比

Fig. 7　Comparison of vertically integrated moisture transport and regional moisture budget between ERA5 and CMA-GFS

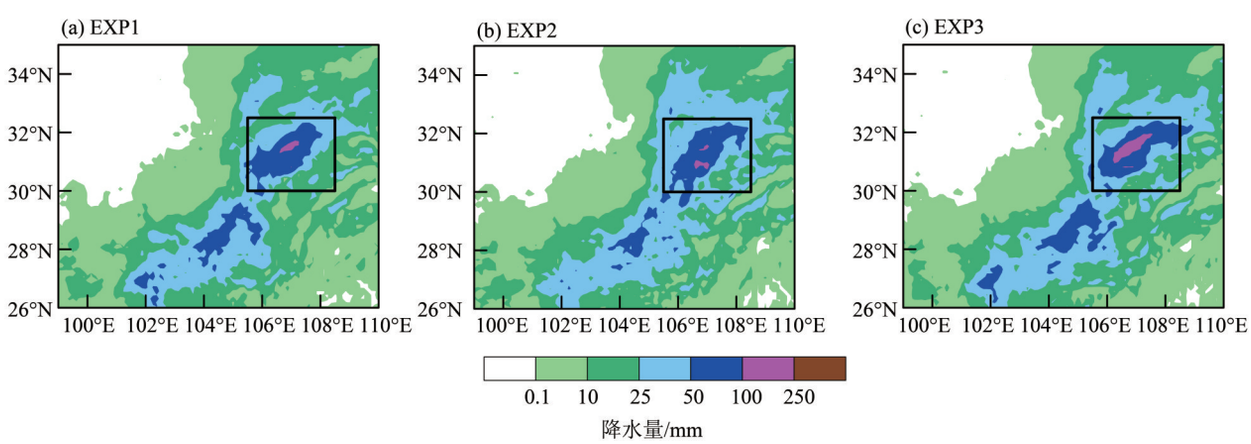


图8　敏感性试验24 h累积降水

Fig. 8　24 h accumulated precipitation forecasts from the sensitivity experiments

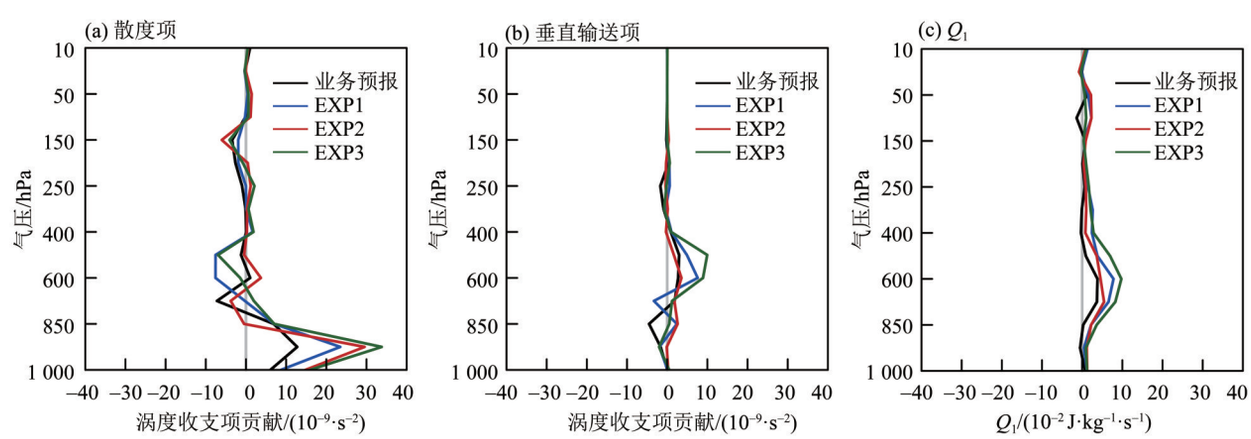
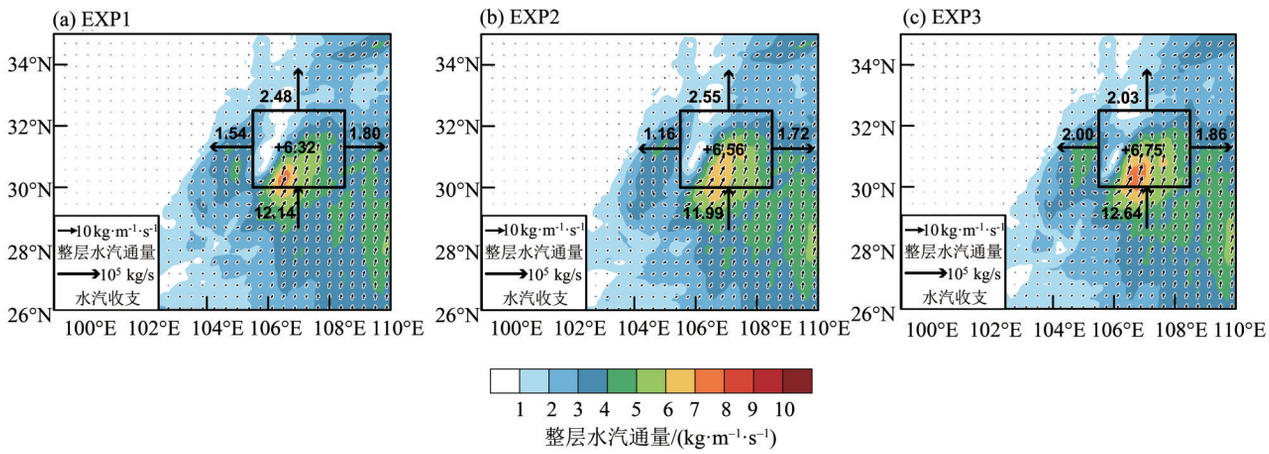


图9　敏感性试验与业务预报涡度收支及Q_1对比

Fig. 9　Comparison of the vorticity budget terms and Q_1 between the operational forecast and sensitivity experiments

净水汽输入也有所增加，表明改善水汽输入侧的水汽条件有利于增强降水。EXP3 中区域净水汽输入增强最为明显，与图 8 中的降水增强及图 9 中的 Q_1 增大相对应，说明低层动力结构改善与水汽供应增加，共同加强了水汽辐合与非绝热加热，有利于动力、水汽与热力反馈链条的建立。



黑框为水汽收支计算区域，细矢量为整层水汽通量，参考矢量为 10 kg·m^{-1}·s^{-1}，黑色粗箭头为各边界水汽收支，单位为 10^5 kg/s。

图 10　敏感性试验整层水汽输送及区域水汽收支

Fig. 10　Vertically integrated moisture transport and regional moisture budget in the sensitivity experiments

考虑到敏感性试验可能影响目标区以外的降水预报，本研究进一步计算了 3 组试验在中国区 24 h 累积降水的公平威胁评分（ETS，equitable threat score）和 Bias 评分（图 11）。在 0.1 和 10 mm 阈值下，各试验 ETS 与业务预报差异较小。对于 50 和 100 mm 降水，EXP1 和 EXP3 的 ETS 有所提高，Bias 值也更接近 1。EXP2 对中国区域的整体评分影响较小，与其仅调整局地水汽条件有关。

由于 EXP1 采用全局统一的对流动量混合调整，有必要进一步评估其对其他区域降水预报的影响。为此，本研究开展了 2025 年 6 月逐日 12:00 UTC 起报的批量预报试验，并从全球降水误差分布和中国区域降水评分两方面评估该调整的整体影响（图 12）。全球降水绝对误差的变化主要位于热带地区，误差增加区与减小区交错出现，未形成大范围一致的增大或减小。中国区域 ETS 和 Bias 与业务预报总体接近，0.1 和 100 mm 阈值下 ETS 略有提高，Bias 也更接近 1。EXP1 未造成中国区域降水预报技巧的系统性下降，但这一结论还需要在不同季节和天气背景下继续检验。

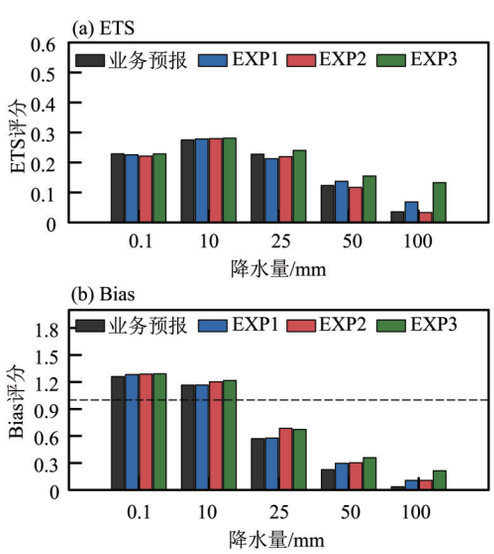


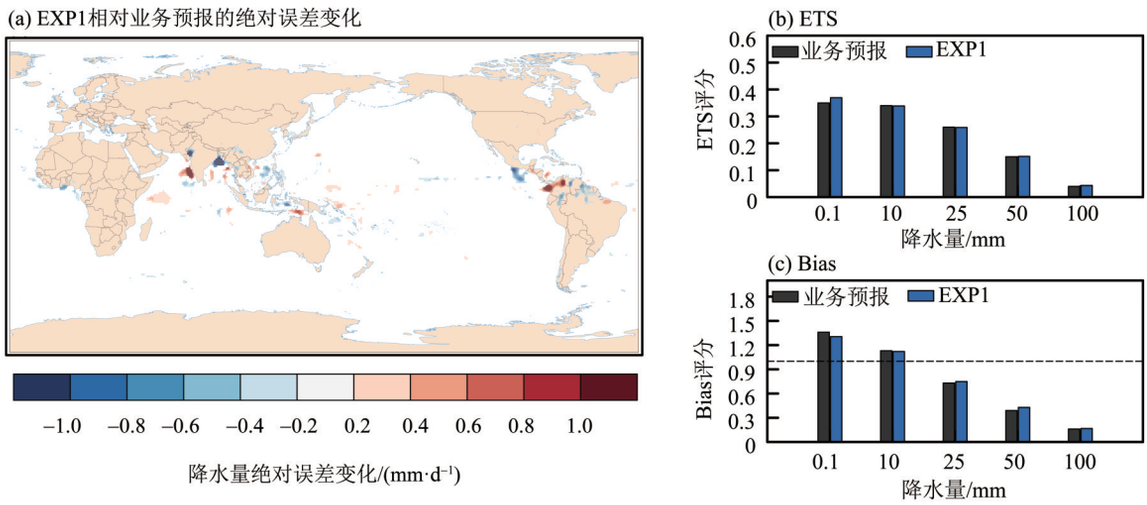
图 11　业务预报与敏感性试验中国区域降水评分

Fig. 11　Precipitation skill scores over China for the operational forecast and sensitivity experiments

综上，3 组敏感性试验从动力、水汽及其耦合作用 3 个方面支持了前文提出的误差链条。减弱对流动量混合主要增强了低层辐合拉伸、涡度垂直输送及低涡对暖湿气流的卷入能力；修正水汽条件能够增加目标区水汽输入和降水；二者叠加后，降水、散度项、垂直输送项、Q_1 及区域净水汽输入呈现更协调的增强，表明低层动力结构和水汽供应的协同改善有利于动力、水汽和热力反馈链条的建立。

3　结　论

本研究针对 2025 年 6 月 30 日四川东北部一次持续性强降水过程，对 CMA-GFS 预报偏差开展动力、热力和水汽综合诊断，并开展敏感性试验。主要结论包括：CMA-GFS 较好地预报了高原槽、西南



审图号为GS(2016)1667，底图边界无修改。

图 12　EXP1月尺度降水预报影响评估

Fig. 12　Evaluation of the impact of EXP1 on monthly precipitation forecast performance

气流及强降水主要落区，但西南涡发展明显偏弱，大暴雨范围和峰值强度均被明显低估；CMA-GFS中低层辐合、涡度垂直输送和非绝热加热均偏弱，同时区域净水汽输入不足，限制了西南涡发展和强降水维持。敏感性试验表明，减弱对流动量混合和改善初始水汽条件均能增强降水，二者同时调整时改善最明显。

本研究仅针对一次典型过程开展诊断，相关结果在不同季节和环流背景下的适用性仍需进一步检验。后续将结合更多西南涡个例和更长时间的批量试验，评估相关调整的稳定性，并进一步分析复杂地形及物理过程对低涡发展和强降水预报的影响。

参考文献：

丁一汇，2005. 高等天气学[M]. 2版. 北京：气象出版社：43−44.

段海霞，陆维松，毕宝贵，2008. 凝结潜热与地表热通量对一次西南低涡暴雨影响分析[J]. 高原气象，27(6)：1315−1323.

何光碧，2012. 西南低涡研究综述[J]. 气象，38(2)：155−163.

康岚，郝丽萍，牛俊丽，2011. 引发暴雨的西南低涡特征分析[J]. 高原气象，30(6)：1435−1443.

李国平，陈佳，2018. 西南涡及其暴雨研究新进展[J]. 暴雨灾害，37(4)：293−302.

李国庆，陈瑞荣，杨广基，等，1976. 青藏高原东南部低涡的初步模拟试验[J]. 中国科学，(3)：286−294，329−331.

李跃清，徐祥德，2016. 西南涡研究和观测试验回顾及进展[J]. 气象科技进展，6(3)：134−140.

潘旸，谷军霞，宇婧婧，等，2018. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报，76(5)：755−766.

苏勇，沈学顺，张红亮，等，2020. GRAPES_GFS中三维参考大气的研究：参考态构造和实际预报试验[J]. 气象学报，78(6)：962−971.

孙超，霍庆，任芝花，等，2018. 地面气象资料统计处理系统设计与实现[J]. 应用气象学报，29(5)：630−640.

王凡，龚建东，王瑞春，等，2024. CMA全球混合四维变分同化系统的方法研究[J]. 气象学报，82(5)：709−720.

王蕾，陈起英，徐国强，等，2024. CMA−GFS对一次强降水过程预报评估及诊断改进[J]. 中山大学学报(自然科学版中英文)，63(2)：46−58.

张红亮，沈学顺，苏勇，2022. 预估−校正的半隐式半拉格朗日时间积分方案及其在CMA−GFS模式中的应用[J]. 气象学报，80(2)：280−288.

张进，孙健，沈学顺，等，2023. CMA−GFS $V_{4.0}$模式关键技术研发和业务化[J]. 应用气象学报，34(5)：513−526.

张小玲，程麟生，2000. “96.1”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断I:涡度和涡度变率诊断[J]. 高原气象，19(3)：285−294.

张欣，漆梁波，刘冲，等，2026. 2024—2025年江淮梅雨期CMA−GFS−V4.2模式降水预报效果评估[J]. 海洋气象

学报，46(2)：1−14.

周春花，肖递祥，陈朝平，2023. 四川盆地西部连续两次特大暴雨过程的西南涡特征分析[J]. 高原山地气象研究，43(1)：26−33.

Arakawa A，2004. The cumulus parameterization problem：Past，present，and future[J]. J Climate，17(13)：2493−2525.

Bauer P，Thorpe A，Brunet G，2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. Nature，525(7567)：47−55.

Chen W Y，Xu G Q，Ma Y X，et al，2026. Simulation of different microphysical schemes and latent heat effects on extreme precipitation of typhoon Haikui (2023)[J]. J Trop Meteor，32(3)：239−254.

Fritsch J M，Carbone R E，2004. Improving quantitative precipitation forecasts in the warm season：A USWRP research and development strategy[J]. Bull Amer Meteor Soc，85(7)：955−966.

Han J，Pan H L，2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP global forecast system[J]. Weather Forecast，26(4)：520−533.

Hersbach H，Bell B，Berrisford P，et al，2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quart J Royal Meteoro Soc，146(730)：1999−2049.

Huffman G J，Stocker E F，Bolvin D T，et al.，2023. GPM IMERG Final Precipitation L3 Half Hourly 0.1 degree × 0.1 degree V07[DB/OL]. Greenbelt，MD：Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC)，(2023−07−13)[2026−07−02]. https://doi.org/10.5067/GPM/IMERG/3B−HH/07.

Morrison H，van Lier−Walqui M，Fridlind A M，et al，2020. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics[J]. J Adv Model Earth Syst，12(8)：e2019MS001689.

Shen X，Su Y，Zhang H，et al，2023. New version of the CMA−GFS dynamical core based on the predictor−corrector time integration scheme[J]. J Meteor Res，37(3)：273−285.

Sun J，Xue M，Wilson J W，et al，2014. Use of NWP for nowcasting convective precipitation：Recent progress and challenges[J]. Bull Am Meteor Soc，95(3)：409−426.

Trenberth K E，1991. Climate diagnostics from global analyses：Conservation of mass in ECMWF analyses[J]. J Climate，4(7)：707−722.

Tulich S N，2015. A strategy for representing the effects of convective momentum transport in multiscale models：Evaluation using a new superparameterized version of the Weather Research and Forecast model (SP−WRF)[J]. J Adv Model Earth Syst，7(2)：938−962.

Wang Q W，Tan Z M，2014. Multi−scale topographic control of southwest *Vortex* formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation：Southwest *Vortex* Formation[J]. J Geophys Res Atmos，119(20)：11543−11561.

Wu Z，Liu H，Chan K T F，et al，2022. Effects of topography and latent heat on the evolution of a mesoscale dual−core southwest Vortex over Sichuan Basin，China[J]. Front Earth Sci，10：827601.

Xu Y，Li G，Zhang X，et al，2025. Formation mechanism of overshooting convection in the southwest *Vortex* circulation under the influence of mesoscale gravity wave[J]. Dyn Atmos Oceans，110：101559.

Yanai M，Esbensen S，Chu J H，1973. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large−scale heat and moisture budgets[J]. J Atmos Sci，30(4)：611−627.

Yang Q，Hannah W M，Leung L R，2022. Convective momentum transport and its impact on the madden−Julian oscillation in E3SM−MMF[J]. J Adv Model Earth Syst，14(11)：e2022MS003206.

Zhou C，Li Y，2024. Dynamic and thermodynamic characteristics of warm−sector rainstorms caused by the southwest China Vortex in Sichuan basin[J]. Theor Appl Climatol，155(8)：7095−7108.

（责任编辑　江　睿）