

哥伦比亚北部近海风速高分辨率模拟与预测

刘渊培 黄刚 汪亚 郑江珊 刘何稚

High-Resolution Modeling and Prediction of Offshore Wind Speed in the Northern Colombia

LIU Yuanpei HUANG Gang WANG Ya ZHENG Jiangshan LIU Hezhi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25001>

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

不同嵌套方式下的积云对流方案对上海崇明极端暴雨高分辨率模拟的影响研究

Impact of Cumulus Parameterization Schemes with Multigrid Nesting on the High-Resolution Simulation of an Extreme Heavy Rainfall Event in Chongming, Shanghai

气候与环境研究. 2021, 26(1): 58 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20016>

高低分辨率耦合模式对北赤道逆流模拟性能的比较分析

Comparison Between High- and Low-Resolution Coupled Models for North Equatorial Countercurrent Simulation Performance

气候与环境研究. 2024, 29(6): 695 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2024.23124>

QM和QDM方法对中国极端气候的高分辨率气候变化模拟的误差订正对比

Bias Correction in Climate Extremes over China for High-Resolution Climate Change RegCM4 Simulations Using QM and QDM Methods

气候与环境研究. 2022, 27(3): 383 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.21037>

6.25 km高分辨率降尺度数据对21世纪长江经济带极端气候事件及其风险的集合预估

An Ensemble Projection of Extreme Climate Events and Related Risk Exposures in the 21st Century in the Yangtze River Economic Zone Using High-Resolution (6.25 km) Downscaling Datasets

气候与环境研究. 2023, 28(1): 45 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2022.21140>

基于可变分辨率地球系统模式的海河流域极端降水变化预估

Projected Changes in Extreme Precipitation over Haihe River Basin Based on a Variable-Resolution Community Earth System Model

气候与环境研究. 2025, 30(4): 373 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2025.23153>

ERA5再分析资料对中国大陆区域近地层风速气候特征及变化趋势再现能力的评估

Evaluation of Near-Surface Wind Speed Climatology and Long-Term Trend over China's Mainland Region Based on ERA5 Reanalysis

气候与环境研究. 2021, 26(3): 299 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20101>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



刘渊培, 黄刚, 汪亚, 等. 2026. 哥伦比亚北部近海风速高分辨率模拟与预测 [J]. 气候与环境研究, 31(2): 153–161. LIU Yuanpei, HUANG Gang, WANG Ya, et al. 2026. High-Resolution Modeling and Prediction of Offshore Wind Speed in the Northern Colombia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 31 (2): 153–161. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25001

哥伦比亚北部近海风速高分辨率模拟与预测

刘渊培¹ 黄刚¹ 汪亚^{1,2} 郑江珊³ 刘何稚⁴

¹ 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟与应用全国重点实验室, 北京 100029

² 南京信息工程大学水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室, 南京 210044

³ 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200030

⁴ 三峡国际能源投资集团有限公司, 北京 100029

摘要 基于 WRF 模式 (Weather Research and Forecasting Model), 构建了高分辨率的风速模拟系统。通过对 Yonsei University (YSU)、Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 和 Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE) 3 种边界层参数化方案进行敏感性试验, 确定了 YSU 方案在该区域的优越性, 并采用多层嵌套的方式实现了 3 km 级别的高分辨率风速模拟。结果表明, WRF 降尺度后风速模拟精度显著提升, 尤其对极端天气事件如飓风 “Julia” 的模拟较好。本研究可为哥伦比亚海上风电项目的选址、运行调度和风险管理提供科学依据, 同时为类似复杂地形和海洋环境区域的风速模拟提供参考。

关键词 哥伦比亚北部 海上风速 高分辨率模拟 WRF 模式 边界层参数化

文章编号 1006-9585(2026)02-0153-09

中图分类号 P456.8

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2025.25001

High-Resolution Modeling and Prediction of Offshore Wind Speed in the Northern Colombia

LIU Yuanpei¹, HUANG Gang¹, WANG Ya^{1,2}, ZHENG Jiangshan³, and LIU Hezhi⁴

¹ State Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

³ Shanghai Investigation, Design and Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200030

⁴ China Three Gorges International Corporation, Beijing 100029

Abstract A high-resolution simulation system using the Weather Research and Forecasting (WRF) model was developed by conducting sensitivity experiments with three boundary-layer parameterization schemes, namely, Yonsei University (YSU), Mellor-Yamada-Janjic (MYJ), and Quasi-Normal Scale Elimination (QNSE), to identify the optimal configuration. The YSU scheme demonstrated superior performance in capturing region-specific wind patterns, enabling a

收稿日期 2025-02-24; 网络预出版日期 2025-07-04

作者简介 刘渊培, 男, 博士研究生, 主要从事 AI—降尺度方面研究。E-mail: liuyuanpei23@mails.ucas.ac.cn

通讯作者 黄刚, 男, 博士, 研究员, 主要从事热带海气相互作用、东亚季风以及全球变暖动力学等研究。E-mail: hg@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国三峡哥伦比亚控股有限公司科研项目 CTGL-2022-CO-SA-039, 水利部水文气象灾害机理与预警重点实验室 (筹) 开放基金 HYMED202407, 国家自然科学基金项目 42141019、42261144687

Funded by CTG Colombia Holding S.A.S. (Grant CTGL-2022-CO-SA-039), Open Project of the Key Laboratory of Hydrometeorological Disaster Mechanism and Warning of Ministry of Water Resources (Grant HYMED202407), National Natural Science Foundation of China (Grants 42141019 and 42261144687)

3-km resolution simulation via multilayer nesting. Results indicate a substantial improvement in the determination accuracy of WRF-downscaled wind speeds, particularly during extreme events exemplified by Hurricane Julia's wind structure replication. These outcomes provide critical scientific support for offshore wind project siting, grid dispatch optimization, and risk mitigation strategies in northern Colombia while establishing a transferable methodology for wind-resource assessment in complex coastal environments globally.

Keywords Northern Colombia, Offshore wind speed, High-resolution simulation, WRF model, Boundary layer parameterization

1 引言

哥伦比亚海上风力资源丰富，具有很大的海上风电项目开发潜力，但受局地复杂地形、山体的影响，哥伦比亚北部近海沿岸风场的变化具有较大波动性（Zhou and Lau, 1998; 姚琪等, 2013）。风能的波动性和间歇性常引起风电出力的变化，易给电力系统电能质量、安全稳定运行和经济效益带来不利影响，因此风资源预测极为重要（Kawashima and Uchida, 2017）。由于风力发电功率和风速呈三次方的关系，2 m/s 的风速误差可能造成风力发电功率 50% 甚至 100% 的极大偏差，这种情况在观测数据稀少的近海、深远海地带则更加严重。传统海面风速观测主要依靠船舶、石油平台、浮标、观测塔和岛屿站等实测气象观测，此种方法可对局地进行长时间连续观测，但在空间上有局限性，而且人力、物力耗费高。由于哥伦比亚及其邻近海域观测数据较少，目前的再分析数据等产品空间分辨率过低，无法满足风资源评估、风电开发的数据需求。数值天气预报具有定量、快速、连续的优势，可以有效地弥补传统海面风资源预测的局限性，基于高分辨率的区域模式，可以得到较高分辨率的区域风速数据，进而可实现精细化的风资源评估和预测。但数值模式仍受到参数化方案不确定性的影响，因此仍需结合参数化方案优选等手段优化预报结果，实现最优的区域尺度模拟（程雪玲等, 2015; Posada-Marín et al., 2019; 孙全德等, 2019; Fernández-Alvarez et al., 2023）。

总体来说，由于在现有的预报结果改进手段

中，针对近海沿岸区域的风资源精细化模拟较少，无法满足近海、深远海业务需求。如何改进粗分辨率预报结果以获得满足实际业务需求的高时空分辨率气象数据？一方面，考虑到风电站精细化预报的时空分辨率要求，目前主要预报机构的预报产品及其校订产品已无法直接满足需求；另一方面，由于近海、深远海观测的极端缺乏，产业界传统上简单地结合机器学习算法对数值模式资料进行后处理已无法实现。因此，亟需开展基于区域数值模式的高时空分辨率动力降尺度研究。

2 资料与方法

2.1 数据

本研究使用的数据包括全球预报系统（Global Forecast System, GFS）数值天气预报数据、ERA5（ECMWF Reanalysis v5）再分析数据以及本地观测数据。GFS 数据是本研究的驱动场，提供了大尺度的气象参数（[https://gdex.ucar.edu/datasets/d084001/\[2025-07-04\]](https://gdex.ucar.edu/datasets/d084001/[2025-07-04])）；ERA5 再分析数据作为基准数据集，用于验证和评估模型模拟结果的准确性（Hersbach et al., 2023）。此外，本研究主要采用 WRF 模式进行降尺度模拟，以获得高时空分辨率的数据集（见表 1）。

2.2 方法

本研究主要采用中尺度区域数值模式 WRF 进行风速模拟。

2.2.1 模型选择与配置

模拟试验选用 WRF 模式 V4.3 版本，采用

表 1 GFS 与 ERA5 数据基本信息

Table 1 Basic Information of GFS and ERA5 data

数据名称	来源	时间范围	空间分辨率
GFS	美国国家环境预报中心（NCEP）	2020~2022年	0.25°（纬度）×0.25°（经度）
ERA5	欧洲中期天气预报中心（ECMWF）	2020~2022年	0.25°（纬度）×0.25°（经度）

GFS 0.25° (纬度) $\times 0.25^\circ$ (经度) 数据作为初始场, 每 3 小时更换一次边界条件, 同时模拟采用 9~3 km 的多层嵌套方案, 外圈为 9 km 分辨率, 内圈为 3 km 分辨率。试验中心经纬度为 (11.10°N , 73.52°W), 模式所有区域垂直层数共 34 层, 模式所有区域的物理参数化方案包括: Thompson 云微物理参数化方案, Tiedtke 积云对流参数化方案, 适用于大气环流模式的快速辐射传输模型 (Rapid Radiative Transfer Model for General Circulation Models, RRTMG) 长短波辐射方案, Noah 陆面过程, 边界层参数化方案则对 YSU、MYJ 以及 QNSE 三种方案进行敏感性模拟试验后进行优选。模拟试验起始时间为每日 00:00 (协调世界时, 下同), 模拟采用连续积分 240 h, 积分时间步长为 15 s, 输出时间分辨率为 1 h。边界层参数化方案敏感性试验同模拟试验设置除边界层参数化方案不同外, 其余参数完全相同。

2.2.2 边界层参数化方案的选择

由于风速等要素对边界层参数较为敏感, 模拟近海地区风速的关键问题是选取最优参数化方案 (Han and Pan, 2011; Haiden et al., 2021)。本项目结合目前该地区的相关研究, 对边界层 3 个主要参数化方案进行试验, 并选取最优方案 (Ruiz et al., 2022)。不同参数化方案使用相同的 GFS 驱动场, 分别选取 2022 年 1 月、7 月分别作为冬季、夏季的典型月份进行试验, 水平分辨率为 9 km, 基于敏感性试验优选参数化方案。

本研究使用的 3 个边界层参数化方案分别为 YSU、MYJ 以及 QNSE。其中除 YSU 为非局地方案外, 其余方案均为局地方案。局地方案中每个格点上的脉动通量由该格点上各物理量的均值获得, 非局地方案则综合考虑该格点本身及其邻近格点上的各物理量对格点脉动通量的影响。相比于 MYJ 与 QNSE 方案, YSU 方案通过在控制方程中加入逆梯度项以表示非局地通量 (Galperin and Sukoriansky, 2010; Wang et al., 2011; Xie et al., 2012; Cohen et al., 2015)。MYJ 方案采用 Mellor and Yamada (1982) 的湍流动能闭合方法表示湍流, 而 QNSE 方案则在稳定层结下采用由湍流谱闭合模式发展而来的 $k-\epsilon$ 模式, 在不稳定层结下仍使用 MYJ 湍流动能闭合方案的计算方法表示湍流 (Mellor and Yamada, 1982; Janjić, 1994, 2001; Hong et al., 2006; Hong, 2010)。 $k-\epsilon$ 模式对 Mellor and Yamada (1982) 提出的湍流动能闭合方法中的动量与热量扩散系数表达式进行了改进, 保留了更多物理过程。

2.2.3 模拟试验设计

采用多层嵌套的方式进行高分辨率风速模拟。外圈设置为 9 km 分辨率, 内圈覆盖哥伦比亚北部海域及相应陆地, 分辨率为 3 km。试验时间选取了 2020~2022 年的多个时段, 以涵盖不同季节和天气条件 (见图 1)。

2.2.4 模型验证与评估

通过与 ERA5 再分析数据和有限的观测数据对

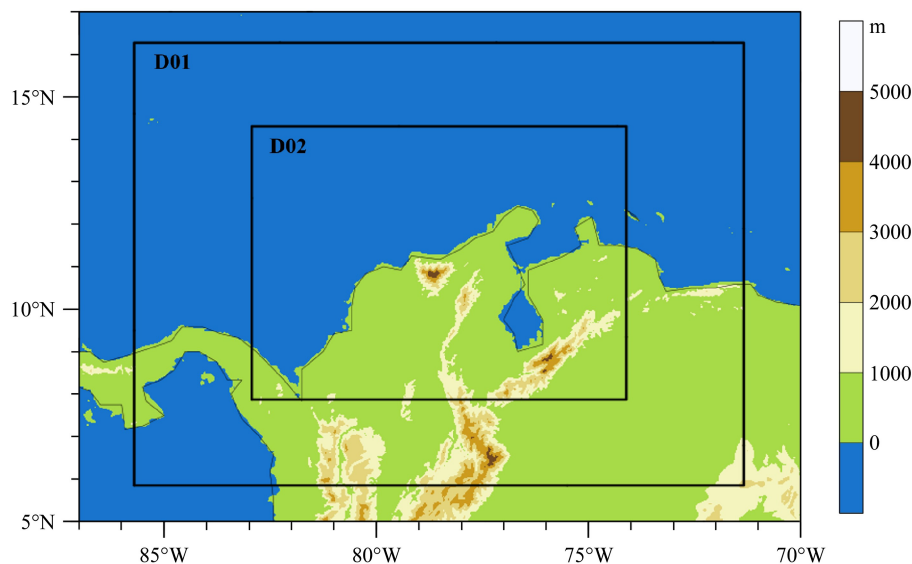


图 1 哥伦比亚北部研究区域高程图及 WRF 9 km 和 3 km 嵌套模拟方案示意图。

Fig. 1 Elevation map of the study area in northern Colombia and the schematic diagram of the WRF 9-km and 3-km nested simulation scheme.

比, 采用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 指标定量评估不同参数化方案的模拟性能; 同时重点分析高分辨率模拟在极端天气事件的模拟能力。

3 结果与分析

3.1 参数化方案敏感性分析

图 2 展示了 3 种参数化方案 YSU、QNSE、MYJ 的 WRF 试验结果 (图 2a–2c)、GFS 全球预报数据 (图 2d) 及 ERA5 再分析数据 (图 2e) 的风速和风矢量。由于高分辨率数据和站点数据的缺乏, 此处以 ERA5 作为基准, 对 WRF 不同试验结果和 GFS 结果进行比对分析。考虑到小尺度过程仍会通过影响动量交换等影响大尺度过程, 更好地精细化小尺度过程模拟, 同时也可以提升对大尺度过程的模拟。若 WRF 有更为合理的中小尺度过程表征, 那么其在粗分辨率上, 较 GFS 结果应会更优, 因此这种比对, 在无高分辨率观测数据的情景下, 有一定参考意义。结果显示, GFS 预报在近海地区风速明显偏大, 而在陆地地区风速偏小。GFS 近海存在两个风速大值区, 均超过 15 m/s, 而 ERA5 风速远低于此数值。相比之下, 采用

WRF 降尺度后, 海上风速偏差减小, GFS 中近海风速偏差高值区得到较大幅度校正, 陆地和海上风速平均强度与 ERA5 更为接近, 海上强风速带位置也与 ERA5 更为一致, 较好地校正了 GFS 中强风速带偏东的偏差。值得注意的是, ERA5 再分析数据分辨率为 25 km, 远低于 WRF 的 9 km 分辨率, 因此 WRF 不仅整体上与 ERA5 更为接近, 校正了 GFS 系统性的强度和位置偏差, 还能够更精细地模拟局地风速特征, 如海上强风速带的精细结构及陆地上的强风速区。上述结果表明, 相较于 GFS 全球尺度预报, WRF 降尺度不仅能够得出更为精细化的局地风速特征, 还能够校正粗分辨率数据集下的强度和位置偏差, 整体风速分布和强度与 ERA5 再分析数据更为接近。这表明使用 WRF 进行风速动力降尺度的必要性。

特别地, 对于近海地区偏差可以发现, 就近海的风速模拟而言, 3 种参数化方案中 YSU 方案效果更优, 这与上文提到的 YSU 对于西侧近海低值中心更好地复现有关。定量而言, 在海洋上, QNSE 方案的 MAE 为 0.95 m/s, MYJ 方案的 MAE 为 0.90 m/s, 而 YSU 方案的 MAE 仅为 0.87 m/s, 因此 YSU 方案显著优于 QNSE 与 MYJ 参数化方案得到的降尺度结果。我们认为对于哥伦比亚地区

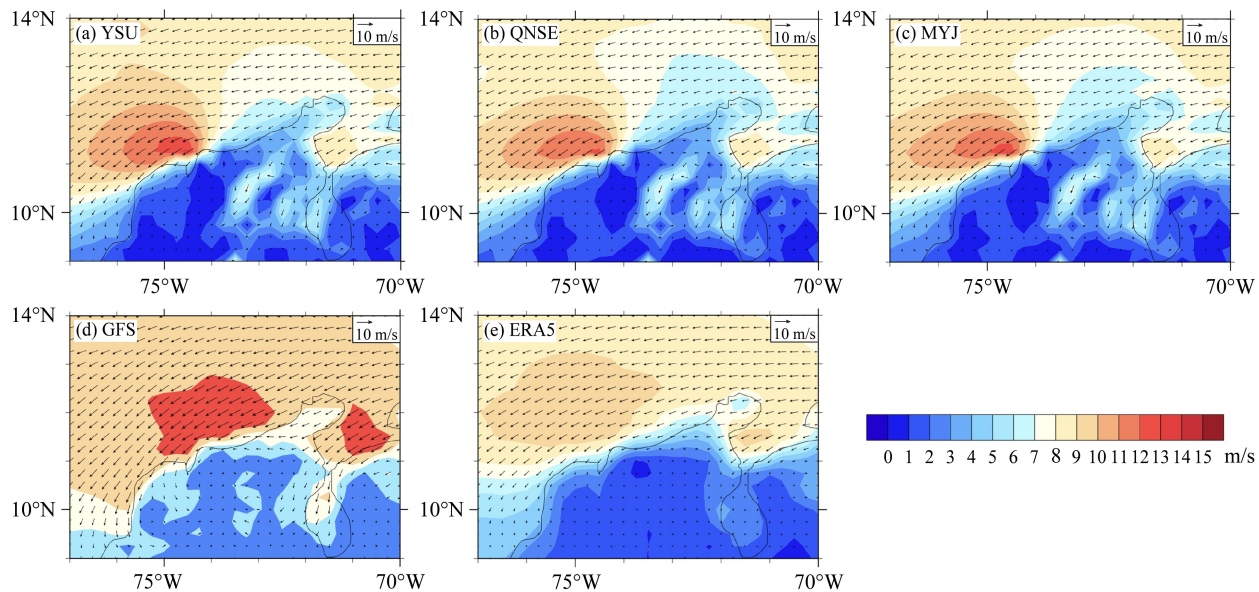


图 2 2022 年 1 月 6~10 日 (a) YSU、(b) QNSE、(c) MYJ 边界层参数化方案模拟数据、(d) GFS 预报数据 (起始时间为 2022 年 1 月 1 日) 与 (e) ERA5 再分析数据在哥伦比亚北部的平均风场空间分布。

Fig. 2 Spatial distributions of average wind fields in northern Colombia during 6–10 Jan 2022 from (a) simulation using the YSU boundary layer parameterization scheme, (b) simulation using the QNSE scheme, (c) simulation using the MYJ scheme, (d) GFS forecast data (initialized from 1 Jan 2022), and (e) ERA5 reanalysis data.

连绵起伏的地势与海陆交界的地形, YSU 方案考虑的非局地效应可能更好地表示了格点上的脉动通量与边界层内的大尺度湍涡, 从而表现更佳 (见图 3)。

通过比对海上风速模拟效果发现, YSU 边界层参数更为适合哥伦比亚北部海域的风速模拟。因

此后续分析中, 采用 YSU 边界层参数方案进行 WRF 模拟。

3.2 公里级预测模型结果分析

前述通过参数化方案优选确定了边界层参数化方案, 因此基于上述方案进行多层嵌套模拟, 实现区域 3 km 模拟, 本节对模拟数据进行评估分析。

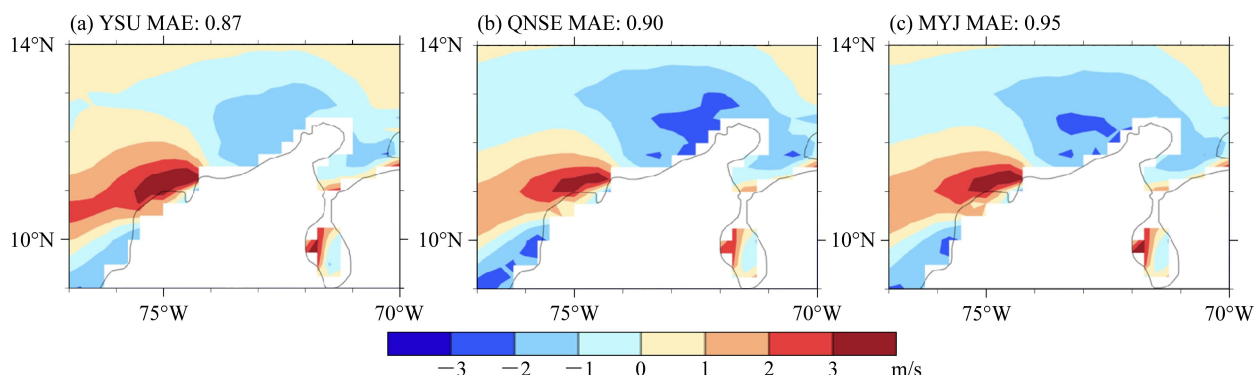


图 3 2022 年 1 月 6 日~10 日 (a) YSU、(b) QNSE、(c) MYJ 边界层参数化方案模拟的海上 10 m 风速在哥伦比亚北部相对于 ERA5 再分析数据的模式偏差空间分布 (起始时间为 2022 年 1 月 1 日)。

Fig. 3 Spatial Biases of simulated 10-m offshore wind speeds in northern Colombia during 6–10 Jan 2022 from (a) YSU scheme, (b) QNSE scheme, (c) MYJ scheme versus ERA5 reanalysis data (initialized from 1 Jan 2022).

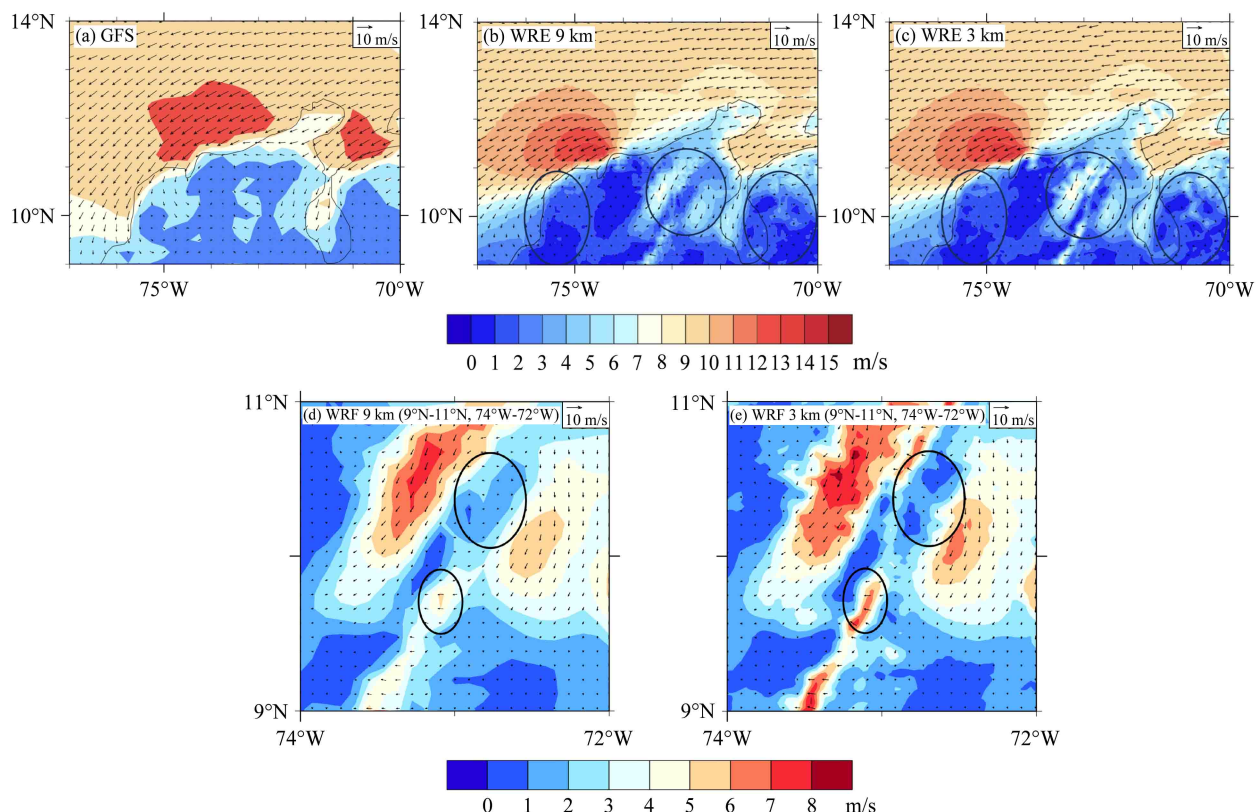


图 4 2022 年 1 月 6~10 日哥伦比亚北部 (a) GFS、(b) WRF9 km 和 (c) WRF3 km 平均风场及 (c) WRF9 km 与 (d) WRF3 km 分辨率细节对比 (黑色圆圈标注处 WRF 9 km 与 3 km 模拟结果存在较大差异)。

Fig. 4 Average wind fields in northern Colombia during 6–10 Jan 2022 from (a) GFS, (b) 9-km WRF, and (c) 3-km WRF datasets with (d) 9-km WRF and (e) 3-km WRF detail comparisons (black circles mark areas with significant differences between the WRF 9-km and 3-km simulation results).

首先选取冬季、夏季两个季节的典型模拟个例进行代表性分析。图 4 和图 5 分别为 2022 年 1 月 6~10 日及 2022 年 7 月 6~10 日 GFS 预报结果、WRF 9 km 模拟结果和 WRF 3 km 模拟结果的风速分布情况。相较于 GFS 预报结果, WRF 9 km 与 WRF 3 km 两种分辨率的模拟结果在 2022 年 1 月与 7 月均显著提升了对于局地特征的精细化模拟。不论是海上还是陆上风速, WRF 模拟结果的特征均更为精细: 如图 4 海上西侧的高值区分布, 在 GFS 的大尺度分布之外, WRF 还能够模拟出近海的高值

中心, 陆上风速也存在类似结果。对于 WRF 9 km 和 3 km 结果, 通过对比也可发现 WRF 3 km 的模拟能够刻画出更为精细的特征。如图 4b、4c 所示, 9 km 模拟在哥伦比亚北部的西北部及安第斯山脉处往往较为粗糙, 仅为单一值区, 整体分布较为一致; 而在 3 km 模拟中, 风速分布更为复杂, 细节更多, 这与 3 km 尺度上更为精细的地形、下垫面分布有关。如图 4d、4e 所示, 相较于 3 km 的模拟, 9 km 分辨率下的结果对安第斯山脉高、低值区的模拟存在不足, 两者存在一定差异。

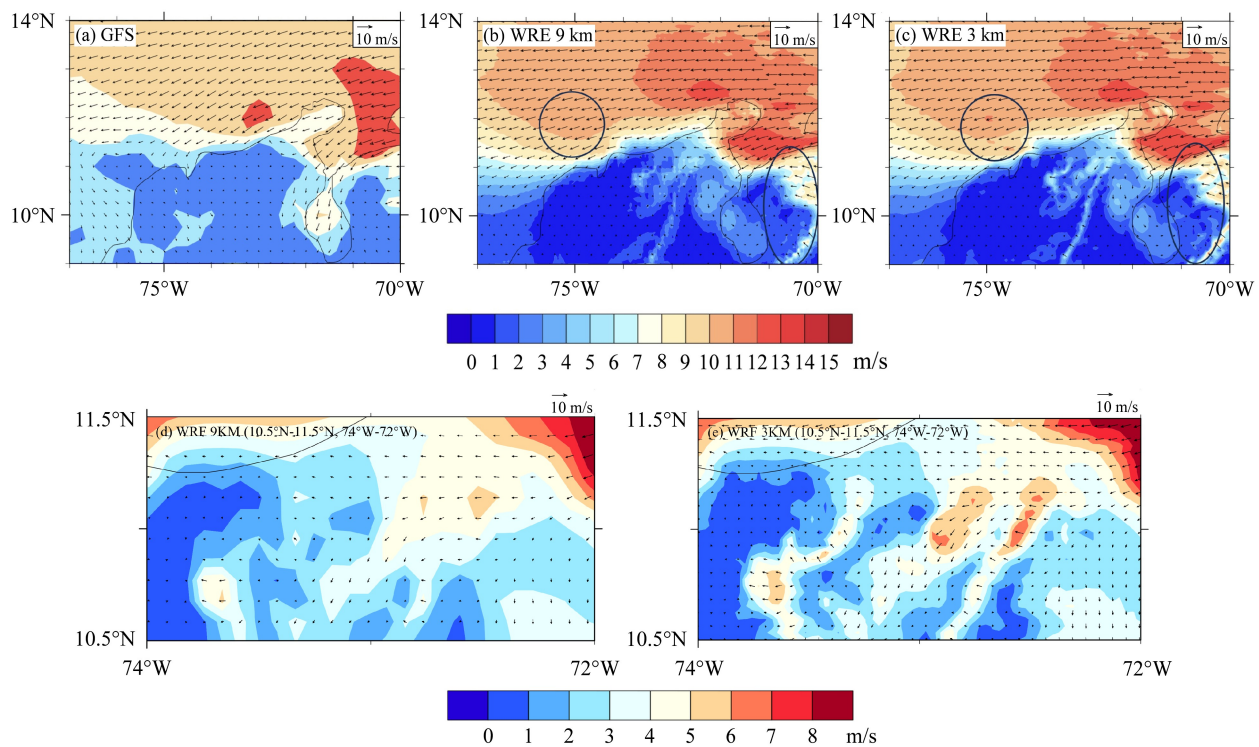


图 5 同图 4, 但为 2022 年 7 月 6~10 日。

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for 6~10 Jul 2022.

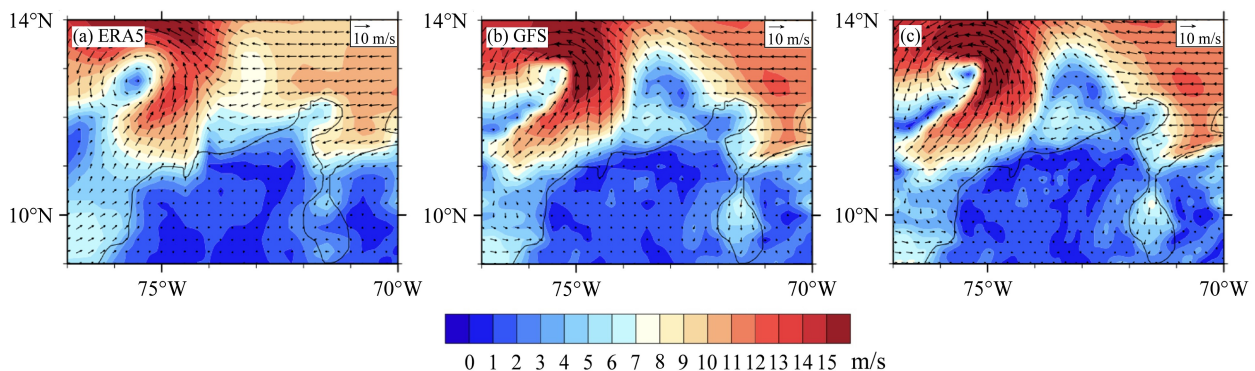


图 6 2022 年 10 月 8 日 00:00 哥伦比亚北部 (a) ERA5 再分析资料、(b) GFS 预报数据、(c) WRF 模拟数据飓风 Julia 风场分布。

Fig. 6 Simulated wind fields for Hurricane Julia in northern Colombia at 0000 UTC 8 Oct 2022 from (a) ERA5 reanalysis data, (b) GFS forecast data, and (c) WRF simulation data.

以上分析表明, WRF 模拟能够更好地刻画出局地尺度风速的高分辨率精细化特征, 对于风机选址、预报、规划尤为重要。而在 WRF 的两种尺度模拟中, 尽管 9 km 模拟的风速特征已经相对 GFS 有了很大提升, 但与 3 km 模拟相比仍然存在较大差异。3 km 数据集在 9 km 模拟的基础上, 还能够进一步复现出更小尺度的变化特征, 这表明其能够更好模拟出小尺度的天气过程以及能够更好地考虑精细地形和下垫面的影响。

3.3 极端事件分析

除常规风速预测外, 一些极端事件如台风等对风电场影响极大, 因此在建立高时空分辨率预测系统中, 必须考虑对于台风和台风相关影响的模拟能力 (Bieli et al., 2019; Wang and Toumi, 2021)。2022 年 10 月 7 日, “Julia” 在加勒比海南部的一个热带气旋中形成, 正好位于南美洲海岸附近, 期间经过哥伦比亚北部海域。10 月 9 日, 其变成了飓风, 并在尼加拉瓜登陆, 同日晚些时候, 其以热带风暴的形式进入太平洋。“Julia” 给中美洲大部分地区带来了暴雨, 造成了危及生命的山洪暴发和致命的泥石流。洪水、风暴潮以及房屋全部或部分倒塌迫使成千上万的人撤离。“Julia” 共造成 35 人直接死亡, 54 人间接死亡, 损失至少 4.06 亿美元。针对哥伦比亚北部海域, 就 10 月 8 日的再分析资料以及 GFS、WRF 模拟进行简要对比分析, 以展示项目构建的高分辨率模拟系统对于台风的模拟能力。

图 6 为 2022 年 10 月飓风 “Julia” 过境时的风场分布图。从风速以及风场来看, 能明显发现以台风样的涡旋结构, 即台风强风带以及中心台风眼地区的静风区。GFS 全球预报结果总体很好地预测出台风的强度以及大致分布, 但对于风眼地区风速存在明显高估。WRF 3 km 尺度高分辨结果与 GFS 相近, 能够较好地预测出此次台风以及其强度。相较 GFS, WRF 3 km 高分辨率结果对于台风眼静风区的风速预测明显改进, 与 ERA5 更为接近。因此, 本高分辨率模拟系统对于台风的模拟整体效果良好。

4 总结与讨论

本研究针对哥伦比亚北部近海沿岸复杂风场条件, 构建并评估了基于 WRF 模式的高分辨率风速模拟系统。通过对 YSU、MYJ 和 QNSE 三种边界

层参数化方案的比较试验, 确定了 YSU 方案在该区域风速模拟中的优越性, 并采用多层嵌套方案实现了 3 km 级别的高分辨率风速模拟。研究结果表明, YSU 方案在模拟哥伦比亚北部近海风速方面表现最佳, 其平均绝对误差 (MAE) 仅为 0.87 m/s, 显著优于 MYJ 和 QNSE 方案。此外, WRF 降尺度后风速模拟的精度显著提升, 相较于粗分辨率的 GFS 全球尺度预报与 ERA5 再分析资料, WRF 9 km、3 km 降尺度模拟数据不仅能够得出更为精细化的局地风速特征, 还能够校正 GFS 数据集下的风速强度和位置偏差, 整体风速分布和强度与 ERA5 再分析数据更为接近, 尤其在极端天气事件如飓风 “Julia” 的模拟中表现出色。此外, 3 km 级别的高分辨率模拟不仅能够更精细地刻画局地风速特征, 还有效捕捉了小尺度天气过程和复杂地形对风场的影响, 这为风电项目的选址、运行调度和风险管理提供了可靠的科学依据。对于 WRF 降尺度后风速模拟精度显著提升的现象, 我们认为可能由分辨率提高对地形和局地效应的刻画、边界层物理过程的改进、深对流过程显式解析以及网格尺度效应的减小等因素所导致。WRF 中次网格地形方案的存在使得在高分辨率降尺度后, 其能够更精细地解析地形, 如山脉、海岸线和城市区域, 而粗分辨率往往会平滑复杂地形, 导致风速的模拟偏差 (Jiménez and Dudhia, 2012, 2013; 马晨晨等, 2016; 杨鹏武等, 2016; 郑亦佳等, 2016; 刘郁珏等, 2019); 并且 WRF 能够更真实地反映地形引起的风场扰动和局地环流, 同时对地表粗糙度的描述也更为精确, 尤其在城市区域, 可以更好地表征建筑物和植被对风速的减速作用 (王鹏波等, 2024); 此外在高分辨率模拟中, 深对流过程往往可以通过显式方式解析, 而不依赖于对流参数化方案, 这减少了参数化模型中的不确定性; 此外 WRF 还提供了尺度自适应的对流参数化方案, 使得在强对流性天气下, 风速模拟的准确性得以提高 (王丹和余贞寿, 2023)。

在研究过程中, 优化边界层参数化方案和实施高分辨率嵌套模拟显著提升了风速预测的精度和细致程度, 尤其在极端天气事件的模拟能力上表现优异。这对于风电项目的经济效益和电力系统的稳定运行具有重要意义。然而, 本研究也存在一些局限性。首先, 哥伦比亚近海地区的观测数据相对匮乏, 尤其是高频率和高空间分辨率的实测数据有限, 限制了模型验证和参数优化的全面性。其次, 尽管

YSU 方案在本研究中表现优越, 但边界层参数化方案本身存在一定的不确定性, 不同天气条件下其适用性可能有所差异。极端事件的模拟能力虽然在飓风“Julia”中得到了验证, 但仍需进一步研究以确保模型在不同类型极端天气事件中的普适性和准确性。

同时, 本研究由于观测数据的缺失等原因, 仍存在一定局限性。首先, 未来研究应通过在哥伦比亚北部近海区域增设更多的实测气象站和浮标, 以获取更丰富的风速数据, 进而支持模型验证和优化; 当前主要基于 ERA5 数据进行评估, 仍然存在较大局限性。其次, 目前的模拟仅基于 WRF 结果, 仍然存在优化改进的空间, 未来应考虑结合其他数值天气预报模式和机器学习方法, 构建多模型集成预报系统, 以提高风速预测的准确性和稳定性。此外, 更深入研究高分辨率模型在不同类型极端天气事件(如台风、强风暴等)中的模拟能力, 完善极端事件的预测, 也是未来的重要方向。

参考文献 (References)

- Bieli M, Camargo S J, Sobel A H, et al. 2019. A global climatology of extratropical transition. Part I: Characteristics across basins [J]. *J. Climate*, 32(12): 3557–3582. doi:10.1175/jcli-d-17-0518.1
- 程雪玲, 胡非, 曾庆存. 2015. 复杂地形风场的精细数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 20(1): 1–10. Cheng Xueling, Hu Fei, Zeng Qingcun. 2015. Refined numerical simulation of complex terrain flow field [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 20(1): 1–10. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13225
- Cohen A E, Cavallo S M, Coniglio M C, et al. 2015. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U. S. cold season severe weather environments [J]. *Wea. Forecasting*, 30(3): 591–612. doi:10.1175/WAF-D-14-00105.1
- Fernández-Alvarez J C, Costoya X, Pérez-Alarcón A, et al. 2023. Dynamic downscaling of wind speed over the North Atlantic Ocean using CMIP6 projections: Implications for offshore wind power density [J]. *Energy Reports*, 9: 873–885. doi:10.1016/j.egy.2022.12.036
- Galperin B, Sukoriansky S. 2010. Geophysical flows with anisotropic turbulence and dispersive waves: Flows with stable stratification [J]. *Ocean Dynamics*, 60(5): 1319–1337. doi:10.1007/s10236-010-0325-z
- Haiden T, Janousek M, Vitart F, et al. 2021. Evaluation of ECMWF forecasts, including the 2021 upgrade [R]. ECMWF. doi:10.21957/xqnu5o3p
- Han J, Pan H L. 2011. Revision of convection and vertical diffusion schemes in the NCEP Global Forecast System [J]. *Wea. Forecasting*, 26(4): 520–533. doi:10.1175/WAF-D-10-05038.1
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2023. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present [DB/OL]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi:https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47
- Hong S Y. 2010. A new stable boundary-layer mixing scheme and its impact on the simulated East Asian summer monsoon [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136(651): 1481–1496. doi:10.1002/qj.665
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 134(9): 2318–2341. doi:10.1175/mwr3199.1
- Janjić Z I. 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122(5): 927–945. doi:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:Tsmecm>2.0.Co;2
- Janjić Z I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model [R]. NCEP Office Note, 437. <https://www.emc.ncep.noaa.gov/officenotes/newernotes/on437.pdf>.
- Jiménez P A, Dudhia J. 2012. Improving the representation of resolved and unresolved topographic effects on surface wind in the WRF model [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2): 300–316. doi:10.1175/jamc-d-11-084.1
- Jiménez P A, Dudhia J. 2013. On the ability of the WRF model to reproduce the surface wind direction over complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(7): 1610–1617. doi:10.1175/jamc-d-12-0266.1
- Kawashima Y, Uchida T. 2017. Effects of terrain-induced turbulence on wind turbine blade fatigue loads [J]. *Energy and Power Engineering*, 9(13): 843–857. doi:10.4236/epe.2017.913053
- 刘郁珏, 苗世光, 刘磊, 等. 2019. 修正 WRF 次网格地形方案及其对风速模拟的影响 [J]. *应用气象学报*, 30(1): 70–81. Liu Yujue, Miao Shiguang, Liu Lei, et al. 2019. Effects of a modified sub-grid-scale terrain parameterization scheme on the simulation of low-layer wind over complex terrain [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 30(1): 70–81. doi:10.11898/1001-7313.20190107
- 马晨晨, 余晔, 何建军, 等. 2016. 次网格地形参数化对 WRF 模式在复杂地形区风场模拟的影响 [J]. *干旱气象*, 34(1): 96–105, 124. Ma Chenchen, Yu Ye, He Jianjun, et al. 2016. Effect of subgrid-scale terrain parameterization on WRF's performance on wind field over complex terrain [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 34(1): 96–105, 124. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-01-0096
- Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. *Rev. Geophys.*, 20(4): 851–875. doi:10.1029/RG020i004p00851
- Posada-Marín J A, Rendón A M, Salazar J F, et al. 2019. WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: Implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain [J]. *Climate Dyn.*, 52(5): 3609–3629. doi:10.1007/s00382-018-4403-0
- Ruiz S A G, Barriga J E C, Martínez J A. 2022. Assessment and validation of wind power potential at convection-permitting

- resolution for the Caribbean region of Colombia [J]. *Energy*, 244: 123127. doi:[10.1016/j.energy.2022.123127](https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123127)
- 孙全德, 焦瑞莉, 夏江江, 等. 2019. 基于机器学习的数值天气预报风速订正研究 [J]. *气象*, 45(3): 426–436. Sun Quande, Jiao Ruili, Xia Jiangjiang, et al. 2019. Adjusting wind speed prediction of numerical weather forecast model based on machine learning methods [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 45(3): 426–436. doi:[10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.012](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.012)
- Wang C H, Hu J, Feng S L, et al. 2011. Comparing different boundary layer schemes of WRF by simulation the low-level wind over complex terrain [C]//2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC). Dengleng: IEEE, 6183–6188. doi:[10.1109/AIMSEC.2011.6009632](https://doi.org/10.1109/AIMSEC.2011.6009632)
- 王丹, 余贞寿. 2023. 公里尺度分辨率 WRF 模拟梅雨暴雨对积云对流参数化的敏感性试验研究 [J]. *大气科学*, 47(6): 1876–1890. Wang Dan, Yu Zhenshou. 2023. Effect of cumulus parameterization schemes on the high-resolution numerical simulation of heavy Meiyu front rainfall events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 47(6): 1876–1890. doi:[10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21259](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21259)
- 王鹏波, 刘永乐, 魏永鹏, 等. 2024. 基于 WRF 模拟的中国西北河谷城市夏季的大气边界层特征 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 60(5): 569–576, 585. Wang Pengbo, Liu Yongle, Wei Yongpeng, et al. 2024. Characteristics of urban atmospheric boundary layer over a northwest valley city of China in summer based on WRF simulation [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 60(5): 569–576, 585. doi:[10.13885/j.issn.0455-2059.2024.05.001](https://doi.org/10.13885/j.issn.0455-2059.2024.05.001)
- Wang S, Toumi R. 2021. Recent migration of tropical cyclones toward coasts [J]. *Science*, 371(6528): 514–517. doi:[10.1126/science.abb9038](https://doi.org/10.1126/science.abb9038)
- Xie B, Fung J C H, Chan A, et al. 2012. Evaluation of nonlocal and local planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 117(D12): D12103. doi:[10.1029/2011JD017080](https://doi.org/10.1029/2011JD017080)
- 杨鹏武, 王学锋, 王麟, 等. 2016. WRF_TopoWind 模式对中国低纬高原高山风速模拟的适用性研究 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 38(5): 766–772. Yang Pengwu, Wang Xuefeng, Wang Lin, et al. 2016. A study on the applicability of WRF_TopoWind model to simulate the mountain wind speed of the low latitude plateau in China [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese)*, 38(5): 766–772. doi:[10.7540/j.ynu.20160060](https://doi.org/10.7540/j.ynu.20160060)
- 姚琪, 郑崇伟, 梁新友, 等. 2013. 北大西洋海表风速季节特征及长期变化趋势分析 [J]. *科技资讯*, (1): 135–138. Yao Qi, Zheng Chongwei, Liang Xinyou, et al. 2013. Seasonal characteristics of sea surface wind field and its long term trend in the North Atlantic Ocean [J]. *Science & Technology Information (in Chinese)*, (1): 135–138. doi:[10.16661/j.cnki.1672-3791.2013.01.198](https://doi.org/10.16661/j.cnki.1672-3791.2013.01.198)
- 郑亦佳, 刘树华, 缪育聪, 等. 2016. YSU 边界层参数化方案中不同地形订正方法对地面风速及温度模拟的影响 [J]. *地球物理学报*, 59(3): 803–815. Zheng Yijia, Liu Shuhua, Miao Yucong, et al. 2016. Effects of different topographic correction methods on the simulation of surface wind speed and temperature in parameterization scheme of the YSU boundary layer [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 59(3): 803–815. doi:[10.6038/cjg20160304](https://doi.org/10.6038/cjg20160304)
- Zhou J Y, Lau K M. 1998. Does a monsoon climate exist over South America? [J]. *J. Climate*, 11(5): 1020–1040. doi:[10.1175/1520-0442\(1998\)011<1020:Damceo>2.0.Co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1020:Damceo>2.0.Co;2)