

WRF模式中不同物理参数化方案组合在中国近海风能资源评估中的适用性研究

杜梦蛟, 易侃*, 文仁强, 张子良, 王浩

(中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038)

摘要: 基于中尺度气象数值模式 WRF(Weather Research and Forecasting), 分别对我国广东、浙江、山东这3个近海典型风能资源储备区域进行了45组物理参数化方案组合连续1 M的敏感性试验, 对试验中多要素的模拟结果进行综合评估, 分别确定了适用于3个风能资源储备区各自排名前3的物理参数化方案组合, 并对其模拟性能较优的原因进行分析。为了测试3个风能资源储备区筛选得到的物理参数化方案组合的适用性, 利用不同于敏感性试验时段的模拟结果, 结合海上测风塔和海洋气象站的实测数据开展进一步评估。结果表明, 优选得到的物理参数化方案组合具有较好的适用性, 其对近海的风速模拟性能较优, 具有实际业务应用价值。

关键词: WRF模式; 参数化方案; 风能资源; 适用性

中图分类号: P743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0065-14

1 引言

随着碳达峰碳中和目标的提出, 我国能源结构正在发生根本性变革。相比于传统的水力发电和火力发电等, 风力发电是一种清洁的、可再生的新型发电形式。近几十年内, 风力发电技术日臻完善, 风电场的数目和规模均迅速扩大, 风力发电在能源结构中的占比快速提高^[1-3]。由于海上风电具有资源丰富、利用效率高、环境友好等优势, 诸多风电开发企业将视线转移至风能资源储备丰富的中国近海区域^[4-5]。近年来, 随着海上风电的迅速发展, 大型化、深远海化、规模化发展已经成为未来我国风电开发的重要方向^[6-8]。

随着我国风电平价上网政策的逐步推进, 风电行业通过技术创新实现降本提效已是大势所趋。这其中, 对风能资源的精准评估是保障风电开发经济效益的重要因素。美国国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)指

出, 提高对大气物理过程和风电场流场特性的认识是目前风能研究和发展中主要面临的三大挑战之一^[9]。在常规的风能资源评估中, 认识和判别风电场所在区域的气象条件主要通过测风塔测风和气象观测资料的统计分析来实现^[10-13]。气象条件具有高度的非线性及混沌特性, 其中的风场同样具有多时空尺度变化的复杂特性, 因此, 单一观测点位且观测时长有限的测风塔或气象站点的风观测资料, 通常无法完全反映出较大范围的海上风电场内的风场实际时空分布特征^[14-15]。在海上风电场站实际建设、运维和评估工作中暴露出的现场观测资料数据缺失、观测代表性不足以及资源评估周期长、难度大等问题, 也进一步制约了海上风能的研究和发展^[16-18]。随着海上风电产业的发展, 为了避免现场风观测存在的误差与缺测等问题, 数值模拟技术在风资源评估中逐渐获得重视, 其中气象数值模式和计算流体力学数值模式得到了较为广泛的应用^[19-22]。

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-05-14。

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2020-0015、WWKY-2020-0703)。

作者简介: 杜梦蛟(1990-), 男, 工程师, 博士, 主要从事风能资源模拟与评估研究。E-mail: du_mengjiao@ctg.com.cn

*通信作者: 易侃(1992-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事新能源气象科技相关研究。E-mail: yi_kan@ctg.com.cn

气象数值模式在风电领域的应用,在一定程度上降低了实际工程应用中现场测风的难度,摆脱完全依赖固定位置观测点的缺陷,能够有效地评估风电场的风能资源分布状况,为风电场的建设和运行提供重要参考^[23-25]。受制于气象数值模式本身性能与目前大型计算机的运算能力,尽管存在诸多提升模拟性能的方法,但是数值气象预报仍然不可避免地存在一定误差^[26-28]。由于气象数值模式主要关注天气和气候学问题,模式本身的动力框架及配套的参数化方案设置主要为了更好地模拟出格点可分辨尺度的天气和气候现象^[29-30],因此,即使是风能领域应用最广泛的中尺度气象数值模式 WRF (Weather Research and Forecasting, 其空间分辨率通常在 3~30 km 左右),其模拟得到的风场精度仍较为有限,很难完全满足风电场开发的实际需求^[31-32]。

对于海上风能资源的模拟和评估,虽然 WRF 模式的风场精度距离风电场实际应用需求还有一定的差距,但其仍然是目前最具应用前景的风场模拟工具之一。前人的研究表明,优化物理参数化方案组合是提高数值预报精度的有效手段^[33]。WRF 模式拥有繁多复杂的物理参数化方案,不同方案的组合从根本上决定了模式最终的模拟和预报效果^[34]。目前,绝大多数 WRF 模式物理参数化方案组合优选是在陆地上进行的,其主要关注了模式在陆地上的模拟性能。然而,海上大气物理过程与陆地存在显著差异,因此前人对于陆地的物理参数化方案组合的优选结果难以完全照搬到海上风能资源评估当中^[35]。为了提高海上风能资源评估中 WRF 模式对气象要素的模拟和预报精度,使其更好地服务于中国海上风电产业,因此有必要对 WRF 模式开展以海域为主的物理参数化方案组合的优选和调整,针对中国近海的不同海况,选择最适用的 WRF 模式物理参数化方案组合。

2 数据与方法

2.1 WRF 模式与数据介绍

本文采用中尺度数值模式 WRF 对广东、浙江、山东这 3 个我国主要的海上风能资源储备区开展参数化方案的适用性研究。WRF 模式是由美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric

Research, NCAR)、美国国家海洋和大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) 以及天气预报系统实验室 (Forecast Systems Laboratory, FSL) 等研究机构和大学联合开发的新一代高分辨率、非静力平衡的中尺度数值模式^[29]。WRF 模式主要包括前处理模块、同化模块、数值模式主模块以及后处理模块。本文使用的是 WRF V3.8 版本。

本文采用的 WRF 模拟范围如图 1 所示。在 3 个研究区域内分别进行模拟,空间分辨率均为 3 km × 3 km,采用的物理参数组合以及评分方案均相同。垂直分层共 50 层,根据由模式 sigma 层到垂直高度的转换计算,能够显示海上风能资源评估最为关注的 200 m 以下风场以及相关天气系统的精细结构。首先选取 45 组试验参数化方案,以 2017 年 7 月作为模拟时段,分别进行 24 h、48 h、72 h 的敏感性试验。根据 45 组敏感性试验的分析结果,筛选出广东、浙江、山东各自模拟效果排名前三的参数化方案组合,结合测风塔观测资料,分别选取冷季 (2020 年 1 月为代表) 和暖季 (2019 年 7 月为代表) 检验模拟效果,以此给出适用于 3 个地区海上风能资源评估的 WRF 参数化方案组合。本文采用的观测数据包括中国长江三峡集团有限公司海上测风塔的多层观

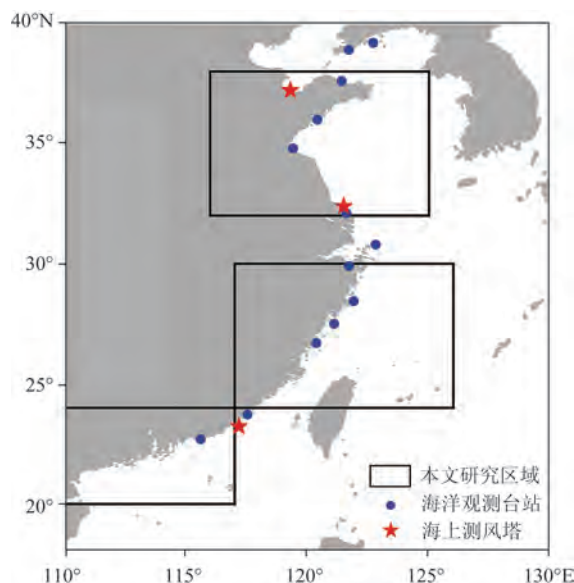


图 1 本文采用的 WRF 模拟区域与观测位置示意图
Fig.1 The WRF simulation domain and observation location used in this paper

测数据(本文主要采用 100 m 高度处的风速、风向)以及中国海洋观测台站的观测资料(观测点位见图 1,包括海洋气象、波浪、温度和盐度,经过格式检查、标准化、质量控制和校准等处理形成标准化数据集,其中风速、风向的观测高度为 10 m)。除此之外,相应时段的 ERA5 再分析数据^[36](全球空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间分辨率为 1 h)以及 GPM (Global Precipitation Measurement) 卫星降水数据^[37](针对全球雨雪进行测量的国际卫星任务,每 3 h 对全世界的雨雪进行一次观测)也被用于本文的分析,ERA5 及其海温数据作为本文 WRF 模拟的初始及边界条件数据。

本文共使用 18 种微物理参数化方案(见表 1)、17 组大气边界层方案与近地层物理参数化方案组合(见表 2)、10 组短波与长波辐射方案组合(见表 3)进行试验,为方便试验及表述,文中均使用所有方案的简称(见表 1—3)。

表 1 本文所用微物理参数化方案及其简称

Tab.1 Microphysics parameterization schemes and their abbreviations used in this study

| 微物理参数化方案 | 简称 |
|-----------------------------|------|
| Kessler | MP1 |
| Lin | MP2 |
| WSM3 | MP3 |
| WSM5 | MP4 |
| Eta (Ferrier) | MP5 |
| WSM6 | MP6 |
| Goddard | MP7 |
| Thompson | MP8 |
| Milbrandt 2-mom | MP9 |
| Morrison 2-mom | MP10 |
| CAM5.1 | MP11 |
| SBU-YLin | MP13 |
| WDM5 | MP14 |
| WDM6 | MP16 |
| NSSL 2-mom | MP17 |
| NSSL 2-mom w/CCN prediction | MP18 |
| NSSL 1-mom | MP19 |
| NSSL 1-momlfo | MP21 |

表 2 本文所用大气边界层与近地层物理参数化方案组合及其简称

Tab.2 The combination of planetary boundary layer and surface layer physical parameterization schemes and their abbreviations used in this study

| 大气边界层与近地层物理参数化方案组合 | 简称 |
|--------------------------------------|---------|
| YSU-revised MM5 Monin-Obukhov scheme | PB1SF1 |
| MYJ-Eta similarity | PB2SF2 |
| QNSE | PB4SF4 |
| MYNN2-revised M-O | PB5SF1 |
| MYNN2-M-O | PB5SF2 |
| MYNN2-MYNN | PB5SF5 |
| MYNN3-revised M-O | PB6SF1 |
| MYNN3-M-O | PB6SF2 |
| MYNN3-MYNN | PB6SF5 |
| ACM-revised M-O | PB7SF1 |
| BouLac-revised M-O | PB8SF1 |
| BouLac-M-O | PB8SF2 |
| UW-revised M-O | PB9SF1 |
| UW-M-O | PB9SF2 |
| Shin-Hong-revised M-O | PB11SF1 |
| GBM-revised M-O | PB12SF1 |
| MRF-revised M-O | PB99SF1 |

表 3 本文所用短波与长波辐射方案组合及其简称

Tab.3 The combination of shortwave and longwave radiation schemes and their abbreviations used in this study

| 短波与长波辐射方案组合 | 简称 |
|-------------|----------|
| CAM-CAM | LW3SW3 |
| CAM-RRTMG | LW3SW4 |
| CAM-RRTMG | LW3SW24 |
| RRTMG-CAM | LW4SW3 |
| RRTMG-RRTMG | LW4SW4 |
| RRTMG-RRTMG | LW4SW24 |
| New Goddard | LW5SW5 |
| RRTMG-CAM | LW24SW3 |
| RRTMG-RRTMG | LW24SW4 |
| RRTMG-FAST | LW24SW24 |

2.2 方法介绍

由于数值模式的输出变量众多,对各个变量模

拟的水平也参差不齐。为了研究适用于不同海域的WRF参数化方案组合,经综合评估后选择了下列评估因子:200 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa和900 hPa的位势高度、温度、经向风与纬向风,以及地面温度、经向风与纬向风、降水。对于降水以外的变量使用均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)与相关系数(Correlation Coefficient, CC)进行定量评估。公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (1)$$

$$\text{CC} = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

式中: N 是用于计算的总数; F_i 是时间 i 的模拟值; O_i 是时间 i 的再分析/观测资料。RMSE用于评估变量大小,CC用于表征变量变化趋势。在计算RMSE和CC时,由于WRF模拟的分辨率远高于ERA5再分析数据,我们首先利用双线性插值将WRF结果进行

处理,分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,然后在插值的网格点上进行评估计算。

任何数值模式都不可能同时实现对所有气象要素场的最优模拟,因此需要有针对性地选取主要关注的物理量进行评估和检验。海上风能资源研究主要关注近地面/海面的风速,以及与其密切相关的三维位势高度(对应槽、脊、气旋等天气系统)、三维温度(反映斜压性过程等)、降水(反映凝结潜热释放过程等)和三维风速。我们将不同的权重赋予不同层次的要素场(大气边界层内风速的权重系数超过60%),通过综合排名最终确定最优的物理参数化方案组合。位势高度、温度和风场评估采用式(1)和式(2)。对于降水,首先按照中国气象局的《降水量等级》(GB/T 28592—2012)将降水分为小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨5个等级,然后采用TS(Threat Score)与ETS(Equitable Threat Score)评分指标在每个等级内分别进行评估。本文共计算了66个客观评分,加权组合的计算公式如下:

$$\text{CC}_H = 0.1\text{CC}_{H(200)} + 0.2\text{CC}_{H(500)} + 0.2\text{CC}_{H(700)} + 0.2\text{CC}_{H(850)} + 0.3\text{CC}_{H(900)} \quad (3)$$

$$\text{RM}_H = 0.1\text{RM}_{H(200)} + 0.2\text{RM}_{H(500)} + 0.2\text{RM}_{H(700)} + 0.2\text{RM}_{H(850)} + 0.3\text{RM}_{H(900)} \quad (4)$$

$$\text{AB}_H = 0.1\text{AB}_{H(200)} + 0.2\text{AB}_{H(500)} + 0.2\text{AB}_{H(700)} + 0.2\text{AB}_{H(850)} + 0.3\text{AB}_{H(900)} \quad (5)$$

$$\text{RA} = 0.5\text{RM}_H + 0.5\text{AB}_H \quad (6)$$

$$\text{CC}_T = 0.1\text{CC}_{T(200)} + 0.1\text{CC}_{T(500)} + 0.1\text{CC}_{T(700)} + 0.2\text{CC}_{T(850)} + 0.25\text{CC}_{T(900)} + 0.25\text{CC}_{T(\text{sur})} \quad (7)$$

$$\text{RM}_T = 0.1\text{RM}_{T(200)} + 0.1\text{RM}_{T(500)} + 0.1\text{RM}_{T(700)} + 0.2\text{RM}_{T(850)} + 0.25\text{RM}_{T(900)} + 0.25\text{RM}_{T(\text{sur})} \quad (8)$$

$$\text{CC}_U = 0.05\text{CC}_{U(200)} + 0.1\text{CC}_{U(500)} + 0.1\text{CC}_{U(700)} + 0.15\text{CC}_{U(850)} + 0.2\text{CC}_{U(900)} + 0.4\text{CC}_{U(\text{sur})} \quad (9)$$

$$\text{RM}_U = 0.05\text{RM}_{U(200)} + 0.1\text{RM}_{U(500)} + 0.1\text{RM}_{U(700)} + 0.15\text{RM}_{U(850)} + 0.2\text{RM}_{U(900)} + 0.4\text{RM}_{U(\text{sur})} \quad (10)$$

$$\text{CC}_V = 0.05\text{CC}_{V(200)} + 0.1\text{CC}_{V(500)} + 0.1\text{CC}_{V(700)} + 0.15\text{CC}_{V(850)} + 0.2\text{CC}_{V(900)} + 0.4\text{CC}_{V(\text{sur})} \quad (11)$$

$$\text{RM}_V = 0.05\text{RM}_{V(200)} + 0.1\text{RM}_{V(500)} + 0.1\text{RM}_{V(700)} + 0.15\text{RM}_{V(850)} + 0.2\text{RM}_{V(900)} + 0.4\text{RM}_{V(\text{sur})} \quad (12)$$

$$\text{ET}_{\text{Light}} = 0.5\text{ETS}_{\text{Light}} + 0.5\text{TS}_{\text{Light}} \quad (13)$$

$$\text{BS}_{\text{Light}} = |\text{BIAS}_{\text{Light}} - 1| \quad (14)$$

$$\text{ET}_{\text{Moderate}} = 0.5\text{ETS}_{\text{Moderate}} + 0.5\text{TS}_{\text{Moderate}} \quad (15)$$

$$\text{BS}_{\text{Moderate}} = |\text{BIAS}_{\text{Moderate}} - 1| \quad (16)$$

$$\text{ET}_{\text{Heavy}} = 0.5\text{ETS}_{\text{Heavy}} + 0.5\text{TS}_{\text{Heavy}} \quad (17)$$

$$\text{BS}_{\text{Heavy}} = |\text{BIAS}_{\text{Heavy}} - 1| \quad (18)$$

$$\text{ET}_{\text{Torrential}} = 0.5\text{ETS}_{\text{Torrential}} + 0.5\text{TS}_{\text{Torrential}} \quad (19)$$

$$\text{BS}_{\text{Torrential}} = |\text{BIAS}_{\text{Torrential}} - 1| \quad (20)$$

$$\text{ET}_{\text{Extraordinary}} = 0.5\text{ETS}_{\text{Extraordinary}} + 0.5\text{TS}_{\text{Extraordinary}} \quad (21)$$

$$\text{BS}_{\text{Extraordinary}} = |\text{BIAS}_{\text{Extraordinary}} - 1| \quad (22)$$

$$ET = 0.1ET_{\text{Light}} + 0.15ET_{\text{Moderate}} + 0.3ET_{\text{Heavy}} + 0.3ET_{\text{Torrential}} + 0.15ET_{\text{Extraordinary}} \quad (23)$$

$$BS = 0.1BS_{\text{Light}} + 0.15BS_{\text{Moderate}} + 0.3BS_{\text{Heavy}} + 0.3BS_{\text{Torrential}} + 0.15BS_{\text{Extraordinary}} \quad (24)$$

$$TS = NA / (NA + NB + NC) \quad (25)$$

$$ETS = (NA - R_{(a)}) / (NA + NB + NC - R_{(a)}), R_{(a)} = (NA + NB)(NA + NC) / (NA + NB + NC + ND) \quad (26)$$

式中: CC 是相关系数; RM 是均方根误差(为了整套公式写法的统一, 将 RMSE 缩写成 RM); AB (Absolute Error) 是绝对误差(模拟与观测之差的绝对值); RA 是综合误差指标; ETS 是降水 ETS 评分; TS 是降水 TS 评分; ET 是降水组合评分; BIAS 是偏差; BS 是偏差指数; PM 是综合排名; 变量 H 、 T 、 U 、 V 分别代表位势高度、温度、纬向风、经向风, 下标 200、500、700、850、900、sur 分别代表 200 hPa、500 hPa、700 hPa、850 hPa、900 hPa 和地面; Light、Moderate、Heavy、Torrential、Extraordinary 分别代表小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨。在式(25)和(26)中, NA 表示预报事件发生, 实况同样发生了的事件; NC 表示预报事件不发生, 但实况却发生了的事件; NB 表示预报事件发生, 但实况却没发生了的事件; ND 表示预报事件不发生, 实况也没发生了的事件。各个指标对应的权重系数用以确保对近地面风场以及强降水的模拟达到综合最优。具体评估步骤如下:

I. 对各个方案结果对应的 CC_H 与 RA 进行排名:

①将 CC_H 按照从大到小排名, 得到各方案排名序列;

②将 RA 按照从小到大排名, 得到各方案排名序列;

将①与②的排名相叠加, 按照从小到大排列, 得到位势高度模拟效果的综合排名 PM_H ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 CC_H 排名为主对数值相等的变量进行再排名;

II. 对各个方案结果对应的 CC_T 与 RM_T 进行排名:

①将 CC_T 按照从大到小排名, 得到各方案排名序列;

②将 RM_T 按照从小到大排名, 得到各方案排名序列;

将①与②中的排名相叠加, 按照从小到大排列, 得到温度模拟效果的综合排名 PM_T ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 CC_T 排名为主对数值相等的变量进行再排名;

III. 对各个方案结果对应的 CC_U 与 RM_U 进行排名:

①将 CC_U 按照从大到小排名, 得到各方案排名序列;

②将 RM_U 按照从小到大排名, 得到各方案排名序列;

将①中的排名与②中的排名乘以 1.25 相叠加, 按照从小到大排列, 得到纬向风模拟效果的综合排名 PM_U ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 RM_U 排名为主对数值相等的变量进行再排名;

IV. 对各个方案预报结果对应的 CC_V 与 RM_V 进行排名:

①将 CC_V 按照从大到小排名, 得到各方案排名序列;

②将 RM_V 按照从小到大排名, 得到各方案排名序列;

将①中的排名与②中的排名乘以 1.25 相叠加, 按照从小到大排列, 得到经向风模拟效果的综合排名 PM_V ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 RM_V 排名为主对数值相等的变量进行再排名;

V. 将各个方案纬向风模拟效果的综合排名 PM_U 与经向风模拟效果的综合排名 PM_V 相累加, 按从小到大排名, 得到各方案对风场模拟的排名序列 PM_W ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 PM_U 排名为主对数值相等的变量进行再排名;

VI. 对各个方案的 ET 与 BS 进行排名:

①将 ET 按照从大到小排名, 得到各方案排名序列;

②将 BS 按照从小到大排名, 得到各方案排名序列;

将①与②中的排名相叠加, 按照从小到大排列, 得到降水模拟效果的综合排名 PM_P ; 叠加排名时如果出现数值相等, 则以 ET 排名为主对数值相等的变量进行排名;

VII. 叠加排名: $PM_H + PM_T + 2 \times PM_W + 2 \times PM_P$, 按从小到大排列, 获得各方案的最终综合排名 PM, 由此确定最优物理参数化方案。

考虑到对 WRF 所有的参数化方案进行遍历测试需要庞大的计算能力和计算时间, 为了有效且合

理地进行研究,本文按照 TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution) 模式优化方法^[38],首先通过客观的综合评估确定效果最优的微物理参数化方案,并对模式的边界层及近地层方案组合进行试验,最后通过客观的综合评估确定效果最优的长波及短波辐射方案组合。由此可以得到3个目标区域各自最优的微物理参数化方案、大气边界层与近地层物理参数化方案组合、短波与长波辐射方案组合。

3 WRF 模式参数化方案组合的优选和评估

本节将围绕广东、浙江、山东这3个我国主要的海上风能资源储备区,通过对历史时段(2017年7月)45组物理参数化方案敏感性试验的24 h、48 h、72 h模拟结果进行综合评估,优选适用于中国近海不同区域的物理参数化方案组合。由于45组历史时段的试验数据量大、检验变量及步骤较多,因此将主要以广东区域的试验为例进行说明。

3.1 微物理参数化方案评估

从广东近海区域24 h物理参数化方案敏感性试验的模拟结果可以看出(见表4),MP13对于纬向风和经向风的模拟结果较好,对其他变量的模拟排名也相对较高,因此在18个方案中综合排名第1;MP18和MP19分列第2名和第3名。MP13综合效果最优的原因主要在于其包含了一个诊断湍流强度变量^[39],该变量对于云内的冰相特征有较好的修正效应,能够更好地模拟广东地区的云微物理过程,尤其是对流较旺盛(广东近海地区水汽充沛,不稳定能量大,对流旺盛)的冰相云过程(此类云凝结潜热释放更大,对大气的动力和热力影响更显著),因此,其所模拟大气的三维动力和热力状态更接近于实际大气。

在广东区域48 h和72 h敏感性试验中(图略),MP13的综合排名同样为18个微物理参数化方案的第1名,MP10和MP9分别为第2名和第3名。在浙江区域24 h、48 h和72 h的敏感性试验中(图略),MP10与MP13的综合排名并列第1,进一步结合近地面风场的模拟结果可以发现,MP10的效果更优,

表4 18种微物理参数化方案对广东区域24 h模拟结果的各项指标单项排名及综合总排名

Tab.4 The individual and comprehensive rank of the 24-hour simulation results of 18 microphysics parameterization schemes for each index in Guangdong

| 方案 | 高度场 | 温度场 | 纬向风 | 经向风 | 合风速 | 降水量 | 总排名 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 18 | 17 | 15 | 17 | 16 | 3 | 12 |
| 2 | 9 | 15 | 11 | 11 | 12 | 15 | 15 |
| 3 | 17 | 16 | 17 | 15 | 16 | 11 | 16 |
| 4 | 5 | 5 | 10 | 10 | 11 | 6 | 7 |
| 5 | 16 | 13 | 18 | 18 | 18 | 16 | 17 |
| 6 | 10 | 11 | 14 | 14 | 14 | 13 | 14 |
| 7 | 8 | 12 | 12 | 5 | 9 | 8 | 10 |
| 8 | 7 | 1 | 8 | 4 | 5 | 14 | 9 |
| 9 | 13 | 10 | 9 | 9 | 9 | 2 | 8 |
| 10 | 4 | 4 | 7 | 7 | 6 | 10 | 5 |
| 11 | 11 | 8 | 6 | 8 | 7 | 1 | 4 |
| 13 | 3 | 6 | 4 | 1 | 3 | 4 | 1 |
| 14 | 2 | 9 | 13 | 12 | 13 | 9 | 11 |
| 16 | 15 | 18 | 16 | 16 | 17 | 18 | 18 |
| 17 | 1 | 14 | 1 | 3 | 1 | 12 | 6 |
| 18 | 6 | 3 | 3 | 2 | 2 | 7 | 2 |
| 19 | 12 | 2 | 2 | 6 | 4 | 5 | 3 |
| 21 | 14 | 7 | 5 | 13 | 10 | 17 | 14 |

MP13为第2名,MP11为第3名。山东区域的敏感性试验中结果为MP9排名第1,MP10和MP7分别为第2名和第3名(图略)。由此不难看出,我国不同区域近海风能资源适用的微物理参数化方案存在着一定差异,但排名前三的方案中有个别方案相同。

3.2 大气边界层与近地层物理参数化方案评估

在选用每个区域综合最优的微物理参数化方案的基础上,我们进一步对17组边界层方案开展敏感性试验,采用类似的方法选取适用于不同区域的大气边界层与近地层物理参数化最优方案。

以10 m纬向风的模拟结果为代表(见图2),从图中可以看出,尽管在多数时间内,不同边界层方案的模拟效果差异不是非常明显,但整体会对数值模拟结果有一定影响。例如,不同方案在48 h敏感性试验的CC相差可超过0.3,72 h敏感性试验的RMSE相差近2倍。这主要是由于风能资源评估所关注的风场变化基本都发生在大气边界层内,其层

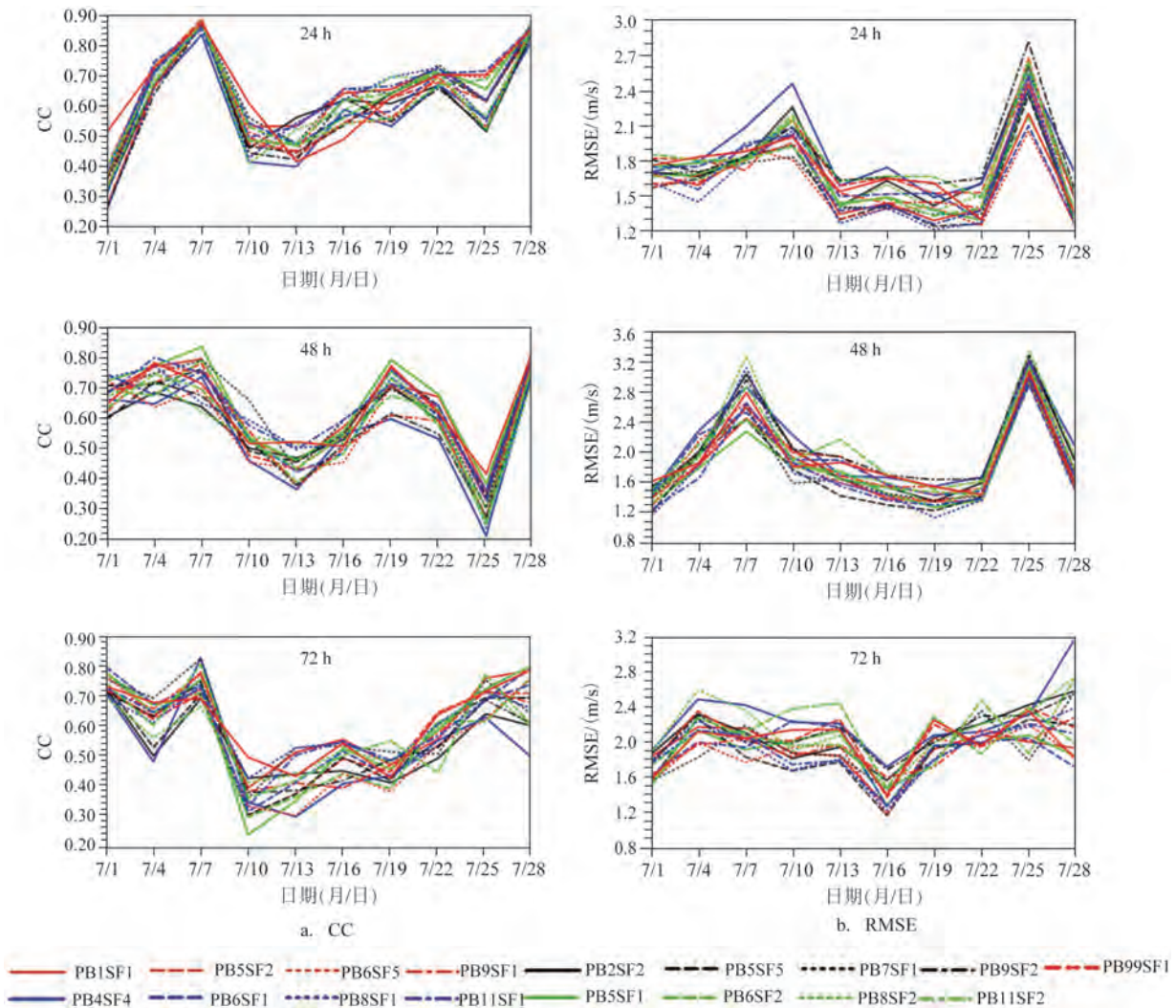


图2 17组大气边界层与近地层物理参数化方案对广东区域10 m纬向风的模拟效果(区域内所有格点的区域平均)
Fig.2 The results of 17 groups of boundary layer and near-surface schemes in simulating the 10 m zonal wind in Guangdong region (the average of all grid points in this area)

结状态和湍流状态主要受边界层过程影响,相关的物理过程可以从动力(地面摩擦、湍流交换、变压风等)与热力(大气层结稳定度、感热、潜热通量交换等)两方面影响整个三维大气,从而对最终的模拟效果产生显著影响。

按照式(3)—(24)进行综合评估,在广东区域24 h、48 h和72 h的敏感性试验中,PB5SF1排名第1,PB1SF1和PB99SF1分别为第2名和第3名。浙江区域的前3名分别是PB5SF1、PB1SF1和PB99SF1(图略)。山东区域的前3名分别是PB99SF1、PB6SF1和PB9SF1(图略)。相较于3个区域的微物理参数化方案,不同区域之间适用的大

气边界层与近地层参数化方案的差异较大,表明3个区域的边界层特征存在较大差异。广东区域排名第1的PB5是一个局地闭合的参数化方案,并加入了凝结过程,对于广东近海相对潮湿与不稳定层结频繁出现的大气边界层过程有着更好的刻画^[40];山东区域排名第1的PB99则采用了局地的、稳定度依赖的扩散方案,该方案对大气边界层的热力特征有着更敏感的反应,更适用于稳定度多变的大气边界层^[41]。

3.3 短波与长波辐射方案组合评估

采用同样的方法对短波与长波辐射方案组合进行综合评估,得到广东区域的前3名方案为

LW3SW4、LW5SW5 和 LW4SW24, 浙江区域的前 3 名方案为 LW3SW3、LW3SW24 和 LW3SW4, 山东区域的前 3 名方案为 LW3SW24、LW3SW3 和 LW5SW5。由此可见, 长波辐射方案基本以 LW3 为最优, 可能由于其适用于我国近海多种气溶胶共存的情形, 而短波辐射方案的差异主要体现在对云体垂直变化的刻画上(图略)^[42]。

按照式(3)~(24)进行综合评估, 分别得到广东、浙江、山东 3 个区域数值模拟的综合最优参数化方案。广东地区的结果为: 第一为 MP13、PB5SF1、LW3SW4; 第二为 MP10、PB1SF1、LW5SW5; 第三为 MP9、PB99SF1、LW4SW24。山东地区的结果为: 第一为 MP9、PB99SF1、LW3SW24; 第二为 MP10、PB5SF1、LW3SW3; 第三为 MP7、PB9SF1、LW5SW5。浙江地区的结果为: 第一为 MP10、PB5SF1、LW3SW3; 第二为 MP13、PB1SF1、LW3SW24; 第三为 MP11、PB99SF1、LW3SW4。在近地面要素的预报中, 这些方案的模拟效果相对较好, 而物理参数化方案存在差异的最主要原因是不同地区的地理与天气气候特征之间存在差异。值得注意的是, 每种方案组合是根据 2017 年 7 月的模拟值与 ERA5 再分析数据对比得到的综合最优结果。某一方案是否切实符合实际需求, 仍然需要在不同时段与实际测风及观测资料进行对比评估, 来探究该方案的适用性。

4 物理参数化方案组合在不同海域风能资源评估中的适用性分析

结合海上测风的观测时间, 我们分别挑选 2019 年 7 月代表暖季, 2020 年 1 月代表冷季, 对广东、浙江、山东开展 1 M 不间断的数值模拟, 以此研究每个地区排名前 3 的物理参数化方案组合(以下分别简称 phys1、phys2、phys3)的实际效果; 同时, 充分结合现场观测结果(优先选取海上测风塔 100 m 高度处的资料进行评估分析, 若模式区域和相应时段缺乏该资料, 则使用海洋观测台站 10 m 高度的观测资料进行补充和替代以完成评估分析), 分析不同季节背景下 WRF 模式物理参数化方案在我国近海不同海域风能资源评估中的适用性。

4.1 广东区域的适用性分析

鉴于大气复杂的热力学和动力学状态, 首先选取包括近地面风场、温度场和海平面气压以及分级降水的近地层变量进行适用性分析(图略)。综合冷季和暖季结果, phys1 对于暖季具有最优的模拟效果, 其在冷季也有良好的表现, 而 phys2 与 phys3 的模拟效果相当。

对于海上风能资源评估最为关注的近地面层不同高度的风场模拟, 我们选择采用中国长江三峡集团有限公司海上测风塔的观测资料开展适用性分析。值得注意的是, 在与测风塔资料进行对比时, 需将 WRF 模式的模拟数据按测风塔不同测量高度进行插值, 并选取海上测风塔 100 m 高度处的数据为重点分析对象。由广东区域暖季结果可见(见图 3), WRF 模式对于风速的模拟优于瞬时变化较为剧烈的风向模拟, 不同方案对于风向的模拟没有明显差距。而冷季风速廓线结果则表明(见图 4), 3 种方案在不同高度处对风速模拟的相关系数存在一定差异, 最大差异约为 5%。

将广东区域冷季和暖季风速与风向模拟结果与实际测风数据进行验证, 原本综合排名第 3 的 phys3 反而具有最优的模拟再现能力, phys1 和 phys2 分别排在第 2 名和第 3 名。由此说明, 大气边界层内的风场随季节和高度的不同, 也会存在显著变化, 100 m 以下的常值通量层内包含了复杂的湍流过程, 不同方案组合在不同垂直层中对湍流过程描述的性能好坏也不同, 难以保证全层均为最优。受到不同参数之间的协同作用和影响, 物理参数化方案单项最优的组合不一定完全适用于实际的风场变化, 经过实际观测的检验, 才能得到更为合理、准确的风能资源模拟和预报适用性综合最优方案。

4.2 浙江区域的适用性分析

在对浙江区域暖季的各项评估中, phys1 的温度、气压和降水的模拟结果均为最优(图略)。由于浙江区域内没有获取到完整的测风塔观测数据, 因此选用海洋观测站的 10 m 风速、风向观测资料, 开展此区域物理参数化方案对风能资源模拟和预报的适用性分析。

从图 5 可以看出, phys1 的风速相关系数较其它

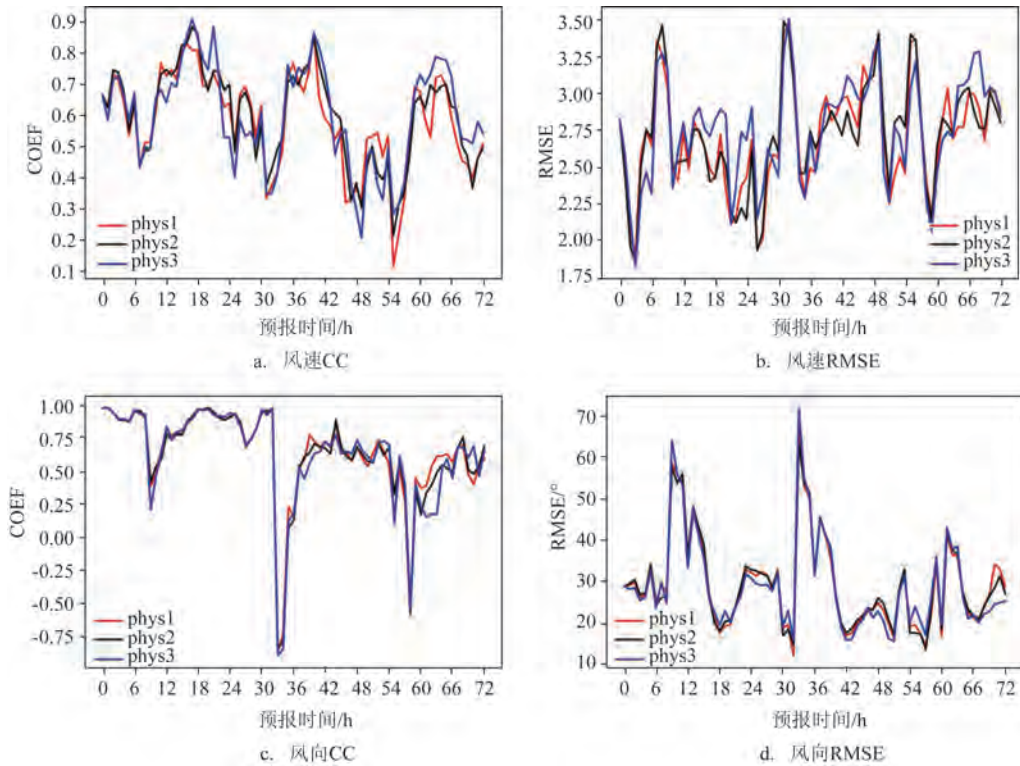


图3 广东区域2019年7月(暖季)的100 m高度风速和风向模拟结果评估

Fig.3 The simulation results of 100 m wind speed and wind direction in Guangdong in July 2019 (warm season)

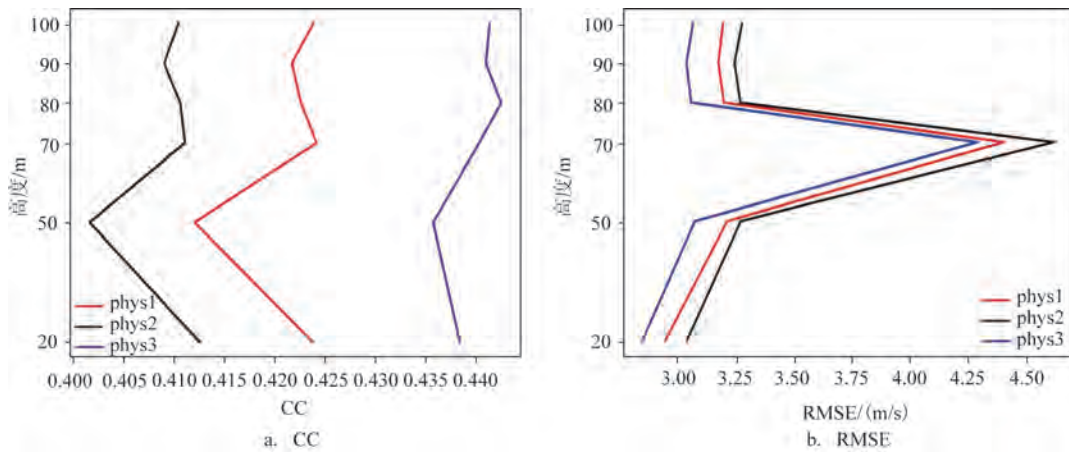


图4 广东区域2020年1月(冷季)的风速廓线模拟结果评估

Fig.4 The simulation results of wind speed profile in Guangdong in January 2020 (cold season)

两组方案有一定的提高,这说明在风场的一致性上,phys1表现性能相对最优。在风速模拟的RMSE中,3种方案组合在不同时间段表现各异,相较而言phys1的RMSE略偏低,但在月末阶段其RMSE相对偏高。总体而言,phys1与phys3的风速RMSE较小,但3种方案对风向的模拟均与实际观测差距较

大(图略),对于适用性评价的参考性相对较低。

在对浙江区域冷季的各项评估中,phys1的结果依然相对最优。但是,从图6也可以看出,各方案对风向的模拟都存在着较大的误差,RMSE最大接近 300° ,CC也反映出模拟风向与实际观测风向相差较大,个别时间的风向CC接近 -0.9 ,类似的特征也体

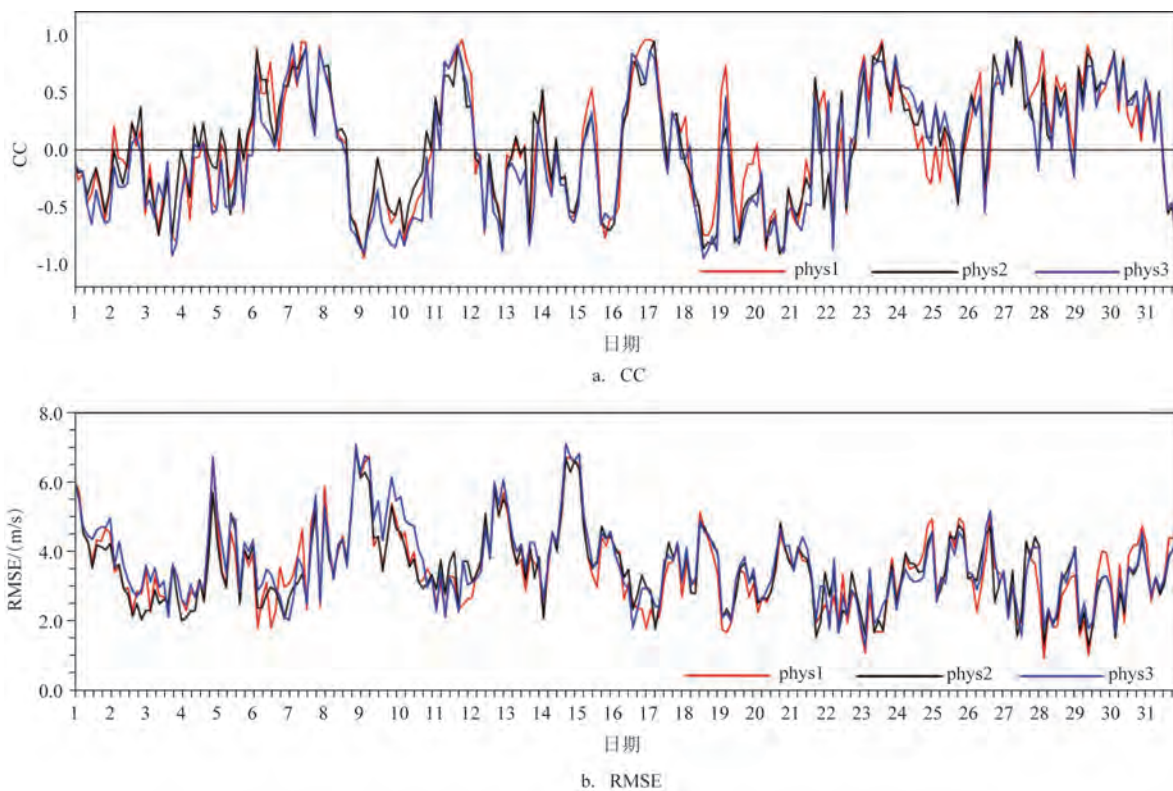


图5 浙江区域2019年7月(暖季)的10 m风速模拟结果评估

Fig.5 Evaluation of the simulation results of 10 m wind speed in Zhejiang in July 2019 (warm season)

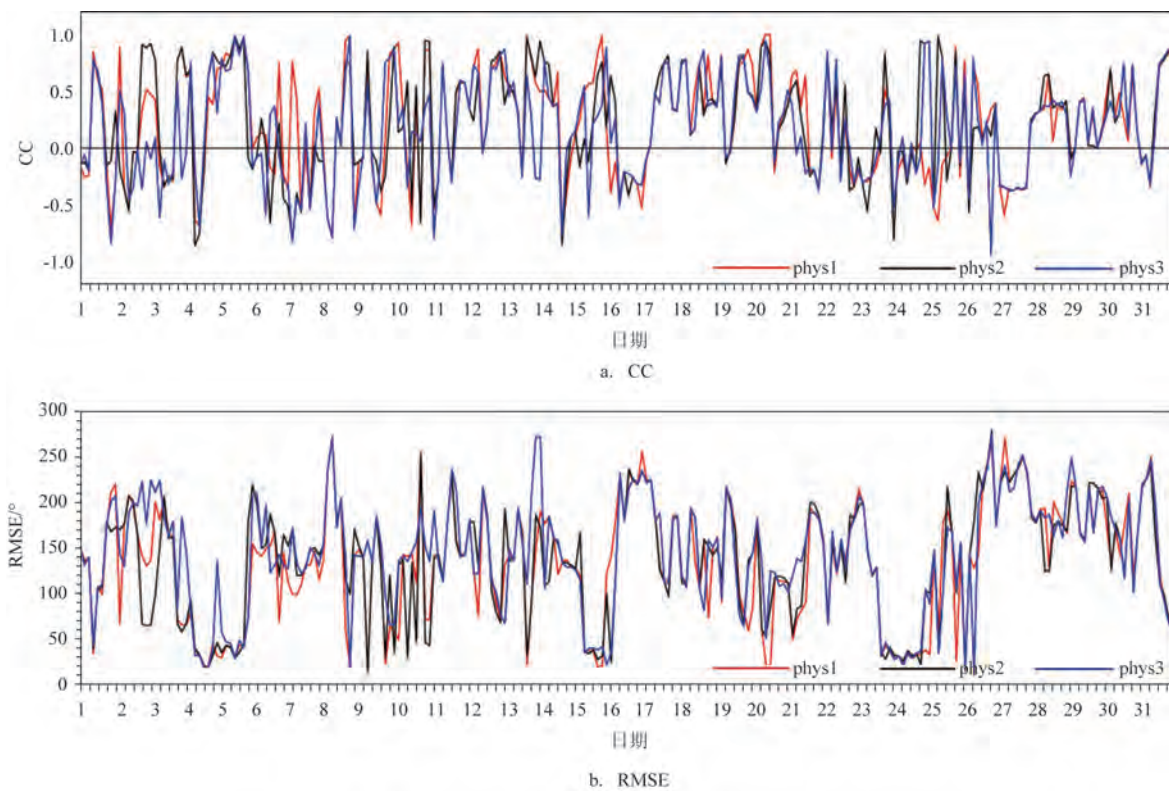


图6 浙江区域2020年1月(冷季)的10 m风向模拟结果评估

Fig.6 Evaluation of the simulation results of 10 m wind direction in Zhejiang in January 2020 (cold season)

现在暖季风向的结果中。这说明这些误差不依赖季节变化,也无法通过不同物理参数化方案组合进行明显改进,这主要是来自WRF模式本身的误差,尤其是下垫面的地形变化。同时,选取的海洋观测站的风速、风向为一定观测时间段内的统计平均值,一定程度上存在跟WRF输出的瞬时风速、风向不匹配问题,而图3由于采用海上测风塔瞬时观测值进行对比,风向的RMSE明显减小。除此之外,如果采用海洋与大气耦合模式或大气与海浪耦合模式,可能会进一步减小WRF模拟的中国近海的风速、风向误差。

总体而言,3种方案在风场模拟的量值方面差异不大,但在时间变化上存在一定的模拟误差,phys1的风速、风向模拟相对于另外两组方案具有一定优势。结合ERA5再分析资料以及GPM卫星降水数据的评估结果,我们认为phys1是最适用浙江区域WRF模式的物理参数化方案组合。

4.3 山东区域的适用性分析

通过与ERA5再分析数据和GPM卫星降水数

据进行对比,结果均显示phys1对山东区域冷季和暖季的近地层具有最好的模拟效果(图略)。在暖季100 m高度处风场的评估中(图略),3组方案组合的模拟性能整体变化较为一致,phys1的CC最大而RMSE最小,因而具有相对最优的模拟效果,这也与再分析资料评估的结果一致,表明phys1优于其他两组方案。

在山东区域的冷季模拟中(见图7),相较其它近地面层变量(如温度、降水等),phys3对于风场的模拟有着较为显著的提升,其风速模拟的CC变大且RMSE减小。这主要是由于随着季节的变化,大气中的主导天气系统出现变化,产生大风的物理机制也由暖季的对流性转化为冷季的斜压性,因此phys3的模拟性能有了显著提高,与phys1的模拟效果几乎相当。

综合上述分析,结合山东地区暖季100 m高度处风场和冷季近地面风场的模拟评估结果,尽管在冷季时phys3的模拟效果有显著提升,但考虑风能资源完整年观测和评估的需求,以及全年整体模拟

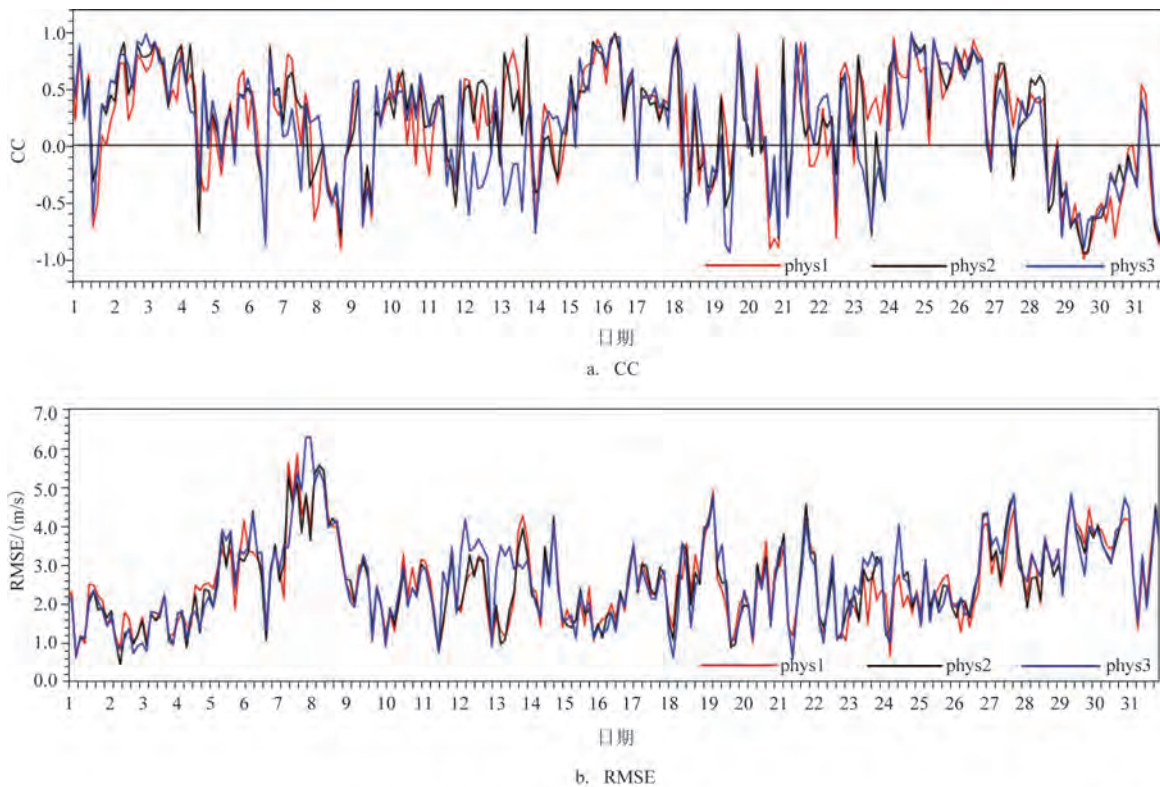


图7 山东区域2020年1月(冷季)的10 m风速预报结果模拟

Fig.7 Evaluation of the simulation results of 10 m wind speed in Shandong in January 2020 (cold season)

效果的稳定性,我们仍然选择冷、暖季模拟效果均较为优秀的 phys1 为适用于山东区域海上风能资源评估模拟的 WRF 物理参数化方案。

5 总结与讨论

本文通过大量 WRF 模式的敏感性试验、连续模拟试验及其与海上实测数据的交叉验证,设计了海上风能资源的科学综合评分方法,检验了常规的近地面层气象要素,且对海上风能资源关注的要素进行了重点加权考量,研究了适用于我国不同海域的 WRF 模式的参数选取和优化方案。对于 WRF 模式在海上风能资源评估中准确性不足的问题,本文也提供了适用于不同海域的参数化方案建议。结论如下:

(1) 针对 2017 年 7 月开展综合评分,根据 45 组敏感性试验的结果,从不同的方案组合中确定了广东、浙江、山东各省的综合评分排名。

(2) 分别选取 2019 年 7 月与 2020 年 1 月作为暖季与冷季代表进行了 1 M 的数值模拟,并用于确认优选结果的适用性。对于暖季,综合评分的最优方案组合对近地层风场、温度场和海平面气压场的模拟均为综合最优;对于冷季,由于其天气系统及物理过程的差异,综合评分的最优方案组合的模拟效果有一定的下降,但仍然在风场方面具备较好的模拟再现能力。

(3) 与海上测风塔与海洋观测站的测风资料进行对比,结果表明,广东区域的风场模拟效果最好,在其近海风能资源评估中适用性最好的参数化方案组合为 NSSL 1-mom, YSU-revised MM5 M-O, RRTMG-RRTMG, 浙江区域为 Milbrandt 2-mom, MRF-revised-M-O, CAM-RRTMG, 山东区域为 Morrison 2-mom, MRF-revised-M-O, CAM-CAM。

本文针对广东、浙江、山东开展的 WRF 模式物理参数化方案综合评分以 2017 年 7 月为模拟期,方案组合对于夏季的大气物理过程具备较好的模拟性能。然而,由于其它季节的天气过程存在差异,大风形成机理也显著不同,因此,以 7 月为基准优选得到的最优方案组合对于其它季节的表征能力有着一定局限性,未达到综合最优。未来可以选取其它季节的代表月份,开展类似的风能资源评估参数

化优选方案。

文中针对 3 个区域冷季、暖季海上风能资源评估的适用性分析中,存在对比观测资料数量偏少,且单个点位代表性不足的问题。未来如果有更多不同观测时间和观测点位的测风数据参与评估验证,将能够更客观地评选物理参数化方案组合,进一步确定不同参数化方案在较大区域内的适用性问题。

致谢:感谢国家科技资源共享服务平台—国家海洋科学数据中心(<http://mds.nmdis.org.cn/>)提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 夏云峰. 2019 年全球新增风电装机超 60GW[J]. 风能, 2020(4): 36-41.
XIA Y F. The global installed capacity of new wind power exceeded 60GW in 2019[J]. Wind Energy, 2020(4): 36-41.
- [2] 于晶, 马广东, 刘鑫, 等. 我国风力发电发展存在的问题及健康发展策略[J]. 工程技术(文摘版), 2022(30).
YU J, MA G D, LIU X, et al. Problems and healthy development strategies of wind power generation in China[J]. Engineering Technology (Abstract Edition), 2022(30).
- [3] 王秀强. 朝阳之晖, 与时并明——2020 年中国风电行业回顾与展望[J]. 能源, 2021(2): 60-65.
WANG X Q. Review and prospect of China's wind power industry in 2020[J]. Energy, 2021(2): 60-65.
- [4] 赵世明, 姜波, 徐辉奋, 等. 中国近海海洋风能资源开发利用现状与前景分析[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 117-121.
ZHAO S M, JIANG B, XU H F, et al. Exploration and application of ocean wind energy resources in coastal sea of China[J]. Ocean Technology, 2010, 29(4): 117-121.
- [5] 宋军. 苏北近海与陆上风资源特性对比研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
SONG J. Comparative research on offshore and onshore wind resources characteristics in North Jiangsu area[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016.
- [6] 张秀芝, BODDINGTON R, 朱蓉, 等. 中国近海风电场开发指南[M]. 北京: 气象出版社, 2010.
ZHANG X Z, BODDINGTON R, ZHU R, et al. China offshore wind farm development guide[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2010.
- [7] 陈建东, 王晶. 国外海上风电的发展现状、趋势与展望[J]. 世界科技研究与发展, 2014, 36(4): 458-464.
CHEN J D, WANG J. Development status, trends and prospects of offshore wind power in some foreign countries[J]. World Sci-Tech R & D, 2014, 36(4): 458-464.
- [8] 易跃春. 中国海上风电 2018[J]. 电力设备管理, 2018(12): 81-83.
YI Y C. China offshore wind power in 2018[J]. Electric Power

- Equipment Management, 2018(12): 81-83.
- [9] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): eaau2027.
- [10] 李泽椿, 朱蓉, 何晓凤, 等. 风能资源评估技术方法研究[J]. 气象学报, 2007, 65(5): 708-717.
- LI Z C, ZHU R, HE X F, et al. Study on the assessment technology of wind energy resource[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2007, 65(5): 708-717.
- [11] BROWER M C. 风资源评估: 风电项目开发实用导则[M]. 刘长浥, 张菲, 王晓蓉, 译. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- BROWER M C. Wind resource assessment: a practical guide to developing a wind project[M]. LIU C Y, ZHANG F, WANG X R, trans. Beijing: China Machine Press, 2014.
- [12] 朱飙, 李春华, 陆登荣. 甘肃酒泉区域风能资源评估[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 152-156.
- ZHU B, LI C H, LU D R. Wind energy resource assessment of Jiuquan, Gansu Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2009, 27(2): 152-156.
- [13] 旷芳芳, 张友权, 张俊鹏, 等. 3种海面风场资料在台湾海峡的比较和评估[J]. 海洋学报, 2015, 37(5): 44-53.
- KUANG F F, ZHANG Y Q, ZHANG J P, et al. Comparison and evaluation of three sea surface wind products in Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(5): 44-53.
- [14] 廖忠云, 季民. 海洋风场三维可视化方法研究[J]. 海洋信息, 2016(2): 1-5.
- LIAO Z Y, JI M. Research on 3D visualization method of marine wind field[J]. Marine Information, 2016(2): 1-5.
- [15] 周海, 匡礼勇, 程序, 等. 测风塔在风能资源开发利用中的应用研究[J]. 水电自动化与大坝监测, 2010, 34(5): 5-8.
- ZHOU H, KUANG L Y, CHENG X, et al. An applied study on wind tower for wind energy resources exploitation[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2010, 34(5): 5-8.
- [16] 蔡树群, 牛建伟, 何映晖, 等. 基于海上风电场构建海洋水文同步实时现场观测系统的思考[J]. 热带海洋学报, 2021, 40(3): 96-102.
- CAI S Q, NIU J W, HE Y H, et al. A view on constructing synchronous real-time in-situ observational system of marine hydrology based on offshore wind power field[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2021, 40(3): 96-102.
- [17] 谢今范, 雷杨娜, 孙娴. 风电场代表年数据订正方法的不确定性分析[J]. 太阳能, 2015(4): 48-55.
- XIE J F, LEI Y N, SUN X. Uncertainty analysis of correction method for representative annual data of wind farm[J]. Solar Energy, 2015(4): 48-55.
- [18] 韩毅, 赵勇, 童博, 等. 复杂地形风场的风资源评估方法与展望[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 139-146.
- HAN Y, ZHAO Y, TONG B, et al. Review and outlook of wind resource assessment methods for wind site located at complex terrain[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 139-146.
- [19] 易侃, 张子良, 张皓, 等. 海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势[J]. 分布式能源, 2021, 6(1): 1-6.
- YI K, ZHANG Z L, ZHANG H, et al. Technical status and development trends of numerical modeling for offshore wind resource assessment[J]. Distributed Energy, 2021, 6(1): 1-6.
- [20] 李正泉, 宋丽莉, 马浩, 等. 海上风能资源观测与评估研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(8): 800-810.
- LI Z Q, SONG L L, MA H, et al. Review of methodologies for offshore wind resource observation and assessment[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(8): 800-810.
- [21] 程兴宏, 陶树旺, 魏磊, 等. 基于WRF模式和自适应偏最小二乘回归法的风能预报试验研究[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1461-1469.
- CHENG X H, TAO S W, WEI L, et al. Short-term wind power forecasting experiment based on WRF model and adapting partial least square regression method[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(5): 1461-1469.
- [22] 应有, 申新贺, 姜婷婷, 等. 基于中微尺度耦合模式的风电场风能资源评估方法研究[J]. 可再生能源, 2021, 39(2): 195-200.
- YING Y, SHEN X H, JIANG T T, et al. Research on wind resource assessment method based on the coupled mesoscale-microscale framework[J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2): 195-200.
- [23] BILAL M, BIRKELUND Y, HOMOLA M, et al. Wind over complex terrain-Microscale modelling with two types of mesoscale winds at Nygardsfjell[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 647-653.
- [24] BADGER J, FRANK H, HAHMANN A N, et al. Wind-climate estimation based on mesoscale and microscale modeling: statistical-dynamical downscaling for wind energy applications[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(8): 1901-1919.
- [25] 穆海振, 徐家良, 柯晓新, 等. 高分辨率数值模式在风能资源评估中的应用初探[J]. 应用气象学报, 2006, 17(2): 152-159.
- MU H Z, XU J L, KE X X, et al. Application of high resolution numerical model to wind energy potential assessment[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(2): 152-159.
- [26] ABERSON S D. The impact of dropwindsonde data from the THORPEX pacific area regional campaign and the NOAA hurricane field program on tropical cyclone forecasts in the global forecast system[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(9): 2689-2703.
- [27] HALLY A, RICHARD E, FRESNAY S, et al. Ensemble simulations with perturbed physical parametrizations: Pre-HyMeX case studies[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2014, 140(683): 1900-1916.
- [28] SUN G D, MU M. A new approach to identify the sensitivity and importance of physical parameters combination within numerical models using the Lund-Potsdam-Jena (LPJ) model as an example

- [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 128(3): 587-601.
- [29] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A description of the advanced research WRF version 2[R]. Boulder: NCAR, 2018, 113: 7-25.
- [30] SONG J B, FAN W, LI S, et al. Impact of surface waves on the steady near-surface wind profiles over the ocean[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 155(1): 111-127.
- [31] CARVALHO D, ROCHA A, GÓMEZ-GESTEIRA M, et al. WRF wind simulation and wind energy production estimates forced by different reanalyses: comparison with observed data for Portugal [J]. Applied Energy, 2014, 117: 116-126.
- [32] CLIFFORD K T. WRF-model performance for wind power forecasting in the coast ranges of central California[D]. San Jose State University, 2011.
- [33] HU X M, KLEIN P M, XUE M. Evaluation of the updated YSU planetary boundary layer scheme within WRF for wind resource and air quality assessments[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(18): 10490-10505.
- [34] JÄRVINEN H, LAINE M, SOLONEN A, et al. Ensemble prediction and parameter estimation system: the concept[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2012, 138 (663): 281-288.
- [35] GIANNAKOPOULOU E M, NHILI R. WRF model methodology for offshore wind energy applications[J]. Advances in Meteorology, 2014, 2014 (9): 68-79.
- [36] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [37] SMITH E A, ASRAR G, FURUHAMA Y, et al. International global precipitation measurement (GPM) program and mission: an overview[M]//LEVIZZANI V, BAUER P, TURK F J. Measuring Precipitation from Space. Dordrecht: Springer, 2007.
- [38] TZENG G H, HUANG J J. Multiple attribute decision making: methods and applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [39] LIN Y L, COLLE B A. A new bulk microphysical scheme that includes riming intensity and temperature-dependent ice characteristics[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(3): 1013-1035.
- [40] NAKANISHI M, NIINO H. An improved Mellor - Yamada level-3 model: its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 119(2): 397-407.
- [41] BETTS A K, HONG S Y, PAN H L. Comparison of NCEP-NCAR Reanalysis with 1987 FIFE Data[J]. Monthly Weather Review, 1996, 124(7): 1480-1498.
- [42] COLLINS W D, RASCH P J, BOVILLE B A, et al. Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0)[R]. NCAR, 2004.

Study on the applicability of different combination of physical parameterization schemes of WRF model in assessing offshore wind energy resources of China

DU Mengjiao, YI Kan*, WEN Renqiang, ZHANG Ziliang, WANG Hao

(Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on the Weather Research and Forecasting (WRF) mesoscale numerical model, 45 groups of physical parameterization scheme combinations are used to conduct sensitive experiments lasting 1 month for the offshore areas of Guangdong, Zhejiang and Shandong provinces, which are the three typical wind energy resource reserve areas in China, and the simulation results of multiple elements in the experiments are comprehensively evaluated in order to determine 3 physical parameterization scheme combinations that are suitable for each of the 3 wind energy resource reserve areas. Moreover, the reason for their better simulation performance is analyzed. In order to test the applicability of the combination of physical parameterization schemes selected for the three wind energy resource reserve areas, the simulation results different from the sensitivity experiment period are used to conduct further evaluation by using the measured data from offshore wind towers and marine meteorological stations. The results show that the selected combination of physical parameterization schemes has good applicability and their performance for offshore wind speed simulation is better, which has the value of practical business application.

Key words: WRF; parameterization scheme; wind energy resource; applicability