

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.001

“21.7”河南暴雨的集合敏感性分析

赵志宇¹, 张 进², 雷荔蓀^{1*}, 张 熠¹

(1. 中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210093;

2. 地球系统数值预报中心, 中国气象局, 北京, 100081)

摘 要: 河南郑州“21.7”特大暴雨是中国近年来发生的一场严重气象灾害, 对此暴雨事件的数值预报模式表现出较大的不确定性, 对暴雨落区和降水强度的预测均存在偏差。目前, “21.7”河南暴雨的形成机理已经得到广泛研究, 但针对其集合敏感性分析的研究却十分有限。集合敏感性分析是一种利用集合预报来估计模式预报对初始场敏感性的方法, 可诊断极端天气过程的影响因子、对数值模式集合预报不确定性进行分析等。因此, 针对“21.7”河南暴雨个例, 利用 WRF-ARW 模式, 结合集合初始条件与多物理过程以及物理过程扰动等方法, 构建不同的区域模式集合预报。利用集合敏感性分析方法开展“21.7”河南暴雨的可预报性和影响该暴雨的因子分析。结果表明, “21.7”河南暴雨对初始条件的温度场、湿度场、风场和位势高度场扰动具有敏感性, 增强郑州地区的气旋性环流、改变郑州上空的气温、降低郑州地区的气压、增强台风“烟花”的强度可以使此次暴雨的降水强度增强。本研究能够增进对“21.7”河南暴雨成因的理解, 并改进集合预报。

关键词: 集合敏感性分析, 集合预报, 初始条件, 河南暴雨

中图分类号: P456.7

文献标志码: A

Ensemble sensitivity analysis for the "21.7" Henan extreme rainstorm

Zhao Zhiyu¹, Zhang Jin², Lei Lili^{1*}, Zhang Yi¹

(1. Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences,

Nanjing University, Nanjing, 210093, China; 2. Center for Earth System Modeling and Prediction,

China Meteorological Administration, Beijing, 100081, China)

Abstract: The "21.7" extreme rainstorm in Zhengzhou, Henan Province, was a severe meteorological disaster that has occurred in China in recent years. The numerical models show significant uncertainty in this rainfall event, and there are deviations in the forecast of rainfall areas and intensity. Currently, the formation mechanism of the "21.7" Henan rainstorm has been widely studied, but research on its ensemble sensitivity analysis is very limited. Ensemble sensitivity analysis is a method that utilizes ensemble forecasts to estimate the sensitivity of model forecasts to initial conditions. It diagnoses the influencing factors of extreme weather processes and analyze the uncertainty of ensemble forecasts. Therefore, this study focuses on the individual case of the "21.7" Henan rainstorm, using the WRF-ARW model, combined with ensemble initial conditions, multi-physics, and model perturbations to construct several regional model ensemble forecasts. Ensemble sensitivity analysis is used to assess the predictability of the "21.7" Henan rainstorm and analyze the factors influencing this rainfall. The results show that the "21.7" Henan rainstorm is sensitive to the temperature field, humidity field, wind field, and geopotential height field perturbations of the initial conditions. Enhancing the cyclonic circulation in the Zhengzhou area, changing the temperature over Zhengzhou, reducing the air pressure in the Zhengzhou area, or strengthening the intensity of Typhoon In-Fa can enhance the precipitation intensity of this rainfall. This study improves understanding of the causes of the "21.7" Henan

基金项目: 国家自然科学基金(41922036, 42192553)

收稿日期: 2024-02-24

* 通讯联系人, E-mail: lililei@nju.edu.cn

rainstorm and enhance ensemble forecasts.

Key words: ensemble sensitivity analysis, ensemble forecast, initial condition, Henan extremely heavy rainfall event

2021年7月19日至22日,河南省出现了大范围极端降水天气,简称“21.7”河南暴雨。这次极端暴雨过程持续时间长,降水量极大,具有明显的极端灾害性,主要强降水时段集中在7月19日00时至22日00时。对于这次极端降水,数值模式对暴雨落区和降水强度的预测均存在较大的不确定性^[1]。本研究对这次极端降水进行了敏感性分析。敏感性分析是一种用来表征预报变量对初始条件微小变化的响应,并研究天气事件背后的动力学机制和可预报性的定量方式。传统的敏感性分析通过主观选取状态变量和区域进行扰动,将模式向前积分,并评估预报响应来完成。然而,重新运行模式需要巨大的计算成本,并且由于扰动变量或区域的选择通常是主观的,往往难以获取优化的初始扰动。因此目前广泛使用的敏感性分析方法为客观方法,包括基于伴随模式的敏感性分析(Adjoint Sensitivity Analysis, ASA)^[2]以及基于集合预报的敏感性分析(Ensemble Sensitivity Analysis, ESA)^[3]。伴随敏感性已被应用于极端降水事件的分析。Chu and Tan^[4]使用伴随敏感性诊断了一次梅雨极端降水事件,指出减少低层温度和湿度的分析误差有利于改进梅雨强降雨的短期预报。然而,伴随敏感性需要使用切线性模式及其伴随模式,并进行反向积分^[5]。同时,伴随敏感性依赖于线性假设,即预报误差是线性增长的,这样的假设对于快速发生发展的天气事件通常难以满足。相对于伴随敏感性,集合敏感性则利用集合预报敏感性分析,既不需要伴随模式,也可由模式向前积分获得误差的非线性增长,因此相较于伴随敏感性,集合敏感性具有一定的优势。

集合敏感性分析作为一种线性回归方法,利用集合预报的样本数据来估计预报响应函数与初始条件之间的关系^[3]。集合敏感性分析利用了各个集合预报成员对可能的初始条件扰动的响应,以此来识别对预报结果影响显著的初始变量的类型及其位置。通常,集合敏感性计算每个模式格点上每种状态变量变化所引起的预报响应函数的

变化。而常使用的集合敏感性忽略了状态变量之间的协方差,因此通常被称为单变量集合敏感性。2007年,Ansell and Hakim^[6]比较了单变量集合敏感性和伴随敏感性在冬季流型中的表现,发现集合敏感性分析能够提供初始场改变所得到的模式预报结果改变的准确估计。此后,集合敏感性分析方法被国内外学者广泛用于诊断影响各种极端天气事件的关键因素,并用于改善热带气旋和对流尺度事件的预报。Ren et al^[7]研究了2013年的超强台风“海燕”的生成和发展过程,证明初始时刻的温度、湿度、低层辐合强度、高层辐散强度对台风“海燕”的发展有较大的影响,并证明相比多变量集合敏感性分析,单变量集合敏感性分析对结果存在高估现象。Torn and Hakim^[8]研究了2012年冬季美国得克萨斯州的一次强对流过程,发现该次强对流过程对于初始时刻的风场和湿度较为敏感。Chang et al^[9]使用集合敏感性分析方法分析了太平洋上的两个极端温带气旋,揭示了太平洋上极端温带气旋的生成与来自亚欧大陆上的长波能量输送有关。

“21.7”河南暴雨的极端性十分显著,其降水强度大,持续时间长,暴雨落区集中,且在暴雨期间还有影响我国的台风“烟花”和台风“查帕卡”。已经有很多学者对“21.7”河南暴雨的降水特征、天气系统、发生发展机制、下垫面影响和数值模式预报等方面进行了研究^[10]。然而,目前使用集合敏感性分析方法对“21.7”河南暴雨的成因和可预报性进行分析的研究还十分有限,特别是利用集合敏感性分析方法探究此次极端降水事件与台风“烟花”和台风“查帕卡”的相关性的研究。因此,本研究基于NCEP FNL (National Centers for Environmental Prediction Final)再分析资料^[11]和多组WRF模式(Weather Research and Forecasting Model)^[12]区域集合预报资料,通过集合敏感性分析方法揭示影响暴雨强度的关键因子,分析模式区域与分辨率设置、参数化方案和模式扰动方案对此次极端暴雨事件的可预报性的影响,同

时分析台风“烟花”和“查帕卡”的强度对此次极端降水的影响,以期能够加深对极端降水事件成因的理解,增进对极端降水事件和台风的认识,并改善极端降水事件数值天气预报的不确定性。

1 集合敏感性分析

集合敏感性分析是一种基于线性回归分析的方法,旨在评估单个扰动变量 x 与预报响应函数 J 之间的关系,可以衡量模式预测结果对初始场的敏感性。其核心是使用线性回归系数来衡量预测指标受初始场扰动变量影响的程度。

设集合预报的集合大小为 N ,扰动变量个数为 P , $J_E \in \mathbb{R}^N$ 为所有集合成员的预报响应函数, $x \in \mathbb{R}^P$ 为选取的 P 个扰动变量,矩阵 $X \in \mathbb{R}^{N \times P}$ 表示所有集合成员的扰动变量, $X_p \in \mathbb{R}^N$ 表示所有集合成员的第 p 个扰动变量。集合敏感性分析使用的线性回归模型如下^[3]:

$$J = \beta^T x + \epsilon \quad (1)$$

其中 $\beta = (b_1, b_2, \dots, b_P)^T$ 和 ϵ 分别是斜率(回归系数)和截距。应用最小二乘法,得到多变量集合敏感性:

$$\beta = \frac{\partial J}{\partial x} = X(X^T X)^{-1} J_E \quad (2)$$

在数据同化系统中,假设观测空间与扰动变量空间一致,将集合敏感性 β 点乘分析增量 δx ,即可估计同化某个观测所造成的预报响应函数的变化 δJ_p 。理想情况下,扰动变量 x_p 的分析增量为 σ_p ,将其线性回归到其他扰动变量上,得到分析增量:

$$\delta x_i = \sigma_p \times \frac{\text{cov}(X_i, X_p)}{\text{var}(X_i)}, i = 1, 2, \dots, P \quad (3)$$

由此得到 J 对扰动变量 x_p 的响应 δJ_p :

$$\delta J_p = \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right)^T \delta x \quad (4)$$

在实际的集合预报中,有限的集合成员个数会导致抽样误差,使分析增量之间产生虚假的协方差。通常使用局地化方法减少此类误差^[7]。局地化的分析增量的形式为 $\rho \circ (\delta x)$,其中局地化函数 ρ 与分析增量 δx 维度相同, \circ 表示Hadamard积。最常用的局地化函数是Gaspari-Cohn函数,其形式为关于空间距离的分段五阶多项式^[13]。

经过局地化以后,预报响应的变化量为:

$$\delta J_p = \left(\frac{\partial J}{\partial x} \right)^T \rho \circ (\delta x) \quad (5)$$

仅保留式(2)中协方差矩阵 $X^T X$ 中对角线上的元素,忽略变量之间的协方差,得到单变量集合敏感性:

$$b_p = \frac{\partial J}{\partial x_p} = \frac{\text{cov}(J_E, X_p)}{\text{var}(X_p)}, p = 1, 2, \dots, P \quad (6)$$

$$\delta J_p = \sigma_p \times \frac{\partial J}{\partial x_p} \quad (7)$$

Hacker and Lei^[14]指出,在不使用局地化因子的前提下,单变量集合敏感性和多变量集合敏感性的结果是一致的。因此,本研究使用单变量集合敏感性对此次暴雨过程进行敏感性分析。

2 “21.7”河南暴雨概述

图1所示为NCEP FNL再分析资料所得的河南及其临近区域在2021年7月18日00时至7月21日00时间的降水量。2021年7月18日,河南省北部开始出现强降水。7月19日,强降水的范围扩大,强度明显增强,并开始向南移动,其中心主要位于郑州西部。7月20日,强降水范围进一步扩大,强度继续增强,郑州地区的降水强度达到最高峰。从7月20日00时至7月21日00时,郑州站24 h累积降水量超过400 mm。7月21日,降水中心向北移动,到达河南北部的鹤壁和新乡附近。22日,强降水范围显著减小,降水强度明显减弱,河南省的强降水活动基本停止。这次极端暴雨过程持续时间长,降水量极大,具有明显的极端灾害性,主要强降水时段集中在7月19日00时至22日00时。

在“21.7”河南暴雨爆发的时间段里,影响我国的天气系统还有2021年第六号台风“烟花”和第七号台风“查帕卡”。图2和图1相似,但区域为中国东部以及西北太平洋,包括台风“烟花”和“查帕卡”。前人的研究表明,“21.7”河南暴雨的爆发与台风“烟花”和“查帕卡”有显著的相关性。崔晓鹏和杨玉婷^[15]指出,台风“烟花”和“查帕卡”促进了低空输送通道的出现,有利于暖湿空气向中国北方地区输送。

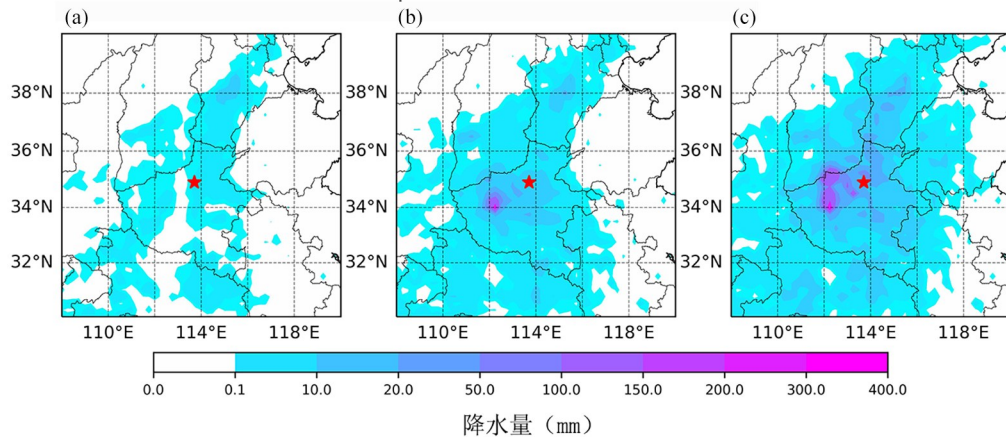
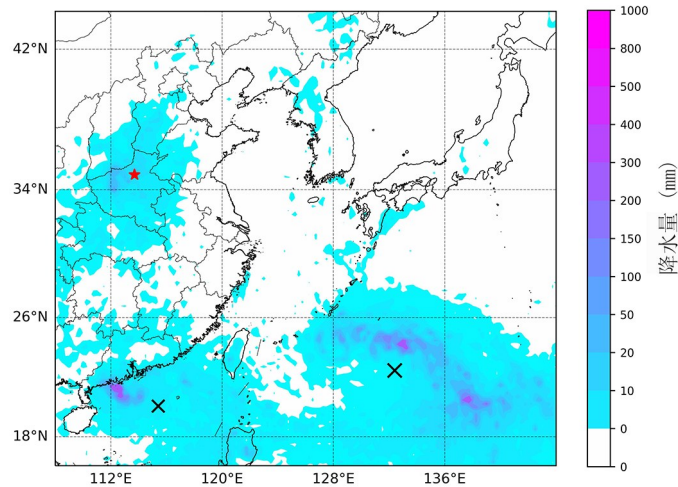


图 1 2021 年 7 月 18 日 00 时 (UTC+8, 下同) 至 7 月 21 日 00 时河南及其临近区域的累积降水量分布 (单位: mm): (a) 代表 7 月 18 日 00 时至 7 月 19 日 00 时 24 h 的累积降水量分布, (b) 代表 7 月 18 日 00 时至 7 月 20 日 00 时 48 h 的累积降水量分布, (c) 代表 7 月 18 日 00 时至 7 月 21 日 00 时 72 h 的累积降水量分布 (红色星号代表郑州所在位置)

Fig. 1 Accumulated precipitation distribution in Henan and its adjacent areas from 00:00 on July 18, 2021 (UTC+8, the same below) to 00:00 on July 21, 2021 (unit: mm): (a) represents the accumulated precipitation distribution for the 24 h from 00:00 on July 18 to 00:00 on July 19, (b) represents the accumulated precipitation distribution for the 48 h from 00:00 on July 18 to 00:00 on July 20, and (c) represents the accumulated precipitation distribution for the 72 h from 00:00 on July 18 to 00:00 on July 21 (The red asterisk represents the location of Zhengzhou)



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

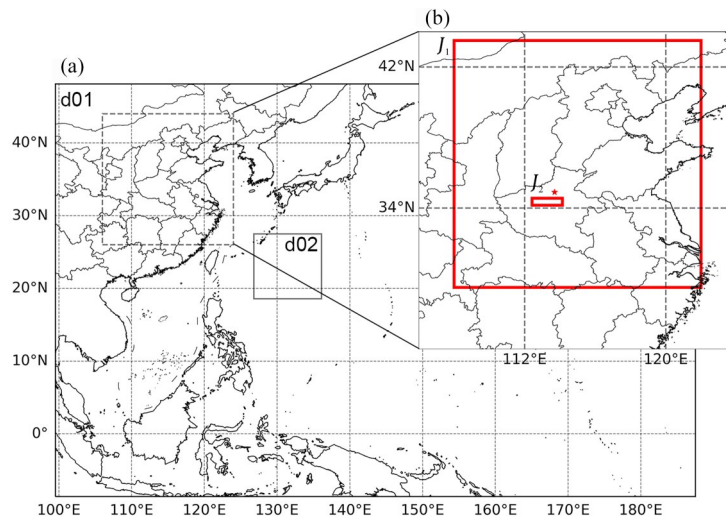
图 2 2021 年 7 月 18 日 00 时至 7 月 21 日 00 时的累积降水量分布 (单位: mm)

Fig. 2 Accumulated precipitation distribution from 00:00 on July 18, 2021, to 00:00 on July 21, 2021 (unit: mm)

3 试验设计

集合敏感性分析使用的数据来自 WRF 模式的集合预报。图 3a 示意了模式区域的设置, 其中 d01 是固定区域, 水平分辨率为 12 km. d01 中双向嵌套一个涡旋跟随区域 d02, 水平分辨率为 2.4 km. d01 区域的网格数量为 712×561 , d02 区域的

网格数量为 401×401 . 在垂直方向上设置了 57 层, 顶部设置为 10 hPa. 在模式物理过程参数化方面, 微物理过程参数化采用 WSM6^[16] 和 Thompson^[17] 方案. 积云参数化采用 MSKF^[18] 等方案. 边界层参数化采用 YSU^[19], GFS EDMF^[20], E- ϵ ^[21] 和 MYNN^[22] 方案. 近地面层参数化采用 Revised MO 方案^[23], 辐射参数化采用 RRTM-



The outer frame of (a) represents the d01 domain, with the inner gray solid line box representing the d02 domain. The red box in (b) represents the accumulated precipitation statistical region selected for forecast response functions J_1 and J_2 , with the red asterisk indicating the location of Zhengzhou.

图3 WRF模式的区域及预报响应函数选取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of regional and forecast response function selection for the WRF model

G^[24]方案,此外采用NOAH陆地表面模型^[25].模式扰动采用SPPT (Stochastically Perturbed Parameterization Tendencies)^[26],SKEB (Stochastic Kinetic Energy Backscatter)^[27]以及边界层物理扰动.边界层物理扰动是指将边界层参数化方案中的边界层高度和表面层参数化方案中的粗糙度高度进行随机扰动,扰动幅度为 $\pm 25\%$.

集合预报的初始条件由循环集合同化产生^[28].该循环集合同化由80个集合成员组成,每6 h使用集合均方根滤波(Ensemble Square-Root Filter)同化NCEP全球资料同化系统(Global Data Assimilation System, GDAS)的观测数据^[29].同化的观测数据包括常规观测、云导风、AMSUA卫星资料(Advanced Microwave Sounding Unit-A)、HIRS卫星资料(High Resolution IR Sounder)、AIRS卫星资料(Atmospheric IR Sounder)和MHS卫星资料(Microwave Humidity Sounder)等.冷启动的集合初始条件和循环集合同化的边界条件均通过在NCEP全球预报系统(Global Forecast System, GFS)上叠加静态扰动产生^[30].基于不同的模式区域设置与模式分辨率,叠加不同的物理过程参数化方案和模式物理扰动,再结合集合初始条件,进行了多组集合预报.

每组集合预报的集合成员个数为80,9或8.预报的时间为2021年7月18日00时至7月25日00时.具体的集合预报试验如表所示.结合不同的集合初始条件和模式物理过程设置,共进行了六组试验,分别为单区域试验(Exp_SD)、嵌套区域试验(Exp_ND)、嵌套区域多物理过程试验(Exp_NDMP)、嵌套区域边界层扰动试验(Exp_NDPBLP)、嵌套区域随机扰动试验(Exp_NDSP)、嵌套区域多物理过程随机扰动试验(Exp_NDMPSP).每组试验均选取80个集合成员进行分析.除了单区域试验(Exp_SD)使用12 km单层网格区域以外,其余试验均使用12 km网格和2.4 km涡旋跟踪网格的嵌套区域.嵌套区域多物理过程试验(Exp_NDMP)的集合成员之间采用不同的积云参数化方案和边界层参数化方案.嵌套区域边界层扰动试验(Exp_NDPBLP)在模式中添加边界层扰动.嵌套区域随机扰动试验(Exp_NDSP)的部分成员添加边界层扰动,部分成员添加随机模式扰动.嵌套区域多物理过程随机扰动试验(Exp_NDMPSP)的集合成员之间采用不同的积云参数化方案和边界层参数化方案,部分成员添加边界层扰动,部分成员添加SPPT和SKEB随机扰动.

表 集合敏感性试验设置

Table Configurations of ensemble sensitivity analysis experiments

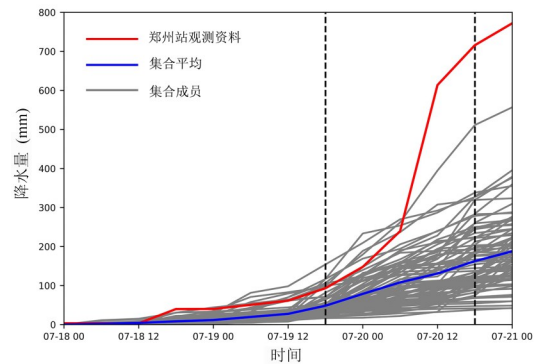
试验名称	区域与分辨率	物理过程		模式扰动
		积云对流参数化	边界层参数化	
Exp_SD	12 km 单层网格	MSKF	YSU	无
Exp_ND		MSKF	GFS EDMF	
Exp_NDMP		MSKF, KFeta	YSU, E- ϵ , MYNN	
			GFS EDMF	
Exp_NDPBLP	12 km 网格+2.4 km 涡旋跟踪网格	MSKF	GFS EDMF	边界层物理扰动
Exp_NDSP		MSKF	GFS EDMF	边界层物理扰动, SPPT, SKEB, SPPT+SKEB
Exp_NDMSP		MSKF, KFeta	YSU, E- ϵ , MYNN, GFS EDMF	边界层物理扰动, SPPT, SKEB, SPPT+SKEB

这里选择 2021 年 7 月 19 日 18 时至 7 月 20 日 18 时这一时段进行集合敏感性分析, 因为该时段内降水强度最强. 设定两个不同的预报响应函数区域 J_1 和 J_2 (图 3b). 其中 J_1 表示郑州附近区域 ($112.42^\circ \sim 114.14^\circ \text{E}$, $34.16^\circ \sim 34.56^\circ \text{N}$) 的 24 h 累积降水量, J_2 表示河南及其周边省份 ($108^\circ \sim 122^\circ \text{E}$, $29.5^\circ \sim 43.5^\circ \text{N}$) 的 24 h 累积降水量. 选择的扰动变量是温度 (T)、水汽混合比 (Q)、纬向风 (U)、经向风 (V) 和位势高度 (PH), 因为这几个模式变量对于降水过程的演变和发展具有重要影响. 因此, 每组集合预报试验分别计算预报响应函数 J_1 和 J_2 对五类扰动变量 (T, Q, U, V, PH) 在四个垂直层 (500, 700, 850, 925 hPa) 的敏感性 δJ .

4 试验结果

集合预报在预测此次暴雨过程的降水强度方面存在低估现象. 以郑州地区 ($112.42^\circ \sim 114.14^\circ \text{E}$, $34.16^\circ \sim 34.56^\circ \text{N}$) 的降水量为例, 2021 年 7 月 18 日 00 时至 7 月 21 日 00 时的观测数据显示, 郑州站的累积降水量为 771.8 mm. 然而, 单区域试验 (Exp_SD) 中 WRF 模式集合预报给出的郑州地区平均降水量仅为 187.5 mm (图 4). 区域集合预报的平均降水量显著低于再分析的降水量. 基于不同设置的集合预报, 将对不同的预报响应函数、模式区域、模式扰动以及物理过程等进行集合敏感性分析.

4.1 预报响应函数的影响 比较单区域试验 (Exp_SD) 中预报响应函数 J_1 (图 5) 和 J_2 (图 6) 的敏感性 δJ . 从图中可以看出无论是选取 J_1 还是



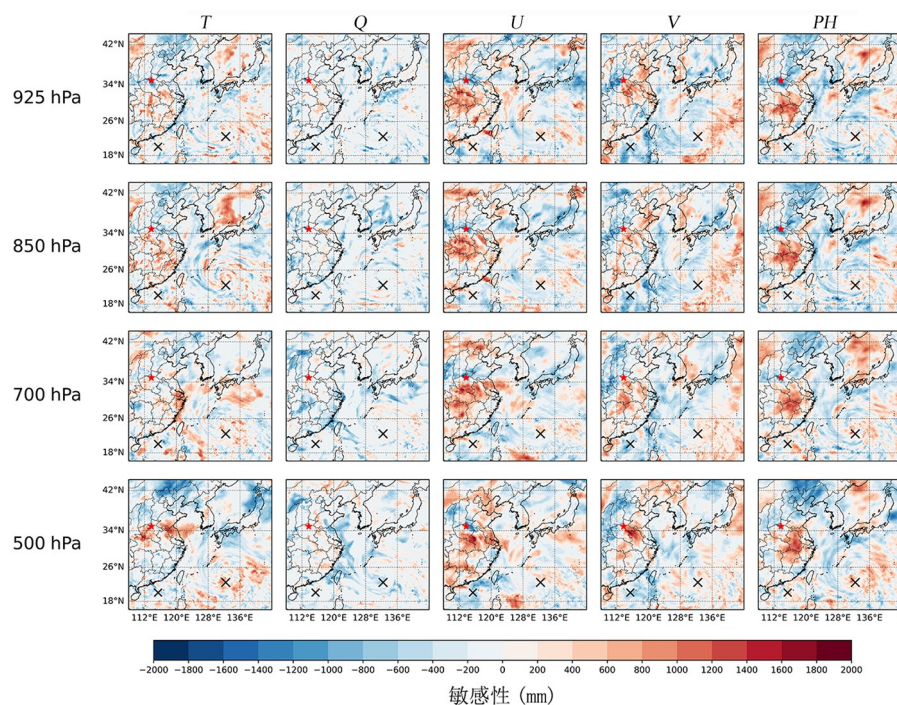
The two vertical black dashed lines represent the accumulated precipitation periods selected for the experiment.

图 4 2021 年 7 月 18 日 00 时至 7 月 21 日 00 时河南郑州区域降水量曲线图 (单位: mm)

Fig. 4 Time series of average precipitation in the Zhengzhou region, Henan, from 00:00 on July 18, 2021, to 00:00 on July 21, 2021 (unit: mm)

J_2 , 敏感性分析的结果相似. 由于 J_2 所选的降水区域大于 J_1 , 因此 δJ_2 普遍大于 δJ_1 . δJ_1 表征了郑州附近区域累积降水量的敏感性, δJ_2 表征了河南省及其周边省份累积降水量的敏感性. δJ_1 和 δJ_2 在空间分布上的相似性说明在此次极端降水过程中, 河南省及其周边省份出现的降水与郑州附近区域的强降水成因相似. 由于选择 J_1 和 J_2 得到的敏感性结果相似, 下文仅针对选取 J_1 得到的敏感性进行分析.

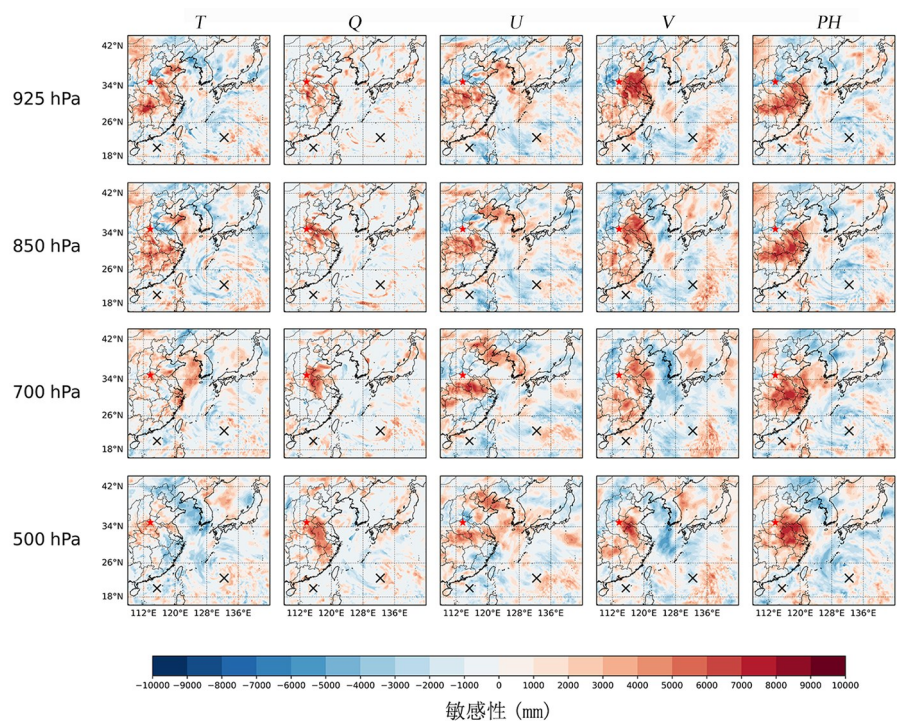
在郑州附近区域, 在 925 hPa 高度层降低温度, 在 925 hPa 以上的高度层增加温度有利于增加降水强度. 在 500 hPa 及以下高度层, 增加郑州附近区域的湿度有利于降水强度的增加. 纬向风



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图5 Exp_SD中预报响应函数 J_1 对模式变量的敏感性

Fig. 5 Sensitivity of forecast response variable J_1 to model variables in Exp_SD



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图6 Exp_SD中预报响应函数 J_2 对模式变量的敏感性

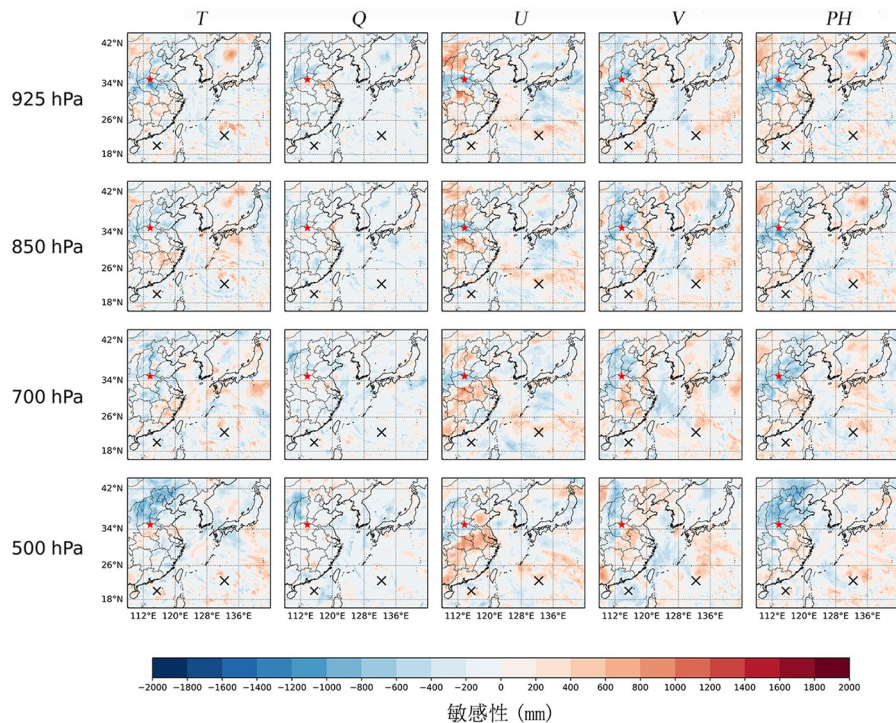
Fig. 6 Sensitivity of forecast response variable J_2 to model variables in Exp_SD

的敏感性在各个高度层表现为南正北负,经向风的敏感性在各个高度层表现为东正西负,说明增加郑州附近区域南侧的西风、北侧的东风、东侧的南风 and 西侧的北风,即增强郑州附近的气旋性环流,有利于降水强度的增加. 位势高度的敏感性分布表明,在 925 hPa 和 850 hPa 高度层降低气压,有利于降水强度的增加,这与加强气旋性环流导致降水强度增加的结论互相印证. 此外,郑州附近区域的降水与台风“烟花”具有明显的相关性. 图 5 至图 10 中黑色叉号的中心点分别代表台风“烟花”和“查帕卡”的中心位置. 在 500 hPa 及以下高度层,在“烟花”的台风眼内部均存在温度敏感性的正值. 这表明增强“烟花”台风眼附近的温度,即增强台风暖心结构,有利于郑州附近降水强度的增加. 在“烟花”的台风眼附近,经向风的敏感性表现为东正西负,说明“烟花”台风眼东部南风越强,西部北风越强,郑州附近区域的降水强度越强(图 5).

4.2 模式区域的影响 比较单区域试验(Exp_SD, 图 5)和嵌套区域试验(Exp_ND, 图 7)

的敏感性 δJ , 可以看出,当模式设置嵌套区域时,降水的敏感性普遍弱于模式设置单区域时的降水敏感性. 在预报响应函数和其他条件不变的前提下,敏感性数值越低意味着预报的不确定性越低,即集合预报的离散度降低,因此嵌套高分辨率的涡旋跟踪区域有助于降低降水强度的预报不确定性. 在嵌套区域试验(Exp_ND)中,模式针对台风“烟花”设置了高分辨率的涡旋跟踪区域 d02,因此嵌套区域试验(Exp_ND)与单区域试验(Exp_SD)相比增加了对台风“烟花”的模拟精细度,说明对台风“烟花”进行更精细的模拟有助于提高数值模式对此次极端降水事件的可预报性.

在郑州附近区域,嵌套区域试验(Exp_ND)中温度、湿度和风速的结论与单区域试验(Exp_SD)类似,即降低低层温度,增加高层温度,增加湿度,增强气旋性环流有利于降水强度增加. 对于位势高度的敏感性,嵌套区域试验(Exp_ND)的负值区在各个高度层覆盖了郑州附近区域,说明降低郑州近地面及高空的气压有利于降水强度增强. 而单区域试验(Exp_SD)的位



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图 7 Exp_ND 中预报响应函数 J_1 对模式变量的敏感性

Fig. 7 Sensitivity of forecast response variable J_1 to model variables in Exp_ND

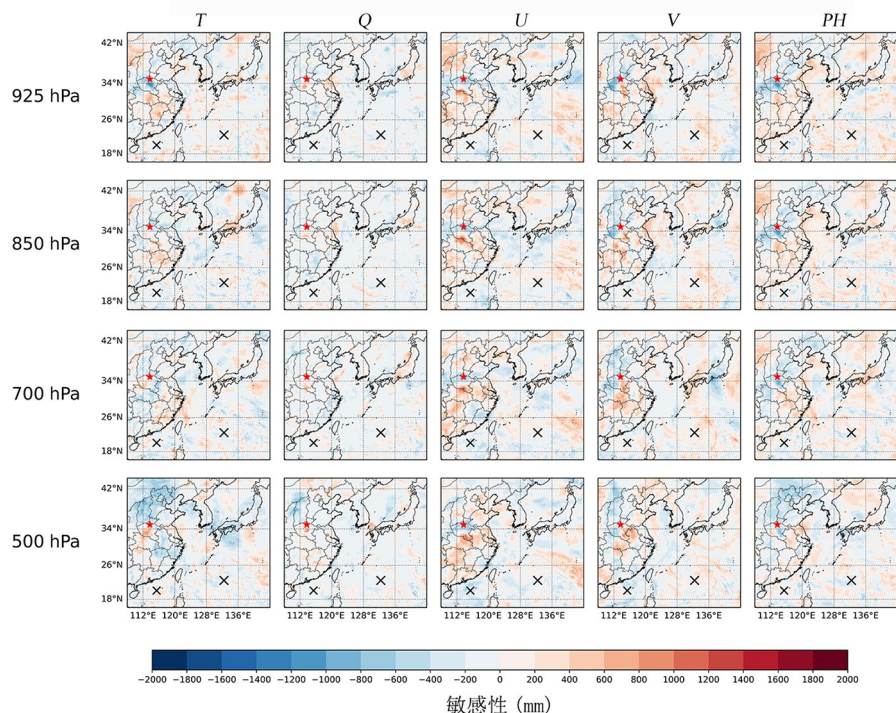
势高度敏感性负值区在 700 hPa 和 500 hPa 高度层上则没有覆盖到整个郑州区域. 此外, 嵌套区域试验(Exp_ND)在台风“烟花”附近的温度敏感性更好地表现出暖心的特点, 风速敏感性分布更好地表现出气旋性环流的特点, 说明增强台风“烟花”的气旋性环流和暖心结构, 即增强台风“烟花”的强度有利于郑州附近降水强度的增加.

4.3 模式扰动的影响 试验中使用了两类模式扰动, 分别是边界层物理扰动和随机扰动. 边界层物理扰动将边界层参数化方案中的边界层高度和表面层参数化方案中的粗糙度高度进行随机扰动, 扰动幅度为 $\pm 25\%$. 随机扰动使用 SPPT 和 SKEB 方案, 其中部分集合成员使用 SPPT 扰动温度、风速和湿度, 部分集合成员使用 SKEB 扰动温度和旋转风分量, 部分集合成员同时使用 SPPT 和 SKEB. 从数值上看, 嵌套区域边界层扰动试验(Exp_NDPBLP, 图 8)的敏感性数值要普遍小于嵌套区域随机扰动试验(Exp_NDSP, 图 9)的敏感性数值, 说明在预报此次极端降水时, 加入边界层物理模式扰动比加入随机模式扰动具有更

小的预报不确定性, 也即是集合预报离散度降低.

对比嵌套区域边界层扰动试验(Exp_NDPBLP, 图 8)和嵌套区域试验(Exp_ND, 图 7), 嵌套区域边界层扰动试验(Exp_NDPBLP)比嵌套区域试验(Exp_ND)的敏感性数值总体上更小, 说明加入边界层物理扰动后, 预报不确定性进一步降低. 此外, 加入边界层物理扰动后, 敏感性数值的空间分布规律基本没有变化, 影响此次暴雨过程降水强度的主要因素与 4.2 节中的结论相同.

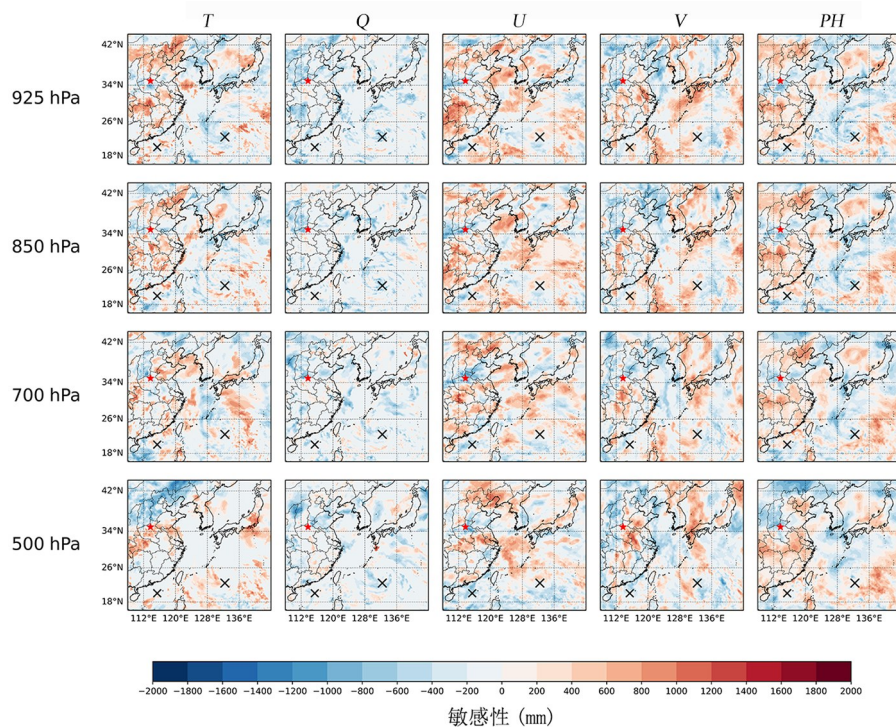
4.4 多物理过程的影响 嵌套区域试验(Exp_ND, 图 7)的积云对流参数化使用 MSKF 方案, 边界层参数化使用 GFS EDMF 方案. 而嵌套区域多物理过程实验(Exp_NDMP, 图 10)在不同的集合成员中使用不同的积云对流参数化方案和边界层参数化方案来获得多物理过程的集合预报. 与嵌套区域试验(Exp_ND)相比, 嵌套区域多物理过程试验(Exp_NDMP)的敏感性数值普遍较高, 温度敏感性和位势高度敏感性出现大量正值区, 结果已不可信. 这可能是多种参数化方案



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图 8 Exp_NDPBLP 中预报响应函数 J_1 对模式变量的敏感性

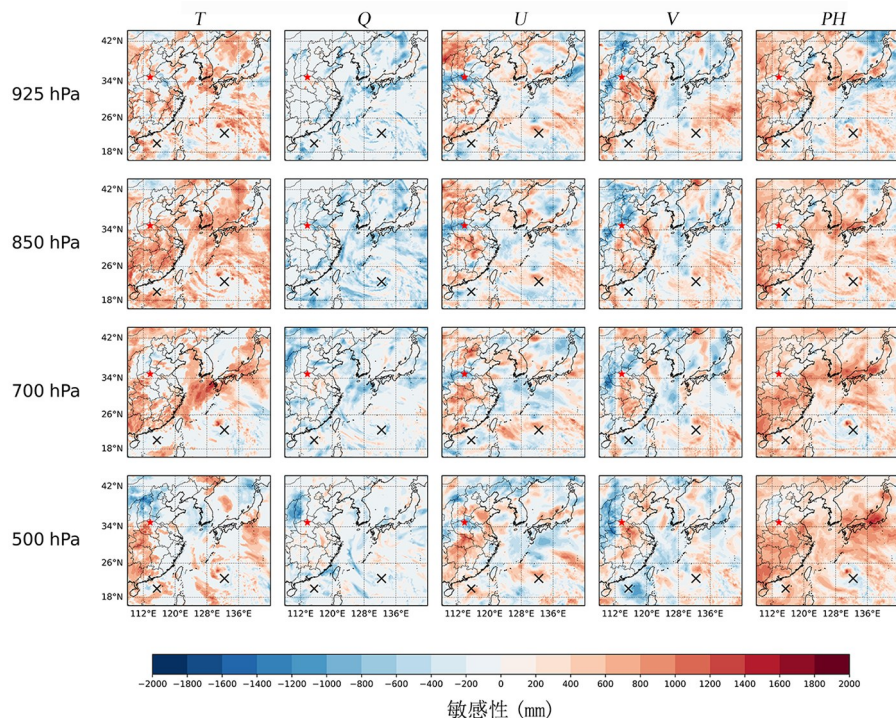
Fig. 8 Sensitivity of forecast response variable J_1 to model variables in Exp_NDPBLP



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图 9 Exp_NDSP 中预报响应函数 J_1 对模式变量的敏感性

Fig. 9 Sensitivity of forecast response variable J_1 to model variables in Exp_NDSP



The black crosses denote the locations of typhoon In-fa and typhoon Cempaka, respectively. The red asterisk represents the location of Zhengzhou.

图 10 Exp_NDMP 中预报响应函数 J_1 对模式变量的敏感性

Fig. 10 Sensitivity of forecast response variable J_1 to model variables in Exp_NDMP

在此次极端降水事件中的表现差异过大导致的,初始场发生变化时,由于集合成员之间采用了不同的参数化方案,集合成员在向前积分时会急剧放大初始场的扰动,使敏感性分析的数值偏高。此外,对比嵌套区域随机扰动试验(Exp_NDSP)和嵌套区域多物理过程随机扰动试验(Exp_NDMPS),嵌套区域多物理过程随机扰动试验(Exp_NDMPS)的敏感性数值出现了比嵌套区域多物理过程试验(Exp_NDMP)范围更广、数值更大的正值区,这是多物理过程和模式随机扰动的共同作用导致的。由于嵌套区域多物理过程随机扰动试验(Exp_NDMPS)的结果中出现了大量的虚假相关性,因此对应的结果不作展示。

5 结论

“21.7”河南暴雨是历史上罕见的特大暴雨,相比于普通的降水过程,数值模式对这次暴雨的降水强度和落区的预测均存在较大的不确定性。此次暴雨的主要强降水时段集中在7月19日00时至22日00时,其中降水量最多的时段为7月19日到7月20日。在此次暴雨发生的同时,台风“烟花”和“查帕卡”对我国的天气系统产生了重要影响。本文利用WRF模式,结合集合初始条件、多物理参数化方案和物理扰动方案,以及不同的模式区域设置,进行了多组集合预报。通过使用不同的预报响应函数,选取温度、水汽混合比、纬向风、经向风和位势高度作为扰动变量,对此次暴雨过程进行了集合敏感性分析。

本研究通过多组集合预报试验的比较,深入分析此次极端降水的集合敏感性。选择不同区域的预报响应函数 J_1 和 J_2 时,集合敏感性的空间分布相似。由于 J_1 选取的降水区域为郑州附近, J_2 选取的降水区域为河南及周边省份,集合敏感性分析结果的相似性说明河南及周边省份的降水与郑州附近的降水成因相似。进一步分析表明,在郑州附近区域,降低低层(925 hPa)温度、升高高层(925 hPa以上)温度、增加湿度、增强气旋性环流和降低气压有利于降水强度的增加。台风“烟花”与此次极端降水有显著相关性,增强台风“烟花”的气旋性环流和暖心结构,即增强台风“烟花”的强度有利于降水强度的增加。多组不同集合初

始条件和模式物理过程设置的对比试验表明,嵌套区域相比单区域,可以提高对台风“烟花”的模拟精度,降低降水预报的不确定性。边界层物理扰动相较于随机扰动具有更小的预报不确定性,对降水的敏感性更低,有助于改善集合预报。然而,多物理过程试验可能受参数化方案差异的影响,产生了大量的虚假相关,结果不具有可信性。

本文利用集合敏感性分析对“21.7”河南暴雨这一极端个例进行了分析,相对于已有的研究多着重于集合敏感性的因子分析,这里还对不同的模式区域、多物理参数化方案以及物理扰动等集合预报设置对集合敏感性分析的影响进行了研究。集合敏感性分析可充分利用集合预报,诊断极端降水事件的主要影响因子以及影响集合预报的物理过程和模式设置,但是,集合敏感性估计所得的影响降水过程的动力因子以及天气尺度的配置对集合预报不确定性的影响还需更深入的分析。相对于本文使用的单变量集合敏感性,多变量集合敏感性可考虑不同模式变量间对预报相应函数的协同影响,进而有可能对集合敏感性诊断的动力过程提供更系统一致的分析。并且,定量地估计模式嵌套设置、多物理过程和物理扰动等对集合敏感性的影响仍待研究。

参考文献

- [1] 栗晗,王新敏,朱枫.“21.7”河南极端暴雨多模式预报性能综合评估.大气科学学报,2022,45(4):573—590. (Li H, Wang X M, Zhu F. Comprehensive evaluations of multi-model forecast performance of “21.7” Henan extreme rainstorm. Transactions of Atmospheric Sciences, 2022, 45(4): 573—590.)
- [2] Errico R M, Raeder K D, Fillion L. Examination of the sensitivity of forecast precipitation rates to possible perturbations of initial conditions. Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography, 2003, 55(1): 88—105.
- [3] Hakim G J, Torn R D. Ensemble synoptic analysis. Meteorological Monographs, 2008, 33(55): 147—162.
- [4] Chu K K, Tan Z M. Mesoscale moist adjoint sensitivity study of a Mei-Yu heavy rainfall event. Advances in Atmospheric Sciences, 2010, 27(6): 1415—1424.

- [5] Errico R M. What is an adjoint model? Bulletin of the American Meteorological Society, 1997, 78(11): 2577—2592.
- [6] Ancell B, Hakim G J. Comparing adjoint - and ensemble - sensitivity analysis with applications to observation targeting. Monthly Weather Review, 2007, 135(12): 4117—4134.
- [7] Ren S J, Lei L L, Tan Z M, et al. Multivariate ensemble sensitivity analysis for super typhoon Haiyan (2013). Monthly Weather Review, 2019, 147(9): 3467—3480.
- [8] Torn R D, Hakim G J. Ensemble-based sensitivity analysis. Monthly Weather Review, 2008, 136(2): 663—677.
- [9] Chang E K M, Zheng M H, Raeder K. Medium - range ensemble sensitivity analysis of two extreme Pacific extratropical cyclones. Monthly Weather Review, 2013, 141(1): 211—231.
- [10] 姚秀萍, 李若莹. 河南“21.7”极端暴雨的研究进展. 气象学报, 2023, 81(6): 853—865. (Yao X P, Li R Y. Progress in research of the July 2021 extreme precipitation event in Henan province, China. Acta Meteorologica Sinica, 2023, 81(6): 853—865.)
- [11] National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, et al. NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, April 1997 through June 2007. Research Data Archive at the National Center, 1997. DOI: <https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/>.
- [12] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF model version 4.1. Technical Report. No. NCAR/TN - 556+STR, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2019: 145.
- [13] Gaspari G, Cohn S E. Construction of correlation functions in two and three dimensions. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, 125(554): 723—757.
- [14] Hacker J P, Lei L L. Multivariate ensemble sensitivity with localization. Monthly Weather Review, 2015, 143(6): 2013—2027.
- [15] 崔晓鹏, 杨玉婷. “21.7”河南暴雨水汽源地追踪和定量贡献分析. 大气科学, 2022, 46(6): 1543—1556. (Cui X P, Yang Y T. Tracking and quantitative contribution analyses of moisture sources of rainstorm in Henan Province in July 2021. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2022, 46(6): 1543—1556.)
- [16] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). Journal of the Korean Meteorological Society, 2006, 42(2): 129—151.
- [17] Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Monthly Weather Review, 2004, 132(2): 519—542.
- [18] Zheng Y, Alapaty K, Herwehe J A, et al. Improving high-resolution weather forecasts using the Weather Research and Forecasting (WRF) Model with an updated Kain - Fritsch scheme. Monthly Weather Review, 2016, 144(3): 833—860.
- [19] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318—2341.
- [20] Han J, Witek M L, Teixeira J, et al. Implementation in the NCEP GFS of a hybrid eddy-diffusivity mass-flux (EDMF) boundary layer parameterization with dissipative heating and modified stable boundary layer mixing. Weather and Forecasting, 2016, 31(1): 341—352.
- [21] Detering H W, Etling D. Application of the $E - \epsilon$ turbulence model to the atmospheric boundary layer. Boundary - Layer Meteorology, 1985, 33(2): 113—133.
- [22] Olson J B, Smirnova T, Kenyon J S, et al. A description of the MYNN surface - layer scheme. NOAA Technical Memorandum OAR GSL - 67, Boulder: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
- [23] Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al. A revised scheme for the WRF surface layer formulation. Monthly Weather Review, 2012, 140(3): 898—918.
- [24] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated - K model for the longwave. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D14): 16663—16682.

- [25] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 8851.
- [26] Palmer T N, Buizza R, Doblas - Reyes F, et al. Stochastic parametrization and model uncertainty. Shinfield Park: European Centre for Medium - Range Weather Forecasts, 2009.
- [27] Shutts G. A kinetic energy backscatter algorithm for use in ensemble prediction systems. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2005, 131(612): 3079—3102.
- [28] Lei L L, Ge Y J X, Tan Z M, et al. Evaluation of a regional ensemble data assimilation system for typhoon prediction. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, 39(11): 1816—1832.
- [29] Whitaker J S, Hamill T M, Wei X, et al. Ensemble data assimilation with the NCEP global forecast system. *Monthly Weather Review*, 2008, 136(2): 463—482.
- [30] Torn R D, Hakim G J, Snyder C. Boundary conditions for limited - area ensemble Kalman filters. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(9): 2490—2502.
- (责任编辑 杨贞)