

WRF模式海南地区地表要素最优初始化时间研究

焦 悅^{1,2}, 邢益航^{1,2}, 黄诗彤^{1,2}, 吴 璞³, 尚 明⁴, 施晨晓⁵, 贺 音⁶, 白 磊^{1,2,7*}

¹海南大学生态学院, 海南 海口

²海南大学, 海南省农林环境过程与生态调控重点实验室, 海南 海口

³兰州中心气象台, 甘肃 兰州

⁴河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

⁵海南省气象信息中心, 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南 海口

⁶陕西省气象局, 陕西省气象信息中心, 陕西 西安

⁷海南智慧低空气象大数据研究中心, 海南 海口

收稿日期: 2025年4月7日; 录用日期: 2025年5月9日; 发布日期: 2025年5月19日

摘要

数值天气预报的准确性极大地依赖于模式初始化场的质量及其平衡收敛过程, 而这一过程在地形复杂、海陆交互显著的热带岛屿区域显得尤为关键。本研究基于WRF模式针对海南岛区域开展了不同分辨率初始场对模式平衡收敛特征的系统研究。采用ERA5 (0.25°)和ERA-Interim (0.75°)再分析资料作为初始场, 通过设计短期和长期平行对比试验, 分析了2米温度(T2)、2米比湿(Q2)及10米风场(U10、V10)等近地面要素的平衡收敛特征。研究发现, 高分辨率初始场显著提升了模式的平衡收敛效率, ERA5驱动的模拟在长期积分中温度场平均收敛时间较ERA-Interim缩短2.7小时(17.4 vs 20.1小时), 比湿场缩短3.3小时(18.1 vs 21.4小时), 风场缩短3.0~3.5小时(U10: 20.2 vs 23.2小时, V10: 21.1 vs 24.6小时)。短期模拟结果表明, 不同物理量具有显著的时间依赖特征: 温度场的平均收敛时间为2.8小时, 比湿场为3.3小时, 风场则需要3.7~4.0小时。特别是在18时起报的预报中, ERA5温度场的动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)相关系数达到最高值0.93, 而ERA-Interim降至0.87, 表明ERA5在处理日落前后的温度变化方面具有独特优势。基于研究结果, ERA5在各物理量的预报中均表现出更快的收敛速度和更高的预报准确性, 这对提升热带海岛地区数值预报水平具有重要的参考价值。

关键词

数值天气预报初始化, 平衡收敛时间, 再分析资料, 边界层参数化, 海陆相互作用, 中尺度气象模拟

Optimal Initialization Time for Surface Variables in WRF Model over Hainan Island

*通讯作者。

Yue Jiao^{1,2}, Yihang Xing^{1,2}, Shitong Huang^{1,2}, Jing Wu³, Ming Shang⁴, Chenxiao Shi⁵, Yin He⁶, Lei Bai^{1,2,7*}

¹School of Ecology, Hainan University, Haikou Hainan

²Key Laboratory of Agro-Forestry Environmental Processes and Ecological Regulation of Hainan Province, Hainan University, Haikou Hainan

³Lanzhou Central Meteorological Observatory, Lanzhou Gansu

⁴School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

⁵Hainan Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation, Hainan Meteorological Information Center, Haikou Hainan

⁶Shaanxi Meteorological Information Center, Shaanxi Meteorological Bureau, Xi'an Shaanxi

⁷Hainan Intelligent Low-Altitude Meteorological Big Data Research Center, Haikou Hainan

Received: Apr. 7th, 2025; accepted: May 9th, 2025; published: May 19th, 2025

Abstract

The accuracy of numerical weather prediction heavily depends on the quality of model initialization fields and their spin-up process, which is particularly crucial in tropical island regions characterized by complex terrain and significant land-sea interactions. This study systematically investigated the impact of initial fields with different resolutions on model spin-up characteristics over Hainan Island using the WRF model. Using ERA5 (0.25°) and ERA-Interim (0.75°) reanalysis data as initial fields, we analyzed the spin-up characteristics of near-surface variables including 2-meter temperature (T2), 2-meter specific humidity (Q2), and 10-meter wind fields (U10, V10) through both short-term and long-term parallel experiments. Results demonstrated that high-resolution initial fields significantly enhanced model spin-up efficiency. In long-term simulations, ERA5-driven experiments showed shorter convergence times compared to ERA-Interim: temperature field convergence time decreased by 2.7 hours (17.4 vs 20.1 hours), specific humidity field by 3.3 hours (18.1 vs 21.4 hours), and wind fields by 3.0~3.5 hours (U10: 20.2 vs 23.2 hours, V10: 21.1 vs 24.6 hours). Short-term simulation results revealed distinct temporal dependencies among different physical variables: temperature field averaged 2.8 hours for convergence, specific humidity field required 3.3 hours, while wind fields needed 3.7~4.0 hours. Notably, in forecasts initialized at 18, ERA5 temperature field achieved the highest DTW correlation coefficient of 0.93, while ERA-Interim dropped to 0.87, indicating ERA5's superior performance in capturing temperature variations during sunset transitions. Based on these findings, ERA5 demonstrated superior performance in both convergence speed and forecast accuracy across all physical variables, providing valuable insights for improving numerical weather prediction capabilities in tropical island regions.

Keywords

Numerical Weather Prediction Initialization, Spin-Up Time, Reanalysis Data, Boundary Layer Parameterization, Land-Sea Interaction, Mesoscale Meteorological Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

数值天气预报的准确性取决于多个关键因素，其中模式初始化场的质量对预报结果具有决定性影响

[1][2]。区域数值模式在初始化后需要经过一段“初始化时间”(spin-up time)使大气状态达到动力和热力平衡。在这个过程中，模式需要调整各种物理过程之间的相互作用，消除由于数据同化和模式动力假设带来的不平衡[3]-[5]。已有研究表明，不同类型数值模式的 spin-up 特征存在显著差异。全球气候模式和海洋环流模式通常需要数十年到数百年的 spin-up 时间[6][7]，区域气候模式和陆面模式则需要数周到数月[8]-[10]。短期天气预报模式的 spin-up 时间相对较短，通常为数小时到十几小时[11][12]。影响 spin-up 时间的因素包括模式分辨率、模拟区域、模拟季节以及环流强度等[13]-[15]。

近年来，为减少过长 spin-up 时间对数值预报准确性的影响，研究人员开发了多种技术方法。在海洋模式中采用“Distorted Physics”和“Matrix method”等方法[16][17]；在短期天气预报模式中，通过云分析方法同化卫星和雷达等非常规观测资料，改进初始湿度场和云场，缩短 spin-up 时间并提高短期降水预报水平[18]-[20]。目前，WRF 等主流数值模式在不同分辨率下的平衡收敛特征已得到广泛研究。在温带陆地区域，温度和湿度场约需 12 小时达到平衡[21]；而在热带海洋性环境中，由于海陆相互作用复杂，往往需要更长的 spin-up 时间[22]。特别是在海南这类海陆风主导的热带岛屿地区，复杂的下垫面特征和快速变化的地表过程，使得传统固定时长的 spin-up 方案可能难以满足高精度预报需求。

针对上述问题，本研究将分析海南地区 WRF 模式中温度、湿度、风速要素在不同积分时长下的演变特征，确定模式达到平衡收敛所需的最短时间尺度。研究结果将为优化海南地区数值预报系统提供科学依据。

2. 数据与方法

2.1. 研究区域

本研究选取中国海南岛($18^{\circ}10' \sim 20^{\circ}10'N$, $108^{\circ}37' \sim 111^{\circ}03'E$)作为研究区域(图 1)。海南岛位于南海北部，是中国第二大岛，四周环海，总面积约 3.54 万平方公里。地形呈“中部高、四周低”的特征，中部五指山最高海拔 1867 米。该区域属热带季风气候，年平均降水量约 1639 毫米，但时空分布不均匀。降水类型包括台风、季风、强对流等多种天气系统影响，区域性暴雨和干旱灾害频发。

2.2. 数据来源

2.2.1. WRF 驱动数据

本研究采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA5 和 ERA-Interim 全球再分析数据作为模式驱动场。ERA5 是 ECMWF 最新一代再分析产品[23]，提供 1940 年至今的全球大气再分析数据，水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ ，垂直方向从地表至 0.1 hPa 共 37 层，时间分辨率为 1 小时。ERA-Interim 数据集覆盖 1979 年至 2019 年，水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$ ，垂直方向 31 层，时间分辨率为 6 小时[24]。这两套再分析数据均包含温度、相对湿度、位势高度、风场等完整的大气要素，并将数据由 UTC 转换为北京时间(China Standard Time, CST)。

2.2.2. 观测资料

模式验证采用中国气象数据网提供的海南岛 19 个国家级气象站点的地面常规气象观测资料，包括气压、气温、相对湿度、风向风速和降水量等要素的逐小时观测数据。这些站点空间分布相对均匀，观测数据质量可靠，具有较好的代表性。

2.3. WRF 模式配置

本研究采用 WRF (Weather Research and Forecasting) V4.2 版本进行数值模拟。WRF 是由美国国家大气研究中心(NCAR)等机构开发的新一代中尺度数值预报模式，具有完善的动力框架和物理过程参数化

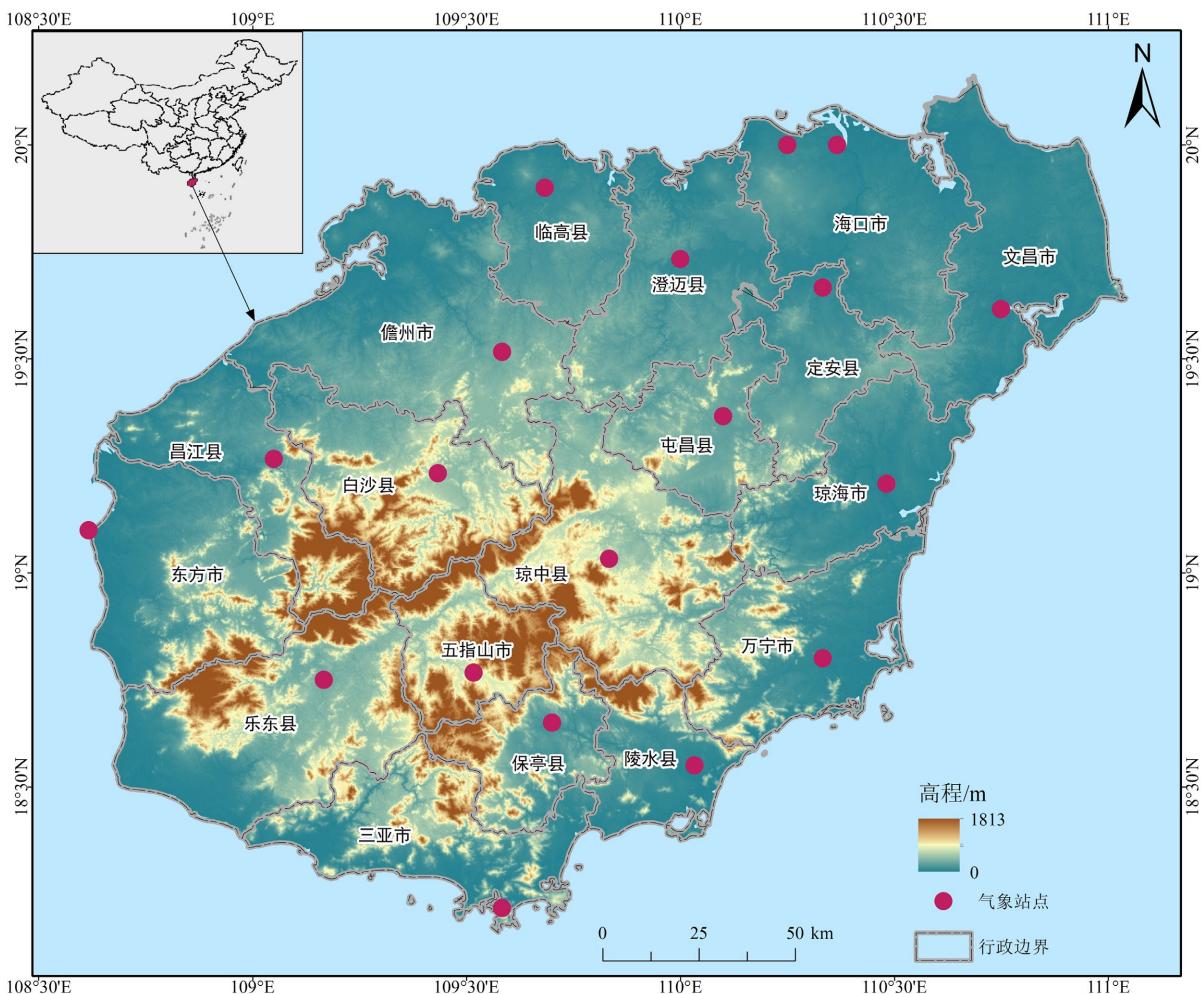


Figure 1. Study area location and meteorological station distribution map (Approval No. GS(2019)1822)

图 1. 研究区位置及气象站点分布图(审图号: GS(2019)1822 号)

方案。模式采用单层网格设置，网格中心位于 19.05°N , 109.05°E ，覆盖整个海南岛及其周边海域。水平分辨率为 5 km ，网格点数为 150 (经向) $\times 150$ (纬向)。垂直方向设置 33 层，模式顶层气压为 50 hPa ，时间积分步长为 90 s 。

2.4. 实验设计

2.4.1. 同一天短期平衡收敛特征试验

短期实验主要反映的是模式初始化后的“预报预热期”，这段时间内模式需要调整初始场与物理过程之间的不平衡。因此，短期实验主要评估模式对初始场快速调整的能力(模式“spin-up”过程)。为评估不同分辨率初始场对模式短期预报的影响，本研究设计了基于 ERA5 (0.25°) 和 ERA-Interim (0.75°) 的对照试验。选取 2017 年 6 月 1 日 UTC00 时至 6 月 7 日 UTC00 时作为研究时段，分别在 UTC00、UTC06、UTC12 和 UTC18 时四个时次启动模式积分，共构建 8 组平行试验。各试验均积分至 6 月 7 日 00 时，确保不同起报时次的模拟结果具有充分的时间重叠。在结果分析中，将 UTC00 时次作为参照组，UTC06、UTC12 和 UTC18 三个时次作为对比组。这一设计可评估初始场分辨率和起报时间对模式短期平衡收敛过程的影响。

2.4.2. 多初始场平衡收敛特征试验

长期实验则涉及到更复杂的物理过程和天气系统演变，包括边界层的日变化、大尺度环流变化等。长期实验则更多关注模式对大尺度环流模式的捕捉能力和长时间积分的稳定性。为研究模式在不同时间尺度下的平衡收敛特征，本研究设计了一组长期积分试验。首先从 2017 年 5 月 31 日 00 时开始进行连续积分至 6 月 30 日 00 时，作为参照组建立模式长期积分的基准状态。在此基础上，分别选取 6 月 1 日、6 日、11 日、16 日、21 日和 26 日 00 时作为起报时刻，每次积分 120 小时，构建 6 组平行对照试验。这一设计既可评估模式在不同天气背景下的 spin-up 特征，又能分析预报时效对平衡收敛的影响。

2.4.3. 评估方法

本研究采用海南岛 19 个国家级气象站点的地面常规观测资料进行验证，重点评估 2 米温度(T2)、2 米比湿(Q2)以及 10 米水平风场(U10、V10)等近地面要素。模式输出结果首先通过双线性插值方法插值至观测站点位置，随后计算平均误差(Mean Error, ME):

$$ME = \frac{1}{n} \sum (F_i - O_i)$$

其中， F_i 为预报值， O_i 为观测值， n 为样本数。ME 可反映模式预报的系统性偏差，正值表示预报偏大，负值表示预报偏小。

本研究还采用动态时间规整(Dynamic Time Warping, DTW)距离来度量时间序列之间的相似性。与欧氏距离相比，DTW 能够处理时间序列在时间轴上的非线性伸缩，更好地捕捉序列的结构相似性。具体而言，给定两个时间序列 $X = (x_1, \dots, x_n)$ 和 $Y = (y_1, \dots, y_m)$ ，首先构建 $n \times m$ 的距离矩阵 D ，其中 $D(i, j)$ 表示点 x_i 和 y_j 之间的距离。DTW 通过寻找最优规整路径 W 来对齐这两个序列。规整路径 $W = (w_1, \dots, w_k)$ 由距离矩阵中的元素构成，需满足以下约束条件：

$$\text{边界条件: } w_1 = (1, 1), w_k = (n, m)$$

$$\text{连续性: } w_{l+1} - w_l \in \{(1, 0), (0, 1), (1, 1)\}$$

$$\text{单调性: } i_{l+1} \geq i_l \text{ 且 } j_{l+1} \geq j_l$$

其中 $w_l = (i_l, j_l)$ 表示路径中的第 l 个点。DTW 距离定义为所有可能规整路径中的最小累积距离：

$$DTW(x, y) = \min \sum_{l=1}^k d(w_l)$$

这里 $d(w_l)$ 表示路径上第 l 个点对应的距离值。我们采用动态规划算法求解此最优化问题，复杂度为 $O(nm)$ 。为了提高计算效率，本研究还引入了 Sakoe-Chiba 带宽约束，限制规整路径与对角线的偏离不超过 r 个单位。这不仅减少了计算量，还能防止出现不合理的对齐。

基于 DTW 距离，我们定义序列 X 和 Y 的 DTW 相关性为：

$$\rho_{DTW}(X, Y) = 1 - \frac{DTW(X, Y)}{\sqrt{n \times m}}$$

该指标取值范围为 [0, 1]，值越大表示两个序列越相似。通过计算样本数据集中各序列对之间的 DTW 相关性，我们可以构建相似性矩阵，为后续聚类分析提供基础。

3. 结果

3.1. 模式短期平衡收敛特征

图 2 是 ERA5 和 ERA-Interim 两种再分析资料驱动的 WRF 模式不同起报时间(00、06、12 和 18 时)

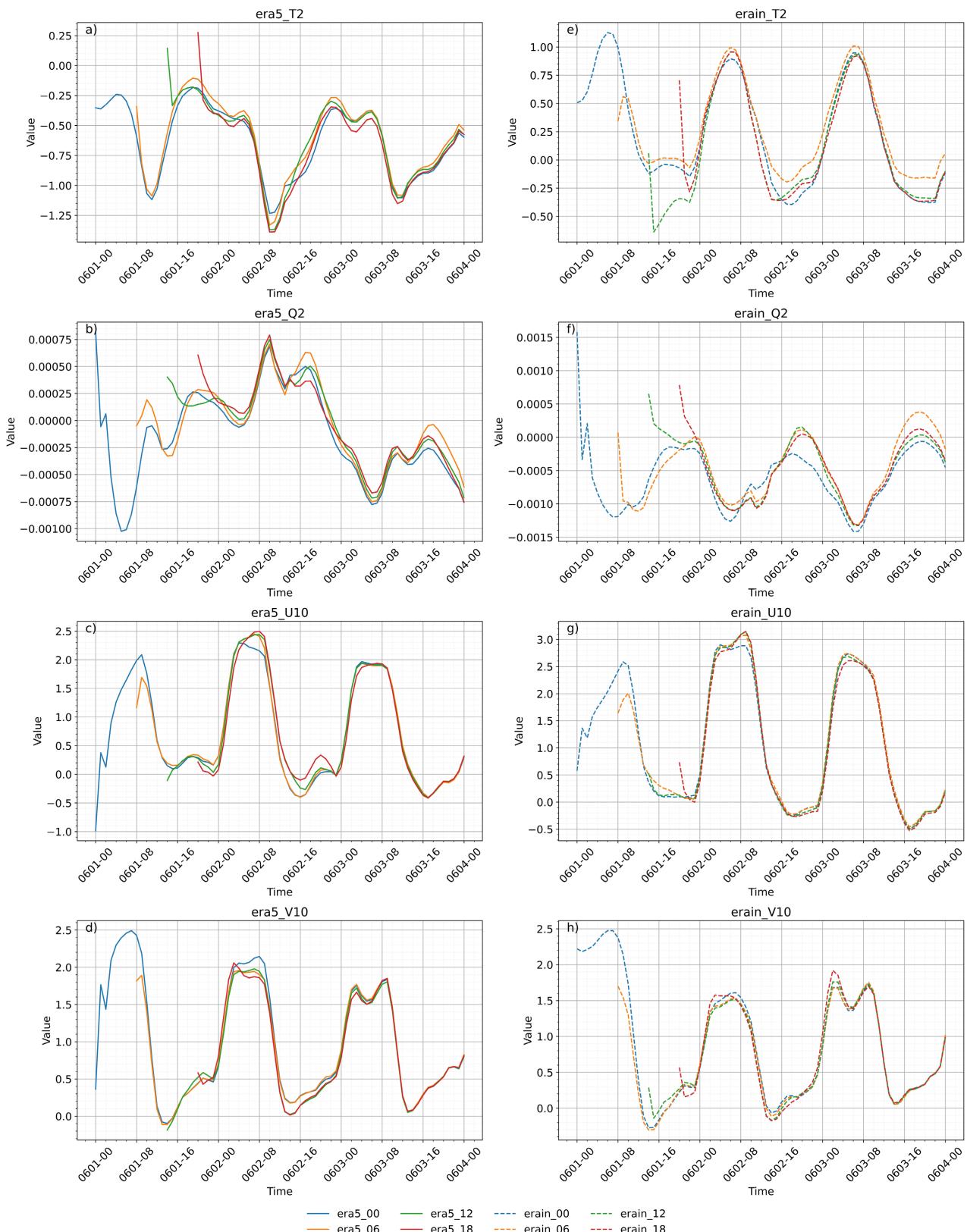


Figure 2. Temporal evolution of near-surface parameter forecast errors in WRF model driven by different reanalysis datasets
图 2. 不同再分析资料驱动的 WRF 模式近地面要素预报误差时序演变特征

的模拟结果，发现近地面气象要素的预报误差(ME)呈现出明显的时间依赖特征和预报预热期特性。图中左列展示了 ERA5 驱动的模拟结果，右列为 ERA-Interim 驱动的结果，从上至下依次为 2 米温度(T2)、2 米比湿(Q2)、10 米水平风场(U10、V10)的误差演变。就 2 米温度而言，ERA5 驱动的模拟(图 2(a))显示出 -1.40°C 至 0.30°C 的误差波动，且不同起报时间的结果在模拟 3~6 小时后趋于收敛，而 ERA-Interim 驱动的温度模拟(图 2(b))则表现出更大的误差幅度(-0.95°C 至 1.15°C)。对于 2 米比湿，ERA5 驱动的模拟(图 2(c))在初始阶段表现出较大的波动($\pm 0.00075 \text{ kg/kg}$)，但在预报 6 小时后各起报时间的结果逐渐趋同，ERA-Interim 驱动的比湿模拟(图 2(d))则呈现出更为规律的周期性波动，误差范围在 $\pm 0.0015 \text{ kg/kg}$ 之间。10 米风场的模拟结果显示，无论是纬向风(图 2(e)和图 2(f))还是经向风(图 2(g)和图 2(h))，两种再分析资料驱动的模拟均表现出显著的日周期特征，误差幅度在 $\pm 3.0 \text{ m/s}$ 范围内，但 ERA5 驱动的结果在预报初期的收敛性明显优于 ERA-Interim。总体上，所有要素的模拟误差都存在 3~12 小时的预报预热期，这段时间内模式需要调整初始场与物理过程之间的不平衡。

表 1 对比了 ERA5 和 ERA-Interim 两套再分析资料在不同物理量预报中的表现。从表 1 的统计结果来看，两种再分析资料在温度(T2m)、比湿(Q2m)、水平风场(U10m、V10m)等近地面要素的短期收敛特征存在显著差异。当使用 ERA5 再分析资料作为初始场时，各要素的收敛时间普遍较 ERA-Interim 快 0.3~0.5 小时。其中，温度场(T2m)表现最为突出，平均收敛时间仅需 2.8 小时，较 ERA-Interim 的 3.2 小时提前了 0.4 小时；比湿场(Q2m)次之，ERA5 平均收敛时间为 3.3 小时，比 ERA-Interim 的 3.7 小时提前了 0.4 小时；而风场要素(U10m、V10m)的收敛时间相对较长，ERA5 的 U10m 和 V10m 平均收敛时间分别为 3.7 小时和 4.0 小时，但仍比 ERA-Interim 分别快 0.5 小时。从不同起报时次来看，12 时起报的预报收敛时间普遍较长。

Table 1. Statistical analysis of error convergence characteristics for near-surface parameters in WRF model with different initial times

表 1. WRF 模式不同起报时间近地面要素预报误差收敛特征统计

变量	起报时间(CST)	精确时间(h) ERA5/ERA-Interim	DTW 相关系数
T2m	06	2.8/3.1	0.92/0.89
	12	2.7/3.2	0.91/0.88
	18	2.9/3.3	0.93/0.87
	Mean	2.8/3.2	0.92/0.88
Q2m	06	3.2/3.5	0.90/0.87
	12	3.4/3.7	0.89/0.86
	18	3.3/3.8	0.91/0.85
	Mean	3.3/3.7	0.90/0.86
U10m	06	3.6/4.0	0.88/0.84
	12	3.8/4.2	0.87/0.83
	18	3.7/4.3	0.86/0.82
	Mean	3.7/4.2	0.87/0.83
V10m	06	3.8/4.3	0.85/0.82
	12	4.1/4.5	0.84/0.81
	18	4.0/4.6	0.83/0.80
	Mean	4.0/4.5	0.84/0.81

在预报准确性方面，通过 DTW(动态时间规整)相关系数分析发现，ERA5 再分析资料同样展现出明显优势。温度场的平均 DTW 相关系数达到 0.92，较 ERA-Interim 高出 0.04；比湿场的相关系数为 0.90，高出 0.04；水平风场 U10m 和 V10m 的相关系数分别为 0.87 和 0.84，均比 ERA-Interim 高出 0.03~0.04。特别值得注意的是，在 18 时起报的预报中，温度场 ERA5 的 DTW 相关系数达到最高值 0.93，而 ERA-Interim 则降至 0.87，差异达到 0.06，这表明 ERA5 在处理日落前后的温度变化方面具有更好的表现。综上，ERA5 再分析资料在各物理量的预报中均表现出更快的收敛速度和更高的预报准确性，这种改进在温度场最为显著，其次是比湿场，而在风场要素中的改进相对较小但仍然明显。

3.2. 模式长期平衡特征分析

在图 3 中，近地面要素的模拟误差(ME)存在显著的日周期振荡特征和数据源依赖性。图中展示了从 6 月 1 日至 6 月 26 日每隔 5 天进行的 6 组模拟试验，以 5 月 31 日 00 时起报的 30 天积分结果作为参考，分析了 2 米温度(T2)、2 米比湿(Q2)以及 10 米风场(U10 和 V10)的模拟误差时间演变特征。从垂直分布来看，ERA5 驱动的模拟结果(左列)与 ERA-Interim 驱动的结果(右列)在误差量级和时间演变特征上均存在明显差异。可以发现，2 米温度误差(图 3(a)和图 3(b))表现出 ± 2.5 K 的波动范围，其中 ERA5 驱动的模拟在积分前期(0~40 h)表现出较大的正偏差，而 ERA-Interim 驱动的结果则显示出相对稳定的误差特征。2 米比湿的误差(图 3(c)和图 3(d))整体较小，数量级在 ± 0.001 kg/kg 范围内，但 ERA5 驱动的模拟表现出更为明显日变化特征。对于 10 米风场，纬向风分量(图 3(e)和图 3(f))的误差波动范围在 ± 2.5 m/s 之间，经向风分量(图 3(g)和图 3(h))则显示出 ± 3.0 m/s 的误差幅度，且两个风场分量都呈现出显著的日周期特征，这种周期性在 ERA5 驱动的模拟中表现得更为突出。

本研究基于六个不同起报时间点的模拟结果，系统地评估了 ERA5 和 ERA-Interim 两套再分析资料在中尺度数值预报模式中的应用效果。表 2 结果显示，ERA5 在模式收敛时间和预报准确性两个关键指标上均优于 ERA-Interim。从温度场(T2)来看，ERA5 的平均收敛时间为 17.4 小时，较 ERA-Interim 的 20.1 小时显著缩短了 2.7 小时，其 DTW 相关系数达到 0.871，高于 ERA-Interim 的 0.844。特别是在 0601-00 起报时次中，ERA5 的温度场收敛时间仅需 15.8 小时，为所有物理量中表现最优，且其相关系数达到最高值 0.883。比湿场(Q2)的模拟结果表明，ERA5 的平均收敛时间为 18.1 小时，比 ERA-Interim 的 21.4 小时提前了 3.3 小时，同时 DTW 相关系数(0.861)也优于 ERA-Interim (0.831)，表明 ERA5 在水汽场的模拟中具有显著优势。

在风场要素方面，水平风场分量(U10 和 V10)的收敛特征呈现出明显的差异性。U10 风场使用 ERA5 时的平均收敛时间为 20.2 小时，比 ERA-Interim 的 23.2 小时提前了 3.0 小时；V10 风场的收敛时间则相对较长，ERA5 平均需要 21.1 小时，但仍比 ERA-Interim 的 24.6 小时提前了 3.5 小时。值得注意的是，所有物理量在 0611-00 起报时次都表现出最长的收敛时间，这可能与该时段大气边界层的快速发展和复杂的湍流混合过程有关。从 DTW 相关系数来看，U10 和 V10 风场的平均相关系数在 ERA5 中分别为 0.845 和 0.832，较 ERA-Interim 的 0.819 和 0.805 有所提高，但改善幅度小于温度和水汽场。综上所述，两套再分析资料在不同起报时次的表现具有一致性，即随着预报时间的推移，收敛时间呈现出先增加后减小的特征，这种特征在 ERA5 中表现得更为明显。

4. 讨论

本研究通过系统对比 ERA5 (0.25°)和 ERA-Interim (0.75°)两套不同空间分辨率再分析资料在 WRF 模式中的应用效果，深入探讨了数值预报初始场对模式性能的影响。研究发现，ERA5 在近地面温度、比湿和风场等要素的模拟中均表现出显著优势，这种优势不仅体现在收敛时间的缩短，也反映在预报准确性

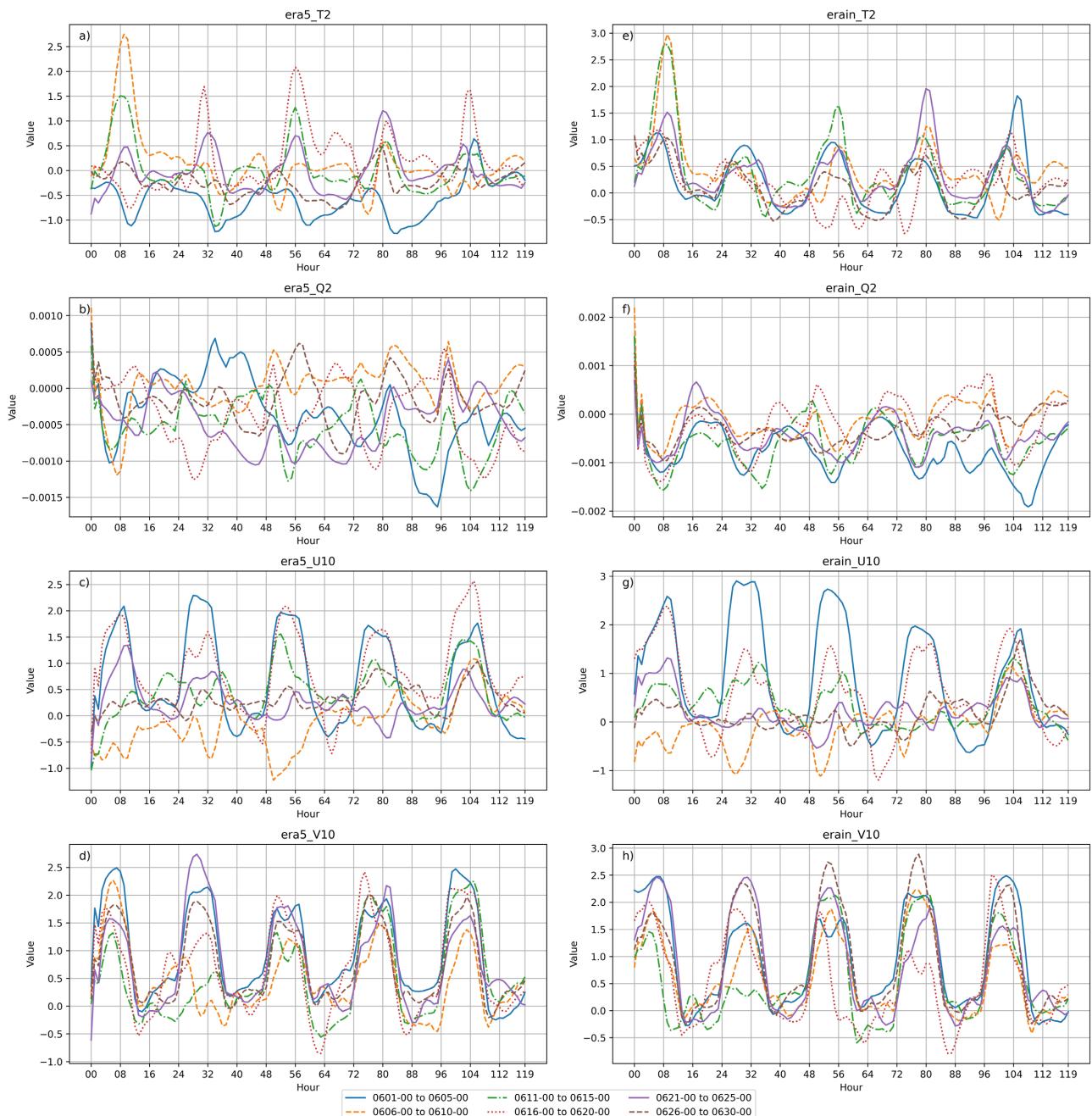


Figure 3. Time series of near-surface forecast errors from multi-initialization WRF simulations driven by ERA5 and ERA-Interim reanalysis data

图 3. 基于 ERA5 与 ERA-Interim 再分析资料驱动的 WRF 多起报模拟中近地面要素预报误差的时间序列

Table 2. Statistical assessment of initial field effects in multi-initial time WRF integration driven by different reanalysis datasets

表 2. 不同再分析资料驱动的 WRF 模式多起报时间积分中初始场影响统计分析

变量	起报时间	ERA5		ERA-Interim	
		精确时间(h)	DTW 相关系数	精确时间(h)	DTW 相关系数
Q2	0601-00	16.4	0.872	19.6	0.843

续表

	0606-00	18.2	0.865	21.4	0.835
	0611-00	19.8	0.853	23.2	0.824
	0616-00	17.3	0.861	20.8	0.831
	0621-00	18.1	0.857	21.5	0.828
	0626-00	18.7	0.859	22.1	0.826
	Mean	18.1	0.861	21.4	0.831
	0601-00	15.8	0.883	18.3	0.856
	0606-00	17.5	0.875	20.1	0.848
	0611-00	18.9	0.864	21.7	0.837
T2	0616-00	16.7	0.871	19.4	0.844
	0621-00	17.4	0.868	20.2	0.841
	0626-00	18.2	0.866	20.8	0.839
	Mean	17.4	0.871	20.1	0.844
	0601-00	19.2	0.841	22.5	0.815
	0606-00	21.5	0.834	24.8	0.807
	0611-00	22.7	0.826	26.3	0.798
V10	0616-00	20.4	0.832	23.9	0.805
	0621-00	21.1	0.829	24.6	0.802
	0626-00	21.8	0.831	25.2	0.804
	Mean	21.1	0.832	24.6	0.805
	0601-00	18.7	0.855	21.4	0.828
	0606-00	20.3	0.847	23.2	0.821
	0611-00	21.5	0.839	24.8	0.813
U10	0616-00	19.6	0.845	22.7	0.819
	0621-00	20.2	0.842	23.4	0.816
	0626-00	20.8	0.844	23.9	0.818
	Mean	20.2	0.845	23.2	0.819

的提升上。在短期实验中，ERA5 在温度场(T2)的平均收敛时间较 ERA-Interim 缩短了 2.7 小时(在长期实验中，17.4 vs 20.1 小时)；比湿场(Q2)的收敛时间缩短了 3.3 小时(在长期实验中，18.1 vs 21.4 小时)。

在不同时间尺度上的模拟表现也呈现出显著差异。短期模拟(00、06、12 和 18 时起报)中，12 时起报的收敛时间普遍较长，这可能与该时段对应的本地时间处于午后对流发展最活跃期有关。而长期模拟(不同日期 00 时起报)结果显示，0611-00 起报时次的所有物理量均表现出最长的收敛时间，这种现象可能与特定天气系统的演变特征密切相关。值得注意的是，风场要素(U10、V10)的改善幅度相对较小，ERA5 的 DTW 相关系数仅比 ERA-Interim 提高了 0.026~0.027。这一现象与 Rivas 等(2019)发现与 ERA-interim 相比，ERA5 风在瞬时 RMS 风速一致性方面提高了 20%，并且在平均和瞬态风误差风散度和风应力旋度偏差方面表现更佳[25]。这种差异主要源于风场对次网格地形扰动和湍流参数化的高度敏感性，即使 ERA5

提供了更高分辨率的地形数据，其 0.25° 的网格间距仍不足以完全解析复杂地形区域的局地环流特征。ERA5在改善模式性能方面的优势具有普遍性，但这种改善在不同区域和天气系统中的表现存在差异。同时，本研究也说明，模式对不同天气背景下初始场的敏感性差异及其物理机制尚需系统研究。

5. 结论

本研究通过系统对比ERA5和ERA-Interim两套再分析资料在WRF模式中的应用效果，得出以下主要结论：

1) ERA5在近地面要素预报中展现出显著优势，这种优势在短期和长期预报中均得到验证。长期预报中，ERA5的温度场平均收敛时间较ERA-Interim缩短2.7小时，DTW相关系数提高0.027；比湿场和风场要素的收敛时间分别缩短3.3小时和3.0~3.5小时。短期预报中，ERA5各要素的收敛时间普遍快0.3~0.5小时，相关系数提高0.03~0.04，表明高分辨率(0.25°)初始场能够更准确地描述大气状态。越高分辨率，能够加速收敛平衡速度。

2) 不同物理量对初始场分辨率的敏感度存在显著差异，温度场和比湿场的改进最为明显，而风场要素的改进相对较小。特别是在18时短期预报中，温度场的相关系数差异达到最大(0.93 vs 0.87)。此外，从预报时效性角度看，ERA5在短期预报(2~4小时)中表现出更快的收敛速度，在长期预报(15~25小时)中则展现出更好的预报稳定性。

致 谢

感谢闫笑笑、李嘉怡、苏怡臻、许梦雨同学对文章的协助；感谢海南百旺信智算中心对该项目支持。

基金项目

感谢国家自然科学基金(No. 32260294)、海南大学科研基金资助项目(KYQD(ZR)-22083)、海南省自然科学基金(423QN317)为研究提供的基金支持。

参考文献

- [1] Bjercknes, V. (2008) Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanic und der Physik.
- [2] Bauer, P., Thorpe, A. and Brunet, G. (2015) The Quiet Revolution of Numerical Weather Prediction. *Nature*, **525**, 47-55. <https://doi.org/10.1038/nature14956>
- [3] Wolcott, S.W. and Warner, T.T. (1981) A Moisture Analysis Procedure Utilizing Surface and Satellite Data. *Monthly Weather Review*, **109**, 1989-1998. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109<1989:amapus>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109<1989:amapus>2.0.co;2)
- [4] Kasahara, A., Mizzi, A.P. and Donner, L.J. (1992) Impact of Cumulus Initialization on the Spinup of Precipitation Forecasts in the Tropics. *Monthly Weather Review*, **120**, 1360-1380. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<1360:iciot>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<1360:iciot>2.0.co;2)
- [5] Short, C.J. and Petch, J. (2022) Reducing the Spin-Up of a Regional NWP System without Data Assimilation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **148**, 1623-1643. <https://doi.org/10.1002/qj.4268>
- [6] Scher, S. and Messori, G. (2019) Weather and Climate Forecasting with Neural Networks: Using General Circulation Models (GCMs) with Different Complexity as a Study Ground. *Geoscientific Model Development*, **12**, 2797-2809. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2797-2019>
- [7] Danek, C., Scholz, P. and Lohmann, G. (2019) Effects of High Resolution and Spinup Time on Modeled North Atlantic Circulation. *Journal of Physical Oceanography*, **49**, 1159-1181. <https://doi.org/10.1175/jpo-d-18-0141.1>
- [8] Zhong, Z., et al. (2007) Numerical Experiments on the Spin-Up Time for Seasonal-Scale Regional Climate Modeling.
- [9] Senatore, A., Mendicino, G., Gochis, D.J., Yu, W., Yates, D.N. and Kunstmann, H. (2015) Fully Coupled Atmosphere-hydrology Simulations for the Central Mediterranean: Impact of Enhanced Hydrological Parameterization for Short and Long Time Scales. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **7**, 1693-1715. <https://doi.org/10.1002/2015ms000510>
- [10] Giorgi, F. and Mearns, L.O. (1999) Introduction to Special Section: Regional Climate Modeling Revisited. *Journal of*

- Geophysical Research: Atmospheres*, **104**, 6335-6352. <https://doi.org/10.1029/98jd02072>
- [11] Weiss, S., Pyle, M., Janjic, Z., Bright, D., Kain, J. and DiMego, G. (2008) The Operational High Resolution Window WRF Model Runs at NCEP: Advantages of Multiple Model Runs for Severe Convective Weather Forecasting.
- [12] Souto, M.J., Balseiro, C.F., Pérez-Muñozuri, V., Xue, M. and Brewster, K. (2003) Impact of Cloud Analysis on Numerical Weather Prediction in the Galician Region of Spain. *Journal of Applied Meteorology*, **42**, 129-140. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<0129:iocaon>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<0129:iocaon>2.0.co;2)
- [13] Matte, D., Laprise, R., Thériault, J.M. and Lucas-Picher, P. (2017) Erratum to: Spatial Spin-Up of Fine Scales in a Regional Climate Model Simulation Driven by Low-Resolution Boundary Condition. *Climate Dynamics*, **49**, 4315-4316. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3825-4>
- [14] Errico, R. and Baumhefner, D. (1987) Predictability Experiments Using a High-Resolution Limited-Area Model. *Monthly Weather Review*, **115**, 488-504. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<0488:peuahr>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<0488:peuahr>2.0.co;2)
- [15] Anthes, R.A., Kuo, Y., Hsie, E., Low-Nam, S. and Bettge, T.W. (1989) Estimation of Skill and Uncertainty in Regional Numerical Models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **115**, 763-806. <https://doi.org/10.1256/smsqj.48802>
- [16] Bryan, K. (1984) Accelerating the Convergence to Equilibrium of Ocean-Climate Models. *Journal of Physical Oceanography*, **14**, 666-673. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<0666:atcteo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<0666:atcteo>2.0.co;2)
- [17] Khatiwala, S. and Visbeck, M. (2004) Accelerated Simulation of Passive Tracers in Ocean Circulation Models. *Ocean Modelling*, **9**, 51-69. [https://doi.org/10.1016/s1463-5003\(04\)00030-7](https://doi.org/10.1016/s1463-5003(04)00030-7)
- [18] Carlin, J.T., Gao, J., Snyder, J.C. and Ryzhkov, A.V. (2017) Assimilation of ZDR Columns for Improving the Spinup and Forecast of Convective Storms in Storm-Scale Models: Proof-of-Concept Experiments. *Monthly Weather Review*, **145**, 5033-5057. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-17-0103.1>
- [19] Warner, J.L., Petch, J., Short, C.J. and Bain, C. (2023) Assessing the Impact of a NWP Warm-Start System on Model Spin-Up over Tropical Africa. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **149**, 621-636. <https://doi.org/10.1002/qj.4429>
- [20] 李佳, 陈葆德, 黄伟, 张旭. 云物理初始化对一次强对流天气数值预报的影响研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(2): 198-208.
- [21] Chu, Q., Xu, Z., Chen, Y. and Han, D. (2018) Evaluation of the Ability of the Weather Research and Forecasting Model to Reproduce a Sub-Daily Extreme Rainfall Event in Beijing, China Using Different Domain Configurations and Spin-Up Times. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 3391-3407. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3391-2018>
- [22] Ma, Z., Zhao, C., Gong, J., Zhang, J., Li, Z., Sun, J., et al. (2021) Spin-Up Characteristics with Three Types of Initial Fields and the Restart Effects on Forecast Accuracy in the GRAPES Global Forecast System. *Geoscientific Model Development*, **14**, 205-221. <https://doi.org/10.5194/gmd-14-205-2021>
- [23] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [24] Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., et al. (2011) The Era-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **137**, 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- [25] Belmonte Rivas, M. and Stoffelen, A. (2019) Characterizing ERA-Interim and ERA5 Surface Wind Biases Using ASCAT. *Ocean Science*, **15**, 831-852. <https://doi.org/10.5194/os-15-831-2019>