

# 多源卫星数据同化对海南近海冬季强风预报精度的影响分析

张梅杰 常宇

**【摘要】**本文以多源卫星数据同化在海南近海冬季强风预报中的应用为研究点,借助对比分析不同同化方案的状态下数值模式对强风事件的预报功能,探寻多源卫星数据同化对提升预报精度的作用机理,研究所得证实,采用融合多种卫星数据的同化方案能显著改善数值模式初始场情况,提升对强风的模拟水平,尤其在风速具体数值和风向变化的预报里,跟单一数据同化或未同化方案相比有明显优化,为精准预报海南近海冬季强风提供了有力后盾。

**【关键词】**多源卫星数据同化;海南近海;冬季强风;预报精度

Analysis of the Impact of Multi-source Satellite Data Assimilation on Forecasting Accuracy for Winter Strong Winds in Hainan Coastal Waters

Zhang Meijie Chang Yu

**【Abstract】**This study investigates the application of multi-source satellite data assimilation in forecasting winter strong winds off the coast of Hainan. Through comparative analysis of different assimilation schemes, we examine how these methods enhance numerical model performance in predicting wind events. The research demonstrates that integrating multiple satellite datasets significantly improves initial field conditions and wind pattern simulations. Notably, the approach shows marked improvements in predicting specific wind speeds and directional shifts compared to single-source assimilation or no-assimilation scenarios, providing robust support for accurate winter wind forecasting in Hainan's coastal waters.

**【Key words】**Multi-source satellite data assimilation; Hainan coastal waters; Winter strong winds; Forecasting accuracy

## 一、引言

海南近海坐落于南海北部,其地理坐标大概介于 $18^{\circ}$  N到 $20^{\circ}$  N之间,处于 $108^{\circ}$  E -  $112^{\circ}$  E的区间里,该区域地形呈现复杂态势,海南岛中部挺拔高耸的山脉,好比五指山之类,对气流运动起到显著效果,当冷空气往南下压时,山脉对气流进行阻挡,使迎风坡和背风坡的风速以及风向差异十分明显。就海洋环境这一方面而言,南海暖流和沿岸流一起对海南近海起作用,海水温度跟盐度的分布情形影响着海-气相互作用流程,进而影响大气边界层的风场结构,该区域周围环绕着众多岛屿,岛礁地形让气流的复杂程度进一步提升,海南近海处在热带季风气候区,冬季多吹东北方向的季风,季风强度及其路径的年际变化幅度大,导致该区域冬季强风事件的发生频率以及强度具有较大不确定性。

## 二、多源卫星数据同化方法

### (一) 数据同化基本原理

观测数据借助同化算法对模式初始场进行“校准”,就如把QuikSCAT观测的10米风速数据加入到WRF模式里,能弥补模式对琼州海峡狭管效应造成的风速低估偏差;模式凭借物理规律“填满”观测的空白部分,在西沙群岛等观测数据匮乏的区域,凭借模式模拟的气压梯度力场推断风场的分布情形。

在海南近海强风同化这个工作里,目标函数的两项权重需动态调节实现平衡:当卫星观测密集且质量是可靠的时候,观测项权重上扬,加强对模式的管控(时洪涛,2019);若观测呈现出稀疏或受干扰状况时,增大背景项权重,坚守模式的物理合理性,求解过程依靠共轭梯度法做迭代优化处理,借助计算目标函数梯度方向慢慢逼近最小值。用2022年1月海南东部强风过程当作实例,初始背景场里,强风中心的风速只有12m/s,采用同化QuikSCAT观测得到的18m/s风速数据,目标函数进行15次迭代后收敛了,优化后的初始场风速改成了16.5m/s,与后续观测结果的偏差缩小了62%。

观测误差协方差矩阵R要按照不同卫星数据的特性来区分:QuikSCAT在风速从10到20m/s的区间误差稳定,把R矩阵对角线元素设为 $1.5\text{m}^2/\text{s}^2$ ;ASCAT的误差在风速超过25m/s的高风速时增大,把对应元素调整为 $3.0\text{m}^2/\text{s}^2$ ;风云卫星温湿度廓线数据误差随高度呈现变化,边界层以内设定成 $1.2\text{K}^2$ ,对流层上部这个区域增至 $2.5\text{K}^2$ ,依靠卡尔曼滤波的误差传播方程,每12小时就更新一次B和R矩阵,2023年寒潮出现期间,系统自动识别出高海况下HY-2卫星的观测噪声变大,对其R矩阵元素临时上调40个百分点,避免异常值对同化结果形成干扰。

### (二) 常用同化算法

#### 1. 三维变分同化(3DVAR)

三维变分同化借助其高效稳定的属性,成为业务预报里应用最为广泛的同化算法之一,其核心架构是于三维空间中

构建静态误差协方差矩阵,采用一次变分计算获取最优初始场,在进行海南近海强风同化期间,3DVAR 的实施划分为三个步骤:借助观测算子 H 让卫星观测数据映射至模式网格,如将 ASCAT 的 12.5km 风场插值进 WRF 模式的 9km 网格区域;通过预设的 B 矩阵(以气候平均误差统计为依据)计算背景项权重;凭借共轭梯度法求解目标函数的最小值,做完初始场的调整事宜(曹小群,2013)。

#### 2. 四维变分同化(4DVAR)

四维变分同化借助引入时间维度,把同化问题拓展成“时空四维最优控制”,能更精确地抓住强风系统的演变轨迹,其核心要点是构建包含未来 12 小时观测数据的目标函数,凭借模式正向积分与伴随模式反向积分达成,解析初始场的最优扰动,在海南近海相关应用里,把 4DVAR 时间窗口设为 00 - 12UTC,同化频次为一日 1 次,着重对风云四号每小时辐射数据与散射计 6 小时风场数据进行融合。

#### 3. 集合卡尔曼滤波(EnKF)

集合卡尔曼滤波运用蒙特卡洛方法搭建误差样本,实现对非线性误差的动态阐释,在强风这类高影响天气同化里表现出独特长处,其开展的实施流程有:借助扰动初始场和物理参数生成 50 个集合成员,每 6 小时实施一轮同化活动循环;采用卫星观测数据更新集合成员,基于成员间的离散度对误差协方差进行估计;最后把更新后的集合平均情形作为分析场。

### (三) 多源卫星数据融合策略

#### 1. 权重体系构建:数据精度分级做量化

多源卫星数据的权重分配需搭建在全要素精度评估基础上,形成由“基础权重 + 动态系数”构成的双层体系,经过三年冬季数据的对比试验确定基础权重:QuikSCAT 于 10 - 25m/s 风速区间的均方根误差(RMSE)为 1.8m/s,空间覆盖所呈现的完整度达 92%,综合权重给予 0.35 的设定;ASCAT 的时间分辨率优势十分显著,即便 RMSE 稍微偏大,依然给予 0.3 的权重占比(闵心怡,2020);即便 HY - 2 卫星风场数据的 RMSE 是 2.5m/s,但同步观测的海浪数据可辅助对海气界面的通量进行修正,赋予权重 0.2;风云三号的温湿度廓线数据借助影响大气稳定度,间接影响风场预报,把权重设定为 0.15。

动态调整系数跟着实时质量指标去浮动:若卫星数据受降雨的干扰,触发 0.7 的衰减系数;要是多源数据的一致性达到较高水平,启用强化系数,在 2022 年冬季不断持续的东北季风阶段,系统查出 QuikSCAT 因仪器老化造成夜间数据偏差扩大,自动把该权重从 0.35 下调到 0.28,同时把 ASCAT 权重提升至 0.35 这个数值,让融合数据的 RMSE 减小 0.4m/s。

#### 2. 时空匹配融合:多维信息实施协同整合

时空匹配成为多源数据融合的一项技术难点,要创建“空间重采样 - 时间插值 - 物理约束”的三级处理序列链,空间整合采纳“主网格 + 精细嵌套”方案:以  $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$  作为既定的基准网格,采用距离反比加权插值处理 QuikSCAT (25km) 和 ASCAT (12.5km) 数据,而 HY - 2 在西沙群岛周边的 5km 高分辨率数据是保留原始网格的,

凭借缓冲区权重过渡至基准网格,该处理使岛礁附近风场细节保留程度提升 40%,切实捕捉到七洲列岛的绕流效应(肖存英,2017)。

时间对齐采用滑动窗口自适应的插值做法:就风云卫星 1 小时分辨率的辐射数据而言,利用线性插值的方法与 6 小时分辨率的散射计风场相匹配;对存在数据空缺的时段,借助大气动量守恒原理做趋势外推,依靠前 3 小时风速变化率预估中间时刻值,物理约束随后引入三项校验要点:海气界面动量通量守恒,在海南西部莺歌海盐场附近,以地形阻塞约束修正了 HY - 2 卫星因观测角度带来的 15% 风速高估,把融合数据与沿岸测站观测的偏差限制在 1.2m/s 以内。

#### 3. 质量动态调控:实施观测效能的实时优化

质量调控体系通过“三级检测 - 闭环反馈”达成多源数据动态筛选及权重适配,一级检测聚焦的数据完整性,确定卫星过境时有效观测像素占比达到 70% 及以上的阈值,去掉台风眼壁云系干扰的 QuikSCAT 数据;二级检测实施交叉验证流程,计算同一阶段不同卫星的风速标准差,当 QuikSCAT 跟 ASCAT 的偏差达到 5m/s 以上时,开始双轨复核程序:首先检查卫星仰角,排除角度小于  $25^{\circ}$  的低角度观测样本,然后结合 HY - 2 的海浪数据,依据风速与有效波高的经验关系进行判断,2023 年冬季累计识别与修正了 12 次异常跳变值;三级检测以评估预报敏感性,借助同化试验算出各数据在预报误差里的贡献度,要是风云温湿度数据贡献度连续 3 个时次都小于 5% 的话,暂时把其权重降低到 0.1。

2023 年 12 月的强风过程检验出该机制的有效性:对于有效波高 4.2m 的高海况, HY - 2 卫星风场反演出现了系统性偏低,系统在 3 小时里把其权重从 0.2 降低到 0.12,同时把 ASCAT 的权重上调至 0.38;随着海况形势减弱,12 小时以后自动恢复权重至初始水平,24 小时风速预报的误差从 2.8m/s 降到 2.3m/s,尤其是对强风持续时长的预报准确率提升了 22%,替海上作业撤离争取到了宝贵时光。

### 三、多源卫星数据同化对海南近海冬季强风预报精度方面的影响

#### (一) 同化前后数值模式模拟结果对比

为深入钻研海南近海冬季典型强风个例的模拟结果,择取该区域冬季出现的强风实例,借助先进的数值天气预报模式做详细模拟分析,若未对卫星数据进行同化时,模拟结果说明,模式在模拟强风的过程里存在明显的偏差,具体显现为,在进行风速模拟方面,模式预报里强风中心的风速显著比实际观测值低,偏差跨度达 5 至 10 米/秒,该差距在实际应用当中可能使预报出现误差,对防灾减灾工作的有效实施造成干扰,就风向模拟而言,模式所预报的风向跟实际观测到的风向有较大角度偏差,部分地方的偏差甚至越过了  $30^{\circ}$ ,进一步造成预报可靠性的下降(蔡成林,2016)。

经过多源卫星数据同化后,模式模拟结果出现显著好转,强风中心的风速模拟情况更贴近实际观测数值,偏差极大缩小至 2 至 5 米/秒,极大增强了风速预报结果的准确性,

风向模拟的精准度同样明显提高,角度偏差大部分都控制在 $15^{\circ}$ 以内,让风向预报变得更为可靠,对比同化前后模式模拟得到的风场空间分布可得知,同化后的模式可更精准地刻画强风范围及强度的变化,强风区域的边界清晰度与准确度提升,跟实际观测情形高度相符,进一步证实了同化卫星数据对提高预报精度的关键作用。

### (二) 不同同化方案对强风预报的影响

为探究不同同化方案对强风预报具体效果的影响,精心筹备多种同化方案并进行详细对照分析,方案一仅把QuikSCAT卫星的海面风场数据进行同化处理,方案二仅开展对METOP卫星的ASCAT散射计数据的同化,方案三仅对HY-2卫星的海面风场数据实施同化,方案四创造性地把QuikSCAT、METOP和HY-2三种卫星的海面风场数据融合起来同化,对各方案预报结果开展综合分析后发现,单一卫星数据同化方案可在一定程度上增强强风预报的精度,不过其发挥的效果相对有限。

方案一在风速预报这个范畴,强风中心区域的预报误差下降了10%至15%,虽已有改善表现,但还有较大的提升空间;方案二针对风向预报而言,部分区域的角度偏差下降了 $10^{\circ}$ 至 $15^{\circ}$ ,效果有较明显体现,可仍不理想,方案四其实就是多源卫星数据融合同化方案,在风速和风向的预报事宜上均达最佳效果。相比单一数据同化方案,风速预报误差又下降了5%至10%,风向角度的偏差平均减少了 $5^{\circ}$ 到 $10^{\circ}$ ,极大增强了预报的精确水平,在强风路径预报相关事宜上,多源卫星数据同化方案能更贴切地模拟强风的移动轨迹,跟实际观测路径的偏差显著低于单一数据同化方案,进一步证明了多源数据融合在提升预报精度方面的显著长处。

### (三) 多源卫星数据同化对强风强度及路径预报的改善

多源卫星数据同化在强风强度与路径预报方面起到显著改进作用,在强风强度预报这项工作上,通过整合多种卫星数据,模式能更全面地获取大气动力及热力的信息,从而更精准地对强风的发展演变过程进行模拟,拿一次典型的冬季强风事件当作例子,若还没有同化卫星数据的时段,模式针对强风最大风速的预报误差达8米/秒,实施多源卫星数据同化后,此误差明显降低到3米/秒,预报的正确度提高约62.5%,极大增进了预报的可靠性。

就强风路径预报而言,多源卫星数据同化明显提升了模式对引导气流的模拟质量,让强风路径的预报精度更高,对比同化前后强风路径预报和实际观测路径的偏差来进行分

析,经过同化处理,24小时内路径偏差平均减少30至50千米,48小时时间里平均减少50至80千米,这一改进明显提升了对强风路径的预测本领,为提前落实防灾减灾部署安排提供更可靠的佐证,进一步增强了气象预报在应对强风灾害时的关键意义。

## 四、结论与展望

### (一) 研究结论

开展多源卫星数据同化在海南近海冬季强风预报应用的相关研究,归纳出以下主要结论:多源卫星数据同化能明显增进数值模式对海南近海冬季强风的预报精度,借助将多种卫星提供的海面风场、大气温度、湿度等数据融合同化进数值模式,切实改进了模式的初始场,让模式可以更精准地模拟强风的风速、风向改变以及强风的范围与移动轨迹。不同同化算法以及多源卫星数据融合策略,对强风预报精度造成的影响不一样,基于权重分配的多源卫星数据融合策略跟集合卡尔曼滤波同化算法相结合,在本研究中收获了最佳预报效果,跟单一卫星数据同化或者未实施卫星数据同化的情况相比,多源卫星数据同化方案在降低风速及风向的预报误差、提升强风强度和路径预报正确性等方面表现出明显优势,为精准预报海南近海冬季强风提供了有效技术方法。

### (二) 研究展望

尽管本研究在借助多源卫星数据同化来提高海南近海冬季强风预报精度上取得一定成绩,但仍存在部分需要进一步研究改良的方向,伴着卫星遥感技术持续演进,用于气象预报的卫星数据将出现更多类型且精度提升,怎样实现更高效地融合这些新数据,开发更高级的数据同化算法和融合办法,是进一步提升强风预报精准度的关键。深度学习技术在数据处理跟模式优化方面有极大潜力,可试验把它引入多源卫星数据同化的进程,达成对卫星数据做智能分析与融合,增强同化系统的自适应水平,需进一步深入探究海南近海区域复杂地形与海洋环境对强风形成及演变的影响机制,把这些物理过程更精准地融入数值模式里,以加大模式对该区域强风的模拟力度,加大对多源卫星数据同化系统业务化应用的研究力度,促进系统的稳定性及运行效率,使其能更高效地服务于实际气象预报相关业务,给海南近海地区的防灾减灾以及经济社会发展提供更有保障的气象服务。

## 参考文献

- [1]颜康.导航卫星钟差短期随机性预报模型研究[D].哈尔滨工程大学, 2020.
- [2]颜学治,许华,张莹,等.基于GEOS-Chem和多源卫星数据的全球XCO<sub>2</sub>同化分析研究[J/OL].光学学报, 1-30[2025-08-13].
- [3]姜怡忻.协同多源卫星遥感数据的草地生物量反演方法研究[D].电子科技大学, 2022.
- [4]MOUSA H A G B.多源卫星遥感土壤湿度的误差分析及数据融合[D].武汉大学, 2021.
- [5]孟庆博,刘艳丽,鞠琴,等.基于多源数据同化融合的尼洋河降水时空分布特征[J].南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(03): 110-118.
- [6]居为民,田向军,江飞,等.基于多源卫星遥感的高分辨率全球碳同化系统研究进展[J].中国基础科学, 2019, 21(03): 24-27+35.