

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.096



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



基于熵权 TOPSIS 方法的台风 WRF 模拟方案 参数化评估

魏凯, 何延超, 李浩宇, 张明金

(西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 611756)

摘要: 台风破坏性极强, 其路径及强度的准确模拟直接关系到台风影响区内跨海桥梁的安全设计、选址以及防灾减灾措施的制定。以 1415 号台风“海鸥”为对象, 选取 12 种物理参数化方案组合, 基于 WRF 模式开展台风风场数值模拟。将模拟后的时段根据最大风速半径范围内风场结构是否受陆地影响划分为时段 1 与时段 2, 结合 CMA 最佳路径数据集, 具体对比了两时段各参数化方案及其组合对路径、中心最低气压和最大风速的模拟误差。采用熵权 TOPSIS 方法评估了两时段模拟性能最优的方案, 并将其组合起来与浮标实测数据对比验证。结果表明: 未数据同化的方案模拟的台风路径误差较大; 边界层 YSU 模拟的最大风速误差最小, 而边界层 MYJ 模拟的中心最低气压误差最小; 在时段 1, 使用了边界层 MYJ 的方案模拟性能最好, 时段 2 中微物理方案 WSM6、辐射方案 RRTM/RRTM、边界层 YSU、海面通量 isftcflx-0 的组合模拟性能最好, 两时段最优方案组合之后与浮标实测数据吻合较好。

关键词: 台风; WRF 模式; 物理参数化方案; 最大风速半径; 熵权 TOPSIS 方法

中图分类号: P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Evaluation of typhoon WRF simulation parameterization schemes based on Entropy weight TOPSIS method

WEI Kai, HE Yanchao, LI Haoyu, ZHANG Mingjin

(State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756,
P. R. China)

Abstract: The typhoon is extremely strong, and the accurate simulation of its track and intensity is directly related to the safety design, site selection, disaster prevention and mitigation measures of sea-crossing bridges in the typhoon-affected area. In this paper, Typhoon Kalmaegi (1415) is taken as the object, and 12 combinations of physical parameterization schemes are selected to carry out numerical simulation of typhoon wind field based on the WRF model. The simulated period is divided into period 1 and period 2 according to whether the wind field structure within the radius of the maximum wind speed is affected by land. Combined with the CMA, the simulation errors of each parameterization scheme and its combination on the track, central minimum pressure and maximum wind speed in the two periods was specifically compared. Entropy weight TOPSIS method is used to evaluate the optimal simulation performance in two periods, and the combination is

收稿日期: 2025-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(52222804)

作者简介: 魏凯(1984-), 男, 教授, 主要从事深水大跨桥梁研究, E-mail: kaiwei@swjtu.edu.cn.

Received: 2025-07-13

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 52222804)

Author brief: WEI Kai (1984-), professor, main research interest: sea-crossing bridge, E-mail: kaiwei@swjtu.edu.cn.

compared with the measured buoy data for verification. The results show that the error of typhoon track simulated by the scheme without data assimilation is larger; Boundary layer YSU simulation has the smallest error of maximum wind speed, while boundary layer MYJ simulation has the smallest error of central minimum pressure; In period one, the two schemes using boundary layer MYJ have the best simulation performance, and in period two, the combined simulation performance of microphysical scheme WSM6, radiation scheme RRTM/RRTM, boundary layer YSU and sea surface flux isftcflx-0 is the best, and The combination of the two optimal schemes is in good agreement with the measured data of buoys.

Keywords: typhoon; WRF model; physical parameterization schemes; maximum wind speed radius; entropy weight TOPSIS method

台风是一种破坏力极强的自然灾害,其影响除了自身带来的强风,同时还伴随着暴雨、巨浪、风暴潮等次生灾害,严重威胁着跨海桥梁的建设与运营^[1-2]。例如,2000年夏季0010号台风“碧利斯”期间带来的极端降雨使台湾高屏大桥两处桥墩被水流冲毁,同时桥面下陷^[3]。另外,台风风场作为波浪模拟输入条件的基础,在风浪耦合中起到关键作用,是保证波浪模拟准确的关键^[4]。因此,台风的准确模拟不仅对波浪的准确预测至关重要,也直接关系到桥梁等工程结构的可靠性与运营维护安全性。

目前,沿海地区主要依赖气象台站和雷达等手段观测台风,但由于精度有限、仪器受损、成本高,难以获得全面、连续的数据^[5]。为了克服这些局限,台风数值模拟被广泛使用。台风模拟的方法主要有参数化风场和WRF(Weather Research and Forecast)中尺度大气模式。参数化风场是基于简化的物理模型和数值模拟实现的,其计算效率高,但通常忽略了不同土地覆盖和地形对台风风场的影响^[6]。然而WRF能考虑地形以及更复杂的气象物理过程,并将物理过程转换为参数化方案实现,可以更准确地预测和重现真实大气环境下台风风场和气压场特征^[7]。近年来,随着计算机技术的飞速发展,大量学者利用WRF进行台风模拟,研究显示WRF能较好地模拟台风路径、台风强度等关键特征^[8-10]。但WRF模式包含众多物理参数化方案,且研究表明^[11-13],不同参数化方案的组合可能导致模拟结果存在显著差异。同时,相同的参数化方案在不同的地形下也会展现出不同的模拟性能,Li等^[14]研究发现,边界层YSU擅长模拟山脉、城市地区和陆地/海洋界面等复杂地形。因此筛选出受地形影响前后的最优的参数化方案至关重要。

笔者选取了12种参数化方案,采用WRF模式对1415号台风“海鸥”开展数值模拟。同时依据最大风速半径范围内的风场结构是否受到陆地影响将模拟后的时段划分为时段1、时段2,通过与CMA最佳路径数据集对比,系统评估了各方案在路径、中心最低气压和最大风速上的模拟误差。同时,结

合Li等^[15]提出的熵权TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)方法,分别对两时段内各方案的模拟性能综合评分,进而筛选出两时段模拟性能最优的参数化方案组合。

1 台风介绍

1415号台风“海鸥”(Kalmaegi)在中国登陆速度超过40 m/s,台风登陆后,其强度(台风级)维持了将近11 h,且登陆时恰逢天文大潮期,引发了中国历史罕见的风暴潮,给海南、广东、广西3省区沿海造成了巨大破坏与经济损失^[16]。

该台风于2014年9月12日下午在菲律宾以东的西北太平洋洋面上生成,13日下午5时加强为台风,14日晚间登陆菲律宾吕宋岛东北部,受地形摩擦影响后强度减弱,穿越菲律宾进入南海东北部后,强度再度迅速增强,16日9时40分左右与19时45分左右,分别在海南省文昌市翁田镇沿海和广东省徐闻县南部沿海登陆,中心附近风力均达13级(40 m/s),中心最低气压为960 hPa,16日晚11时登陆越南北部广宁省后,强度迅速减弱并消散。

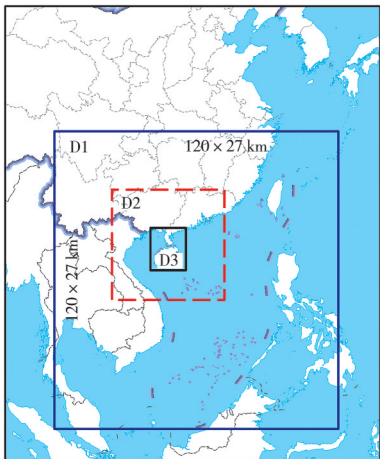
2 WRF参数化方案对海鸥的模拟

2.1 WRF模式设置

尽管台风“海鸥”强度等级不高,但其引起的风暴增水异常显著。使用WRF-ARW模式对其区域发展和运动过程进行模拟,为后续基于ADCIRC的高精度风暴潮模拟提供可靠的风场强迫条件,模拟时间从2014年9月14日6时(UTC)至9月17日6时(UTC),初始场数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的FNL历史再分析数据,包含了26个非均匀分布的气压层与地面层数据。

WRF模式垂直分为50层,模式顶位于50 hPa,模式采用Lambert地图投影,时间步长120 s,嵌套区域分为3层,其中D1格点数为120×120,分辨率为27 km;D2格点数为151×151,分辨率为9 km;D3格点数为166×181,分辨率为3 km,具体嵌套范

围如图 1。WRF 参数设置详见表 1。



审图号: GS(2025)5888号

图 1 WRF 模式嵌套区域

Fig. 1 Nested domain of the WRF model

表 1 WRF 模式设置

Table 1 WRF model configuration

WRF 模式	配置
WRF 版本	WRF ARW V4. 2. 1
地图投影方式	Lambert
时间步长	120 s
顶部压力	50 hPa
垂直分辨率	50 层
水平分辨率	27, 9, 3 km
模式积分时间	72 h

2.2 参数化方案设置

WRF 中物理参数化方案选择众多。主要根据 (<https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/>) WRF 官网中的 WRF Physics Survey Results 选取了使用频率较高的 5 种微物理方案,分别为 Lin、WSM5、WSM6、Thompson、Morrison,两种辐射方案即 RRTM/RRTM 与 RRTMG/RRTMG,边界层方案选用了专门模拟中低纬度地区的 YSU 与 MYJ,一种积云对流方案 Kain-Fritsch(KF)。李响^[17]对 2003—2008 年西北太平洋的 20 次台风进行数值模拟,发现选择 KF 方案模拟得到的结果与观测较为接近,因此仅考虑 KF 一种积云对流方案。具体试验方案如表 2 所示。

2.3 WRF 参数化方案模拟结果验证与对比

采用中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)提供的最佳路径数据集(<https://tc-data.typhoon.org.cn/>),对各方案模拟的台风路径、中心最低气压、近中心最大风速等结果进行对比验证。台风路径对比结果如图 2(a)所示。从图中可以看出,各方案模拟的台风路径整体趋势与 CMA 吻合良好,但 P8(未数据同化)模拟的路径较 CMA 有一定向上偏移的趋势且偏移量较大,因此进行数

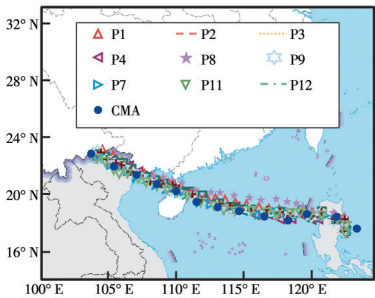
表 2 数值试验方案设计

Table 2 Designs of numerical experiments

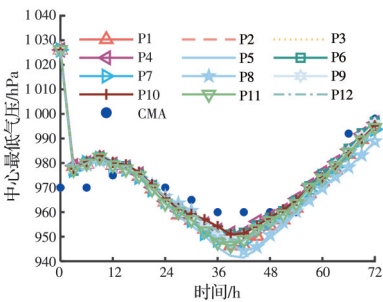
试验方案	微物理方案	长短波辐射方案	边界层方案	海面通量
P1	Lin	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0
P2	Lin	RRTMG/RRTMG	YSU	isftcflx-0
P3	WSM5	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0
P4	WSM5	RRTMG/RRTMG	YSU	isftcflx-0
P5	WSM5	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-1
P6	WSM5	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-2
P7	WSM5	RRTM/RRTM	MYJ	isftcflx-0
P8	WSM5	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0
P9	WSM6	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0
P10	Thompson	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0
P11	Thompson	RRTM/RRTM	MYJ	isftcflx-0
P12	Morrison	RRTM/RRTM	YSU	isftcflx-0

注:P8 未进行数据同化。

据同化能一定程度上减小模拟台风路径误差。



(a) 台风路径对比



(b) 中心最低气压对比

图 2 各方案模拟结果与 CMA 记录值的对比

Fig. 2 Comparison of the simulation results of each scheme with CMA

各方案模拟的不同时刻的中心最低气压与 CMA 对比如图 2(b)所示。从图中可以看出,在 0~12 h 之间,各方案模拟的中心最低气压与 CMA 记录值相差较大,其原因是 WRF 模式在启动时初始场与强迫场严重不匹配造成的一种模式逐渐适应强迫场的现象,而初始场与强迫场达到匹配状态的时间一般需要 12 h,因此一般需要提前模拟^[18]。在 36~48 h 之间,各方案模拟的中心最低气压与 CMA

记录值出现一定偏差,其原因是“海鸥”登陆后下垫面发生变化;在 48~72 h 之间,各方案模拟的中心最低气压与 CMA 记录值接近。

各方案模拟的“海鸥”全区域最大风速如表 3 所示。通过对比各方案发现,长短波辐射方案与数据同化对“海鸥”近中心最大风速的模拟差异性很小,而微物理、海面通量、边界层参数方案的选择对近中心最大风速的模拟差异性较大,采用 isftcflx-1 方案会明显高估中心附近最大风速,因为它能提供更强的感热通量和潜热通量,促进了台风强度的发展^[19]。其中微物理方案 WSM5、海面通量 isftcflx-0、边界层参数方案 MYJ 不仅在同类参数方案中模拟最好,其三者的组合即 P7 模拟也最好。总的来说,通过与 CMA 对比路径、中心最低气压、近中心最大风速可知,WRF-ARW 模式能够较准确地模拟台风“海鸥”的特征。

表 3 全时段各方案最大风速

Table 3 Maximum wind speed throughout the period

试验方案	最大风速/(m/s)	试验方案	最大风速/(m/s)
P1	51.81	P7	44.58
P2	50.64	P8	47.44
P3	47.45	P9	48.07
P4	47.89	P10	48.45
P5	52.01	P11	45.11
P6	48.83	P12	50.67

3 WRF 方案参数化评估

为了更好地评估各方案模拟的“海鸥”最大风速半径范围内的风场结构受陆地影响前后的模拟准确性,同时为了消除 WRF 运行前 12 h 数据不准确的影响,将模拟后的时段分成两段进行分析,第 1 段为 9 月 14 日 18:00—9 月 15 日 21:00(UTC),第 2 段为 9 月 15 日 21:00—9 月 17 日 06:00(UTC),下文简称时段 1 与时段 2。

3.1 基于熵权 TOPSIS 的评估方法

选取 3 个评价指标(平均绝对误差、均方根误差和相关系数),4 个参数指标(经纬度、中心最低气压和最大风速),基于熵权 TOPSIS 方法对各参数化方案的模拟性能综合评分。

TOPSIS 法通过计算衡量各方案与正理想解和负理想解的距离,根据贴近度对各方案进行综合评估与排序,在 TOPSIS 法基础上,结合熵权法,充分利用 WRF 模拟原始数据确定不同参数指标的权重,使其对各方案模拟性能的评估更加客观、合理。通过评价指标对各参数指标进行综合评分,评价指标定义为

$$E_{\text{MAD}} = \sum_{i=1}^N |X^i - X_{\text{obs}}^i| / N \quad (1)$$

$$E_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (X^i - X_{\text{obs}}^i)^2 / N} \quad (2)$$

$$E_R = \frac{\sum_{i=1}^N (X^i - \bar{X})(X_{\text{obs}}^i - \bar{X}_{\text{obs}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X^i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}}^i - \bar{X}_{\text{obs}})^2}} \quad (3)$$

式中: X^i 表示第 i 时刻 WRF 模拟数据, X_{obs}^i 表示第 i 时刻 CMA 最佳路径数据集数据,带上横线的表示所有时刻的平均值, N 表示总时刻数。

熵权法确定参数指标权重的计算过程如下。

1) 根据各方案模拟的原始数据构造初始矩阵。

$$A = (a_{ij})_{c \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{c1} & \cdots & a_{cn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: $i = 1 \cdots c; j = 1 \cdots n, c$ 为模拟的总时刻数, n 表示参数指标, a_{ij} 为第 i 个时刻的第 j 个参数指标数据。

2) 参数指标数据归一化。将各方案模拟出来的经纬度、中心最低气压、最大风速的原始数据进行归一化处理,正向指标的处理方法为

$$y_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)} \quad (5)$$

负向指标的处理方法为

$$y_{ij} = \frac{\max(a_j) - a_{ij}}{\max(a_j) - \min(a_j)} \quad (6)$$

3) 计算各参数指标的权重。

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{c} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2} \quad (7)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^j r_{ij} \quad (8)$$

$$C_j = S_j \cdot R_j \quad (9)$$

$$W_j = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^n C_j} \quad (10)$$

式中: S_j 为第 j 个参数指标的标准差, r_{ij} 为第 i 个参数指标和第 j 个参数指标之间的相关系数, R_j 为第 j 个参数指标与其他参数的相关性, W_j 为第 j 个参数指标的权重。

TOPSIS 法计算过程如下:

1) 根据各方案的平均绝对误差、均方根误差与相关系数,构建各参数指标评价矩阵。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{I1} & \cdots & x_{IJ} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: $I = 1 \cdots m; J = 1 \cdots t, m$ 为参数化方案数, t 为评

价指数。

2)评价指标数据归一化的处理方法同参数指标数据。

3)计算各评价指标的权重。

$$p_{IJ} = \frac{k_{IJ}}{\sum_{I=1}^m k_{IJ}} \quad (12)$$

$$e_j = -\frac{\sum_{I=1}^m p_{IJ} \cdot \ln(p_{IJ})}{\ln(m)} \quad (13)$$

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^t (1 - e_j)} \quad (14)$$

式中: e_j 为第 J 个评价指标的熵值, w_j 为第 J 个评价指标的权重。

4)计算相对贴近度及 TOPSIS 得分, 计算过程如下:

$$z_{IJ} = w_j \cdot \frac{k_{IJ}}{\sqrt{\sum_{I=1}^m k_{IJ}^2}} \quad (15)$$

$$z_j^+ = [\max\{z_{11} \cdots z_{m1}\} \cdots \max\{z_{1t} \cdots z_{mt}\}] \quad (16)$$

$$z_j^- = [\min\{z_{11} \cdots z_{m1}\} \cdots \min\{z_{1t} \cdots z_{mt}\}] \quad (17)$$

$$d_I^\pm = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_j^\pm - z_{IJ})^2} \quad (18)$$

$$G^{SI} = \frac{d_I^-}{d_I^- + d_I^+} \quad (19)$$

式中: $d_I^\pm$ 为第 I 种方案与正、负理想解的距离。

5)建立各参数指标的 TOPSIS 得分矩阵 G, G_n^{Sm} 为第 m 个方案的第 n 个参数指标的 TOPSIS 得分, 计算方法为

$$G = \begin{pmatrix} G_1^{S1} & \cdots & G_n^{S1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_1^{Sm} & \cdots & G_n^{Sm} \end{pmatrix} \quad (20)$$

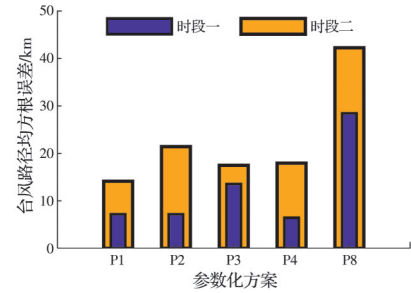
6)根据前述的参数指标权重和参数指标 TOPSIS 得分, 计算得到两时段各方案的综合得分, 计算方法为

$$S_{SI} = \sum_{j=1}^n w_j G_j^{SI} \quad (21)$$

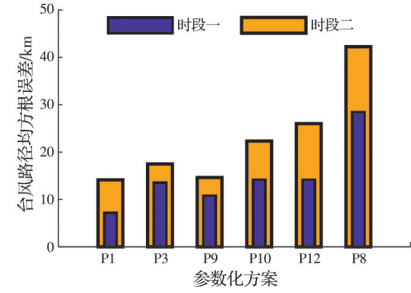
3.2 台风路径误差分析

各方案在两时段的台风路径均方根误差如图 3 所示。从图中可以看出, 所有方案时段 2 的路径均方根误差均大于时段 1, 表明当台风最大风速半径范围内的风场结构受到陆地影响之后, 各方案模拟台风路径的准确性下降。总的来说, 所有方案中 P1 在两时段中模拟台风路径误差最小, 分别为 7.18、14.14 km, 而误差最大的是 P8 (28.44 km、42.25

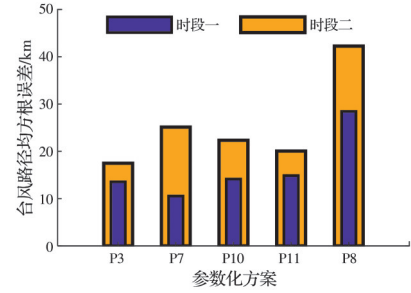
km)。从图 3(b)发现, 在两时段中微物理方案 Lin 模拟出的台风路径误差最小。从图 3(a)发现, 辐射方案在两时段的路径误差变化趋势相反, 从图 3(c)发现, 边界层方案在两时段的路径误差变化趋势也相反, 说明不同类型的物理参数化方案之间是相互联系、相互作用的。从图 3(d)发现, 当海面通量采用 isftcflx-1 方案时, 其在时段 1 的路径误差显著小于其他海面通量方案, 但在时段 2 时路径误差变化不大。



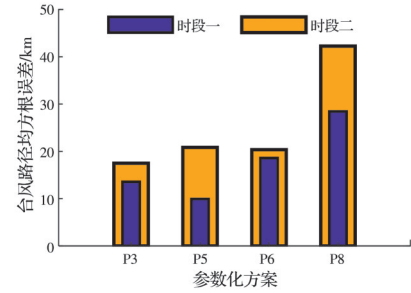
(a) 长短波辐射方案对比



(b) 微物理方案对比



(c) 边界层方案对比



(d) 海面通量方案对比

图 3 各方案两时段台风路径均方根误差

Fig. 3 The root mean square error of the typhoon track in two periods of each scheme

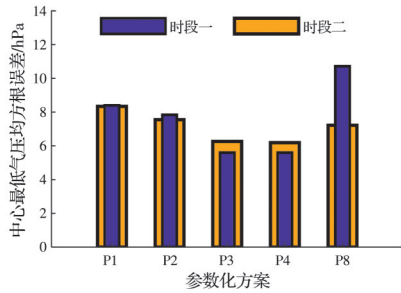
3.3 中心最低气压误差分析

各方案两时段中心最低气压均方根误差如图4所示。从图4可知,未数据同化的方案P8在时段1中心最低气压误差最大,但在时段2与其他方案差别不大;从图4(a)可知,两时段中辐射方案对中心最低气压模拟的影响很小;从图4(b)可知,时段1微物理方案Thompson、时段2微物理方案WSM5模拟的中心最低气压误差最小,相较于模拟最差的微物理方案,误差分别减小了31.06%与33.33%;从

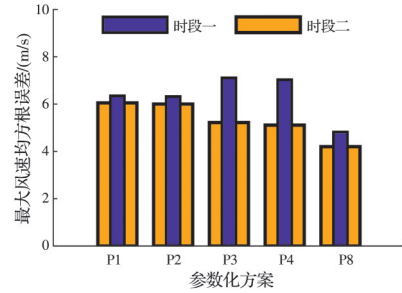
图4(c)可知,两时段中边界层方案YSU能显著降低中心最低气压的模拟误差,误差最大分别减小了34.36%与26.7%;从图4(d)可知,当海面通量采用isftcflx-1方案时,两时段模拟的中心最低气压显著大于其他海面通量方案,而isftcflx-0方案与isftcflx-2方案两时段对中心最低气压的模拟效果差不多。

3.4 最大风速误差分析

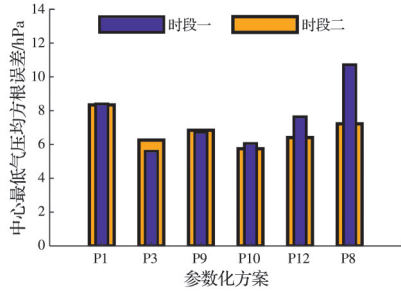
各方案两时段最大风速均方根误差如图5所示。从图5可知,未数据同化的方案P8在两时段中



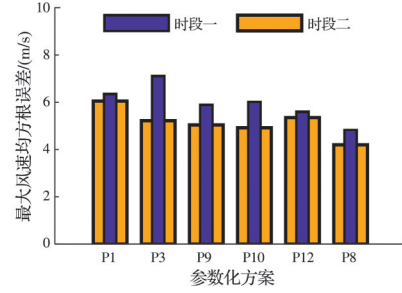
(a) 长短波辐射方案对比



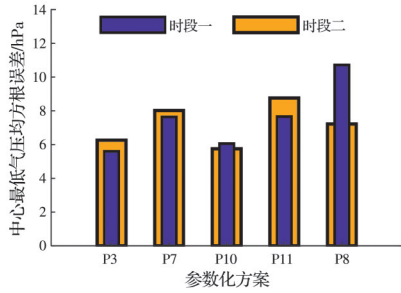
(a) 长短波辐射方案对比



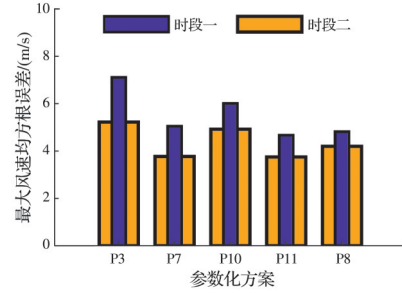
(b) 微物理方案对比



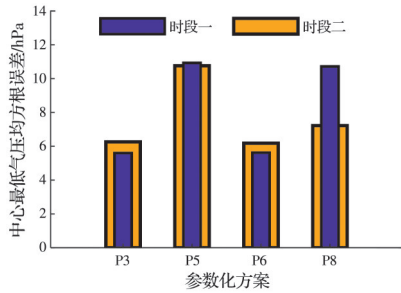
(b) 微物理方案对比



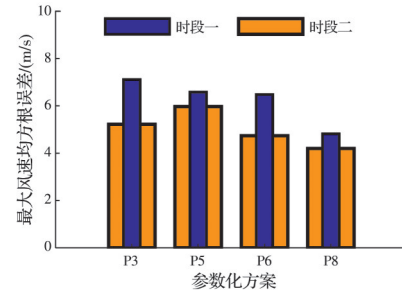
(c) 边界层方案对比



(c) 边界层方案对比



(d) 海面通量方案对比



(d) 海面通量方案对比

图4 各方案两时段中心最低气压均方根误差

Fig. 4 The root mean square error of the minimum pressure in the center of each scheme in two periods

图5 各方案两时段最大风速均方根误差

Fig. 5 The root mean square error of the maximum wind speed in two periods of each scheme

最大风速均方根误差较小。从图 5(a)可知,两时段中辐射方案对最大风速模拟的影响很小;从图 5(b)可知,时段 1 微物理方案 Thompson、时段 2 微物理方案 Morrison 模拟的最大风速误差最小,在模拟最差的微物理方案的基础上,误差分别减小了 18.68% 与 21.24%;从图 5(c)可知,两时段中边界层方案 MYJ 能显著降低最大风速的模拟误差,其模拟误差最小的组合的误差分别减小了 23.78% 与 28.69%;从图 5(d)可知,两时段最大风速模拟误差最小的是海面通量方案 isftcflx-2,相较于模拟误差最大的方案,其分别减小了 20.6% 与 8.86%。

总的来说,微物理方案、边界层方案与海面通量方案的选择对中心最低气压和最大风速的模拟影响较大。边界层方案 YSU 模拟的最大风速误差最小,而 MYJ 模拟的中心最低气压误差最小,其中两时段中对中心最低气压模拟效果最好的方案组合分别是 P10、P7,对最大风速模拟效果最好的方案组合分别是 P3、P11。

3.5 基于熵权 TOPSIS 参数化方案评估与验证

两时段各方案的 TOPSIS 综合得分如图 6 所示。从图 6(a)可知,在时段 1, P7 与 P11 的综合得分最高,其中 P7 与 P11 都使用了边界层 MYJ。由此可见,边界层 MYJ 相较于 YSU 在台风“海鸥”最大风速半径范围内的风场结构未受陆地影响前模拟得更好。从图 6(b)可知,在时段 2 微物理 WSM6、辐射 RRTM/RRTM、边界层 YSU 的组合即 P9 在所

有方案中模拟最好。

由于台风期间实测数据稀缺,仅以浮标 A 实测数据对比验证经熵权 TOPSIS 方法筛选组合后两时段最优方案的模拟性能^[10]。其中浮标 A 的位置为 21.5°N, 113.98°E。从图 7 中可以看出,时段 1 方案 P7 模拟的平均海平面气压与实测更接近,而时段 2 方案 P9 模拟的 10 m 风速更接近实测。总的来说,两时段最优方案组合后的模拟结果与实测吻合较好。

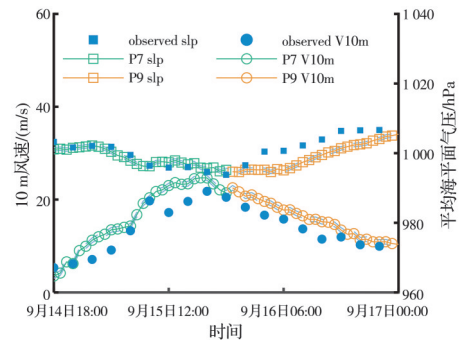


图 7 两时段最优方案与实测的验证

Fig. 7 Verification of the optimal scheme and actual measurement in two periods

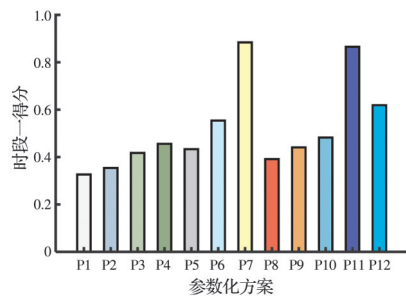
4 结论

使用 WRF 并选取 12 种参数化方案组合,对“海鸥”开展了数值模拟,通过 CMA 验证了各方案对路径、中心最低气压及最大风速模拟准确性。另外,根据“海鸥”最大风速半径范围内的风场结构是否受陆地影响,将模拟后的时段划分为时段 1 和时段 2,分析了两时段不同方案在路径、中心最低气压及最大风速上的模拟误差。同时结合熵权 TOPSIS 方法评估两时段中模拟最好的方案,并将其组合与浮标 A 的实测数据对比验证。主要结论如下:

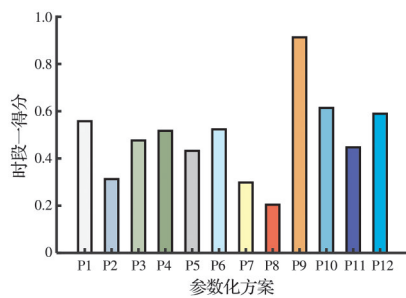
1) 数据同化后的方案模拟的路径与 CMA 吻合良好,未数据同化的方案即 P8 模拟的路径较 CMA 有一定的向上偏移趋势且偏移量较大。在 WRF 模式启动前 12 h,各方案模拟的中心最低气压与 CMA 记录值相差较大。辐射方案与数据同化对“海鸥”近中心最大风速的模拟差异性很小,而微物理、海面通量及边界层参数方案的选择对近中心最大风速的模拟差异性较大。

2) 微物理、边界层与海面通量方案对中心最低气压和最大风速的模拟影响较大。其中,使用边界层 YSU 模拟的最大风速误差最小,使用 MYJ 模拟的中心最低气压误差最小。两时段中对中心最低气压模拟最好的方案分别是 P7、P10,对最大风速模拟最好的方案分别是 P3、P11。

3) 由于地形的影响,同一参数化方案在台风结



(a) 时段 1



(b) 时段 2

图 6 各方案两时段 TOPSIS 综合得分

Fig. 6 The TOPSIS composite score of each scheme in two periods

构受地形影响前后,其模拟性能会呈现显著差异。通过熵权 TOPSIS 方法筛选出了台风风场结构受地形影响前后(即时段 1 与时段 2)模拟最好的方案,然后将筛选出的两时段最优方案进行组合,并与浮标 A 实测数据对比验证,结果表明,经熵权 TOPSIS 筛选组合后的方案与实测吻合较好。其中,在时段 1,使用了边界层 MYJ 的 P7 与 P11 的模拟最好,然而在时段 2,使用了边界层 MYJ 的综合得分较低,模拟最好的是微物理 WSM6、辐射 RRTM/RRTM、边界层 YSU 的组合。

由于 WRF 模式对台风风场的模拟计算量较大,本研究仅针对单一台风开展数值模拟,后续可对更多台风开展 WRF 风场模拟,从而为参数化方案的选择提供理论依据。当获得多种参数化方案的模拟结果后,可通过熵权 TOPSIS 方法筛选出台风风场结构受地形影响前后的综合最优模拟结果,同时当能获取多个实测数据时,应进行不少于两个点位的验证。此外,还可将其组合进而为驱动 SWAN 和 ADCIRC 模型提供更精确的台风风场强迫条件,以提升台风浪与风暴潮模拟的准确性。

参考文献

- [1] WEI K, SHEN Z H, TI Z L, et al. Trivariate joint probability model of typhoon-induced wind, wave and their time lag based on the numerical simulation of historical typhoons [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(2): 325-344.
- [2] 魏凯, 李浩宇, 钟茜, 等. 台风作用下海峡通道内波、流要素极值及其非共线特性研究[J/OL]. *工程力学*, 2023: 1-11. (2023-10-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=GCLX20231027007>.
WEI K, LI H Y, ZHONG X, et al. Study on extreme values and non-collinear characteristics of waves and current parameters in a sea strait under typhoons [J/OL]. *Engineering Mechanics*, 2023: 1-11. (2023-10-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=GCLX20231027007>. (in Chinese)
- [3] 李子涵. 移动式变频变幅桥梁激振系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
LI Z H. Study on vibration excitation system of mobile variable frequency variable amplitude bridge [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [4] 李爱莲. 南海北部台风风暴潮与台风浪耦合特征机理及危险性分析[D]. 山东 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2021.
LI A L. Coupling characteristics, mechanism and risk analysis of typhoon storm surge and typhoon wave in the northern South China Sea [D]. Qingdao, Shandong: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [5] 孔莉莎, 张秀芝. 2018 年 8 号超强台风“玛莉亚”风场模拟[J]. *船舶工程*, 2021, 43(增刊 1): 61-65.
KONG L S, ZHANG X Z. Wind field simulation of super typhoon maria in 2018 [J]. *Ship Engineering*, 2021, 43(Sup 1): 61-65.
- [6] 杨剑, 陈煜, 徐枫, 等. 考虑地形和土地覆盖影响的参数化台风风场模拟[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(1): 47-59.
YANG J, CHEN Y, XU F, et al. Parametric typhoon wind field simulations by considering the effects of terrain and land cover [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(1): 47-59. (in Chinese)
- [7] 周毅, 侯志明, 刘宇迪. 数值天气预报基础[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 193-221.
ZHOU Y, HOU Z M, LIU Y D. Fundamentals of numerical weather Prediction [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 193-221. (in Chinese)
- [8] 钟茜, 魏凯, 沈忠辉, 等. 台风“玛莉亚”风场 WRF 模拟及最大风速半径的非对称特性[J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊 1): 389-396.
ZHONG X, WEI K, SHEN Z H, et al. WRF-based simulation of wind field and asymmetry feature of radius to maximum winds during typhoon Maria [J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(Sup 1): 389-396.
- [9] 刘晓建, 侯棚, 胡晓张, 等. 超强台风“山竹”风浪过程数值模拟研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2023, 20(4): 117-126.
LIU X J, HOU P, HU X Z, et al. Numerical simulation of wind wave process of super typhoon “Mangkhu” [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2023, 20(4): 117-126. (in Chinese)
- [10] JIANG D, HUANG B G, MIAO Q S, et al. Typhoon wind and wave numerical forecasting optimization in the South China Sea based on observation data [J]. *Natural Hazards*, 2025, 121(8): 9653-9677.
- [11] SHEPHERD T J, WALSH K J. Sensitivity of hurricane track to cumulus parameterization schemes in the WRF model for three intense tropical cyclones: Impact of convective asymmetry [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2017, 129(4): 345-374.
- [12] DI Z H, GONG W, GAN Y J, et al. Combinatorial optimization for WRF physical parameterization schemes: A case study of three-day typhoon simulations over the northwest Pacific Ocean [J]. *Atmosphere*, 2019, 10(5): 233.
- [13] NASROLLAHI N, AGHAKOUCHAK A, LI J L, et al. Assessing the impacts of different WRF precipitation

physics in hurricane simulations [J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(4): 1003-1016.

[14] LI L, MA Y X, LI K, et al. The WRF simulation influence of assimilating GNSS water vapor and parameterization schemes on typhoon Rumbia [J]. Atmosphere, 2024, 15(3): 255.

[15] LI H Y, WEI K. Effect of wave-current-surge interactions on simulated wave conditions in a strait via an optimal WRF typhoon model [J]. Ocean Engineering, 2025, 326: 120962.

[16] 张博文, 朱良生. “海鸥”台风作用下近海最大增水、波高分布特征分析[J]. 广东造船, 2019, 38(2): 46-50.
ZHANG B W, ZHU L S. Analysis on characteristics of water set-up extremes and wave height distribution in offshore waters under typhoon “seagull” [J]. Guangdong Shipbuilding, 2019, 38(2): 46-50. (in Chinese)

[17] 李响. WRF 模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(12): 1966-1978.

LI X. Influence of cumulus convection parameterization scheme in WRF model on typhoon path and intensity simulation in northwest Pacific [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(12): 1966-1978. (in Chinese)

[18] 曾祥锋. 基于 WRF 中尺度数值模式台风风场模拟及验证[D]. 广州: 广州大学, 2018.
ZENG X F. Numerical simulation and verification of typhoon wind field by WRF mesoscale model [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2018. (in Chinese)

[19] 李泽培. 中国东南沿海地区台风数值模拟与关键参数研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
LI Z P. Research on numerical simulation and key parameters of typhoons in southeast coastal areas of China [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)

(编辑 XXX)