

# 海气边界层内风电场尾流及功率特性的中尺度数值模拟研究

乐可定<sup>1</sup>, 郁冶<sup>2</sup>, 王异成<sup>3</sup>, 吴春雷<sup>4</sup>, 王强<sup>4</sup>, 罗坤<sup>4\*</sup>, 樊建人<sup>4</sup>

(1. 浙江浙能国电投嵊泗海上风力发电有限公司, 浙江 舟山 202450; 2. 国家电投集团浙江新能源有限公司, 浙江 杭州 310016;  
3. 杭州意能电力技术有限公司, 浙江 杭州 310027; 4. 浙江大学能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 研究基于中尺度数值天气预测(WRF)模型, 耦合海洋模型和风电场参数化方案, 探讨了海洋边界层下的海上风电场尾流效应和功率输出特性。结果发现: 海上风电场尾流易发生混合, 导致较强的风速亏损, 严重影响下游风力机的功率输出。由于大气和海洋之间的动量、热量及水汽等通量交换, 速度亏损表现出更强的水平扩散, 风电场尾流恢复加速, 最终尾流长度缩短。另外, 风电场的尾流特性和功率输出与风力机布局相关, 海气相互作用增强了尾流延伸的稳定性, 削弱了风电场的非局地性影响。研究表明使用多物理耦合模型探究海上风电场运行特性是尤为关键的。

**关键词:** 海洋大气边界层; 海上风电场; 海面; 尾流特性; 功率输出

**中图分类号:** P732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)06-0033-08

## 0 引言

在能源领域, 风能具有巨大的开发潜力, 它可以提供大量的清洁与可再生能源, 是中国实现碳达峰和碳中和的重要手段<sup>[1]</sup>。截止2019年底, 全球风力发电量达4 057亿千瓦时, 占总发电量的5.5%。与陆上风资源相比, 海上风资源的风能密度普遍较高, 平均风速更大且风能稳定性更好, 是未来风能发展的重要方向。虽然海上相较于陆上受地形影响小, 但是海气运动的复杂性(例如海气边界层的自然通量交换、动态海面粗糙度等因素)使得科学研究具有更大的挑战性。为了更好地发展和规划海上风电产业, 亟需开展针对海上风电场的运行特性研究。

海上风电场位于海洋大气边界层(Marine Atmospheric Boundary Layer, MABL)内<sup>[2]</sup>, 大气边界层存在大气和海洋表面之间的多物理、多尺度耦合作用过程, 其可以通过改变海洋近表面多种物理

通量显著影响大气边界层的结构<sup>[3]</sup>, 因此, 在近海大气运动的研究中, 海洋与大气的相互作用被认为是必不可少的考量因素。此外, 海浪的存在会影响边界层湍流分布以及近海面的垂直风速剖面, 因此, 研究海上大气运动还需对海面粗糙度( $z_0$ )进行评估。CHARNOCK<sup>[4]</sup>考虑了海面风速对 $z_0$ 的影响。另外, 海面粗糙度还取决于表面风速和波峰传播速度的关系<sup>[5]</sup>, 一般来说, 波浪越高, 海洋表面粗糙度越长,  $z_0$ 与波浪高度和陡度的依赖关系可以用无量纲法表示<sup>[6]</sup>。总的来说, 海浪的影响可通过物理参数化的方式近似表征。例如, GOLBAZI等<sup>[7]</sup>应用CHARNOCK参数化方法估算了美国东北海岸海上风能评估的 $z_0$ , 并揭示了其对轮毂高度速度预测的重要性。BAHAMONDE等<sup>[8]</sup>进一步结合大气稳定性来计算发电量, 通过与现场数据进行比较, 得到了较好的评估结果。研究证明, 独立的大气模型不足以模拟海洋大气边界层的大气运动, 需要进一步耦合海洋模型来考虑海面和大气之间的相互作用。

收稿日期: 2022-12-09。

基金项目: 浙江浙能国电投嵊泗海上风力发电有限公司科技项目(ZNKJ-2021-080); 国家自然科学基金资助项目(52206281)。

作者简介: 乐可定(1976-), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事海上风电开发与利用研究。E-mail: 18758110220@139.com

\*通信作者: 罗坤(1977-), 男, 教授, 博士, 主要从事能源环境多尺度建模方法研究。E-mail: zjulk@zju.edu.cn

除了海气环境本身的复杂性以外,风电场中风机的分布也会改变海气边界层中的大气动量和湍流通量。观测研究表明,在较稳定的大气边界层内,风电场的尾迹可以延伸几十千米<sup>[9]</sup>,且下风向近下垫面的温度也会发生相应变化<sup>[10-11]</sup>。与海浪参数化方式类似,风电场的影响也可以表示为空气动力学粗糙度的增加。通过采用定性增加 $z_0$ 的方法,研究模拟得到了风电场区域存在1~2 K的温度变化<sup>[12-13]</sup>。WANG等<sup>[14]</sup>采用大气-海洋耦合模型,通过修改表面粗糙度和位势高度来表示风电场,发现陆上风电场的温度升高1℃,海上风电场的温度降低1℃。这种方法可以有效地估计具有数千台风力机的大型风电场甚至超大型风场群的影响,但是, $z_0$ 的增量是根据经验确定的,这种方法无法捕捉垂直风廓线的变化以及风力机群之间的相互干扰。

近几年,将风力机表示为平均来流上的动量汇的参数化方法被广泛用于模拟和量化风电场对大气的作用。风电场参数化(Wind Farm Parameterization, WFP)由BLAHAK等<sup>[15]</sup>和FITCH等<sup>[16]</sup>开发和发展,并由JIMÉNEZ等<sup>[17]</sup>、ARCHER等<sup>[18]</sup>和WU等<sup>[19]</sup>等先后进行改进。WFP是研究风电场大气影响的有效工具,利用适量的计算资源便可以得到垂直方向上风电场的气象影响以及风电场群水平方向的相互干涉。WANG等<sup>[20]</sup>将WFP与天气研究与预测(Weather Research and Forecast, WRF)模型相结合,研究了中国新疆两个风电场之间的尾流干扰以及功率亏损。PLATIS等<sup>[21]</sup>采用相同方法衡量了风电场后方的尾迹长度,发现此模型高估了尾迹的长度。然而,目前风电场中尺度数值研究通常将海面 and 风电场的影响解耦,使得结果通常具有一定的误差与局限性。风电场参数化的模拟通常忽略了大气和海洋的相互作用,而针对海上风资源的研究则忽略了风电场的影响。例如,WU等<sup>[22]</sup>发现,海气边界条件可能会改变海上风能密度(约5%),但相邻风电场的影响却未评估,因此会高估海上风能密度<sup>[23]</sup>。

因此,为了研究海气边界条件下的风电场运行特性,我们在真实沿海环境下模拟了两个风电场,分别为设计的虚拟风电场和真实的风电场。基于中尺度数值模型并结合海上多物理建模方法,评估了海上风电场的运行性能。通过开展多组对比模

拟实验及分析,分别研究了两个风电场下的尾流特性以及功率输出特性。通过比较有无海面的模拟结果和两个风电场的不同表现,进而得到海气作用对风电场的影响以及不同风力机排布下海气作用的变化。

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

为了展现较符合实际环境的研究结果,选取已规划并将持续发展海上风电的杭州湾地区作为研究区域,对两个风电场进行模拟与评估,风电场位置见图1。1号风电场为假设的理想风电场,风力机排布方式均匀,即风力机具有相同的水平间距。风力机放置在WRF水平网格点内,由于WRF的水平网格同经纬度平行,因此风电场整体与经纬度平行,目的是为了更加清晰地观察到不同下垫面下风力机的尾流特征和功率分布特征。具体地,1号风电场的中心地理坐标设定为30.46°N, 121.61°E,面积为10 km×10 km,100台风力机均匀分布其中,即径向与展向距离均为1 km;风力机根据当前典型的海上风力发电机的推力和功率系数进行参数化,额定功率为4.0 MW,轮毂高度为99 m,叶片直径为127 m;切入和切出风速分别为3 m/s和30 m/s,低于或高于这两个数值时,风力机不运行,静态推力系数为0.13。2号风电场为某实际运行的风电场,中心地理坐标为30.68°N, 121.64°E,其具体位置以及风力机排布位置可见图1、图2,运行风力机额定功率为6.25 MW,轮毂高度为110 m,叶片直径为172 m,切入和切出风速分别为3 m/s和25 m/s。

本研究所使用的模型为上层海洋-大气-风电场耦合模型。通过耦合海面-大气模型实现海面动量、热量、水汽量等物理通量的相互交换;通过耦合海面粗糙度模型表征海面波浪的动态变化;通过耦合风电场参数化模型表征风力运行对大气的作用。各模型将在以下章节详细介绍。

### 1.2 风场参数化模型

为了表征风电场对MABL的作用,采用了FITCH等<sup>[24]</sup>提出的WFP模型。该模型将风电场内每台风力机视为致动盘,其对MABL的作用表征为

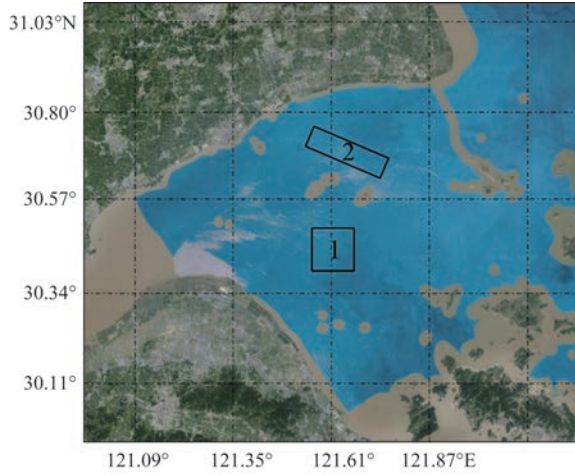


图1 研究区域以及1号风电场和2号风电场位置

Fig.1 Study area and the locations of wind farm #1 and #2

大气动量的汇以及湍流的源,其中,动量变化项和湍动能变化项作为交互变量。方程如下:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N_i C_T |V| u A}{\Delta z} \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N_i C_T |V| v A}{\Delta z} \quad (2)$$

$$\frac{\partial TKE}{\partial t} = -\frac{1}{2} \frac{N_i C_{TKE} V^3 A}{\Delta z} \quad (3)$$

式中:  $N_i$  为网格内风力机的数量;  $C_T$  为推力系数;

$C_{TKE} = C_T - C_P$ , 其中  $C_P$  为功率系数;  $v, u$  代表水平速度分量;  $|V|$  为速度标量;  $A$  为风力机风轮旋转面积;  $\Delta z$  为垂直层的距离。  $C_T, C_P$  和  $A$  由风力机设计参数决定。

### 1.3 海气边界模型

本研究采用大气模式 WRF 和 3DPWP (3D Price-Weller-Pinkel) 上层海洋环流模式<sup>[3]</sup>构建海洋大气环境。已有研究表明,该模型显著提高了近海气象过程模拟的准确性,且与 WRF 耦合的可靠性得到验证<sup>[25]</sup>。此模型基于静水力学模型,通过求解动量、热量和盐度平衡方程,评估上层海洋对地表附近流动响应。对应的方程如下:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + fK \times V + V \cdot \nabla V + W \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{1}{\rho_0} \nabla P \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + V \cdot \nabla T + W \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{\rho_0 C_p} \frac{\partial H}{\partial z} \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + V \cdot \nabla S + W \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial E}{\partial z} \quad (6)$$

式中:  $T$  和  $S$  分别为温度和盐度;  $P$  是静水压力;  $H, E$  和  $\tau$  分别是热量、盐度和动量通量;  $V$  为水平流速;  $W$  是速度的垂直分量;  $f$  是科里奥利参数。

海洋模型设置:水平方向上,海洋模型和大气模型(见 1.5 节)具有相同的水平方向网格;垂直方

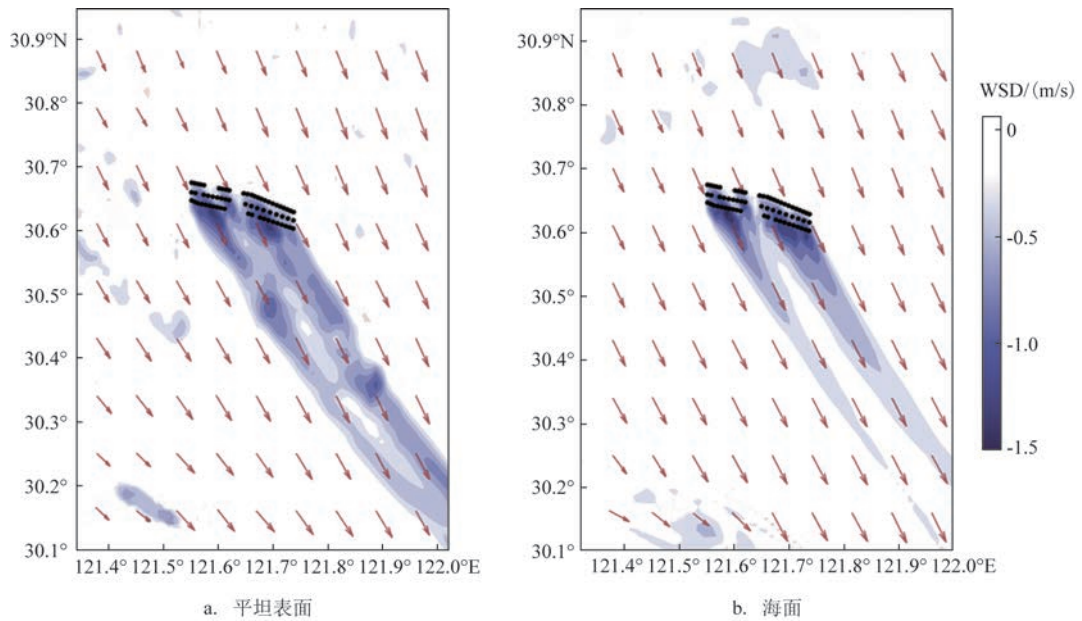


图2 2号风电场的尾流特性

Fig.2 The wake flow of wind farm #2



向上,从海面延伸至海下 400 m 共应用了 30 层垂直层,其中,顶部划分为 20 层,垂直间距为 10 m,下层划分为 10 层,分辨率为 20 m。根据 LEE 等<sup>[3]</sup>的建议,同时采用了较高分辨率的先进微波扫描辐射计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer - 2, AMSR-2) 海洋数据集<sup>[26]</sup>为海洋模型提供初始边界条件。

#### 1.4 海面粗糙度模型

海面粗糙度因海浪的存在而动态变化, $z_0$ 间接决定了海面对近海面的垂直风廓线分布。研究发现 3DPWP 海洋模型对海面粗糙度长度参数化方案较为敏感<sup>[27]</sup>,因此,海面粗糙度模型的选择对模型的准确性至关重要。GREESHMA 等<sup>[27]</sup>研究了 3DPWP 对粗糙度参数化方案的敏感性,通过与实测的对比,推荐了最新的 Donelan 方案,它比 WRF 中默认的 Garratt 方案能提供更好的模拟结果,因此,本研究也采用 Donelan 方案。诊断方程为:

$$z_0 = \max \left\{ 1.27 \times 10^{-7}, \min [z_w z_2 + (1 - z_w) z_1, 2.85 \times 10^{-3}] \right\} \quad (7)$$

$$z_w = \min \left( 1, \left[ \frac{u^*}{1.06} \right]^3 \right) \quad (8)$$

$$z_1 = 0.011 \frac{u^{*2}}{g} + 1.59 \times 10^{-5} \quad (9)$$

$$z_2 = \frac{10}{\exp(9.5u^{*-1/3})} + \frac{1.65 \times 10^{-6}}{\max(u^*, 0.01)} \quad (10)$$

式中: $u^*$ 为摩擦速度; $g$ 为重力加速度。

基于海气边界层模型 3DPWP 与海面粗糙度模型 Donelan,可以构建出适用于中尺度 WRF 模式下的大气海洋环境,从而为 MABL 条件下风电场尾流及功率输出特性模拟提供良好的海气环境。

#### 1.5 大气模型

大气模型采用 WRF (Version 4.3) 模式。针对两个风电场研究区域,模型采用如下设置:采用双向嵌套的方式,共设置 3 层计算域,最外两层设计  $150 \times 150$  个水平网格单元,最内层为  $250 \times 250$ ,其水平分辨率为 500 m,父域为子域网格大小的 3 倍,即由外到内网格的分辨率分别为 4.5 km, 1.5 km 和 0.5 km,最内层网格中心设置在风电场中心。垂直方向网格划分为 71 层,400 m 以下有 25 个垂直层,其中 15

个垂直层用于划分风力机风轮旋转面。

WRF 模式采用美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的 FNL 数据集 (Final Reanalysis Data) 为模型提供初始边界条件,分辨率为 6 h,模拟日期为 10 月 23 日 00 时 (世界时,下同)—10 月 31 日 00 时。最内层时间步长设置为 3 s。大气边界层参数化方案选择 MMYN2 (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level-2.5),微物理方案采用 WSM-6,长波和短波辐射过程分别采用 RRTM 模型 (Rapid Radiative Transfer Model) 和 Goddard 模型,其他物理模型多采用默认模型设置。

至此,上层海洋-大气-风电场耦合的多物理模型框架搭建完成。为了分析和发现海洋环境下的风资源和风电场运行特性,本研究设计了对照实验,对照组 (CTRL) 为平坦表面,实验组 (SS) 为具有波浪的海面。平坦表面不采用海洋模型,设置表面粗糙度为  $z_0=0.0001$  (即 WRF 模型中海面粗糙度的初始默认  $z_0$  值)。为控制变量,CTRL 与 SS 仅存在海面粗糙度不同和是否采用海洋模型的差别。模型的设置见表 1。

表 1 模型设置

Tab.1 Model configuration

下垫面	平坦表面	海面
海洋模型	Off	3DPWP
粗糙度模型	$z_0=0.0001$	Donelan
风电场参数化		FITCH
大气层参数化		MYNN2
长波辐射模型		RRTM
短波辐射模型		Goddard
微物理过程		WSM-6
初始边界条件	GFS-FNL (大气模型); AMSR-E (海洋模型)	
垂直层分布	71 层 (大气模型); 30 层 (海洋模型)	
计算域	3 层嵌套; D03: $150 \times 150$ (4.5 km); D02: $150 \times 150$ (1.5 km); D03: $250 \times 250$ (0.5 km)	

## 2 结果与讨论

不同风向以及热力条件均会对大气的湍流特性产生影响。目前,已有的研究表明风电场仅在稳

定大气边界层下具有较为明显的尾流效应,不稳定边界层下风电场尾流与周围大气混合剧烈,风电场造成的大气影响较为混乱,多种非线性影响较难分析,因此多数研究通常在稳定或中性大气边界层下分析风电场的中尺度大气作用。同样,本研究选取了模拟时间段内主风向连续4 h 稳定大气边界层下的结果,并通过取平均的方法研究了海上风电场的尾流和功率输出。

## 2.1 风电场尾流特性

对于均匀布局的1号风电场(见图3),随着上游越来越多的风力机消耗来流空气动能转化为电能,风速亏损(Wind Speed Deficit, WSD)沿风向逐渐增大,最终在风场后方形成数十公里的尾流,随后,通过从周围空气中补充动能,尾流不断减弱至最终消失。通过平坦表面和海面的对比可以发现,在平坦下垫面上,风电场区域内风力机的尾迹相对独立,每排风力机尾迹较为清晰,即使在风电场数十公里后依旧保留部分尾迹分支;然而,在MABL中,上游风力机后方的尾迹具有明显的展向扩散,导致尾流之间易于混合,最大WSD可达1.5 m/s,同时,尾流区与周围空气的动量交换更剧烈,加快了尾流的恢复,最终导致尾迹延伸距离变短,但宽度有所增加。PLATIS等<sup>[9]</sup>也发现了类似结果,FITCH模型低估了尾迹的恢复率,高估了尾迹的长度。因此,忽视海洋对大气的反馈作用会高估风电场的尾流长度,低

估尾流的展向扩展。

进一步地,通过关闭海洋模型,并且只设置一个粗糙度可变的表面,尾迹与对照组几乎没有差异(尾流长度仅略减小)。换言之,粗糙度的变化在一定程度上有助于尾迹区风速的恢复,但不是引起尾流混合和加快耗散的主要原因,而海气相互作用是导致此现象的主要因素。

对于实际的海上风电场,风力机布局相对复杂,造成的尾流效应也相对复杂。位于左右两侧的风力机群下游形成两条尾流(见图2),对比平坦表面以及海气环境下的尾流特性,差距较为明显。在平坦表面上,尾流效应呈现出较强的不稳定性以及非局地性,在下游30 km外依旧能产生大于0.5 m/s的速度亏损,WSD连续性较差,尾流长度约为45 km。相反,在海气环境下的风电场有着连续的尾流扩散与衰减,下风电场区域形成较强尾流区,随着距离的增加,尾流逐渐耗散,尾流长度约为35 km。对比1号和2号海上风电场,真实风电场下的尾流发展平稳,而理想排布下的风电场尾流存在絮状发展的情况。

通过两种不同边界层的对比来看,实际风电场与均匀布局风电场都有着一致的结果,即海洋边界层下的尾流具有更强的展向扩散,在近风电场区域能形成宽度更大、强度更强的速度亏损区,最终形成的尾流具有较短的耗散长度。除此之外,从图2中还可以发现,平坦表面上的实际风电场由于产生

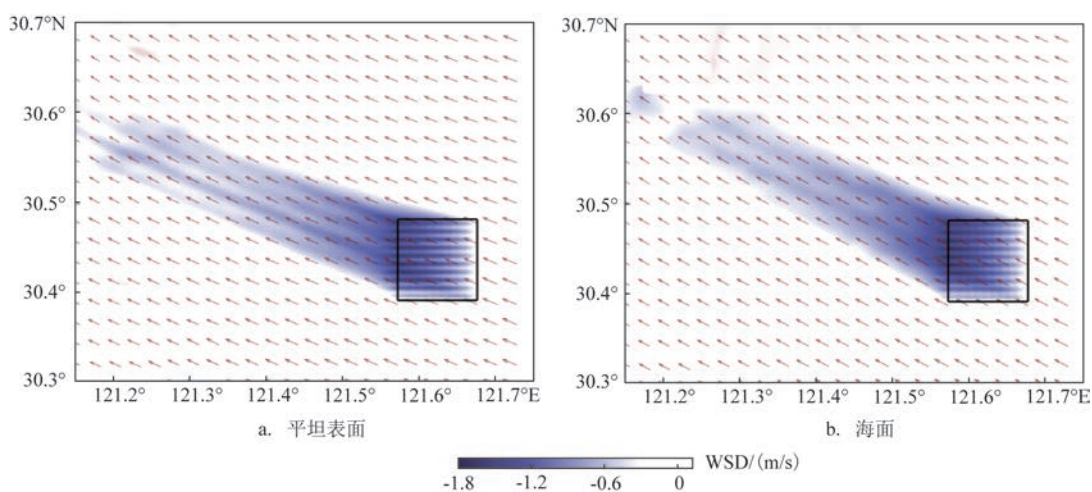


图3 1号风电场的尾流特性

Fig.3 The wake flow of wind farm #1

更多湍流导致了尾流的不连续性以及非局地性,然而在真实的海洋环境下,由于海面吸收了一部分湍流,会大大增强尾流的稳定性与延展性<sup>[28]</sup>。由此我们得出,实际海上风电场的模拟对海气环境有着更强的依赖性,海气模型的选用尤为关键。

## 2.2 风电场功率输出特性

由于尾流效应,下风向的风力机的性能将受到上游风力机的影响,其发电功率会相应降低,图4和图5中展示了与图3和图2相对应的风力机功率输出分布。在不同下垫面下,1号均匀分布风电场的风力机具有不同的功率输出空间分布(见图4)。平坦表面上,下游风力机的平均功率输出为整场功率的96%左右,即约4%的功率受到上游风力机的抑制,随着尾流干涉沿着风速方向不断累加,最下游风力机的功率降低约10%。从图4b可以看出,海面条件下的尾流对功率输出的影响更为明显,下游风力机

的功率输出较正常平均功率下降约10%,最下游风力机的功率降低约15%,即比在平坦表面上进一步下降了5%。

在实际风电场模拟中,尾流对功率输出的影响也较为明显,下游风力机功率低于2.2 MW,上游风力机在2.6 MW以上(见图5),差距约为15%,结果与均匀排布的风力机平均功率输出结果相类似。此风向下,海面吸收了部分大气动能,降低了风力机的功率输出。MABL下的风电场依旧显现出较强的尾流干涉,但由于真实风电场的风力机展向间距布置较大,因此相较于均匀排布,耦合多物理模型与CTRL模型在评估尾流效应对功率影响时的差距不大。

总的来说,海上风电场尾流效应对整场功率输出具有较大的影响,在海面的作用下海上风电场的尾流更易展向扩张,导致下游风力机受到的尾流干扰增强,因此,在进行海上风力机布局时应重视风

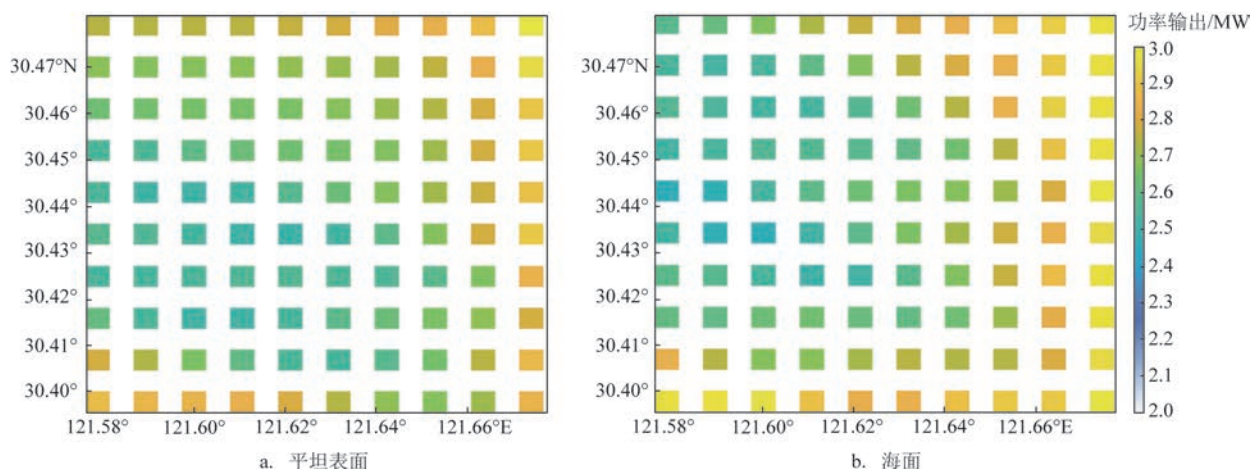


图4 1号风电场的功率输出

Fig.4 The power output of wind farm #1

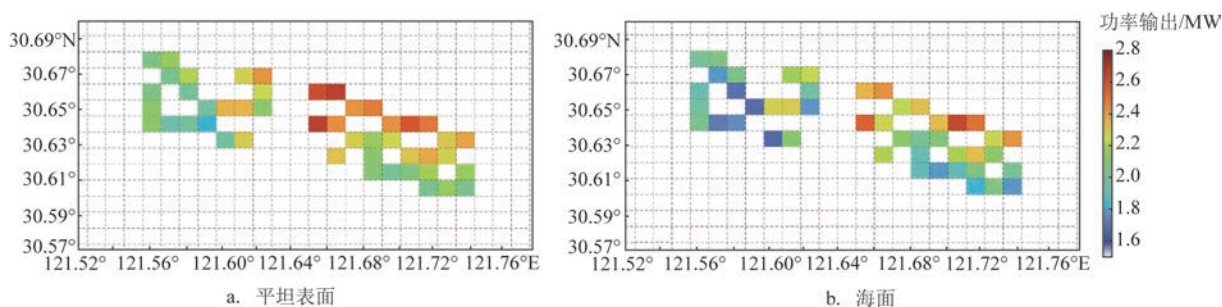


图5 2号风电场功率输出

Fig.5 The power output of wind farm #2



力机展向间距。另一方面,在海上风电场的数值模拟中,评估海气反馈对风电场功率影响尤为重要,使用耦合海洋-大气-风电场的多物理模型是一种有效的方法。

### 3 结论

本文基于中尺度大气模型 WRF,结合上层海洋反馈和风电场参数化的数值方法,研究了海上风电场在海面上的风资源与运行特性。结果表明,使用耦合海洋-大气-风电场模型尤为关键。海气反馈主要会造成以下影响:

①尾流展向扩散增强,风力机尾流具有易混合特性。

②减弱风力机的湍流效应,使得尾流延伸的稳定性增强,风电场非局地性影响减弱。

③下游风力机功率输出受上游尾流的叠加影响,功率衰减可达 15%,相较于平坦表面,海上风力机的尾流干涉更强。

以上现象的产生主要来源于耦合海洋模型导致的海气通量变化,这种海气相互作用需在海上风电中尺度模拟中得到足够重视,同时海浪造成的风切变变化对于功率评估也是不可忽略的因素。本研究充分发掘了海洋-大气-风电场之间的相互作用对风电场运行特性的影响。此外,风力机的布局在本研究中也为影响因素之一,但并未深入研究。后续研究需针对风力机布局和装机容量等风力机的物理特性对海上风电场的运行影响进一步深入挖掘,为海上风电场的设计提供更多的理论指导。

#### 参考文献:

- [1] 蔡继峰, 胡高硕, 石浩. 国内外风能资源评估标准研究综述[J]. 风能, 2021(12): 54-63.
- CAI J F, HU G S, SHI H. A review of research on wind energy resource evaluation standards at home and abroad[J]. Wind Energy, 2021(12): 54-63.
- [2] CHEN S S, ZHAO W, DONELAN M A, et al. Directional wind-wave coupling in fully coupled atmosphere-wave-ocean models: results from CBLAST-hurricane[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(10): 3198-3215.
- [3] LEE C Y, CHEN S S. Stable boundary layer and its impact on tropical cyclone structure in a coupled atmosphere-ocean model[J]. Monthly Weather Review, 2014, 142(5): 1927-1944.
- [4] CHARNOCK H. Wind stress on a water surface[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1955, 81(350): 639-640.
- [5] JENKINS A D, PASKYABI M B, FER I, et al. Modelling the effect of ocean waves on the atmospheric and ocean boundary layers[J]. Energy Procedia, 2012, 24: 166-175.
- [6] TAYLOR P K, YELLAND M J. The dependence of sea surface roughness on the height and steepness of the waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(2): 572-590.
- [7] GOLBAZI M, ARCHER C L. Methods to estimate surface roughness length for offshore wind energy[J]. Advances in Meteorology, 2019, 2019: 5695481.
- [8] BAHAMONDE M I, LITRÁN S P. Study of the energy production of a wind turbine in the open sea considering the continuous variations of the atmospheric stability and the sea surface roughness [J]. Renewable Energy, 2019, 135: 163-175.
- [9] PLATIS A, SIEDERSLEBEN S K, BANGE J, et al. First in situ evidence of wakes in the far field behind offshore wind farms[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2163.
- [10] HARRIS R A, ZHOU L M, XIA G. Satellite observations of wind farm impacts on nocturnal land surface temperature in Iowa[J]. Remote Sensing, 2014, 6(12): 12234-12246.
- [11] SMITH C M, BARTHELMIE R J, PRYOR S C. In situ observations of the influence of a large onshore wind farm on near-surface temperature, turbulence intensity and wind speed profiles [J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 034006.
- [12] MILLER L M, KEITH D W. Climatic Impacts of Wind Power. Joule, 2018, 2: 2618-2632.
- [13] VAUTARD R, THAIS F, TOBIN I, et al. Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms[J]. Nature Communications, 2014, 5: 3196.
- [14] WANG C, PRINN R G. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(4): 2053-2061.
- [15] BLAHAK U, GORETZKI B, MEIS J. A simple parameterization of drag forces induced by large wind farms for numerical weather prediction models[C]//Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition. 2010: 4577-4585.
- [16] FITCH A C, OLSON J B, LUNDQUIST J K, et al. Local and mesoscale impacts of wind farms as parameterized in a mesoscale NWP model[J]. Monthly Weather Review, 2012, 140(9): 3017-3038.
- [17] JIMÉNEZ P A, NAVARRO J, PALOMARES A M, et al. Mesoscale modeling of offshore wind turbine wakes at the wind farm resolving scale: a composite-based analysis with the weather research and forecasting model over horns rev[J]. Wind Energy, 2015, 18(3): 559-566.
- [18] ARCHER C L, WU S C, MA Y L, et al. Two corrections for turbulent kinetic energy generated by wind farms in the WRF model[J]. Monthly Weather Review, 2020, 148(12): 4823-4835.

- [19] WU C L, LUO K, WANG Q, et al. A refined wind farm parameterization for the weather research and forecasting model[J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 118082.
- [20] WANG Q, LUO K, YUAN R, et al. Wake and performance interference between adjacent wind farms: Case study of Xinjiang in China by means of mesoscale simulations[J]. *Energy*, 2019, 166: 1168-1180.
- [21] PLATIS A, HUNDHAUSEN M, MAUZ M, et al. Evaluation of a simple analytical model for offshore wind farm wake recovery by in situ data and Weather Research and Forecasting simulations[J]. *Wind Energy*, 2021, 24(3): 212-228.
- [22] WU L C, SHAO M M, SAHLÉE E. Impact of air-wave-sea coupling on the simulation of offshore wind and wave energy potentials[J]. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 327.
- [23] SCHNEEMANN J, ROTT A, DÖRENKÄMPER M, et al. Cluster wakes impact on a far-distant offshore wind farm's power[J]. *Wind Energy Science*, 2020, 5(1): 29-49.
- [24] FITCH A C, OLSON J B, LUNDQUIST J K. Parameterization of wind farms in climate models[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(17): 6439-6458.
- [25] SRINIVAS C V, MOHAN G M, NAIDU C V, et al. Impact of air-sea coupling on the simulation of tropical cyclones in the North Indian Ocean using a simple 3-D ocean model coupled to ARW[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(16): 9400-9421.
- [26] WENTZ F J, MEISSNER T, GENTEMANN C, et al. Remote sensing systems GCOM-W1 AMSR2 daily environmental suite on 0.25 deg grid, Version 08.2[J]. *Remote Sensing Systems SR*, 2014.
- [27] GREESHMA M, SRINIVAS C V, PRASAD K B R R H, et al. Sensitivity of tropical cyclone predictions in the coupled atmosphere-ocean model WRF-3DPWP to surface roughness schemes[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 26(2): 324-346.
- [28] 乐可定, 郁冶, 王异成, 等. 基于中尺度模式的大气稳定性对风电场运行特性的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2023: 1-7.
- LE K D, YU Y, WANG Y C, et al. Influence of atmospheric stability on the operating characteristics of wind farms based on the mesoscale situations[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2023: 1-7.

## Mesoscale numerical simulation of wind farm wake flow and power characteristics in the marine atmospheric boundary layer

LE Keding<sup>1</sup>, YU Ye<sup>2</sup>, WANG Yicheng<sup>3</sup>, WU Chunlei<sup>4</sup>, WANG Qiang<sup>4</sup>, LUO Kun<sup>4\*</sup>, FAN Jianren<sup>4</sup>

(1. Zhejiang Zheneng Guodian Investment Shengsi Offshore Wind Power Generation Company, Zhoushan 202450, China; 2. State Power Investment Group Zhejiang New Energy Company, Hangzhou 310016, China; 3. Hangzhou Yineng Power Technology Company, Hangzhou 310027, China; 4. State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** In this study, we explore the wake flow and power output of an offshore wind farm using the WRF model, coupling to an ocean model and a wind farm parameterization. It is found that the wake flow of the offshore wind farm significantly affects the operation characteristics of the whole farm. The wake flows of offshore wind turbines are easy to mix, result in a strong wind speed deficit, leading to the decline of power output of downstream wind turbines. The velocity deficit exhibits strong horizontal spread due to the flux exchange between air and ocean, accelerating the recovery of the wake flow, and ultimately leading to a reduction in the length of wake flow. Meanwhile, the wake characteristics and power output of wind farm are related to the layout and installed capacity of wind turbines. The air-ocean interaction increases the stability of wake flow extension, and help to reduce non-local impact. In general, it is important to consider the interaction between air, ocean and the wind farm itself.

**Key words:** marine atmospheric boundary layer; offshore wind farm; sea surface; wake flow; power output