

不同高度 X 波段雷达径向风同化对台风预报影响*

石哲璇¹, 冯佳宁^{1,2**}, 吴 翀¹, 王 超¹, 王 慧¹, 刘 涛¹, 端义宏¹

(1. 中国气象科学研究院灾害天气科学与技术全国重点实验室, 北京 100081; 2. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030)

摘要: 利用中国气象科学研究院的 TRANS 系统, 采用集合卡尔曼滤波方法同化 S 波段多普勒雷达和 X 波段相控阵雷达径向风数据, 对台风苏拉(2023)进行数值试验, 评估 X 波段雷达资料对预报的改进效果, 探讨其不同高度数据的同化敏感性。结果表明, 在同化 S 波段雷达资料的基础上, 同化 X 波段雷达资料可使苏拉预报的路径和强度误差相较同化 S 波段雷达资料的试验额外减少 13.7% 和 58.0%。高度 4 km 以上的 X 波段雷达资料通过动力和热力过程主要影响初始时刻苏拉 600 hPa 以上高度层的位势高度、水平风及暖心强度, 但该影响随数值模式积分的进行逐渐减弱。高度 4 km 以下的 X 波段雷达资料通过动力过程主要影响 700 hPa 以下高度层的位势高度和水平风, 并在预报启动 3 h 后影响苏拉整层水平风场和气压场。研究发现, 仅同化 4 km 以下高度 X 波段雷达资料即可取得与同化该雷达全层资料相当的预报效果, 验证其在 S 波段雷达低层补盲中的有效性, 可为业务预报提供参考。

关键词: 台风; 资料同化; X 波段相控阵雷达; 敏感性试验; 集合卡尔曼滤波

中图法分类号: P457.8

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2025)11-027-15

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20250049

引用格式: 石哲璇, 冯佳宁, 吴翀, 等. 不同高度 X 波段雷达径向风同化对台风预报影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2025, 55(11): 27-41.

Shi Zhexuan, Feng Jianing, Wu Chong, et al. The impact of assimilating high and low-level X-band phased array radar data on tropical cyclone forecasting[J]. Periodical of Ocean University of China, 2025, 55(11): 27-41.

随着数值模式的发展, 虽然热带气旋(Tropical Cyclone, TC)的预报水平得到了显著提升, 但其强度、结构与降水的预报仍有待改进^[1-4]。由于 TC 的发展受到环境风垂直切变、海洋热反馈、副热带高压以及急流系统等多种复杂因素的共同作用, 其非线性特征使得高质量初始场构建成为 TC 预报中的关键^[5-7]。

资料同化(Data Assimilation, DA)通过改进 TC 的初始涡旋场和大尺度环境场, 进而提高对 TC 预报的准确性^[8-9]。目前, 人们已开发出了 WRFDA^[10-11] 和 PSU WRF-EnKF^[12-13] 等同化系统, 并针对雷达高时空分辨率观测资料的特点, 使用此类系统进行了诸多同化 S 波段岸基多普勒雷达(下简称 S 波段雷达)观测的试验。Snyder 等^[14] 验证并研究了在理想场景下, EnKF 同化雷达径向风数据在对流尺度数值模拟中的影响。Zhang 等^[15] 通过卡尔曼滤波方法同化了美国的 3 台岸基多普勒雷达测得的径向风数据, 就飓风温贝托(2007)登陆中的演变过程开展研究, 成功模拟出了其形

成、增强过程, 并改善了其结构。Zhu 等^[16] 通过 EnKF 同化了 S 波段雷达径向风观测, 发现台风韦森特(2012)的平均路径和强度误差分别减少了 10 km 和 15 hPa, 同时 TC 结构更加紧凑, 降水模拟结果更佳, 这与 Yue 等^[17] 研究中呈现的路径和降水预报相似。上述试验表明, 同化 S 波段雷达观测数据改善了 TC 的初始场, 并显著提高了 TC 预测的准确性。因此, 中国气象科学研究院于 2020 年研发了台风快速更新短临预报系统(Typhoon Rapid Refresh Analysis and Nowcasting System, TRANS)^[18], 该系统通过实时同化我国岸基 S 波段雷达径向风数据, 能够进行 TC 精细化风雨预报, 并为国家各级业务部门实时提供预报产品。

鉴于 DA 对计算资源有较高要求^[19], 近年来, 同化 TC 不同区域数据对其预报技巧的影响逐渐受到学术界的广泛关注。当前, 众多学者已着手进行了一系列敏感性试验, 旨在深入分析 TC 中心周边不同区域数据对 TC 不同气象要素的影响程度以揭示对 TC 产生关键影响的

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(42192554, 61827901, 42175016); 中国气象局上海台风研究所项目(TFJJ202210); 灾害天气科学与技术全国重点实验室自主研究课题项目(2025QZA02); 中国气象科学研究院科技发展基金项目(2025KJ017); 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2023Z020)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(42192554, 61827901, 42175016); the Research Fund of Shanghai Typhoon Institution(TFJJ202210); the State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological of Science and Tehnology(2025QZA02); the Science and Technology Development Fund of CAMS(2025KJ017); the Basic Research Fund of CAMS(2023Z020)

收稿日期: 2025-02-20; 修订日期: 2025-03-23

作者简介: 石哲璇(1999—), 男, 硕士生, 研究方向为热带气旋、资料同化。E-mail: zhexuan_shi@hotmail.com

** 通信作者: 冯佳宁, 男, 博士, 副研究员, 研究方向为热带气旋、资料同化等。E-mail: fengjin@cma.gov.cn

区域。Xie 等^[20]使用模式预报资料模拟合成的虚假下投式探空仪开展了同化试验,发现相较环境场的探空资料,TC 内核探空资料对 TC 的预报贡献更大;冯佳宁等^[21-22]通过同化 TC 中心不同距离的数据发现,雷达观测的 TC 内核区资料对改善 TC 的预报技巧起主导作用。此外,Feng 等^[23]同化由飞艇搭载的多普勒雷达观测的径向风数据时发现,当雷达与 TC 中心的距离为最大风速半径时,同化得出的 TC 强度的预报误差最小。上述试验说明了在水平方向上,内核区数据对 TC 预报技巧的提升具有更高贡献。虽然位于边界层及对流层低层的人流辐合、滚轴涡旋、水汽输送、低层环流及角动量垂直输送等过程影响 TC 的强度变化^[24-34],且高层暖心强度与 TC 强度具有显著的正相关性^[35-36],但目前对于不同高度层次的观测资料对 TC 强度、结构特征的影响及贡献的研究仍具有不足之处。为明确垂直方向上影响 TC 的关键层次,优化 DA 系统的计算资源分配,需通过敏感性试验系统评估同化不同高度层观测资料对 TC 预报技巧影响的差异。

由于 S 波段雷达在捕捉中小尺度灾害性天气系统内部涡旋精细结构时存在局限性,并且在低层观测中存在盲区^[37],因此,采用新型 X 波段雷达资料成为增强对 TC 低层精细结构观测能力的一个潜在解决方案。自 2017 年起,中国气象局、广东省气象局和珠海纳睿达科技股份有限公司在广东省部署了大量 X 波段相控阵雷达(X-band Phased Array Radar,下简称 X 波段雷达),截止至 2023 年,已有接近 30 台 X 波段雷达被成功部署^[38-40]。X 波段雷达具有快速扫描和低空覆盖的优势^[41-42],且在测量风速方面与 S 波段雷达具有同等精确度,因此其能够与 S 波段雷达协同工作,并有效补盲 S 波段雷达的低层探测盲区^[43-45]。目前,X 波段雷达已被应用于降水^[43]和 TC 内部中小尺度系统的观测^[41],且同化其径向风数据可有效提高对强风预测^[46]及对 TC 内部龙卷涡旋特征模拟的准确性^[38]。可见,在同化 S 波段雷达径向风数据的基础上进一步同化 X 波段雷达径向风数据,可对低层观测进行补盲,并可基于该特点开展同化位于不同高度雷达观测数据对 TC 预报技巧影响的敏感性试验。

本研究以 2023 年 9 月登陆中国广东省的超强台风苏拉(Saola,2023)为例,在同化 S 波段雷达径向风数据的基础上,进一步同化 X 波段雷达高度位于 4 km 以上及以下的径向风数据,并探究 TC 预报技巧对高低层雷达资料同化的敏感性。本研究阐明了 X 波段雷达对 S 波段雷达低层观测的补盲能力,并初步探索同化低层补盲区域径向风数据对 TC 预报技巧的改进效果。

1 资料与方法

1.1 个例简介

苏拉(2023)个例为 2023 年 8 月 24 日生成于菲律

宾东北部的 9 号 TC,其在生成后于吕宋岛附近短暂滞留打转,随后向西北方向移动进入中国南海,强度持续增强,并快速逼近中国珠三角地区。在 2023 年 9 月 1 日 13 时(UTC),苏拉接近中国香港特别行政区以南的海域,并被观测到具有 55 m/s 的最大地面风速及 930 hPa 的最低海平面气压。自 2023 年 9 月 1 日 14 时(UTC)起,苏拉沿着广东省的海岸线移动(见图 1(a)),于当日 15 时(UTC)被观测到具有 52 m/s 的最大地面风速、935 hPa 的最低海平面气压和 40 km 的 12 级风圈半径。苏拉于次日 5 时 25 分(UTC)在广东省阳江市登陆,登陆时其最大地面风速为 28 m/s,最低海平面气压为 982 hPa。该 TC 于 2023 年 9 月 1 日 0 时—2 日 0 时(UTC)在广东省、广西壮族自治区及海南省引发了超过 360 mm 的降水,对上述地区有重大影响(<https://data.cma.cn/site/article/id/42046.html>)。

1.2 资料

本研究采用的同化资料为 2023 年 9 月 1 日 17 时(UTC)的深圳 S 波段雷达(雷达站号 Z9755)和位于珠海的型号为 AXPT-0164 的 X 波段雷达(雷达站号 ZG041)。Feng 等^[22]的研究中阐述了改善 TC 预报区技巧的关键在于同化雷达观测的 TC 内核区数据,且上述雷达均可以观测到苏拉的内核区(见图 1(a)),因此被选择并应用于本研究中。本试验中的雷达资料通过 Py-Art 进行质量控制处理^[47]。

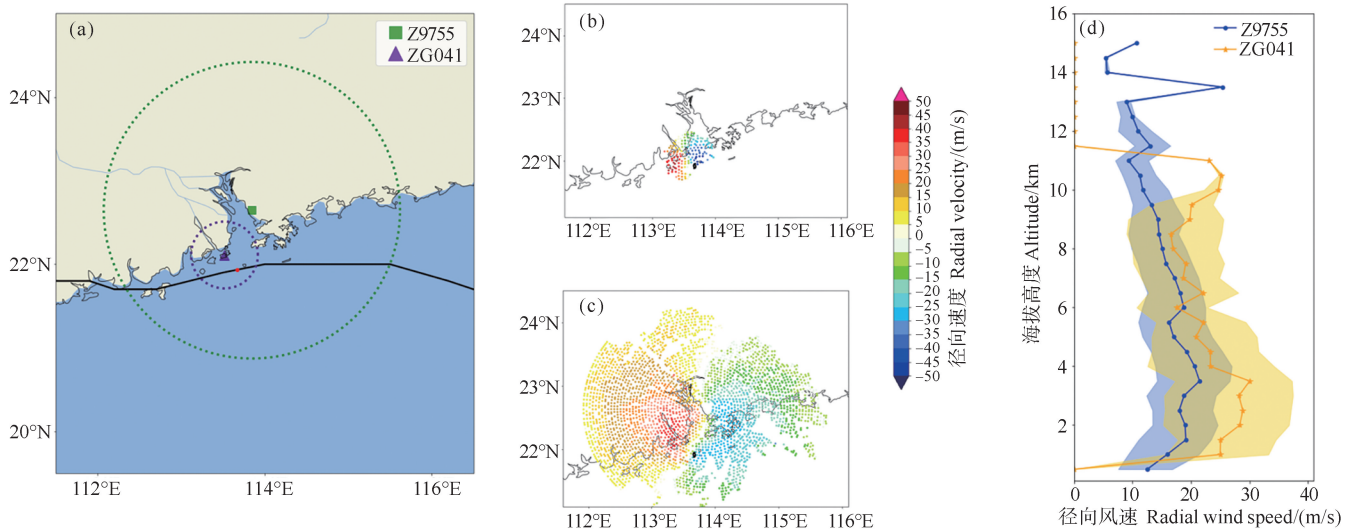
为确保雷达数据与区域模式分辨率匹配,本研究采用 Feng 等^[48]开发的均匀稀疏化算法(Evenly Spaced Thinning Method, ESTM)对数据资料进行稀疏化处理,生成符合条件的超级观测(Super Observation, SO)。由于本次使用的 X 波段雷达的有效观测距离为 44.5 km,远小于 S 波段雷达 197.5 km 的有效观测距离,因此在进行数据稀疏化时,需根据不同雷达的最大观测范围调整剔除中心区域的范围。处理的过程如下:

- (1)剔除距离 S 波段雷达中心 10 km 以内、X 波段雷达中心 2.25 km 以内且风速小于 4 m/s 的所有观测值;
- (2)将每个方位角方向的扫描范围在径向方向上划分为多个长度为 5 km 的区间(bin);
- (3)剔除观测数目小于 4 的 bin;
- (4)计算 bin 内观测的标准差,且剔除 bin 内超出网格空间平均值偏差 2 倍标准差的观测值;
- (5)计算 bin 内剩余观测的平均值;
- (6)将平均值垂直投影至分辨率为 5 km×5 km 的水平网格中,选取最接近网格中所有数据中位数的观测值作为此网格的 SO。

如图 1(b)和 1(c)所示,ESTM 提供了均匀分布于水平网格上的 S 波段雷达和 X 波段雷达观测资料。

此外,在本研究中,苏拉的路径和强度信息来源于中国气象局公开的最佳路径数据集^[49-50],同化的初始和边界条件为 2023 年 9 月 1 日 0 时(UTC),时空分辨率为 6 h 和 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的全球预报系统(Global Forecast

System,GFS)数据提供。本试验中对于暖心的计算方法类似于 Ge 等^[51]的研究,选取距离 TC 中心 600~700 km 范围内每一层的位温平均值作为该层的平均环境位温,并根据环境位温计算 TC 的位温距平。



(a)绿色方块为 S 波段雷达,编号 Z9755,紫色三角为 X 波段雷达,编号 ZG041,扫描覆盖范围为虚线,苏拉的最佳路径为黑色实线,红点表示资料同化时刻;(b)X 波段雷达第三层仰角径向速度稀疏化结果,黑点代表台风位置;(c)同(b),但为 S 波段雷达的结果;(d)蓝线和黄线分别代表 Z9755 和 ZG041,阴影代表对应高度范围内 25%和 75%百分位数。(a) Green square represents the S-band Doppler Radar NO: Z9755, purple triangle represents the X-band Phased Array Radar NO: ZG041, dashed lines represent the scanning coverage areas of corresponding radars, black line represent the track of Saola, and the red dot indicates the position where DA initiated;(b) Radial wind velocities at the 3rd elevation of X-band Phased Array Radar after sparsening processing, Black dot represents the position of Saola;(c) Same as (b), but for the S-band Doppler Radar;(d) Blue line represents Z9755, yellow line represents ZG041, Shades represent the 25% and 75% within the corresponding altitude ranges.)

图 1 广东 S 波段雷达、X 波段雷达的其扫描覆盖范围、雷达资料稀疏化结果、不同高度的径向速度中位数与苏拉最佳路径示意图

Fig. 1 Scanning coverage areas, radial wind velocities after sparsening processing, and the median velocities at different heights of S-band Doppler radar and X-band Phased Array Radar, as well as the track of TC Saola

1.3 模式与同化试验设计

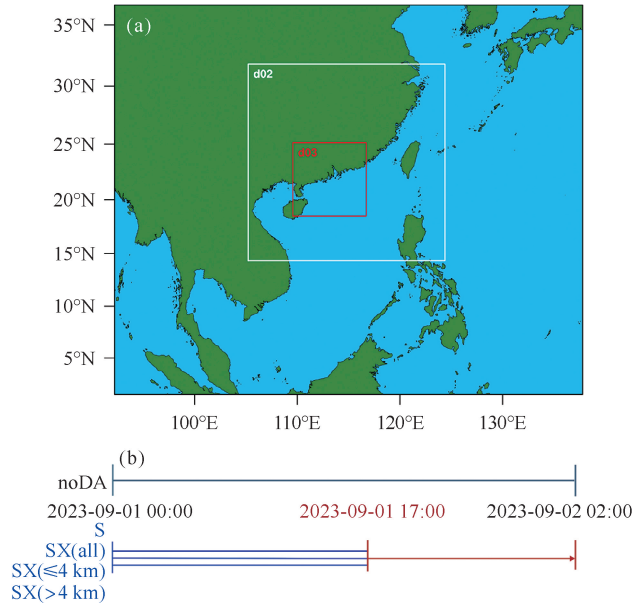
本研究采用中国气象科学研究院 TRANS 系统^[18],该系统采用三层双向嵌套 WRF 模式(见图 2(a))。其中 d01-d03 格点数分别为 120×100 、 151×151 和 169×169 ,网格间距依次为 40.5、13.5 和 4.5 km,垂直分层 43 层,模式顶高 50 hPa。本研究的初始与边界条件由时空分辨率为 6 h、 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的 GFS 数据驱动。数值模式将在 d01 使用 Kain-Fritsch 积云参数方案^[52],并在 d01、d02 和 d03 中使用 WSM6 微物理参数化方案^[53]、Noah 陆气相互作用模型^[54]和 YSU 边界层参数化方案^[55]。

TRANS 系统采用集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)方案,该方案专为区域尺度 DA 研究开发^[13],适用于本案例研究。本研究的 DA 试验时间轴见图 2(b),其中,60 个初始集合成员和边界条件由 WRFDA-3DVAR 的背景误差协方差扰动生成,集合成员的扰动变量包括气压、水平风速(u, v)、位温

及比湿。本研究参考 Feng 等^[13]的研究,在 d02、d03 网格同化雷达径向风资料,并在完成同化后启动 9 h 确定性预报。在同化阶段,首先在 d02 同化 20% 雷达径向风资料,随后在 d03 网格内同化剩余 80% 的资料,以确保 d02 和 d03 的同化分析场最大限度一致;垂直影响半径设为 4 个垂直模式层,以避免高低层数据相互干扰。在预报阶段,d02、d03 网格跟随 TC 位置实时移动,以提升 TC 结构模拟精细度。

根据图 1(d),X 波段雷达的径向风数据较 S 波段雷达数据具有更高的中位数和离散度特征,且 4 km 以下高度观测的径向风速度显著强于 4 km 以上区域。基于此差异,本研究设计了一组未同化任何资料的 noDA 试验及四组 DA 试验。其中 S 试验仅同化 S 波段雷达数据,其余三组试验则在同化 S 波段雷达径向风的基础上,进一步同化所有高度 X 波段雷达径向风数据(SX(all))、4 km 及以下高度 X 波段雷达径向风数据(SX(≤ 4 km))及 4 km 以上高度 X 波段雷达径向风

数据(SX(>4 km))。除同化资料的不同外,所有试验的其他设置均完全一致。



(a) WRF 模型网格配置, (b) DA 试验时间轴设置。图中的三条蓝色平行线表示 DA 开始前的调整适应 (spin up) 过程, 从左至右第一条红色垂直线段表示进行 DA 的时刻, 红色箭头表示 DA 完成后的确定性预报。(a) WRF domain configuration; (b) Schematic flowchart for the DA and noDA experiments. The three blue parallel arrows represent ensemble spin up before the DA cycle. The three blue parallel lines represent ensemble spin up before the DA cycle, the first red vertical line represents the DA process, and the red horizontal line represents the deterministic forecast after the DA process.)

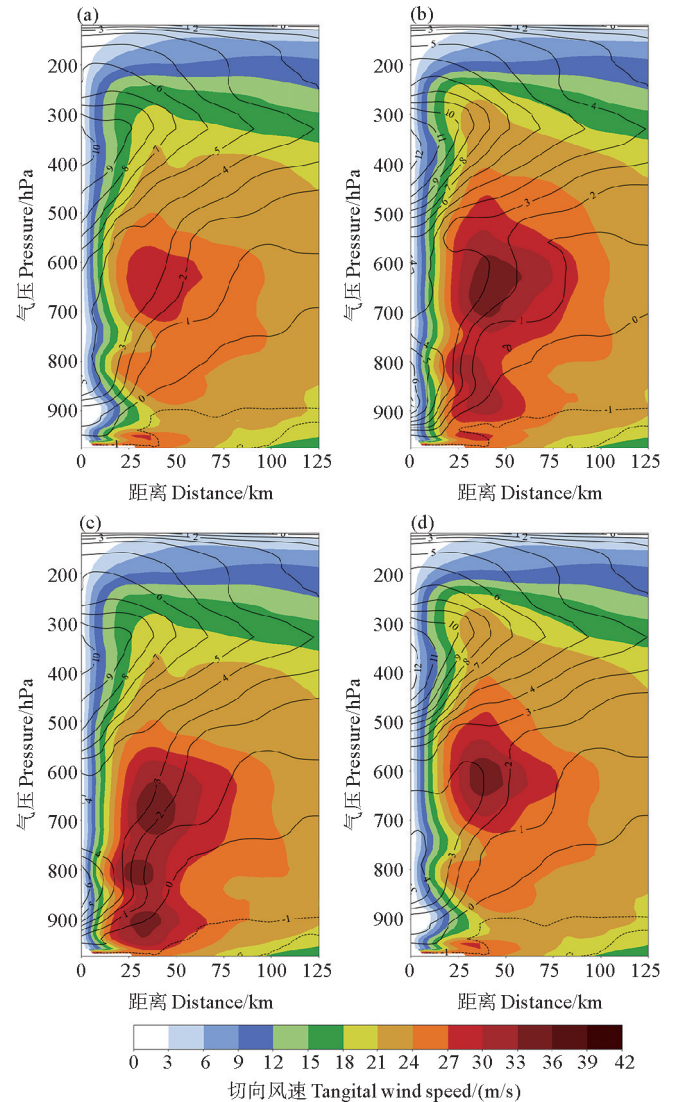
图2 数值预报模式及试验时间轴

Fig. 2 Numerical forecasting model domain configuration and schematic flowchart for different experiments

2 同化分析结果

本研究通过对比多组同化试验的结果, 阐明在同化 S 波段雷达径向风数据的基础上, X 波段雷达径向风数据同化对 TC 分析场的影响, 并对比不同高度 X 波段雷达径向风数据对 TC 不同气象要素的影响差异。如图 3 所示, 在 SX(all) 中, 空间平均切向风速大于 27 m/s 的覆盖范围相较 S 试验明显增大, 且最大切向速度增强了 6 m/s; 同时, 该试验中位于 500 hPa 高度以上的位温距平超过 12 K, 较 S 试验同高度位温距平更高。SX(≤ 4 km) 的切向风速增强幅度在 900~700 hPa 高度范围内显著大于 SX(all), 并在 850 hPa 等压面上形成了与 SX(all) 具有相似空间尺度和强度的位势高度负增量区; 在同化 S 波段径向风数据的基础上, 该负增量可达 71.59 gpm, 接近于 SX(all) 中 68.56 gpm 的结果

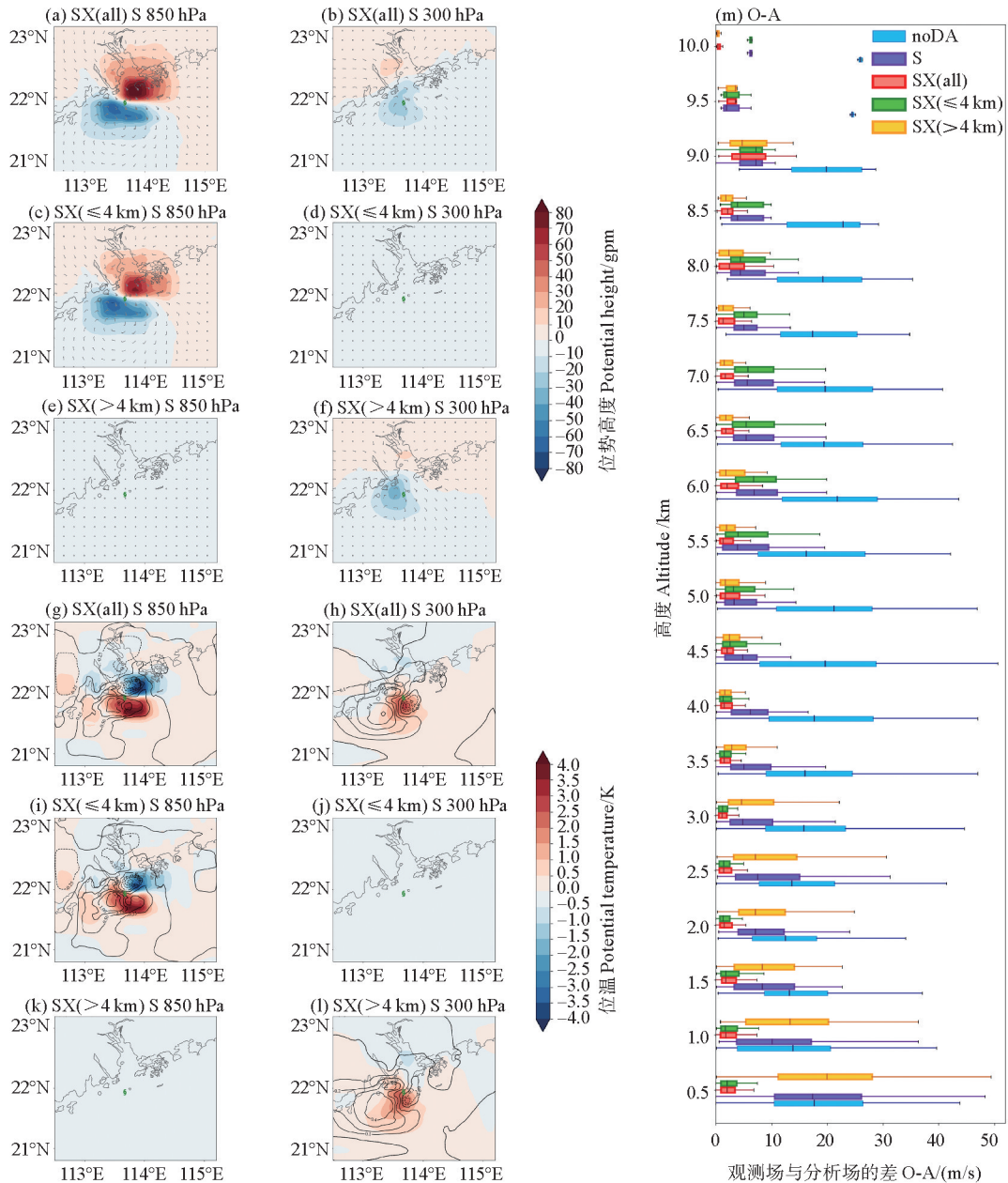
(见图 4)。就位温而言, 图 3(c) 中 SX(≤ 4 km) 与 SX(all) 在 900~700 hPa 的等温线形态及密度分布高度吻合(见图 3(b)), 两者在该区域的位温距平均超过 6 K, 且均在 TC 南侧展现出现达到 4.2 K 和 1.6 g/kg 的位温与比湿正增量(见图 4)。



(等值线代表方位角方向平均位温距平, 单位为 K; 填色图代表切向风速, 单位为 m/s; 正值表示逆时针方向, 负值表示顺时针方向); Panels (a), (b), (c) and (d) correspond to S, SX(all), SX(≤ 4 km), and SX(> 4 km), respectively.)

图3 不同试验在 2023 年 9 月 1 日 17 时 (UTC) 的平均水平切向速度和位温距平图

Fig. 3 Averaged potential temperature anomaly and averaged tangential horizontal wind in different DA experiments at 17:00 UTC 1 September, 2023



((a, b, g, h) SX(all)、(c, d, i, j) SX(≤ 4 km)和(e, f, k, l) SX(> 4 km)的对应结果,其中,(a, c, e)和(b, d, f)分别为 850 和 300 hPa 处的增量,填色和风向标分别代表位势高度(gpm)和水平风(短线代表 2 m/s);(g, i, k)中的填色和等值线为 850 hPa 处的位温(K)和比湿(0.25 g/kg),且等值线虚线代表负值;(h, j, l)中的填色和等值线为 300 hPa 处的位温(K)和比湿(0.1 g/kg),且等值线虚线代表负值;(m)中的蓝色、紫色、红色、绿色和黄色分别代表 noDA、S、SX(all)、SX(≤ 4 km)及 SX(> 4 km)。Results of (a, b, g, h) SX(all), (c, d, i, j) SX(≤ 4 km), and (e, f, k, l) SX(> 4 km), (a, c, e) and (b, d, f) display the increments of geopotential height (shades, gpm) and horizontal wind (barbs; short barb represents 2 m/s) at 850 hPa and 300 hPa, respectively; (g, i, k) represent the increments of potential temperature (shades) and specific humidity (contours, dashed lines; negative increments, solid lines; non-negative increments, contour interval 0.25 g/kg), and (h, j, l) display the the increments of potential temperature (shades) and specific humidity (contours, dashed lines; negative increments, solid lines; non-negative increments, contour interval 0.1 g/kg); Boxes with blue, purple, red, green and yellow represent results of noDA, S, SX(all), SX(≤ 4 km) and SX(> 4 km), respectively.)

图 4 SX(all)、SX(≤ 4 km)和 SX(> 4 km)的分析场相较试验 S 分析场的增量以及不同试验中 X 波段雷达获取的观测场-分析场(O-A)的盒须图

Fig. 4 Increments of SX(all), SX(≤ 4 km), SX(> 4 km) relative to S,

and box plot of the difference between speed observed by X-band Phased Array Radar and analysis speed (O-A)

对 TC 高层而言,SX(> 4 km)与 SX(all)对径向风速的增强效应在 600 hPa 以上高度趋于一致(见图 3),且 SX(> 4 km)在 300 hPa 的高度上于 TC 西侧产生高达 31.32 gpm 的位势高度负增量,较 SX(all)对应的

负增量强约 10 gpm(见图 4)。SX(> 4 km)与 SX(all)在 600 hPa 以上暖心结构改进特征相似,距 TC 中心 100 km 范围内位温距平均超过 12 K;上述两个试验在 300 hPa 处 TC 西侧均形成比湿正增量,并均在 TC

南侧具有最大可达 6.8 K 的位温正增量,且 SX(all)的增量显著高于 SX(> 4 km)中的对应结果,表明在 300 hPa 的等压面高度中, SX(all)和 SX(> 4 km)在试验 S 的基础上进一步增强了暖心强度,且 SX(all)对暖心强度的增强效果较 SX(> 4 km)更显著。

根据图 4(m), S 试验中观测场-分析场差异(O-A)强于 SX(all),说明后者的模拟出的 TC 分析场更接近真实观测结果。SX(≤ 4 km)在低于 4 km 高度层的 O-A 接近 SX(all)中对应高度层的结果,而 SX(> 4 km)在高于 4 km 高度层的 O-A 结果与对应高度层 SX(all)的结果相当。以上特征表明,在同化 S 波段雷达数据的基础上,同化 X 波段雷达径向风进一步减少了观测场和分析场的差异;其中,高度低于 4 km 的 X 波段雷达径向风数据主导减弱 900~700 hPa 范围内分析场和观测场的差异,高度高于 4 km 的 X 波段雷达径向风数据主导减弱 600 hPa 以上高度层次的差异,但该观测数据对分析场的修正效果相较低层数据偏弱。这是由于 S 波段雷达在中高层的径向速度覆盖度优于低层,因此在其基础上同化 X 波段雷达数据对分析场的进一步改

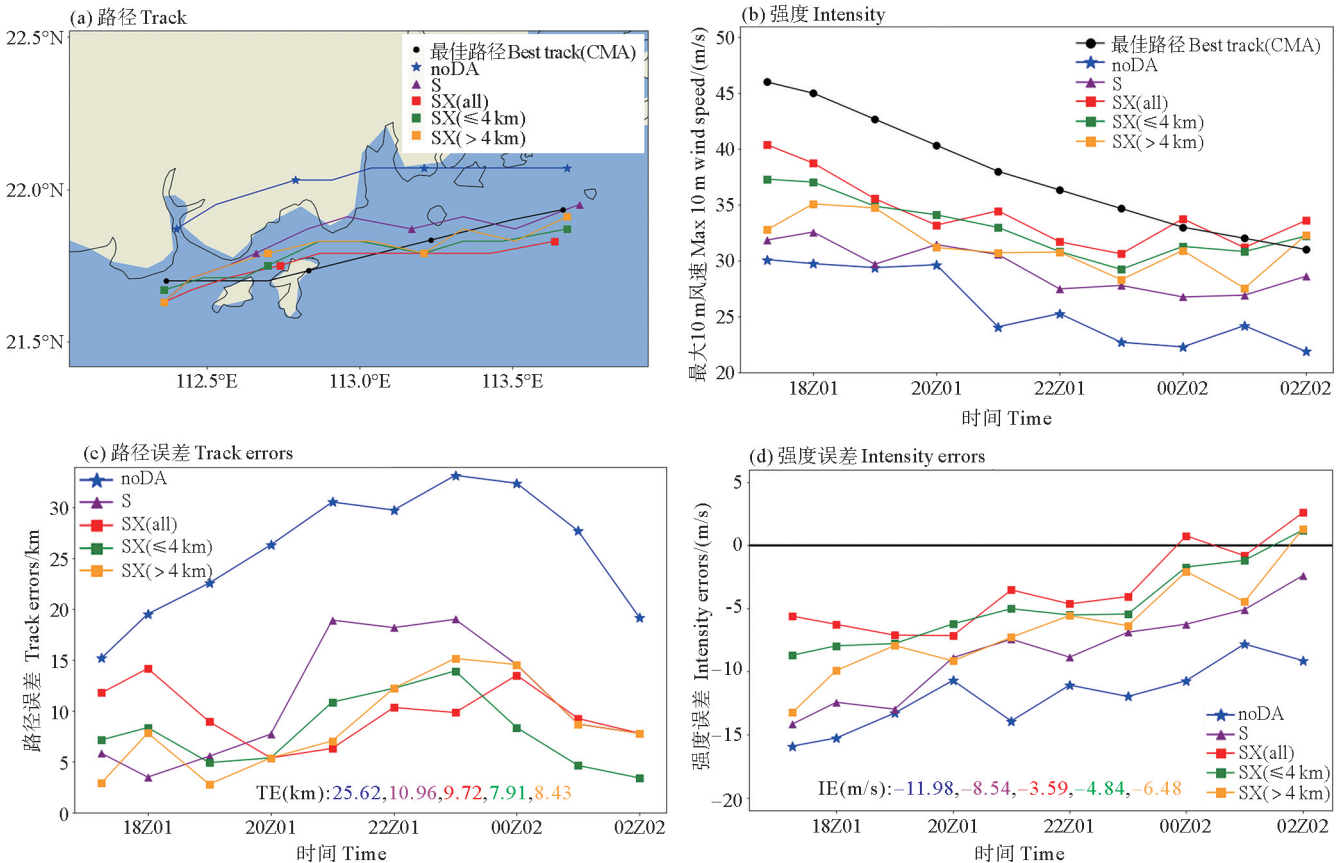
进更多体现在低层。可见,对不同高度分析场的进一步改进取决于同化 X 波段雷达径向风数据所在的海拔高度。

综上所述,在同化 S 波段雷达数据的基础上,进一步同化 X 波段雷达径向风数据可增强 TC 分析场内的切向风,其中 850 hPa 等压面处的切向风增强幅度整体高于 300 hPa 高度中的对应结果。高度位于 4 km 以下的 X 波段雷达径向风数据增强了分析场内 900~700 hPa 范围内的 TC 中低层水平风速并降低了该范围内位势高度,同时减少了低层分析场与观测场之间的差异;高度在 4 km 以上的 X 波段雷达高层径向风数据主要增强分析场中高于 600 hPa 的水平风速及位温降低范围的位势高度,且减少了高层分析场与观测场之间的差异。

3 同化预报结果

3.1 路径和强度

图 5 展示了不同试验中模拟的 TC 路径与强度结果。试验结果显示, S 试验于预报初始时刻的 TC 路径误差



((a)路径,图中的点分别代表苏拉观测和模拟试验中每3h的所在位置、(b)最大10m风速、(c)路径误差及(d)强度误差;(c)和(d)位于图片底部的数值为noDA(蓝色)、S(紫色)、SX(all)(红色)、SX(≤ 4 km)(绿色)及SX(> 4 km)(黄色)的平均TE和平均IE。(a) Track, dots denote the 3-hourly positions of Saola in both observational data and simulation experiments, (b) Maximum 10 m wind speed (MWS), (c) Track error (TE) and (d) Intensity error (IE); The numerical values at the bottom of the figure (c) and (d) represent the mean TE and mean IE for experiments noDA (blue), S (purple), SX(all) (red), SX(≤ 4 km) (green), and SX(> 4 km) (yellow).)

图5 不同同化试验中苏拉的路径、强度及其误差

Fig. 5 Track, intensity and corresponding errors in different experiments

(Track error, TE) 和该试验相较 noDA 试验的平均 TE 减少量分别为 5.8 和 14.6 km, 较 noDA 试验显著改进了 TC 的路径预报。可见, 同化 S 波段雷达径向风数据后 TC 的初始位置更接近观测结果, 从而在确定性预报中降低了 TC 的平均 TE。在同化 S 波段雷达数据的基础上同化 XPAR 数据进一步减少 TC 的平均 TE, 其中, SX(all) 的平均 TE 减少量为 15.9 km, 且 SX(≤ 4 km) 中平均 TE 的改进程度高于 SX(all) 及 SX(> 4 km)。但由于 d03 网格分辨率为 4.5 km, 各同化 X 波段雷达数据试验得出的平均 TE 差异均在 0~4.5 km 范围内, 因此认为在 S 波段雷达径向风同化的基础上, 同化 X 波段雷达径向风数据对路径预报准确性的提升有限, 且同化不同高度 X 波段雷达径向风对路径预报的改进效果相当。

对强度而言, 与 S 试验相比, SX(all) 的平均强度误差(Intensity error, IE) 进一步减小了 4.9 m/s, 说明在 S 波段雷达径向风同化的基础上同化 X 波段雷达径向风数据可进一步提升 TC 强度的预报技巧。SX(≤ 4 km) 在 2023 年 9 月 1 日 17 时 15 分(UTC) 的 10 m 最大风速(Maximum 10 m Wind Speed, MWS) 与 SX(all) 的差异仅为 3.1 m/s, 为 SX(> 4 km) 对应差异的 40.5%。随着预报时间延长, 不同试验强度模拟结果逐渐趋于一致, 但 SX(≤ 4 km) 在 9 月 1 日 20 时、21 时、23 时(UTC) 及 9 月 2 日 1 时(UTC) 对 TC 强度的预报更接近 SX(all), 其 IE 与 SX(all) 的差异均小于等于 1.2 m/s, 说明 SX(≤ 4 km) 与 SX(all) 在强度预报改进上具有相近的能力。可见, 联合同化 S 波段雷达径向风及 4 km 高度以下的 X 波段雷达径向风数据对 TC 路径和强度预测技巧具有显著改进, 该改进主要源于其对分析场内低层风速的增强和对 TC 位置的修正(见图 4), 从而使确定性预报结果更接近同化全部 X 波段雷达径向风数据的结果。相比之下, 尽管同化海拔 4 km 以上的 X 波段雷达径向风增强了分析场中 TC 高层风速, 并在一定程度上修正了 TC 的位置, 但其对 TC 强度的贡献明显低于 X 波段雷达位于 4 km 以下径向风数据的贡献。

3.2 台风结构

在预报中后期阶段, SX(all)、SX(≤ 4 km) 以及 SX(> 4 km) 相较 S 试验中模拟出更低的 TC 海平面气压, 并在 TC 西侧和南侧模拟出更强的水平风速, 其 10 m 风速最大值均高于 30.0 m/s; 同时, SX(all)、SX(≤ 4 km) 及 SX(> 4 km) 于 TC 北侧模拟出的水平风速同样得到增强, 其相较 S 试验增幅均超过 3.0 m/s, 且保留了 noDA 和 S 试验中 TC 位于海平面风场的不对称性(见图 6(a)—6(e))。此现象可能由两方面原因造成: 一是同化 X 波段径向风数据后, SX(all)、SX(≤ 4 km) 及

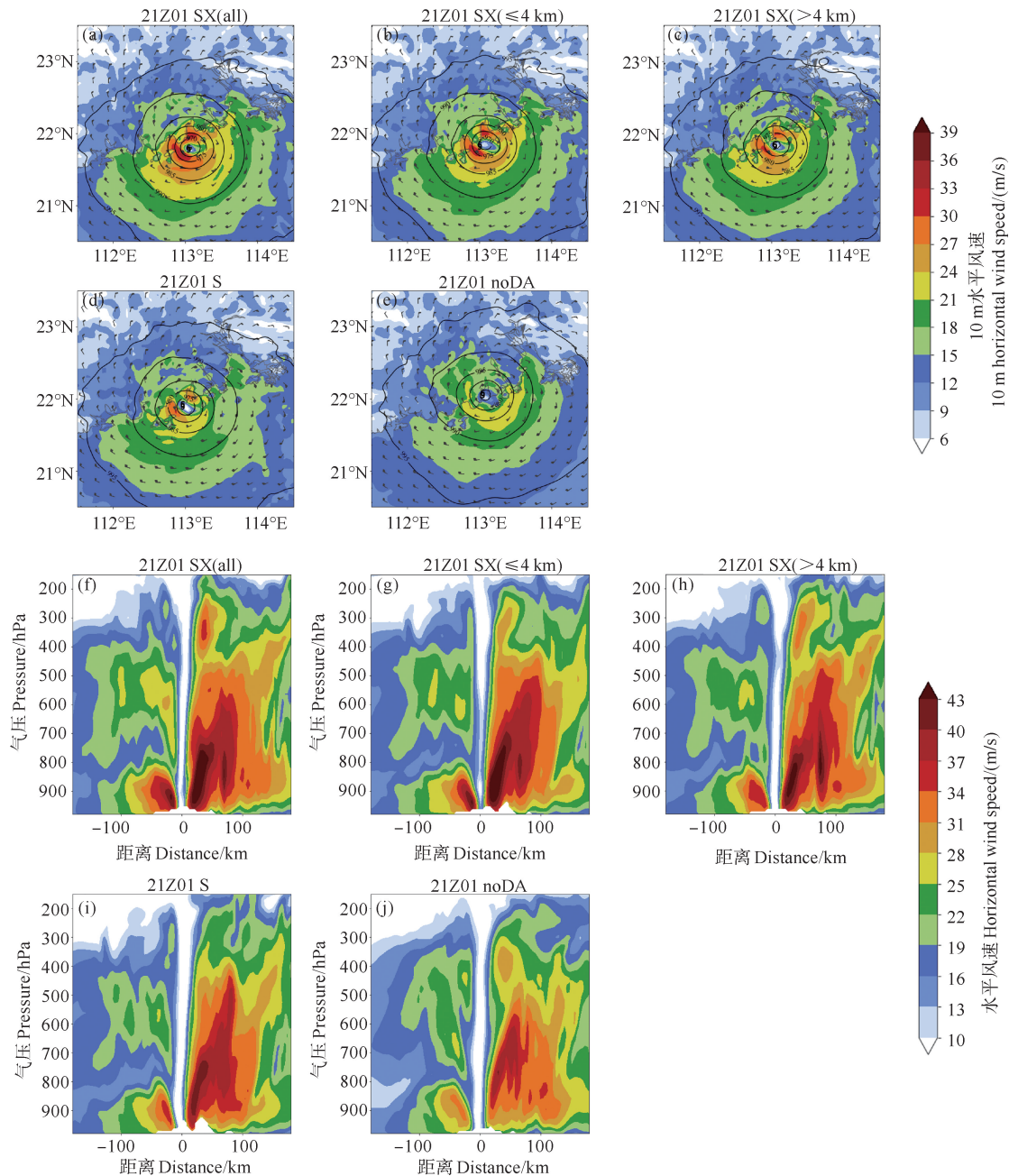
SX(> 4 km) 中模拟的 TC 位置进一步南移(见图 5(a)), TC 相较 S 试验中的结果所受的陆地摩擦更弱^[56], 因此在其南侧具有更大的风速增强; 二是 TC 西侧在同化时更接近 X 波段雷达, 相较 TC 东侧具有更多观测资料(见图 1(b)), 导致 TC 西侧具有更大的风速增强。具体而言, SX(all) 与 SX(≤ 4 km) 中对 TC 中心西南侧及北侧的风场模拟结果高度相似, 且上述两个试验中海平面气压低于 970 hPa 的覆盖范围接近, 说明二者对气压场及风场的增强效果相当; 而 SX(> 4 km) 虽扩展了水平风速高于 24.0 m/s 区域的覆盖范围, 但其西南侧 10 m 水平风速超过 30.0 m/s 的区域的覆盖范围小于 SX(all) 与 SX(≤ 4 km) 中的对应结果, 这与 SX(all) 中模拟的结果存在显著差异。此外, SX(> 4 km) 的最大 10 m 风速为 30.7 m/s, 与 SX(all) 的差异为 3.8 m/s, 说明在该时刻其对 10 m 风速的增强效果无法与 SX(all) 等效。

SX(all)、SX(≤ 4 km) 及 SX(> 4 km) 同样增强了苏拉北侧及南侧的整层水平风速, 且模拟出了 TC 整层的不对称性(见图 6(f)—6(j))。其中 SX(≤ 4 km) 对 700 hPa 以下高度水平风速的增强效果相较 SX(> 4 km) 更接近 SX(all) 中的结果, 显示出 SX(≤ 4 km) 和 SX(all) 对中低层风速预报的等效性。虽然 SX(> 4 km) 在 300 hPa 及以上高度位于 TC 北侧的水平风速模拟强于 SX(≤ 4 km) 中的结果, 但二者最大速度间的差异小于 1.5 m/s, 可见 SX(> 4 km) 和 SX(≤ 4 km) 对高层模拟的结果接近。上述试验结果表明, 针对苏拉动力场的改进, 在同化 S 波段雷达径向风的基础上, 虽然同化高度位于 4 km 以上的 X 波段雷达径向风数据存在一定贡献, 但仅同化 X 波段雷达位于 4 km 以下高度的径向风数据即可达到同化全部高度 X 波段雷达资料的效果。

在确定性预报初期, 即 17~18 时(UTC), SX(all)、SX(≤ 4 km) 及 SX(> 4 km) 较 S 试验显著增强了 TC 在各层的最大水平风速(见图 7)。在 925 hPa 及以下高度的等压面中, SX(≤ 4 km) 模拟的最大水平风速始终高于 SX(> 4 km), 并与 SX(all) 对应区域结果吻合, 表明该层次风速增强主要受 X 波段雷达位于 4 km 以下高度的径向风速资料影响。自 17 时(UTC) 起, SX(> 4 km) 在 450 hPa 以上高度的等压面中模拟出更接近 SX(all) 的更强水平风速, 并在 17 时 45 分(UTC) 后, 使 850 hPa 及以上高度的水平风速增强效果更接近 SX(all)。然而, 随着确定性预报的进行, 该试验中位于 850 hPa 及以上高度的水平风速增强效果自低层至高层逐渐减弱。SX(≤ 4 km) 于 18 时 45 分(UTC) 起在 850 hPa 以下高度的水平风速强于 SX(> 4 km), 且更接近 SX(all) 中的结果(见图 7(b)); 该试验于 20 时(UTC) 在 700 hPa 以下高度的等压面内具有更强的水

平风速,并分别在 21 时 30 分 (UTC) 及次日 0 时 (UTC) 起,在 500 及 200 hPa 以下高度的等压面中模拟出相较于 SX(>4 km) 的结果更接近 SX(all) 中的水平风速。上述结果表明,4 km 以下的 X 波段雷达径向风同化主要影响低层水平风速的增强;而同化 4 km 以上的 X 波段雷达径向风自确定性预报启动的 1 h 后主

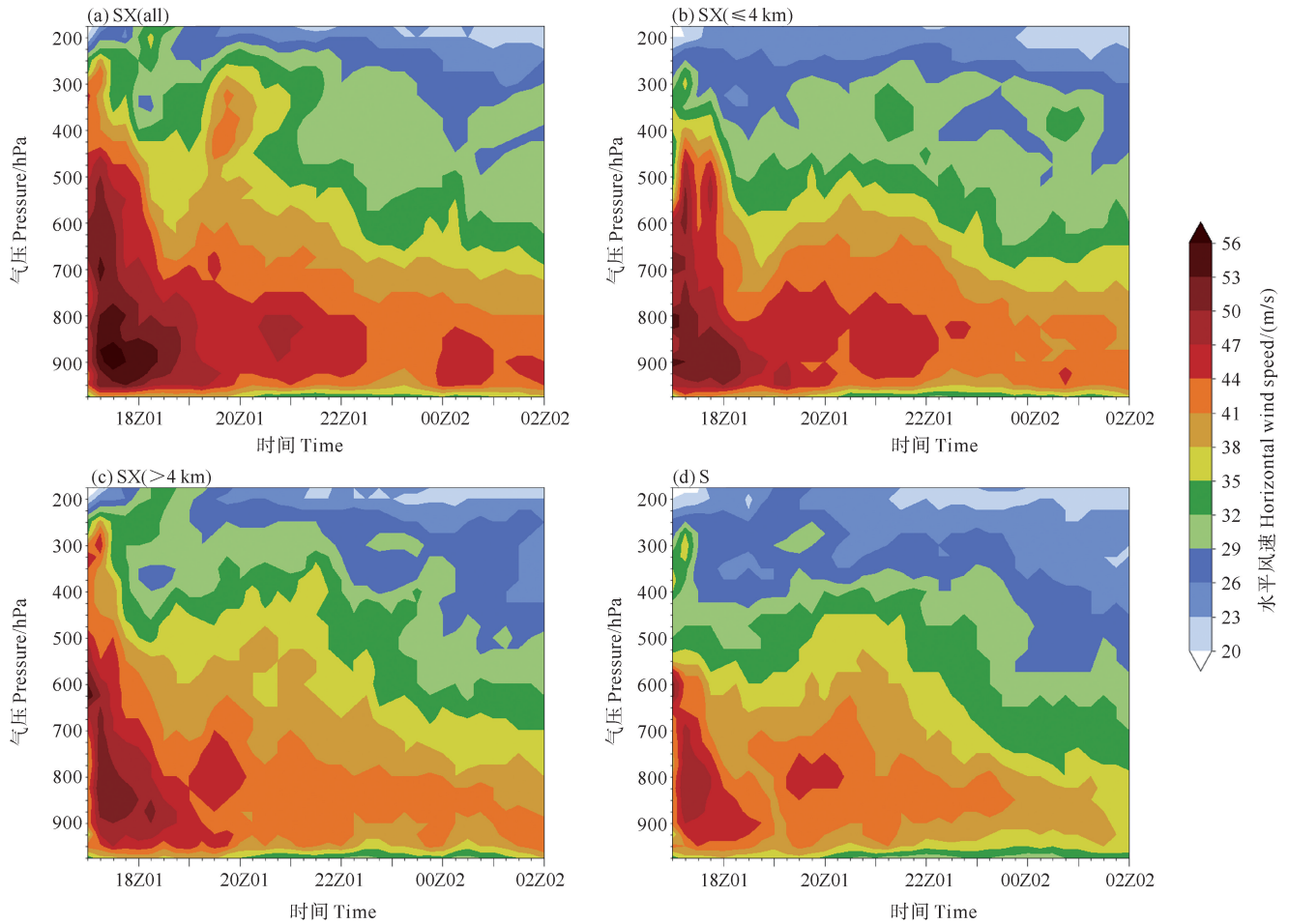
导中高层风速的增强,但随着预数值模式的积分,较弱的低层风速使得中高层风速增强无法长期维持,进而导致该类数据对 TC 中高层风速的增强效果逐渐减弱。在确定性预报后期,同化 4 km 以下的 X 波段雷达径向风数据可使水平风速的预报结果更接近同化全部 X 波段雷达径向风的结果。



((a, f) SX(all), (b, g) SX(≤ 4 km), (c, h) SX(> 4 km), (d, i) S 和 (e, j) noDA 试验的结果; (a—e) 中的等值线为海平面气压场 (hPa); 填色和风向标代表 10 m 水平风速 (m/s), 风向标的短线代表 2 m/s, 黑点代表对应试验模拟出的 TC 位置; (f—j) 中的填色表示水平风速 (m/s), 剖面图横轴的正值和负值分别代表经 TC 中心以南和以北的距离。Results from (a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(> 4 km), (d) S and (e) noDA experiment; Contours represent sea level pressure (hPa) in (a—e), while the shades and barbs represent the 10 m horizontal wind velocity (m/s, each short line of barbs represents 2 m/s) and the black dot represents the simulated position of Saola in corresponding experiments. Shades in (f—j) represents the horizontal wind speed (m/s) and the negative (positive) values on the horizontal axis represent the distance to the south (north) of TC center.)

图 6 2023 年 9 月 1 日 21 时 (UTC) 不同试验的海平面气压场、10 m 水平风场以及经 TC 中心的水平风速剖面图

Fig. 6 Sea level pressure with 10 m horizontal winds, along with vertical cross sections of the analyzed horizontal wind speed across the simulated TC center in different DA experiments at 21:00 UTC 1 September, 2023



((a) SX(all)、(b) SX(≤ 4 km)、(c) SX(> 4 km)、(d) S 试验中的结果。Results in (a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(> 4 km), and (d) S experiments.)

图 7 不同试验中最大水平风速随时间和气压的变化情况

Fig. 7 Variations of the maximum horizontal wind speed with time and pressure in different DA experiments

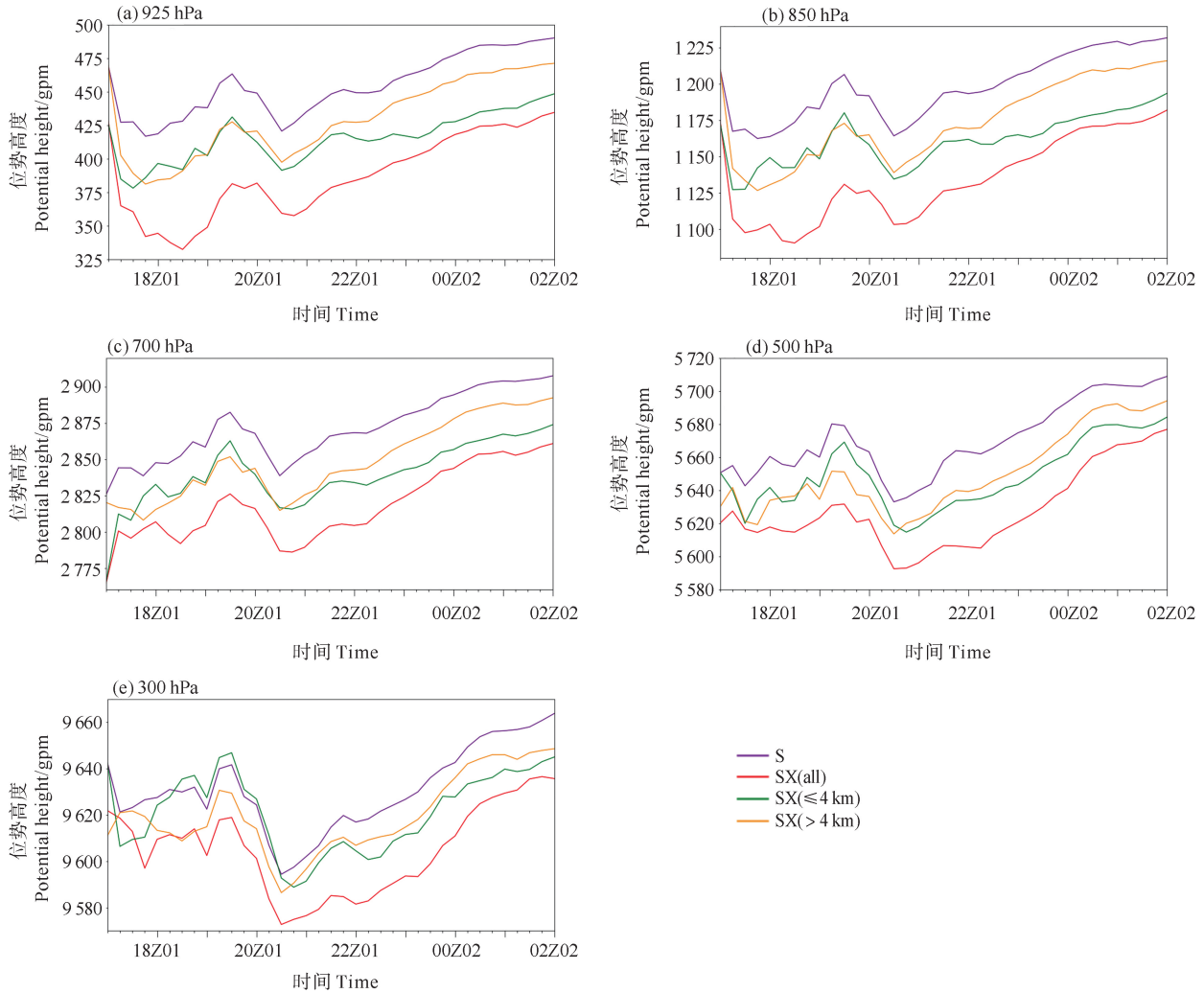
与图 7 中描述的最大水平风速演变趋势类似, SX(all)、SX(≤ 4 km) 及 SX(> 4 km) 较 S 试验模拟出了不同等压面中更低的 TC 最小位势高度(见图 8)。其中, SX(all) 和 SX(≤ 4 km) 在 17 时 30 分(UTC) 前于确定性预报结果中各等压面内最小位势高度显著降低; SX(> 4 km) 对最小位势高度的降低自确定性预报启动 45 min 后显现, 该试验中 500 hPa 及以下高度等压面上的最小位势高度于 17 时 45 分(UTC) 低于 SX(≤ 4 km) 中的对应结果, 且至 18 时(UTC) 在 300 hPa 及以下高度等压面中模拟出了更低的最小位势高度。自 19 时(UTC) 起, SX(> 4 km) 在 925、850 及 700 hPa 等压面中模拟的最小位势高度与 SX(≤ 4 km) 结果的平均差异减小至 5 gpm 以内, 且在 20 时(UTC) 后, SX(≤ 4 km) 在上述等压面中的最小位势高度低于 SX(> 4 km) 中的结果; 在 500 及 300 hPa 高度的等压面上, SX(> 4 km) 较低的最小位势高度维持至 20 时 15 分(UTC), 自 20 时 30 分(UTC) 起, SX(≤ 4 km) 在 925~300 hPa 等压面上具有相较 SX(> 4 km) 对应结果更低、且更接近 SX(all) 的最小位势高度(见图 7)。在次日 0 时(UTC), SX(≤ 4 km) 与 SX(all) 在 925、850、700 hPa 等压面上的模拟最小位势高

度差分别为 9.5、9.1 及 13.0 gpm, 仅为 SX(> 4 km) 对应差异的 23.97%、23.92% 和 38.05%, 说明 SX(≤ 4 km) 与 SX(all) 在增强中低层 TC 气压场强度方面具有等效性。上述结果显示, 在预报初期, 海拔 4 km 以上的 X 波段雷达径向风数据对增强 TC 气压场的强度具有更大影响; 随着确定性预报的进行, 高度 4 km 以下的 X 波段雷达径向风对 TC 气压的影响逐渐增大。在确定性预报启动 3 h 后, X 波段雷达高度 4 km 以下的数据对增强 TC 气压场强度显现出主要影响, 且对中低层 TC 气压的影响与全部高度的 X 波段雷达径向风资料相当。

相比仅 S 试验, 在此基础上进一步同化 X 波段雷达径向风的试验在确定性预报初期显著增强了 TC 的暖心强度(见图 9), 该现象与图 3 中的结果一致。SX(> 4 km) 与 SX(all) 于 17 时(UTC) 至 18 时(UTC) 在 500 hPa 以上最大位温距平均超过 15 K, 强于对应时间段内 SX(≤ 4 km) 中 12 K 的最大位温距平。随着预报时效延长, SX(> 4 km) 模拟的暖心强度自 18 时 30 分(UTC) 起与 SX(≤ 4 km) 结果的差异逐渐减小, 且二者的位温距平差异均在 1 K 以内; 其中, SX(> 4 km) 试验在

20 时(UTC)位于 500 hPa 以上高度的位温距平减弱至 8 K, 低于 SX(≤ 4 km)中的结果; 在 22 时(UTC), SX(>4 km)与 SX(≤ 4 km)模拟出了相同的位温距平, 表明二者在此时刻的暖心强度一致; 在次日 0 时, SX(≤ 4 km)在 500 hPa 以上的高度模拟出了相较 SX(>4 km)强度更高, 且更接近 SX(all)结果的 TC 暖心。可见, 不同高度的 X 波段雷达径向风数据对暖

心强度的贡献与预报时间关系密切, 在确定性预报初期, 4 km 以上 X 波段雷达径向风对暖心强度具有较大影响; 随着预报推进, 暖心强度受 4 km 以上 X 波段雷达径向风的影响减弱, 而受 4 km 以下 X 波段雷达径向风的影响加强, 直至预报中期, 4 km 以上及以下的 X 波段雷达径向风对增强 TC 暖心强度具有相同程度的影响。



((a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(>4 km), (d) S 试验中的结果。Results in (a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(>4 km), and (d) S experiments.)

图 8 2023 年 9 月 1 日 17 时至 2 日 02 时(UTC)不同试验的的最小位势高度图

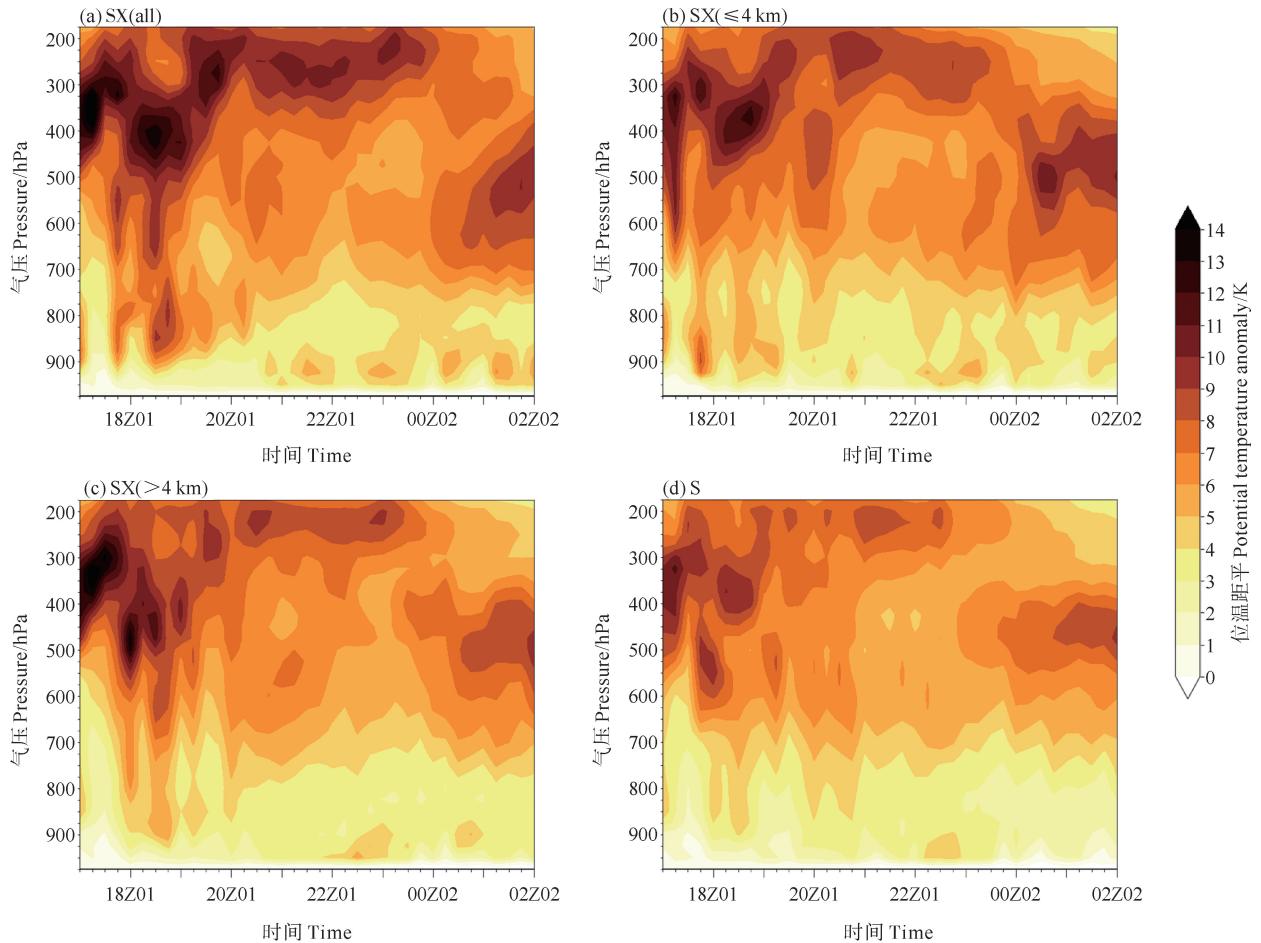
Fig. 8 Minimum geopotential height from 17 UTC 1 September, 2023 to 02 UTC 2 September, 2023 from different DA experiments

图 7 和图 8 中最大风速和最小位势高度的变化趋势可由图 9 中 TC 暖心强度的变化趋势解释。同化高度位于 4 km 以下的 X 波段雷达径向风虽然在分析场中增强了 600 hPa 以下的位温(见图 3), 但该位温增强在确定性预报启动后快速耗散(见图 9(b)), 说明在确定性预报前期, 该类型数据主要通过动力过程直接影响 TC 底层的气压场和风场。在预报启动后, 同化高度位于 4 km 以上的 X 波段雷达径向风的试验维持了分

析场中 500 hPa 以上高度中较强的暖心, 驱使 TC 气压场和风场于 17 时 45 分(UTC)增强, 说明同化高度位于 4 km 以上的 X 波段雷达径向风首先增强了 TC 的暖心强度(见图 3、图 9), 随后通过静力平衡作用加强了 TC 的气压场^[35-36, 57], 进而增强了 TC 位于 850 hPa 及以上高度的水平风场。随着确定性预报的进行, 由于低层数据的空缺造成高空无法维系较强的暖心^[25, 57-59], 该试验中模拟的高层暖心强度于 18 时 30 分(UTC)开始减

弱, 导致该试验自 18 时 30 分(UTC)后无法通过动力和热力过程维持高空较强的气压场和风场^[25,35,57-59]。而 4 km 以下高度的 X 波段雷达径向风数据则通过增强低层气压场及风场, 引发辐合上升, 并通过角动量的

垂直输送及水汽的潜热释放增强了 TC 高层风场、气压场及暖心的强度^[25,35,57-59], 取得了与同化全部高度 X 波段雷达径向风数据类似的结果。



((a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(> 4 km), (d) S 试验中的结果。Results in (a) SX(all), (b) SX(≤ 4 km), (c) SX(> 4 km), and (d) S experiments.)

图 9 不同实验的最大径向平均位温距平随时间和气压的变化

Fig. 9 Variations of the maximum radial averaged potential temperature anomaly with time and pressure in different DA experiments

综上所述, 针对本个例而言, 在 S 波段雷达数据同化基础上同化 X 波段雷达径向风数据可进一步提升 TC 路径和强度的预报准确性。同化位于 4 km 以下高度 X 波段雷达径向风数据对路径、强度及结构改进效果与同化全部 X 波段雷达径向风数据相当, 并优于仅同化位于 4 km 以上高度数据得出的结果。该现象源于 X 波段雷达径向风数据垂直分布特性及 EnKF 增量同化机制^[18,21]。X 波段雷达观测的 4 km 以下高度的径向风速普遍高于 4 km 以上区域的风速(见图 1), 且在同化 S 波段雷达径向风后, 进一步同化 X 波段雷达资料导致低层分析场与背景场差异显著大于高层的对应结果, 进而通过增益矩阵加权产生更强的同化增量, 驱动同化 4 km 以下高度 X 波段雷达数据试验中的模式分析场相较同化 4 km 以上高度 X 波段雷达径向风

数据的结果更接近实际观测场(见图 4(m))。此外, 在确定性预报初期, 4 km 以下高度 X 波段雷达径向风数据通过动力过程首先增强 TC 低层强度, 并通过动力及热力过程加强 TC 高层水平风场、气压场及暖心强度。4 km 以上高度 X 波段雷达径向风数据则通过加强 TC 的暖心强度, 进而增强 TC 的气压场和风场强度; 随着数值模式的积分, 在确定性预报中期, 4 km 以下高度 X 波段雷达径向风数据主要影响 TC 的风场和气压场强度, 并和 4 km 以上高度 X 波段雷达径向风数据对暖心结构强度具有相当程度的影响。

4 结论与讨论

本研究利用 EnKF 方法, 开展针对 X 波段相控阵雷达配合 S 波段多普勒天气雷达在资料同化方向的应

用性研究。本研究对2023年登陆中国的超强台风苏拉(2023)进行数值试验,通过同化S波段多普勒雷达和X波段相控阵雷达观测的径向风数据,初步讨论在同化S波段多普勒雷达资料的基础上,不同高度X波段相控阵雷达资料的同化敏感性。结果表明:同化S波段多普勒雷达径向风数据能够改进苏拉的路径和强度,而在此基础上进一步同化X波段相控阵雷达径向风数据,可使对苏拉路径和强度的改进更接近最佳路径。在同化S波段雷达径向风数据基础上,进一步同化X波段相控阵雷达径向风数据额外减少了13.7%的路径误差和58%的强度误差。敏感性试验表明,在同化S波段多普勒雷达观测径向风数据的基础上,X波段相控阵雷达位于海拔4 km以下径向风数据对苏拉中低层的气压、风、位温和比湿具有更大影响,在确定性预报中通过动力过程直接增强TC低层气压场及风场并随预报的进行,通过动力及热力过程由低层至高层逐渐增强苏拉整层的风场及气压场;而X波段相控阵雷达位于海拔4 km以上的径向风数据在预报初期主要增强苏拉的暖心,进而加强苏拉的气压场和风场,但在确定性预报启动后的105 min后,该数据对暖心的影响与4 km以下高度的X波段相控阵雷达径向风数据相当,对苏拉风场及气压场的影响因此减弱。尽管本次个例的X波段相控阵雷达观测数据在高度4 km以下占比为49%,与高度4 km以上的数据占比接近,但在完成同化S波段多普勒雷达观测资料的基础上,相较同化4 km以上高度X波段相控阵雷达径向风数据,进一步同化4 km以下高度的X波段相控阵雷达资料的同化效果更接近同化全部X波段相控阵雷达资料的结果。因此,从该个例试验来看,X波段相控阵雷达的低空补盲效果在TC预测中呈现出较为关键的辅助作用;在具有S波段雷达观测资料的前提下,仅对低空进行补盲相较对观测更多高空数据对TC预报技巧的提升更为重要。

目前,X波段相控阵雷达已应用于对天气系统的观测。本个例试验为协同同化X波段相控阵雷达和S波段多普勒雷达测得的径向风数据提供了支持,并对登陆TC的业务预报具有一定参考及指导作用。然而,由于本研究仅选用了1台S波段多普勒天气雷达及1台X波段相控阵雷达,并由于资料原因仅进行1个同化循环,后续需开展使用多台雷达的组网进行多次循环的同化试验,以对X波段相控阵雷达的低层数据补盲效果进行进一步验证。本研究得出的结论仅针对2023年的9号台风苏拉,后续还需进行批量TC个例的同化试验以得到具有普遍意义的结论。

参考文献:

- [1] Emanuel K, Zhang F. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2016, 73(9): 3739-3747.
- [2] Yamaguchi M, Ishida J, Sato H, et al. WGENE intercomparison of tropical cyclone forecasts by operational nwp models: A quarter century and beyond[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2017, 98(11): 2337-2349.
- [3] Peatman S C, Klingaman N P, Hodges K I. Tropical cyclone-related precipitation over the northwest Tropical Pacific in met office global operational forecasts[J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(4): 923-941.
- [4] Qian Q, Mao D. Evaluation of tropical cyclone track forecast performance of ECMWF and NCEP ensemble models from 2010 to 2019[J]. *Meteorological Monthly*, 2023, 49(2): 224-234.
- [5] Pu Z, Kalnay E, Derber J C, et al. Using forecast sensitivity patterns to improve future forecast skill[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1997, 123(540): 1035-1053.
- [6] Frank W M, Ritchie E A. Effects of vertical wind shear on the intensity and structure of numerically simulated hurricanes [J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(9): 2249-2269.
- [7] Wu L, Liang J, Wu C. Monsoonal influence on Typhoon Morakot (2009). Part I: Observational analysis[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2011, 68(10): 2208-2221.
- [8] Roy C, Kovordányi R. Tropical cyclone track forecasting techniques: A review[J]. *Atmospheric Research*, 2012(104-105): 40-69.
- [9] Minamide M, Zhang F. Assimilation of all-sky infrared radiances from Himawari-8 and impacts of moisture and hydrometer initialization on convection-permitting tropical cyclone prediction[J]. *Monthly Weather Review*, 2018, 146(10): 3241-3258.
- [10] Barker D, Huang X Y, Liu Z, et al. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(6): 831-843.
- [11] Wang H, Sun J, Fan S, et al. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-var and its impact on prediction of four summertime convective events[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2013, 52(4): 889-902.
- [12] Meng Z, Zhang F. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments[J]. *Monthly Weather Review*, 2007, 135: 1403-1423.
- [13] Meng Z, Zhang F. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part IV: Comparison with 3DVAR in a month-long experiment[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, 136: 3671-3682.
- [14] Snyder C, Zhang F. Assimilation of simulated doppler radar observations with an ensemble kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2003, 131(8): 1663-1677.
- [15] Zhang F, Weng Y, Sippel J A, et al. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of doppler radar observations with an ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(7): 2105-2125.
- [16] Zhu L, Wan Q, Shen X, et al. Prediction and predictability of high-impact Western Pacific landfalling tropical cyclone vicente (2012) through convection-permitting ensemble assimilation of

- Doppler Radar velocity[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, 144(1): 21-43.
- [17] Yue J, Meng Z, Yu C, et al. Impact of coastal radar observability on the forecast of the track and rainfall of Typhoon Morakot (2009) using WRF-based ensemble Kalman filter data assimilation[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(1): 66-78.
- [18] 冯佳宁. 雷达径向风资料同化对登陆台风数值预报的改进[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2022.
Feng J N. Improved Prediction of Landfalling Typhoon in China Based on Assimilation of Radar Radial Winds[D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences, 2022.
- [19] Carrassi A, Bocquet M, Bertino L, et al. Data assimilation in the geosciences: An overview of methods, issues, and perspectives [J]. *WIREs Climate Change*, 2018, 9(5): e535.
- [20] Xie B, Zhang F, Zhang Q, et al. Observing strategy and observation targeting for tropical cyclones using ensemble-based sensitivity analysis and data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(5): 1437-1453.
- [21] 冯佳宁, 端义宏, 徐晶, 等. 雷达资料同化对 2015 年台风彩虹数值模拟改进[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 399-413.
Feng J N, Duan Y H, Xu J, et al. Improving the simulation of Typhoon Mujigae (2015) based on radar data assimilation[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(4): 399-413.
- [22] Feng J, Duan Y, Sun W, et al. Sensitivity analysis of assimilating doppler radar radial winds within the inner- and outer-core regions of tropical cyclones[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2023, 128(8): e2022JD037583.
- [23] Feng J, Duan Y, Liang X, et al. QuickOSSE research on the impact of airship-borne doppler radar radial winds to predict the track and intensity of a tropical cyclone[J]. *Remote Sensing*, 2022, 15(1): 191.
- [24] 刘春霞, 容广坝. 近海突然加强台风能量场的诊断分析[J]. *热带气象学报*, 1996(2): 174-180.
Liu C X, Rong G X. Ondiagnostic analysis of energy fields of abrupt intensification of typhoon offshore[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1996(2): 174-180.
- [25] 徐亚梅, 伍荣生. 热带气旋碧丽斯(2000)发生的数值模拟非对称流的发展及转换[J]. *大气科学*, 2005, 29(1): 79-90.
XU Y M, WU R S. The Numerical simulation of the genesis of tropical cyclone bilis (2000) the evolution and transformation of asymmetric momentum[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, 29(1): 79-90.
- [26] 陈光华, 裴国庆. 对南海热带气旋近海加强机理个例模拟研究[J]. *气象学报*, 2005, 63(3): 359-364.
Chen G H, Qiu G Q. A case simulation study on offshore intensification mechanism of tropical cyclone in South China Sea[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(3): 359-364.
- [27] 黄勇, 王页桂, 蔡其发. 超强台风“梅花”急剧变化的环境特征和能量变化分析[J]. *海洋预报*, 2016, 33(6): 22-31.
Huang Y, Wang Y G, Cai Q F. Analysis on the rapid intensity change of the environment condition and energy flux driven by the super Typhoon Muifa[J]. *Marine Forecasts*, 2016, 33(6): 22-31.
- [28] Bui H H, Smith R K, Montgomery M T, et al. Balanced and unbalanced aspects of tropical cyclone intensification[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2009, 135(644): 1715-1731.
- [29] Zhang F, Tao D, Sun Y Q, et al. Dynamics and predictability of secondary eyewall formation in sheared tropical cyclones [J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017, 9(1): 89-112.
- [30] Gao K, Ginis I, Doyle J D, et al. Effect of boundary layer roll vortices on the development of an axisymmetric tropical cyclone [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74(9): 2737-2759.
- [31] Kepert J D. The boundary layer dynamics of tropical cyclone rainbands[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, 75(11): 3777-3795.
- [32] 梁莉, 崔晓鹏, 李青青. 2015 年热带气旋“彩虹”的高分辨率数值模拟与风场诊断分析[J]. *大气科学*, 2020, 44(3): 533-551.
Liang L, Cui X P, Li Q Q. High resolution numerical simulation of Tropical Cyclone Mujigae (2015) and diagnostic analysis of wind field[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2020, 44(3): 535-551.
- [33] Liang X, Li Q. Revisiting the response of western North Pacific tropical cyclone intensity change to vertical wind shear in different directions[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021, 14(3): 100041.
- [34] Wadler J B, Rudzin J E, Jaimes de la Cruz B, et al. A review of recent research progress on the effect of external influences on tropical cyclone intensity change[J]. *Tropical Cyclone Research and Review*, 2023, 12(3): 200-215.
- [35] Zhang D, Chen H. Importance of the upper-level warm core in the rapid intensification of a tropical cyclone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(2): 2011GL050578.
- [36] Xi D, Chu K, Tan Z M, et al. Characteristics of warm cores of tropical cyclones in a 25-km-mesh regional climate simulation over CORDEX East Asia domain[J]. *Climate Dynamics*, 2021, 57: 2375-2389.
- [37] 肖柳斯, 胡东明, 陈生, 等. X 波段双偏振相控阵雷达的衰减订正算法研究[J]. *气象*, 2021, 47(6): 703-716.
Xiao L S, Hu D M, Chen S, et al. Study on attenuation correction algorithm of X-Band dual-polarization phased array radar[J]. *Meteorological Monthly*, 2021, 47(6): 703-716.
- [38] Wang C, Zhao K, Zhu K, et al. Assimilation of X-band phased-array radar data with EnKF for the analysis and warning forecast of a Tornadoic storm[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2021, 13(10): e2020MS002441.
- [39] 张哲, 戚友存, 朱自伟, 等. 深圳 S 波段与 X 波段双偏振雷达在定量降水估计中的应用[J]. *气象学报*, 2021, 79(5): 786-803.
Zhang Z, Qi Y C, Zhu Z W, et al. Application of radar quantitative precipitation estimation using S-band and X-band polarimetric radars in Shenzhen[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(5): 786-803.
- [40] 张羽, 姚聃, 杨金红, 等. 基于 S 波段双偏振雷达和 X 波段相控阵雷达的超级单体观测分析[J]. *气象科技*, 2023, 51(3): 419-430.
Zhang Y, Yao D, Yang J H, et al. Analysis of a supercell using S-band dual-polarization radar and X-band phased array radar[J].

- Meteorological Science and Technology, 2023, 51(3): 419-430.
- [41] Morotomi K, Shimamura S, Kobayashi F, et al. Evolution of a tornado and debris ball associated with super typhoon hagibis 2019 observed by X-Band phased array weather radar in Japan[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(24): e2020GL091061.
- [42] 程元慧, 傅佩玲, 胡东明, 等. 广州相控阵天气雷达组网方案设计及其观测试验[J]. 气象, 2020, 46(6): 823-836.
Cheng Y H, Fu P L, Hu D M, et al. The guangzhou phased-array radar networking scheme set-up and observation test[J]. Meteorological Monthly, 2020, 46(6): 823-836.
- [43] Wu C, Liu L. Comparison of the observation capability of an X-band phased-array radar with an X-band Doppler radar and S-band operational radar[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(4): 814-824.
- [44] Zhang Y, Tian C, Fu P, et al. Progress of observation experiment for X-band dual polarization phased array radars in Guangzhou[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2020, 10(6): 80-85.
- [45] Zhen X, Ma S, Chen H, et al. A new X-band weather radar system with distributed phased-array front-ends: Development and preliminary observation results[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39(3): 386-402.
- [46] Bechini R, Chandrasekar V, Sun J. Four-Dimensional Variational Data Assimilation of High Resolution X-Band Radar Observations over the Dallas-Fort Worth Metroplex[C]. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan, Italy: IEEE, 2015: 3953-3956
- [47] Helmus J J, Collis S M. The Python ARM radar Toolkit (Py-ART): A library for working with weather radar data in the python programming language[J]. Journal of Open Research Software, 2016, 4(1): 25.
- [48] Feng J, Duan Y, Wan Q, et al. Improved prediction of landfalling tropical cyclone in China based on assimilation of radar radial winds with new super-observation processing[J]. Weather and Forecasting, 2020, 35(6): 2523-2539.
- [49] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China Meteorological Administration Tropical Cyclone Database[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2014, 31(2): 287-301.
- [50] Lu X, Yu H, Ying M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2021, 38(4): 690-699.
- [51] Ge X, Ma Y, Zhou S, et al. Sensitivity of the warm core of tropical cyclones to solar radiation[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(8): 1038-1048.
- [52] Kain J S. The Kain-fritsch convective parameterization: An update[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 170-181.
- [53] Hong S Y, Lim K S, Kim J H, et al. WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 2006, 42(2): 129-151.
- [54] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.
- [55] Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. Improvement of the k-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2003, 107(2): 301-427.
- [56] 袁金南, 黄燕燕, 刘春霞, 等. 陆地摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的模拟研究[J]. 热带气象学报, 2007(6): 531-537.
Yuan J N, Huang Y Y, Liu C X, et al. A simulation study of the influence of land friction on landfall tropical cyclone track and intensity[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007(6): 531-537.
- [57] Chen H, Zhang D. On the rapid intensification of Hurricane Wilma (2005). Part II: Convective bursts and the upper-level warm core[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(1): 146-162.
- [58] Vigh J L, Schubert W H. Rapid development of the tropical cyclone warm core[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2009, 66(11): 3335-3350.
- [59] Emanuel K A. An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986, 43(6): 585-605.

The Impact of Assimilating High and Low-Level X-Band Phased Array Radar Data on Tropical Cyclone Forecasting

Shi Zhexuan¹, Feng Jianing^{1,2}, Wu Chong¹, Wang Chao¹, Wang Hui¹, Liu Tao¹, Duan Yihong¹

(1. State Key Laboratory of Severe Weather Meteorological Science and Technology, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China)

Abstract: This study conducts numerical experiments on tropical cyclone Saola (2023) using the Typhoon Rapid Refresh Analysis and Nowcasting System developed by the Chinese Academy of Meteorological Sciences, assimilating radial wind velocity data from S-band Doppler Radar and X-band Phased Array Radar with the Ensemble Kalman Filter method. The assimilation effects on Saola's track and intensity are evaluated, with particular focus on the assimilation sensitivity of X-band Phased Array Radar data at different altitudes. Results indicate that compared with solely assimilating S-band Doppler Data assimilating X-band Phased-Array Radar data in addition to S-band Doppler Radar data further reduces track error and intensity error by 13.7% and 58.0%, respectively. X-band Phased Array Radar data above 4 km primarily influences the geopotential height, horizontal wind, and warm-core intensity above 600 hPa at the initial time through dynamic and thermodynamic processes, although this effect diminishes progressively during forecast integration. X-band phased array radar data below 4 km mainly affect geopotential height and horizontal wind below 700 hPa through dynamic processes, directly strengthening the mid-to-lower-level pressure and wind fields. Moreover, after 3 hours of the deterministic forecast initiation, the entire wind and pressure fields are influenced. This study finds that assimilating X-band Phased Array Radar data below 4 km provides equivalent forecast skill of tropical cyclone's track, intensity, and structure compared to assimilating X-band Phased Array Radar data at all altitudes. Furthermore, it verifies the effectiveness of X-band Phased-Array Radar in complementing the low-level coverage of S-band Doppler Radar in tropical cyclone data assimilation and forecasting, offering actionable insights for refining operational tropical cyclone forecasting.

Key words: tropical cyclone; data assimilation; X-band phased array radar; sensitivity experiments; Ensemble Kalman filter

责任编辑 庞 旻