

2025.4.9

投稿信

尊敬的《大气科学》编辑部老师：

您好！感谢您在百忙之中接收和审阅我们的稿件，我们文章的题目为“山西地区一次强降水过程的目标观测研究”，以下是对该文研究工作的简要介绍：

一、研究背景及意义

全球变暖的加剧导致我国西北地区呈现出显著的暖湿化特征，其中，山西地区强对流的强度与频数均有所增长，由之产生的夏季暴雨也呈现出变多、变强的趋势，造成的危害也在变大。山西地区的特殊自然地理环境和地质构造，使得夏季强降水及其造成的滑坡等地质灾害多发，严重威胁着电网的安全稳定运行。解决山西复杂山地的夏季强降水预测问题，对于保障电网供电安全意义重大。

考虑到目前强降水预报主要是基于数值模式，而许多研究表明，初始误差是数值预报不确定性的重要来源。因此，减小初始误差是提高强降水预报的重要手段。研究表明，目标观测是减小初始误差的重要途径之一。当前，目标观测已被应用于台风、洋流、ENSO 等多项预报预测研究中，并已被证明其有效性。但较少被用于强降水预报研究中。

目标观测的关键在于敏感区的识别。条件非线性最优扰动（CNOP）方法已被广泛地用于目标观测敏感区的识别之中，且其非线性特征使得其在用于具有强非线性事件的敏感区时更为有效。然而，在以往的研究中，关注的预报对象通常具有较大的尺度，且受限于计算资源和伴随模式的应用，CNOP 方法在应用时往往采用较低的分辨率。本研究将首先建立可进行高分辨率求解的 CNOP 计算方法，然后直接以降水为目标函数，构建针对降水预报的目标观测系统，在此基础上，对一次山西强降水事件的目标观测敏感区进行识别，分析敏感区的物理意义，考察在敏感区内减小初始误差对强降水预报的改善程度。该研究可以为提高山西强降水预报技巧提供参考。

二、主要创新点

构建了针对降水预报的、可进行高分辨率应用求解的目标观测系统，识别了一次山西强降水事件的目标观测敏感区，考察了敏感区的物理意义及在敏感区内减小初始误差对强降水预报的改善程度，并分析了改善的原因。

原辉、胡帆、鲁子翰、傅慎明、周非凡

2025 年 4 月 9 日

山西地区一次强降水过程的目标观测研究

原辉¹ 胡帆² 鲁子翰³ 傅慎明⁴ 周非凡^{3, 5}

1 国网山西省电力公司电力科学研究院, 太原 030021

2 国网山西省电力公司, 太原 030021

3 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

4 地球系统数值模拟与应用重点实验室, 北京 100029

5 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 针对山西南部 2023 年 5 月 20~21 日的一次强降水过程, 使用高分辨率天气研究预报模式 (WRF) 进行了模拟分析, 在此基础上, 利用条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法识别了该次强降水过程的目标观测敏感区, 并对敏感区的物理意义进行了分析, 最后, 通过观测系统模拟试验 (OSSE) 考察了 CNOP 方法识别的敏感区的有效性并进行了原因分析。结果表明: WRF 模式能够模拟出本次过程集中于山西省南部的强降水, 但局地暴雨位置有所偏差, 强度略低, 大雨和中雨位置整体偏西, 小雨范围偏大; 利用 CNOP 方法识别的敏感区主要位于东北冷涡中心附近, 反映了东北冷涡对本次强降水事件的重要影响; 进一步, 根据 CNOP 型初始误差的能量局部极大值的分布, 依次选取了 3 个次敏感的区域做对比分析, 3 个对比区分别反映了青藏高原低压、山西地区切变线以及西太副高的影响, 结果发现同化敏感区内的模拟观测资料可以最大程度提高此次强降水过程大雨和暴雨预报的 TS 评分, 同化山西及其周边地区的观测资料次之, 同化青藏高原低压地区和西太副高北部地区的观测资料也能改善大雨和暴雨预报的 TS 评分, 但程度要小一些。进一步分析发现同化敏感区内的模拟观测资料对山西南部地区风场预报有较大影响, 在山西南部复杂地形的配合下, 通过促进多地区风场的辐合, 扩大大雨的区域, 进而改善本次事件强降水的预报技巧。

收稿日期 2025-04-09 网络预出版日期

作者简介 原辉, 女, 1988 年出生, 高级工程师, 主要从事电力气象及电网防灾减灾技术研究。E-mail: yuanhuidky@163.com

通讯作者 周非凡, 女, 1982 年出生, 研究员, 主要从事台风、暴雨的目标观测和可预报性研究。E-mail: zhouff04@163.com

资助项目 国家电网公司总部科技项目 (5200-202415102A-1-1-ZN)

Funded by State Grid Corporation of China Headquarters Technology Project (Grants 5200-202415102A-1-1-ZN)

61 **关键词** 山西强降水 目标观测 敏感区 条件非线性最优扰动方法

62 文章编号 2025017A

63 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2200.20000

64
65 **Study on target observation of a heavy rainfall in Shanxi Province**

66
67 Hui Yuan¹, Fan Hu², Zihan Lu³, Shenming Fu⁴, Feifan Zhou^{3,5}

68 1 State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030021

69 2 State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030021

70 3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

71 4 Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Beijing
72 100029

73 5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049

74
75 **Abstract** A heavy rainfall process in southern Shanxi from May 20 to 21, 2023 was simulated
76 and analyzed using the high-resolution Weather Research Forecasting model (WRF). On this
77 basis, the target observation sensitive area of the heavy rainfall process was identified using
78 the conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP) method, and the physical significance
79 of the sensitive area was analyzed. Finally, the effectiveness of the sensitive area identified by
80 the CNOP method was investigated through the observation system simulation test (OSSE)
81 and the reasons are analyzed. The results show that the WRF model can simulate the heavy
82 rainfall in the south of Shanxi Province, but the local rainstorm has a deviation in location, a
83 slightly lower intensity, and west-shift positions of moderate and heavy rains, while the range
84 of light rain is relatively large; The sensitive area identified by CNOP method is mainly located
85 near the center of the northeast cold vortex, reflecting the important influence of the
86 northeast cold vortex on the rainstorm event. Further, according to the distribution of the
87 local maximum energy of the CNOP type initial error, three sub sensitive regions are selected
88 for comparative analysis. The three comparison regions reflect the influence of the Qinghai
89 Tibet Plateau low pressure, the shear line in Shanxi region and the Western Pacific subtropical
90 high, respectively. The results show that assimilating the simulated observation data in the
91 sensitive region can maximize the TS score of heavy rain and rainstorm forecast, followed by
92 assimilating the observation data in Shanxi and its surrounding areas. Assimilating the
93 observation data in the low pressure area of the Qinghai Tibet Plateau and the northern area
94 of the Western Pacific subtropical high can also improve the TS score of heavy rain and
95 rainstorm forecast, but to a lesser extent. Further analysis revealed that the simulated
96 observation data within the sensitive area has a significant impact on the wind forecast in
97 southern Shanxi. With the help of the complex terrain in southern Shanxi, it would promote
98 the convergence of wind in multiple regions, expanding the area of heavy rain, and thus
99 improves the forecast technique for this heavy rainfall event.

Key words Shanxi heavy rainfall, targeted observation, sensitive area, conditional nonlinear optimal perturbation (CNOP)

1 引言

山西省是典型的被黄土广泛覆盖的山地高原，地势东北高西南低，高原内部起伏不平，河谷纵横，地貌类型复杂多样，有山地、丘陵、台地、平原，总体而言，山多川少。在这样的复杂地形下，山西省强降水预报一直是个难点。

当前，数值预报是强降水预报的一个重要手段。它是现代天气预报的支撑工具，是目前制作中、短期天气预报最有效的科学方法。它把大量的物理、化学定律引入到对天气系统各种演化过程的描述上来，根据大气内部的物理规律（质量守恒、能量守恒、动量守恒和水汽守恒等），建立了一套偏微分方程组来描述大气的运动和变化，在一定的初始状态和边界条件下，对这组方程组进行数组积分，求其数值解，从而对未来的天气或气候状况做出预报。由此可见，数值预报的预报误差主要来源于三个方面：初始误差、边界误差和模式误差。

早在上世纪八九十年代，许多研究就指出对于短期数值天气预报来说，初始条件的正确性至关重要，它们直接关系到预报的成败（陈明行等 1989，程麟生等 1990），近些年，国际上关于强降水的可预报性研究再次表明，初值的不确定性依然是强降水预报具有较大预报误差的一个主要来源，减小初始误差一直是提高强降水预报的重要途径之一（Langland et al.2002; Errico et al. 2003; Zhang et al.2002,2003,2006; Mahfouf et al. 2007; Hawblitzel et al. 2007; Wandishin et al. 2010）。要减小初始误差，重要的一个手段就是增加观测。然而大范围、长时间地增加观测需要大量的人力、财力、物力。同时，研究表明观测的有效利用也取决于具体的天气过程。因此，“目标观测”应运而生。

目标观测指的是为了提高未来某一特定时刻（验证时刻）、特定区域（验证区域）可能发生的天气过程的预报质量，在此之前的某一时刻（目标观测时刻）、某一区域（目标观测区域或敏感区）实施加强观测（周非凡等 2022）。随着数值模式不断地成熟和完善，目标观测由早期根据经验性地判断敏感区，发展为由数值模式客观地确定敏感区。当前，客观的敏感区的识别方法主要有线性奇异向量方法、条件非线性最优扰动（CNOP）方法、集合转换卡曼滤波方法等。

其中，CNOP 方法自提出以来已被广泛地应用于台风、黑潮、西南涡、阻塞、ENSO、印度洋偶极子、海冰、南海热结构、黄海温盐结构、大气污染等的目标

观测研究中 (Mu et al., MWR 2009; Zhou and Mu, AAS 2011, 2012a,b; Feng et al., CD 2017; Duan et al., CD 2018; Liang et al., JGR 2019; Liu et al., SR, 2021; Liu et al., JGR 2021; Ma et al., JGR 2022; Yang et al., ACP 2022; Dai et al., AAS 2023; Da et al., DSR 2023), 用以识别对预报有最大影响的初值敏感区, 也即目标观测区域。一系列的观测系统模拟试验 (OSSE) 证明, 在 CNOP 识别的敏感区内同化模拟观测资料对预报技巧的提高程度大于在 SV 方法识别的敏感区内同化模拟观测资料对预报技巧的提高程度 (Qin et al., 2013; Chen et al., 2013)。也即证实了 CNOP 方法识别的敏感区的有效性。于是, CNOP 方法自 2020 年起已被用于我国近海热带气旋目标观测的外场试验。中国科学院大气物理研究所联合复旦大学、国家卫星中心、香港天文台等多家单位, 启用风云四号卫星择机对我国近海热带气旋实施目标观测外场试验。目前, 已利用卫星上的干涉式大气垂直探测仪 (GIIRS), 对 2020–2021 年 5 个热带气旋个例, 即灿鸿 (2020)、美莎克 (2020)、海高斯 (2020)、灿都 (2021)、康森 (2021), 进行了目标观测外场试验 (Feng et al., 2022)。试验结果表明, 在 CNOP 方法识别的敏感区内同化 GIIRS 观测反演到的温度场可以明显改善台风路径预报技巧, 在 3–3.5 天时, 路径预报误差平均减小约 100 公里。与此同时, 香港天文台在 CNOP 识别的敏感区内布放机载下投探空仪, 这些探空仪资料被同化后, 也显著提高了台风路径、最大风速、周边降水等的预报技巧 (Chan et al., 2022)。

然而, 迄今为止, CNOP 方法尚未被用于山西地区强降水过程的目标观测研究。山西地形复杂, 强降水预报难度大, 鉴于 CNOP 方法在其他天气、气候、海洋、环境等事件的目标观测敏感区识别中的成功应用, 本研究拟将 CNOP 方法用于针对山西地区强降水过程的目标观测敏感区识别, 并通过观测系统模拟试验 (OSSE) 验证敏感区的有效性。以期利用有限的资源, 逐渐提高山西强降水的预报技巧, 为山西电网安全做出保障。

2、研究方法介绍

2.1 CNOP 方法介绍

条件非线性最优扰动 (CNOP) 方法, 是 Mu et al. (2003) 提出的, 用于考

查对未来状态有较大影响、且在一定约束范围内的扰动。它可用于产生集合预报的初始扰动（段晚锁等 2019）、也可用于寻找某一天气或气候事件发生的最优前期征兆（徐辉，2006）、还可用于产生可预报性研究中对预报结果有较大影响的初始误差（Mu et al., 2007），同时，它还可用于寻找目标观测中的敏感性区域，用以指导观测实验的开展（周非凡等 2014）。

具体地，CNOP 的定义如下：

初始扰动 δX_0^* 称为条件非线性最优扰动(CNOP)，当且仅当

$$J(\delta X_0^*) = \max_{\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta} J(\delta X_0) \quad (1)$$

其中，

$$J(\delta X_0) = [M_t(X_0 + \delta X_0) - M_t(X_0)]^T C_2 [M_t(X_0 + \delta X_0) - M_t(X_0)] \quad (2)$$

X_0 为状态向量 X 的初始状态向量， M_t 是从 0 时刻到 t 时刻的非线性传播算子，不等式 $\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta$ 为约束条件。 β 为正的常数。上标“T”表示转置。正定矩阵 C_1 和 C_2 分别表示对初始扰动 δX_0 及其非线性发展的度量，二者可以相同，也可以不同，主要根据所考虑的物理问题而定。从 CNOP 的定义可知，在所有满足 $\delta X_0^T C_1 \delta X_0 \leq \beta$ 的扰动中 CNOP 的非线性发展最大。

2.2 CNOP 方法用于降水目标观测敏感区识别原理

将 CNOP 方法用于降水过程目标观测敏感区识别时，CNOP 被当做可以导致较大降水预报误差的初始误差，通过消除 CNOP 类型的初始误差，进而提高降水的预报技巧。周非凡等（2014）指出对 CNOP 型初始误差消除的程度越大，对预报效果的改善程度越明显，根据这一思路，敏感区可定义在尽可能最大程度地消除 CNOP 类型初始误差的地方。显然，在 CNOP 型初始误差的大值区，可消除的误差程度最大。本研究采用与周非凡等（2014）类似的办法，也即首先计算 CNOP 型误差在空间每一格点的能量，然后做垂直积分，从而得到水平面上每一格点所在垂直气层的总能量，将水平面上总能量分布的大值区作为敏感区。其

中，垂直积分能量的计算公式如下：

$$J_1 = \int_0^1 \left[u_0'^2 + v_0'^2 + \frac{g}{N\theta} \theta_0'^2 + R_a T_r \left(\frac{p_{s0}'}{p_r} \right)^2 + \frac{L^2}{c_p T_r} q_0'^2 \right] d\sigma$$

(3)

其中， u_0' 、 v_0' 、 T_0' 、 p_{s0}' 、 q_0' 为扰动场的纬向风分量、经向风分量、位温、地表气压和水汽混合比。 σ 为垂直方向坐标， $c_p=1005.71\text{kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 为定压比热， $R_a=287.04\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ 为干空气气体常数，另外，参数 $p_r=1000\text{hPa}$ ， $T_r=270\text{K}$ ， $\bar{\theta}=300\text{K}$ ， $L=2.5104\times 10^6\text{J/kg}$ 为凝结潜热。重力加速度 $g=9.8(\text{m/s}^2)$ ， $\bar{N}=0.01(\text{s}^{-2})$ 为 Brunt - Vaisala 频率。

本研究的预报对象是山西的强降水，因此，公式 (2) 的目标函数取为山西地区的累积降水量的预报偏差，也即

$$J(\delta X_0) = [PR_t(X_0 + \delta X_0) - PR_t(X_0)]^2 \quad (4)$$

其中， R_t 表示从预报初始时刻到 t 时刻的累积降水量。 P 表示投影算子，它规定了验证区域的范围，这里选为山西地区（见图 3d 蓝色边框所示）。

3、试验设计

3.1 模式介绍

本研究采用的模式是中尺度天气预报模式 WRF V4.5.2。模式分辨率为 $9\text{ km} \times 9\text{ km}$ ，水平网格数为 316×418 ，垂直层数为 51 层，模式层顶 50 hPa ，时间步长设为 30 秒。采用的参数化方案主要为：Lin et al.微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、MM5 similarity 近地层方案、Yonsei University 边界层方案、Tiedtke 积云方案。由于在敏感区的有效性验证试验中，需要假设敏感区内的初始场得到了改进，因此本研究采用两种再分析资料驱动 WRF 产生两种初值，将其中一个初值作为更为准确的初值，将另一初值作为对照试验的初值，在此基础上进行 CNOP 的计算。两种再分析资料分别为：(1) 美国国家环境预测中心 (NCEP) 发布的全球业务 ($1^\circ \times 1^\circ$) 最后分析资料 (简称 FNL)，将该资

料插值到 WRF 模式格点上形成初边值条件;(2)欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的第五代全球 (0.25° ×0.25°) 再分析资料 (简称 ERA5), 将该资料插值到 WRF 模式格点上形成初值条件, 如前所述, 由于本文只考虑初值的不确定性对模拟预报的影响, 因此两种资料都采用相同的边界条件, 这里都采用 NCEP FNL 资料提供的边界条件。至于上述两种资料得到的初值哪个将被作为更准确的初值, 将在 3.4 节中进行详细讨论。本研究采用中国气象局陆面过程同化系统产品数据集 (CLDAS, Sun et al., 2020) 中的降水数据做为观测的降水数据进行对比分析。

3.2 模拟效果评估指标

本文将从不同等级降水的 TS 评分定量分析降水模拟效果。

其中, TS 评分的计算公式如下:

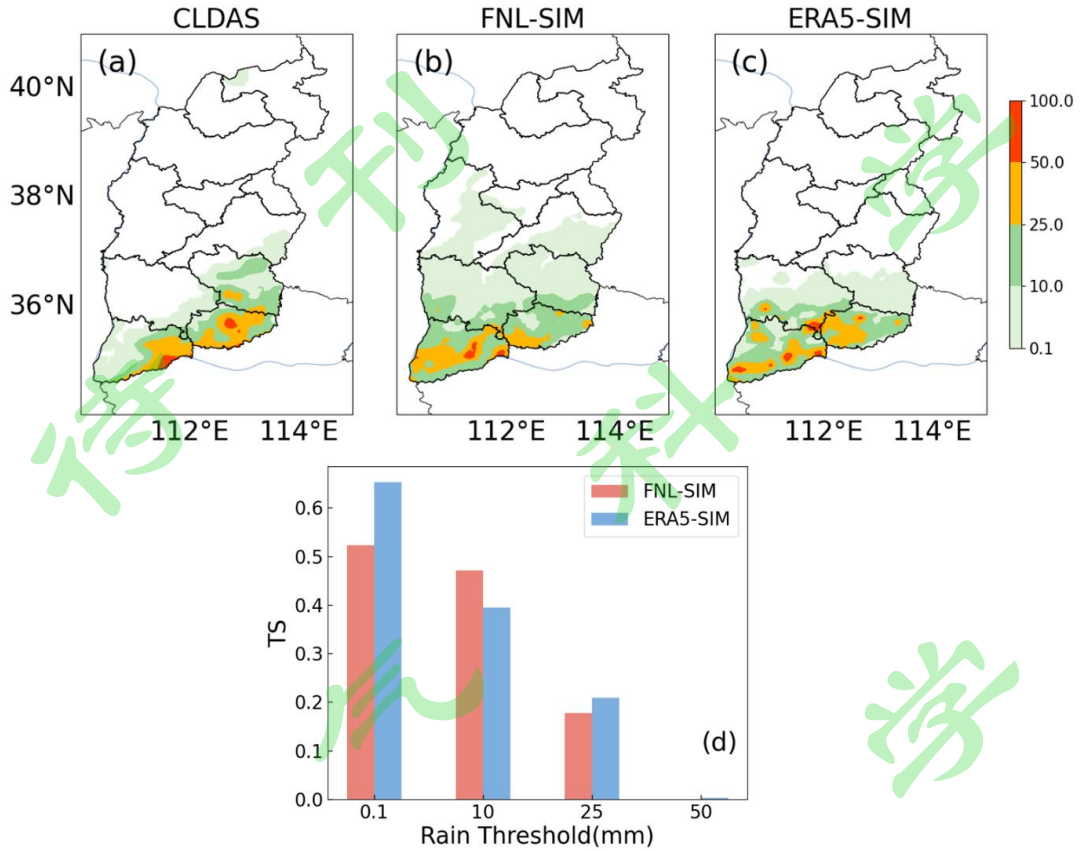
$$TS = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C} \quad (5)$$

式中, N_A 表示预报的降水量和观测的降水量同在某一降水等级以上量级的格点数, N_B 为空报的格点数, N_C 为漏报的格点数。

3.3 强降水个例介绍

2023 年 5 月 20 日, 山西南部出现一次强降水天气过程, 24 h 累计降水量为 0.1-91.9 mm (夏县祁家河), 强降水主要发生在运城-长治晋城一带 (孙颖姝等 2023)。根据山西省气象台的实况统计, 20 日 08 时-21 日 08 时 (北京时, 下同), 山西省内国家站出现 2 站暴雨, 分别为垣曲 (91.7 mm) 和平陆 (54.1 mm), 区域站出现 27 站暴雨。此次强降水过程对流性质显著, 以短时强降水为主 (54 站), 其中, 最大雨强达 69.1 mm/h (垣曲), 局地还伴有雷暴大风。从当天短时强降水站数和强度极值的时间分布特征来看, 强降水时段主要集中在 20 日中午至 21 日前半夜, 持续时间较长。利用中国气象局陆面过程同化系统产品数据集得到的 2023 年 5 月 20 日 08 时~2023 年 5 月 21 日 08 时之间 24 小时累积降水分布如图 1a 所示。可见, 强降水分布与山西省气象台对本次强降水事件的落区

236 描述基本一致。



237

238 图 1. 2023 年 5 月 20 日 08 时-2023 年 5 月 21 日 08 时累计降水分布 (单位: mm): (a)观
239 测; (b) FNL 资料做为初始场的模拟效果; (c) ERA5 资料做为初始场的模拟效果。(d)FNL 和
240 ERA5 做为初始场的模拟效果在山西地区不同降水阈值上的 TS 评分。

241 Figure 1. Accumulated precipitation distribution (unit: mm) from 08:00 on May 20, 2023 to
242 08:00 on May 21, 2023: (a) Observation; (b) The simulation using FNL data as the initial field;
243 (c) The simulation using ERA5 data as the initial field. (d) The TS scores of the simulations
244 using FNL and ERA5 as initial fields at different precipitation thresholds in Shanxi region.

245

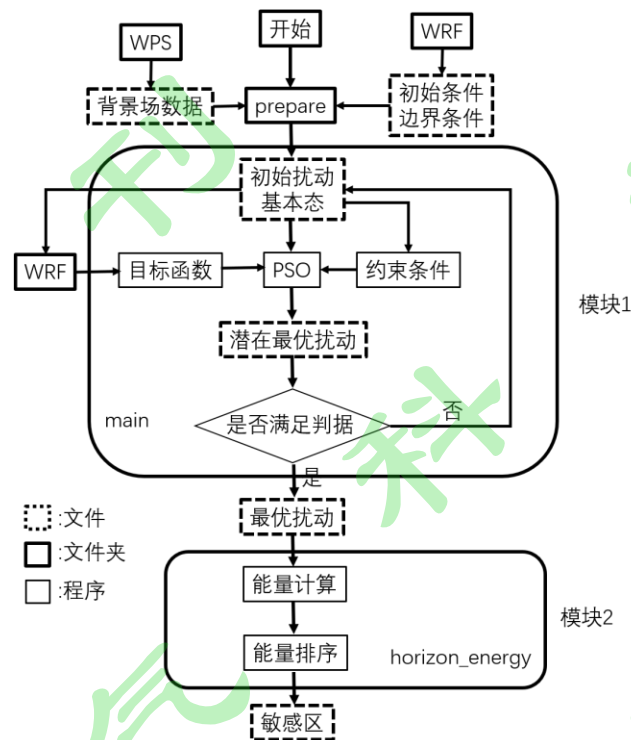
246 3.4 优化试验设计

247 本研究首先分别用 FNL 和 ERA5 资料驱动 WRF 模式对本次强降水事件进行
248 模拟。由图 1d 可见, ERA5 驱动 WRF 模式的模拟结果在小雨、大雨以及暴雨三
249 个量级上的 TS 评分都要好于 FNL 驱动 WRF 模式的模拟结果, 因此, 总体而言,

ERA5 资料驱动 WRF 模式的模拟效果好于用 FNL 资料驱动 WRF 模式的模拟效果。于是，将 FNL 资料的模拟结果做为对照试验，在此基础上，进行 CNOP 的优化计算。将 ERA5 资料插值到 WRF 模式网格进而得到的初始场做为更接近真值的数据，用于在观测系统模拟试验 (OSSE) 中做为待同化的观测资料使用，同时也做为天气形势分析时的观测资料使用。

本研究基于周非凡等 (2024) 开发的“针对降雨预报的目标观测系统 (TORA)”进行敏感区识别计算。该系统的流程如图 2 所示。首先，由 WRF 模式的前处理部分产生背景场数据，然后由 WRF 模式的主体部分产生初始条件和边界条件，接着由 TORA 的模块 1 产生初始扰动、运行参照试验、产生基本态场，然后在模块 1 中进行最优扰动的计算，在最优扰动的计算过程中需要不断地调用 WRF 的非线性积分模块进行目标函数的计算，通过粒子群优化算法 (PSO) 不断地迭代寻找使得目标函数最大的初始扰动，最终获得最优初始扰动；然后启动 TORA 系统的模块 2 进行扰动能量的计算和排序，并由排序结果确定敏感性区域，最终输出敏感区的可视化图像。TORA 所用优化算法为粒子群优化算法 (PSO)。PSO 是智能优化算法的一种。优点在于基于种群的启发式随机搜索方法，它们以适应度函数 (相当于优化问题中所设定的目标函数) 作为寻优判据，对一般的优化问题，能以较大概率求得全局最优解。PSO 智能优化算法无需相关目标函数的梯度信息，对目标函数关于优化变量不可微性，甚至不连续性的情形仍然适用，因此对降水事件有较好的适用性。以往常用于 CNOP 求解的优化算法如谱投影梯度算法 (SPG2, Birgin et al., 2001) 需要提供目标函数关于自变量的梯度信息，由于降水量非连续函数，因此它关于自变量不可微，也就无法为 SPG2 算法提供梯度信息，在以往相关研究中，往往只能间接地考虑降水的问题 (比如目标函数取为

272 能量，穆穆等 2007)。



273
274 图 2. 针对降雨预报的目标观测系统 (TORA) 流程图

275 Figure 2. Target Observation System (TORA) flowchart for rainfall forecasting

276 本研究在降水事件开始前启动优化试验，也即优化时长设为 24 小时，优化
277 开始时间为 2023 年 5 月 20 日 08 时（北京时）。优化试验所用分辨率与模拟试
278 验所用分辨率一致，即都为 9km×9 km。验证区域设置为山西省，如图 3d 所示。
279 将 CNOP 型初始误差的垂直积分能量值从大到小进行排序，取排在在前 2000 的格
280 点值对应的区域设为敏感区（约占全区域的 1.5%）。此外，根据 CNOP 型初始误
281 差的垂直积分能量的局部极大值的位置选取对比区 1,2,3，将在 4.1 节中对这三
282 个对比区进行详细介绍。

283

284 4、结果分析

285 4.1 敏感区分布特征

由于敏感区是由 CNOP 型初始误差的分布所决定，因此，我们首先分析 CNOP 型初始误差的分布特征。图 3 给出了 CNOP 型初始误差的温度场和风场在 500hPa、700hPa 和 850hPa 上的分布。由图可见，500hPa 上，CNOP 型初始误差的风场大值区主要位于我国内蒙、东北、以及青藏高原地区，温度场大值区则主要位于吉林中部地区；700hPa 上，CNOP 型初始误差的风场大值区主要位于内蒙东北部、东北三省地区，而温度场除了东北地区，还有青藏高原东侧、江西安徽交界区域；850hPa 上，CNOP 型初始误差的风场大值区与 700hPa 上风场大值区位置较为接近，都主要位于东北地区，但温度场大值区则有明显不同，850hPa 上山西南部区域有一明显的温度大值中心。为综合考虑 CNOP 型初始误差的大值区的分布情况，对 CNOP 型初始误差进行垂直积分能量计算，得到其水平分布如图 3d 所示。由图可见，CNOP 型初始误差的能量大值区主要位于我国东北地区、青藏高原地区、东海区域，此外，在山西南部地区也有局部极大值。

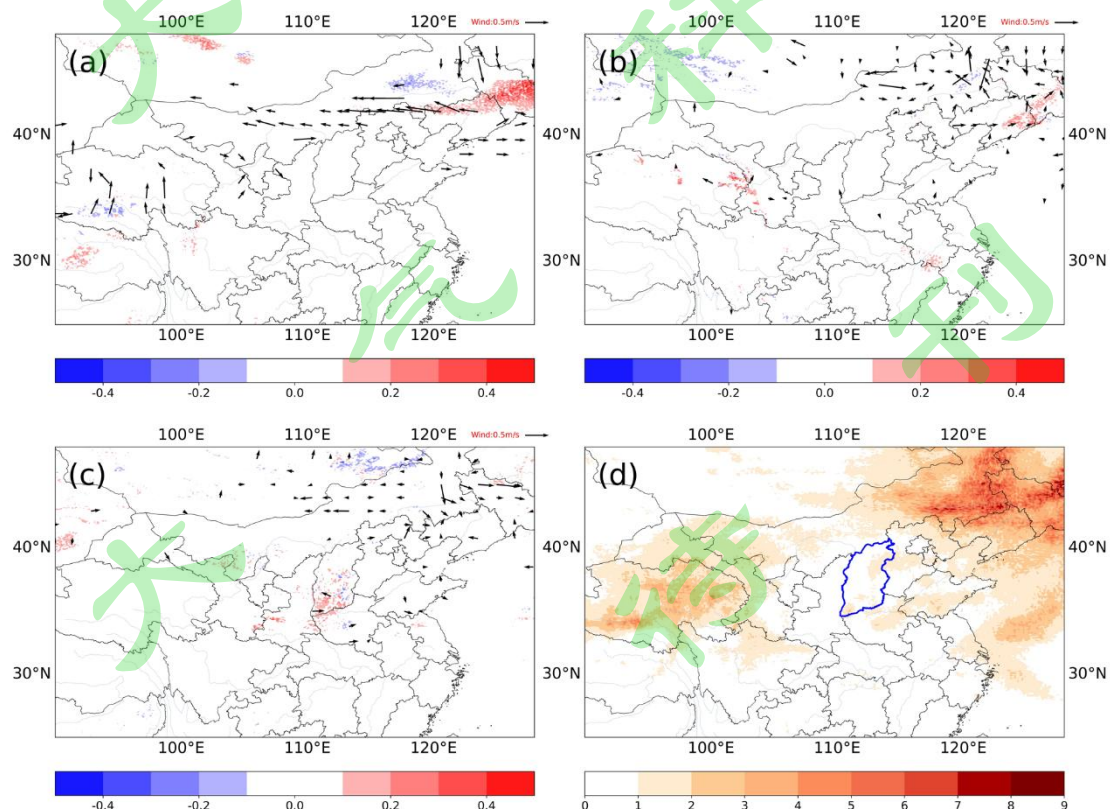


图 3. CNOP 型初始误差的温度场 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (矢量, 单位: m/s) 在(a)500hPa、(b)700hPa 和(c)850hPa 上的分布, 以及(d)CNOP 型初始误差的垂直积分能量的水平分布 (单位: J/kg)。 (d)中的蓝色边框区域表示验证区域。

Figure 3. The distribution of temperature field (shaded, unit: $^{\circ}\text{C}$) and wind field (vector, unit: m/s) of CNOP initial error at (a) 500hPa, (b) 700hPa, and (c) 850hPa, (d) the horizontal distribution of vertical integrated energy of CNOP initial error (unit: J/kg)。 The blue border area in panel d represents the verification area.

接着, 将上述能量值按从大到小的顺序进行排序, 取前 2000 个格点为敏感区, 如图 4a 所示。由图 3d, 由于 CNOP 型初始误差的能量大值区还有部分位于青藏高原、东海地区, 此外又由于考虑的是山西的降水, 同时山西南部地区也有部分能量局部极大值, 结合后面的天气形势分析, 青藏高原地区、东海地区和山西地区这三个区域中也都存在明显的天气系统, 因此我们在这三个区域中分别选取 CNOP 型初始误差能量的局部极大值区作为对比区, 见图 4bcd 所示。具体做法为将 CNOP 型初始误差能量在相应区域中按从大到小排序, 选取该区域中前 2000 个格点为表征该区域的对比区。综上, 由图 4 可见, 敏感区主要集中在我国内蒙古东北部和东北三省交界区域, 以及黑龙江和吉林交界处。对比区 1 主要位于青海中东部和南部地区, 对比区 2 主要位于山西东北部和南部以及河南北部地区, 对比区 3 则主要位于东海和朝鲜半岛地区。

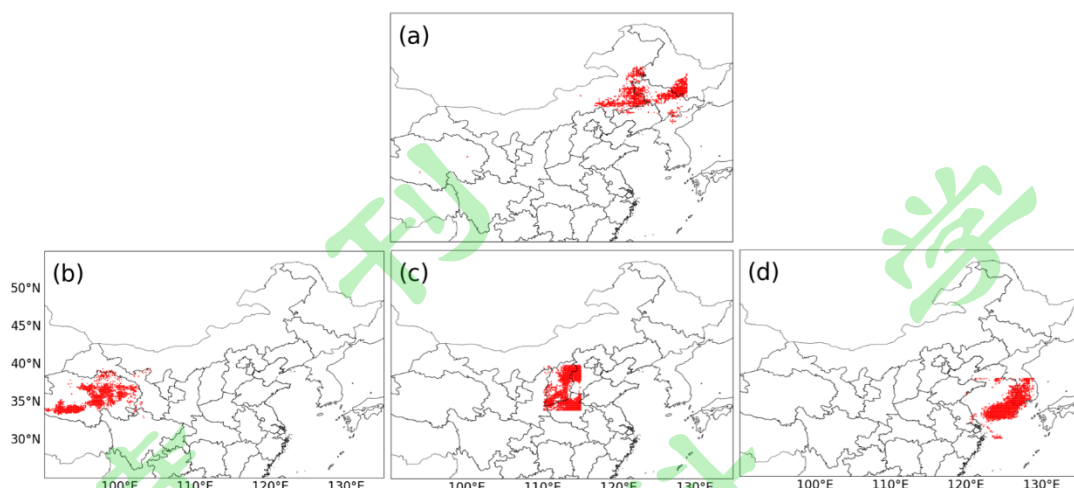


图 4. 红色打点区域: (a)敏感区; (b)对比区 1; (c)对比区 2; (d) 对比区 3。

Figure 4. Red dotted area: (a) sensitive area; (b) Comparison Zone 1; (c) Comparison Zone 2; (d) Comparison Zone 3.

4.2 敏感区有效性检验

本节利用观测系统模拟试验（OSSE）考察敏感区的有效性。在敏感区和对比区分别同化模拟观测资料，考察敏感区和对比区初始误差的减小对验证区降水预报效果的改进程度，进而评估敏感区的有效性。由前可知，由于 ERA5 资料驱动 WRF 模式的模拟效果相对较好，因此，将 ERA5 资料插值到 WRF 模式网格进而得到的初始场做为模拟的观测资料，在敏感区内和对比区内分别同化上述模拟观测资料，考察同化后对山西降水预报的影响。下面将在敏感区内同化模拟观测资料后的预报试验简称为敏感区试验，相应地，有对比区试验（在对比区内同化模拟观测资料后的预报试验）以及对照试验（即同化前的预报试验，也即用 FNL 资料驱动 WRF 的模拟预报试验）。

下面从不同等级降水的 TS 评分和降水的分布形势两个方面考察敏感区试验和对比区试验在山西地区的预报效果。由图 5 可见，敏感区试验可以最大程度提高山西地区大雨和暴雨预报的 TS 评分。对比区 2 试验次之，对比区 1 和 3 试验也能改善大雨和暴雨预报的 TS 评分，但程度比前二者都要小一些。然而不论敏感区试验还是对比区试验，都无法改善小雨的预报技巧，这是因为在此次事件中，小雨的预报范围普遍偏大（对比图 6 和图 1a）。相对于对照试验，同化对比

区 1 和 2 的观测资料后中雨范围有所缩小（图 6bc），与观测更为接近，因此相应的中雨预报技巧得到略微改善（图 5），而同化敏感区和对比区 3 的观测资料后中雨范围进一步扩大（图 6ad），特别是敏感区试验导致了更大范围的中雨，比观测的中雨范围明显偏大，因此其中雨预报技巧最低。此外，由图 6a 可见，敏感区试验主要改善了运城东部和晋城西部的降水分布，从而使得大雨以上级别的降水分布与观测更接近（对比图 1a 和图 6a），然而，在三个对比区试验中这两区域的降水分布形势改善都比较有限，从而对大雨以上级别的降水分布的改进程度要小。

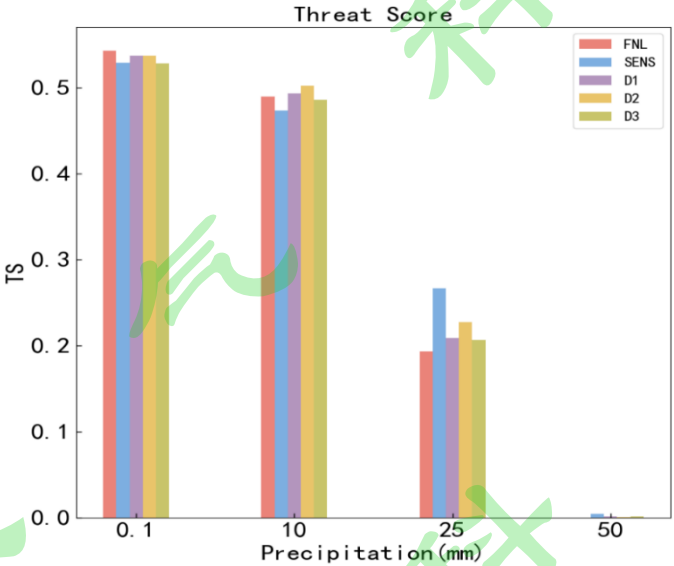


图 5.对照试验（FNL）、敏感区试验（SENS）以及对比区试验（D1,D2,D3）中关于山西地区不同降水阈值的 TS 评分。

Figure 5. TS scores for different precipitation thresholds in Shanxi region in control experiment (FNL), sensitive area experiment (SENS), and comparative area experiments (D1, D2, D3).

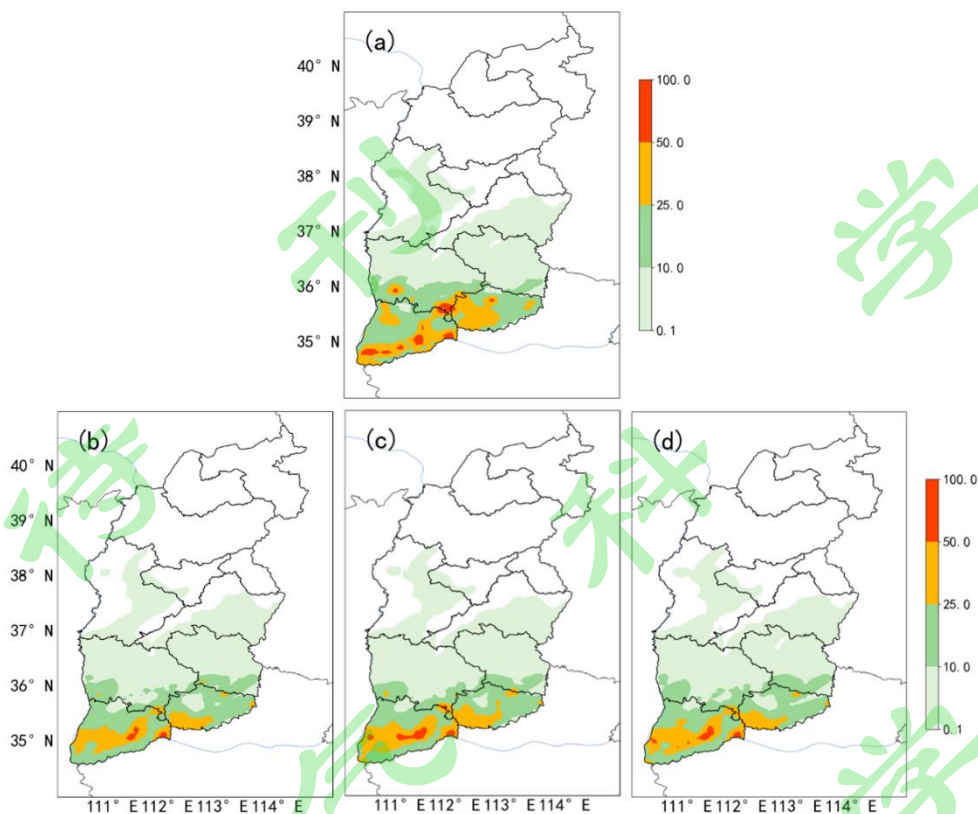


图 6.(a)敏感区试验、(b)对比区 1 试验、(c)对比区 2 试验、(d)对比区 3 试验在山西地区的 24 小时累积降水分布。

Figure 6. 24-hour cumulative precipitation distribution in Shanxi region in (a) sensitive area experiment, (b)comparative area 1 experiment, (c)comparative area 2 experiment, and (d)comparative area 3 experiment.

4.3 敏感区物理意义解析

从前几节可以看出，敏感区内初始场精度的改进对于提高本次山西地区强降水过程的预报技巧具有重要意义。本小节将从天气环流形势入手解析敏感区所阐释的物理意义，从而解释改进敏感区初始场精度可以提高山西地区降水预报技巧的原因。

图 7 给出了 ERA5 资料在 2023 年 5 月 20 日 08 时 500hPa、700hPa、850 hPa 的位势高度场、风场和温度场。由图可见，2023 年 5 月 20 日 08 时，敏感区所处的内蒙古东北部和东北三省交界处，500hPa 高空有低涡维持，敏感区位于低

涡中心的东南侧，低涡中心后部有一冷中心，温度场落后于高度场，根据气旋发展理论，冷涡将继续发展。与此同时，在冷涡底部有高空槽扰动（图 7b），此时验证区也即山西省受到该高空槽影响，山西省北部区域处于槽后，受干冷西北气流控制，而山西中南部区域则位于槽前；此外，冷涡底部等温线密集，为冷锋锋区，山西南部位于锋前（图 7b）。与此同时，青藏高原附近存在一低值系统（图 7a），850 hPa 上山西南部上空存在切变线（图 7c）。地面上，西伯利亚高压脊东南伸至山西中南部，与 850hPa 切变线位置接近（图 7d）。

可见，从天气形势分析上看本次降水事件的主要影响系统有：东北冷涡、高原低压，高空低槽，冷锋，切变线等。然而，敏感区仅仅位于东北冷涡及其连带的高空低槽区，预示了东北冷涡对本次降水事件的重要影响。此外，通过上述天气形势分析可以看出对比区 1 反映了青藏高原低压系统的影响，对比区 2 反映了山西南部切变线的影响，而对比区 3 则位于副高北侧边缘区域，可以反映副高的影响。

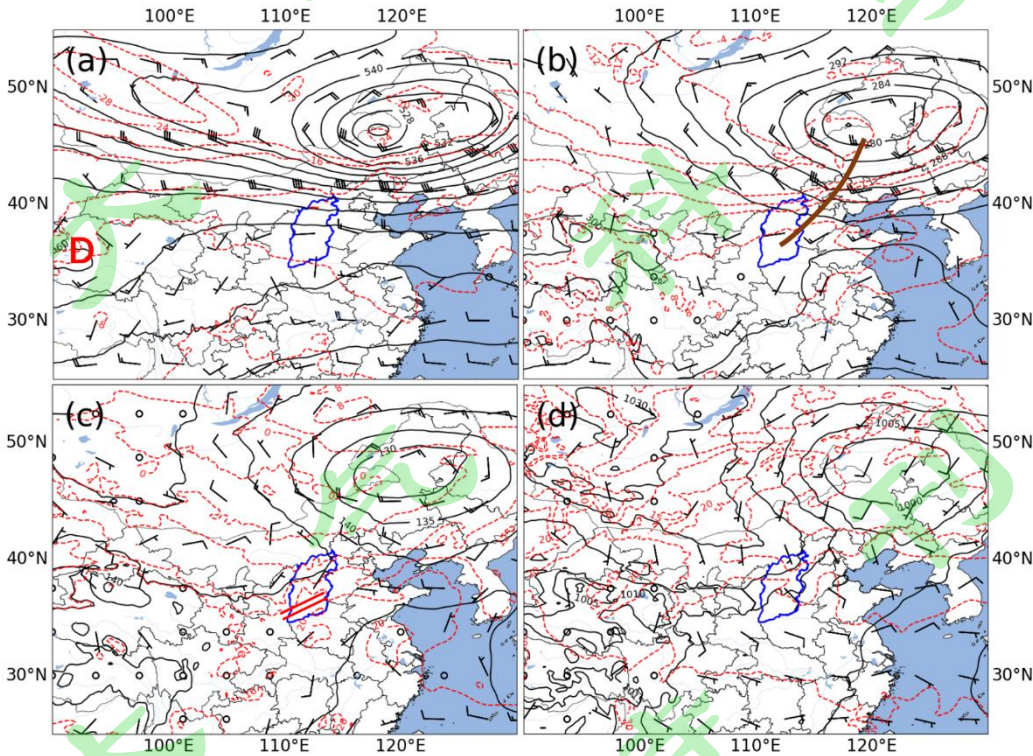
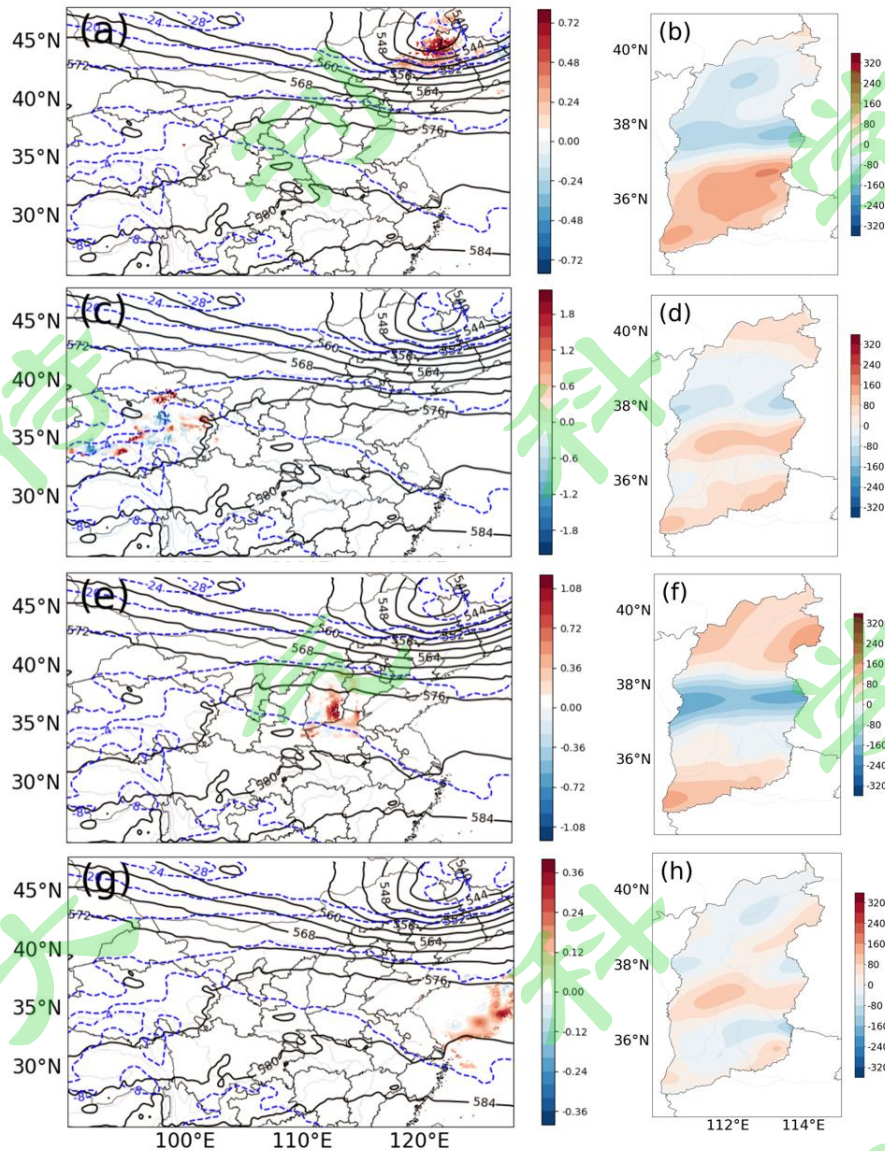


图 7. 2023 年 5 月 20 日 08 时观测的 (a) 500hPa、(b) 700hPa、(c) 850 hPa 的位势高度场（单位：dagpm；黑色等值线）、温度（单位：℃；红色等值线）和风场（风羽图），(d) 海平面气压（单位：hPa；黑色等值线）和风场（风羽图）。蓝色边框区域表示山西省界。风羽符号遵循中国气象局标准（长划代表 4 米/秒，短划代表 2 米/秒，三角形代表 20 米/秒）。

Figure 7. Observed potential height (unit: dagpm; Black contour line), temperature (unit: °C; red contour line), and wind field (wind barb) at (a) 500hPa, (b) 700hPa, and (c) 850 hPa on May 20, 2023 at 08:00, (d) sea level pressure (unit: hPa; Black contour lines and wind field (wind barb). The blue border area represents the boundary of Shanxi Province. The wind barb symbol follows the standards of the China Meteorological Administration (long strokes represent 4 m/s, short strokes represent 2 m/s, and triangles represent 20 m/s).

改进敏感区的初始场后，使得东北区域位势高度降低（图 8a，红色表示同化前的位势高度值大于同化后的位势高度值），也即加强了东北冷涡的强度，从而与 ERA5 资料（也即模拟的观测资料）的东北冷涡的强度更接近，而改进对比区 1 的初始场，则使得青藏高原地区的位势高度场增加（图 8c，在低压区域以负值为主），也即减弱了高原低压，改进对比区 2 的初始场主要使得山西南部区域东西部的位势高度场发生变化（图 8e），加强了山西南部区域的风切变，改进对比区 3 的初始场则使得东海地区的位势高度降低（图 8g），相当于使得副高北部边缘南移。上述不同区域的初始场改进后，对山西区域的预报产生了较大的影响，由图 8b,d,f,h 可以看出，改进敏感区的初始场主要影响了山西南部地区的预报，而改进青藏高原地区的初始场则主要影响了山西中部和南部地区的预报，改进山西地区的初始场主要影响了山西中部、东北部和西南部地区的预报，改进东海地区的初始场主要影响了山西中部和东南部地区的预报，总体而言，改进对比区的初始场对山西地区预报的整体影响程度要小于改进敏感区的初始场对山西地区预报的影响程度。由于本次降水事件主要位于山西南部区域，由图可见，敏感区和对对比区 2 对山西南部地区影响相对较大，这与图 5、图 6 所展示的预报效果较为一致。由于敏感区反映了东北冷涡的影响，而对对比区 2 反映了山西南部切变线的影响，可见，对初始东北冷涡强度以及山西本地切变线的准确描述有助于提高本次山西降水的预报效果。青藏高原低压和东海区域的副高对本次降水的影响则

409 相对较小。



410

411 图 8.对照试验在 2023 年 5 月 20 日 08 时的 500hPa 位势高度场（黑色实线等值线，单位：
412 位势十米）、温度场（蓝色虚线等值线，单位：℃）及其与(a)敏感区试验、(c)对比区 1 试验、
413 (e)对比区 2 试验和 (g) 对比区 3 试验在同一时刻的 500hPa 位势高度场的差（阴影填充在
414 a、c、e、g 小图上），以及 (b)敏感区试验、(d)对比区 1 试验、(f)对比区 2 试验和 (h) 对比
415 区 3 试验与对照试验在预报终止时刻（2023 年 5 月 21 日 08 时）在山西地区的垂直积分能
416 量的差（单位：J/kg）。

417 Figure 8. The 500hPa potential height (black solid contour line, unit: dagpm) and temperature
418 field (blue dashed contour line, unit: °C) of the control experiment at 08:00 on May 20, 2023,
419 as well as the differences in the 500hPa potential height at the same time with (a) the sensitive

area experiment, (c) the comparative area 1 experiment, (e) the comparative area 2 experiment, and (g) the comparative area 3 experiment (shaded on the a, c, e, and g panels), and the difference in vertical integrated energy in Shanxi region (unit: J/kg) between (b) the sensitive area experiment, (d) the comparative area 1 experiment, (f) the comparative area 2 experiment, (h) the comparative area 3 experiment and control experiment at the end of the forecast at 08:00 on May 21, 2023.

下面进一步分析敏感区试验可以改善山西南部地区大雨预报的原因。由图 9ab 可见, 在山西南部晋城盆地地区, 在敏感区试验中东北风与偏北风在该区域辐合, 形成近涡旋式环流场, 根据天气学原理, 地面风场辐合上升, 容易产生较强的对流, 从而在敏感区试验中该地区有明显降水产生 (图 6a), 而对照试验中该区域盛行西北风, 无明显的辐合现象。此外, 在敏感区试验中, 沿太岳山脉西侧有较强的东北风, 该东北风与临汾盆地的偏北风在太岳山南部山脚汇合, 沿着太岳山爬升, 在太岳山南部山顶形成强的降水 (图 6a), 与此同时, 临汾盆地的偏北风穿过中条山和大岳山之间的豁口, 沿着中条山东北部边缘行进, 与翻过大岳山的东北风一起, 在运城东部盆地形成闭合气旋式环流中心, 在科里奥利力作用下北半球地表气旋式环流往往对应辐合上升运动, 从而导致该地区出现明显的降水。虽然对照试验中该区域也有明显的气旋式环流, 然而由于翻过太岳山的东北风和穿过豁口的偏北风都要弱一些, 因此风场强度总体弱一些。此外, 不论是敏感区试验还是对照试验, 在运城盆地都有较强的西北风, 该西北风遇到中条山的阻挡, 在中条山北麓爬坡上升, 形成沿中条山分布式降水。可见, 山西复杂的地形对本次降水分布形势有重要的影响。此外, 对本次降水事件的水汽场的分析显示, 本次降水过程山西南部地区总体湿度条件一般, 不论是敏感区试验还是对照试验, 山西南部整层平均水汽混合比都在 2-2.5g/kg 左右 (图 9cd), 明显低于其南侧河南境内的水汽, 因此山西境内只有少数站达到暴雨水平, 多数地区为

中雨至大雨量级。综上可见，敏感区试验对山西南部地区风场预报有较大影响，在山西南部复杂地形的配合下，通过促进多地区风场的辐合，扩大大雨的区域，进而改善本次强降水事件的预报技巧。

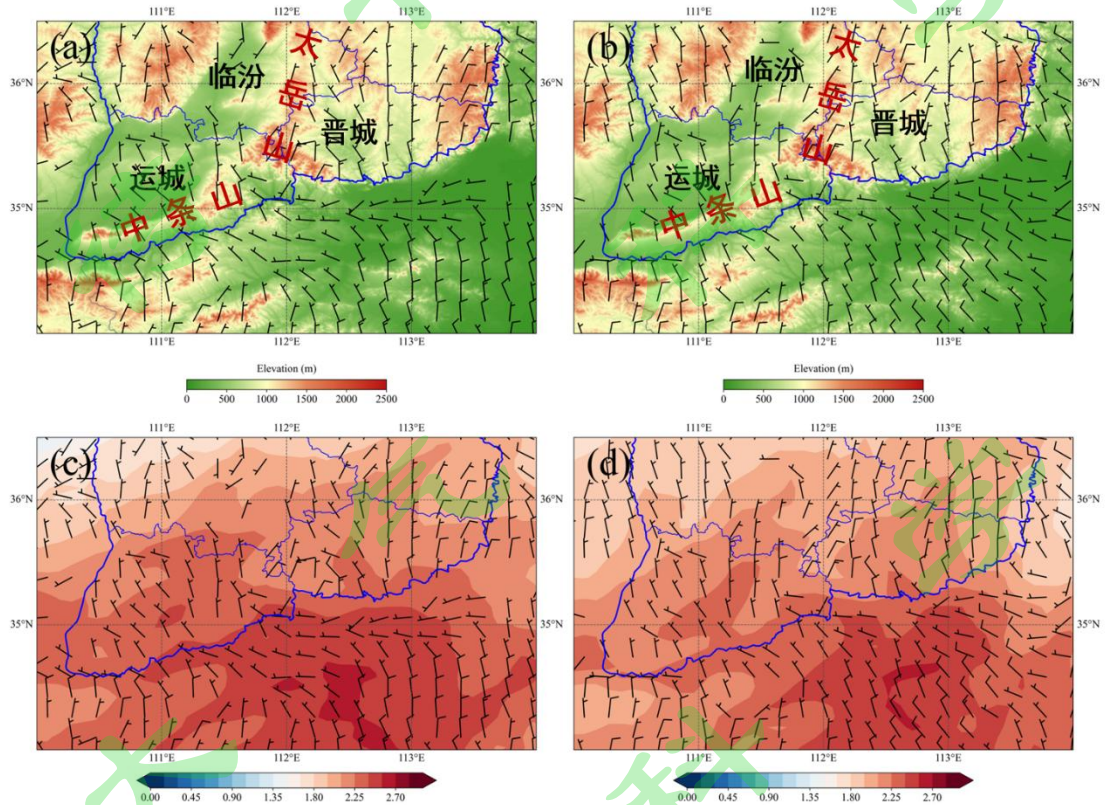


图 9. 2023 年 5 月 21 日 00 时 (a、c) 对照试验和(b、d)敏感区试验在山西南部的地表风场 (风羽图) 叠加 (a、b) 地形 (阴影, 单位: m), (c、d) 整层平均水汽混合比 (阴影, 单位: g/kg)。风羽符号遵循中国气象局标准 (长划代表 4 米/秒, 短划代表 2 米/秒, 三角形代表 20 米/秒)。

Figure 9. The surface wind field (wind barb) in southern Shanxi at 00:00 on May 21, 2023 overlaid with (a, b) the terrain (shaded, unit: m) and (c, d) the average water vapor mixing ratio (shaded, unit: g/kg) of the entire layer. (a, c) the control experiment and (b, d) the sensitive area experiment. The wind barb symbol follows the standards of the China Meteorological Administration (long strokes represent 4 m/s, short strokes represent 2 m/s, and triangles represent 20 m/s).

5、总结和讨论

针对山西南部 2023 年 5 月 20~21 日的一次强降水过程，使用高分辨率中尺度气象模式 WRF，分别用 FNL 和 ERA5 资料驱动该模式对本次强降水过程进行了模拟分析，结果表明，ERA5 资料驱动 WRF 模式的模拟效果好于用 FNL 资料驱动 WRF 模式的模拟效果，因此，将 ERA5 资料做为观测资料使用，用于观测系统模拟试验（OSSE）以及进行天气形势分析。

以 FNL 资料驱动模式的模拟做为对照试验，在此基础上，利用条件非线性最优扰动（CNOP）方法识别了该次强降水过程的目标观测敏感区，并对敏感区的物理意义进行了分析，结果表明，敏感区主要位于内蒙东北部与黑龙江、辽宁、吉林交界处，以及黑龙江南部和吉林交界区域，分析发现该敏感区主要位于东北冷涡中心附近，反映了东北冷涡对本次强降水事件的重要影响。

然后，通过观测系统模拟试验（OSSE）考察了 CNOP 方法识别的敏感区的有效性。首先，根据 CNOP 型初始误差的垂直积分能量的局部极大值区域，依次选取了 3 个次敏感的区域做对比分析，3 个对比区可以分别反映青藏高原低压系统、山西本地切变线以及西太副高的影响，结果发现同化敏感区内的模拟观测资料可以最大程度提高山西南部此次强降水过程大雨和暴雨预报的 TS 评分，同化对比区内的观测资料也能改善山西南部大雨和暴雨预报的 TS 评分，但程度要小一些。这进一步揭示了东北冷涡对本次降水事件的重要性。进一步分析表明敏感区试验（改进敏感区初始场的预报试验）主要通过影响山西南部地区的风场，并在山西南部特殊的地形的配合下影响本次降水的分布。然而由于本次降水过程山西境内水汽不是特别充足，因此山西境内只有少数站达到暴雨水平，多数地区为中雨至大雨量级。

本研究结果显示目标观测方法可以有效提高山西强降水的预报技巧,然而本研究仅对一次强降水事件进行分析,今后还需对更多的强降水事件进行分析,进而得到统计结论,以更好地指导目标观测的实施。此外,本次强降水事件的敏感区位于内蒙和东北三省,山西电网难以去布局观测,下一步,需要将敏感区限制在山西省内,寻找山西省内的敏感区,从而可以指导山西电网的观测布局。

另外,在本次强降水事件中,从天气形势分析上看本次降水事件的主要影响系统不只东北冷涡,然而,敏感区仅仅位于东北冷涡区域,揭示了东北冷涡对本次降水事件的主导影响。由此可见,可以通过目标观测方法挖掘降水事件的主导因素。进而为寻找降水的前期信号提供指导。

致谢: 感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

参考文献:

- 段晚锁,汪叶,霍振华,等. 2019. 数值天气预报和气候预测的集合预报方法: 思考与展望[J]. 气候与环境研究, 24 (3): 396-406. Duan Wansuo, Wang Ye, Huo Zhenhua, et al. 2019. Ensemble forecast methods for numerical weather forecast and climate prediction: Thinking and prospect [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 24 (3): 396-406.
- 穆穆,王洪利,周菲凡. 2007. 条件非线性最优扰动方法在适应性观测研究中的初步应用[J]. 大气科学, 31(6): 1102-1112. Mu Mu, Wang Hongli, Zhou Feifan, 2007. A preliminary application of conditional nonlinear optimal perturbation to adaptive observation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(6): 1102-1112.
- 孙颖姝,乔钰,赵海英,等. 2023. 2023 年 5 月 20 日强降水天气过程分析. 山西重大天气过程预报技术复盘总结汇编(2023), P82. Sun Yingshu, Qiao Yu, Zhao Haiying, et al. 2023. Analysis of the heavy rainfall process on May 20, 2023. Summary, Compilation, and Review of Forecasting Skill of Major Weather Process in Shanxi Province (2023), P82.
- 周菲凡,张贺. 2014. 基于 CNOP 方法的台风目标观测中三种敏感区确定方案的比较研究[J]. 大气科学, 38 (2): 261-272. Zhou Feifan, Zhang He. 2014. Study of the schemes based on CNOP method to identify sensitive areas for typhoon targeted observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 261-272.
- 周菲凡,张贺,叶一苇,等. 2024. 针对降雨预报的目标观测系统. 软件著作权登记号 2024SR1903116. 软件授权日期 2024 年 11 月 26 日. Zhou Feifan, Zhang He, Ye Yiwei, et al. 2024. A target observation system for rainfall forecasting. Software copyright registration number 2024SR1903116. The software authorization date is November 26, 2024.
- Birgin E G, Martinez J E, Marcos R. 2001. Algorithm 813: SPG-software for convex-constrained optimization [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 27: 340-349.
- Chan P W, Han W, Mak B, et al. 2022. Ground-Space-Sky Observing System Experiment During Tropical Cyclone Mulan in August 2022[J]. Adv Atmos Sci, 40(2): 194-200.
- Chen G, Wang B, Liu J. 2021. Study on the sensitivity of initial perturbations to the development of a vortex observed in Southwest China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 126: e2021JD034715.
- Dai G, Mu M, Han Z, et al. 2023. The Influence of Arctic Sea Ice Concentration Perturbations on Subseasonal Predictions of North Atlantic Oscillation Events[J]. Adv. Atmos. Sci, 40: 2242-2261.
- Duan W, Li X, Tian B. 2018. Towards optimal observational array for dealing with challenges of El Niño-Southern Oscillation predictions due to diversities of El Niño[J]. Clim Dyn, 51: 3351-3368.
- Feng R, Duan W, Mu M. 2017. Estimating observing locations for advancing beyond the winter predictability barrier of Indian Ocean dipole event predictions[J]. Clim Dyn, 48: 1173-1185.

- Liang P, Mu M, Wang Q, et al. 2019. Optimal precursors triggering the Kuroshio Intrusion into the South China Sea obtained by the Conditional Nonlinear Optimal Perturbation approach[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124:3941–3962.
- Liu K, Guo W, Da L, et al. 2021. Improving the thermal structure predictions in the Yellow Sea by conducting targeted observations in the CNOP-identified sensitive areas[J]. Sci Rep, 11: 19518 .
- Liu J, Liu K, Guo W, et al. 2023. Optimal initial errors related to the prediction of the vertical thermal structure and their application to targeted observation: A 3-day hindcast case study in the northern South China Sea[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 200: 104146.
- Ma X, Mu M, Dai G, et al. 2022. Influence of Arctic sea ice concentration on extended-range prediction of strong and long-lasting Ural blocking events in winter[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127:e2021JD036282.
- Mu M, Zhou F., Wang H. 2009. A Method for Identifying the Sensitive Areas in Targeted Observations for Tropical Cyclone Prediction: Conditional Nonlinear Optimal Perturbation[J]. Mon Wea Rev, 137: 1623-1639.
- Qin X, Mu M, Duan W. 2013. Conditions under which CNOP Sensitivity Is Valid for Tropical Cyclone Adaptive Observations[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 139: 1544-1554.
- Sun Shuai, Chunxiang Shi, Yang Pan, et al. Applicability Assessment of the 1998–2018 CLDAS Multi-Source Precipitation Fusion Dataset over China[J]. Journal of Meteorological Research, 2020, 34(04): 879-892.
- Yang L, Duan W, Wang Z, et al. 2022. Toward targeted observations of the meteorological initial state for improving the PM 2.5 forecast of a heavy haze event that occurred in the Beijing–Tianjin–Hebei region[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(17): 11429-11453.
- Zhou F F, Mu M. 2011. The impact of verification area design on tropical cyclone targeted observations based on the CNOP method[J]. Adv Atmos Sci, 28(5): 997-1010.
- Zhou F F, Mu M. 2012. The Impact of Horizontal Resolution on the CNOP and on Its Identified Sensitive Areas for Tropical Cyclone Predictions[J]. Adv Atmos Sci, 29: 36-46.
- Zhou F F, Mu M. 2012. The time and regime dependences of sensitive areas for tropical cyclone prediction using the CNOP method[J]. Adv Atmos Sci, 29: 705-716.