

基于热带气旋风圈半径的海上风电场灾害预警时间估计方法研究及应用

杜梦蛟¹, 刘瑞雪², 钟权加^{3,4*}, 李响⁵, 易侃¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038; 2. 武汉中心气象台, 湖北 武汉 430074; 3. 中国科学院大气物理研究所 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029; 4. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 5. 国家海洋环境预报中心, 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 利用2001—2019年美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的热带气旋最佳路径数据集, 统计分析了西北太平洋上影响我国沿海的热带气旋的移速、强度和风圈半径等气候特征。结果表明: 8级、10级和12级热带气旋风圈半径的平均值分别为198.2 km、111.6 km、70.6 km, 且风圈呈现不对称性, 东北象限风圈半径最大, 西南象限最小; 风圈半径与强度变化呈现正相关关系; 热带气旋移速、强度和风圈半径在各海域的空间分布特征明显不同, 且8级和12级风圈半径随纬度变化存在显著差异。在气候特征分析的基础上, 基于风圈半径、移速、强度和离岸距离等变量, 提出一种针对海上风电场的热带气旋灾害预警时间估算方法, 并根据不同风圈半径给出其预警时间的空间分布特征, 为有效利用海上风能和开展抗台风措施提供参考。

关键词: 风圈半径; 海上风电; 热带气旋预警

中图分类号: P732.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)03-0066-09

0 引言

我国东南沿海属于热带气旋频发地区, 热带气旋的发生、发展可能带来大风、强降水、风暴潮等灾害性天气。近年来, 随着我国海上风电装机容量的增加和风能发电的规模化, 热带气旋引起的灾害对海上风电场的破坏愈加严重, 例如, 热带气旋引起的大风可能导致风机整体倾覆、叶片断裂、塔筒折断、电子设备严重失控等^[1-3]。因此, 针对我国海上风电场的台风灾害预警十分重要, 有助于科学指导相关部门开展针对性的抗台风措施, 最大限度地减少人员伤亡和经济损失。

基于热带气旋预警信息开展海上风电机组抗台风措施的同时, 也必须兼顾海上风电场的发电效能。在海上风电机组的最初设计中, 要求风机发电

的切出速度不高于25 m/s, 即风机能够正常运行的最高风速^[4]。换言之, 当热带气旋强度达到热带风暴(中心最大风速大于24.5 m/s)及以上级别时, 有可能会对风电场产生破坏。因此, 若能充分利用热带气旋外围风速小于25 m/s范围内的风能, 将有助于进一步提高海上风力发电机组的发电效率。

风圈半径作为表示热带气旋风力等级影响范围的参数, 在定义热带气旋尺度和灾害影响范围上有重要作用^[5]。国际上定义的风圈半径的范围分别为34 kt(R_{34})、50 kt(R_{50})以及64 kt(R_{64}), 分别对应于我国气象部门定义的8级风圈(17 m/s, R_8)、10级风圈(25 m/s, R_{10})以及12级风圈(32 m/s, R_{12})。向纯怡等^[6]指出风圈半径可以用来表示热带气旋的外围环流、主体强风暴的影响范围以及强灾害的影响范围。基于气候持续性方法, KNAFF等^[7]建立了统

收稿日期: 2022-06-03。

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2020-0703); 上海台风研究基金(TFJJ202108); 国家自然科学基金(42105059)。

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

*通信作者: 钟权加(1989-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事台风可预报性与集合预报研究工作。E-mail: zqj@lasg.iap.ac.cn

计模型预测大西洋、西北太平洋的热带气旋风圈半径,成为重要的风圈半径气候学预测方法;随后,他们又结合卫星资料和热带气旋的最佳路径数据(中心位置、强度和移速)进一步发展了热带气旋风场预测方法,有效改进了风场预测技巧^[8]。此外,也有学者专门针对西北太平洋区域的风圈半径进行了估算,并开展了误差改进方法研究^[9-10]。陈可鑫等^[11]基于多平台热带气旋表面风场资料,统计分析了西北太平洋热带气旋风场的结构,发现风圈半径与强度呈正相关,但不同风圈半径与强度的相关性有差异。最近,在业务应用上,有学者提出了利用风圈半径结构特征提升局地精细化预报的思路,其本质是结合风圈半径、移动路径和强度的修正预报为沿海核电站提供定点、定时的精细化预报服务^[12]。

综上所述,前人针对热带气旋风圈半径等变量开展了大量的统计和预警报相关研究,并取得了重要进展^[13-15]。然而,这些工作较少考虑如何充分利用热带气旋带来的巨大风能资源来提高风力发电效率。例如,R8的风速范围尚未达到风机的切出风速,在其影响范围内风机仍可以保持高效发电;R10的风速范围则有一定危险,需要加以预警。如果在海上风力发电和热带气旋靠近的过程中,能够有效利用风圈半径在R8~R10时间段内的能量,经过长期积累能够产生可观的发电效益,也是对资源更充分的利用。

因此,本文利用2001—2019年的热带气旋最佳路径资料,统计分析了影响我国沿海地区热带气旋的风圈半径、强度以及移动速度等气候特征。在此基础上,利用风圈半径和中心最大风速等变量,本文提出了一种针对海上风电场的热带气旋预警计算新方法。该方法能够给出热带气旋对风电场造成灾害影响的预警时间,有望为海上风电工程应用提供更多有效参考。

1 数据资料

本研究主要使用了美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)提供的热带气旋最佳路径数据集IB-TrACS(International Best Track Archive for Climate Stewardship)。该数据集的时间分辨率为3 h,包括

热带气旋中心经纬度、移动速度、中心最大风速和最低气压以及风圈半径等变量。鉴于该数据集的风圈半径数据记录自2001年开始,因此,本研究选取的时间为2001—2019年。参考中国气象局针对热带气旋强度的分类标准(GBT 19201—2006),可将其划分为热带风暴(TS)、强热带风暴(STS)、台风(TY)、强台风(STY)、超强台风(Super TY),具体详见表1^[16]。与之相对应,本文所提及的热带气旋是指强度级别达到TS及以上。

表1 热带气旋强度等级划分标准

Tab.1 The classification standard of tropical cyclone intensity

热带气旋等级名称	中心最大风速/ (m/s)	蒲福风力 等级
热带风暴(TS)	17.2~24.4	8~9级
强热带风暴(STS)	24.5~32.6	10~11级
台风(TY)	32.7~41.4	12~13级
强台风(STY)	41.5~50.9	14~15级
超强台风(Super TY)	≥ 51.0	16级以上

本文重点关注影响中国沿海地区的风圈半径分布情况。参考中央气象台发布的24 h台风警戒线的经度位置,把纬度范围限制在我国沿海地区,将进入16°~45°N,100°~128°E范围(见图1蓝色方框)的热带气旋定义为影响中国范围的热带气旋,共计232个。剔除了在热带气旋生命史中时次记录少于4个的热带气旋,得到有风圈记录的热带气旋220个。本文所使用的有风圈半径记录的热带气旋在所有影响中国范围的热带气旋中占比达到95%,保证了数据的可信度。本文最终使用了共计4 829个时次的记录,其中TS强度级别有1 649个,STS和TY分别有968和954个,STY和Super TY分别有644和614个(见图1d)。本文所使用的显著性检验方法为双侧Student-t检验,显著性水平为0.05。

2 影响中国的热带气旋气候特征

2.1 不同等级风圈半径的频数分布特征

不同等级风圈半径的总体频数分布见表2。R8、R10、R12各级风圈的平均半径分别为198.2 km、

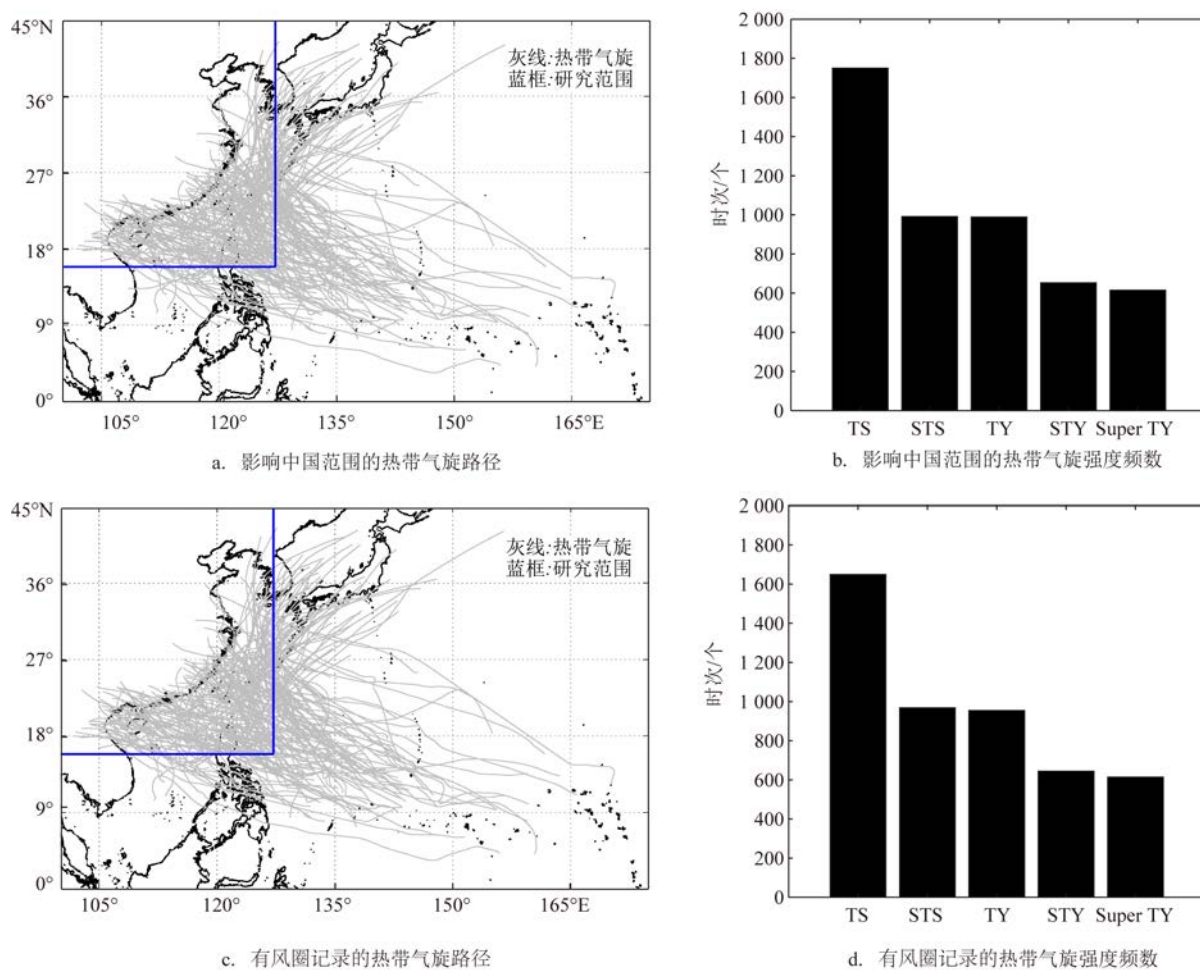


图1 热带气旋移动路径空间分布和强度频数分布

Fig.1 Spatial and intensity frequency distributions of tropical cyclones'

表2 不同等级风圈半径的频数分布

Tab.2 The frequency distribution of wind circle radius at different levels

象限	R8			R10			R12		
	数量 (记录数)	平均值/km	均方差/km	数量 (记录数)	平均值/km	均方差/km	数量 (记录数)	平均值/km	均方差/km
整体	17 984	198.2	91.4	9 860	111.6	54.4	6 397	70.6	29.9
第一象限(NE)	4 510	211.9	98.0	2 473	120.0	60.5	1 605	74.8	32.1
第二象限(SE)	4 498	199.5	89.4	2 471	110.5	50.7	1 602	69.6	27.7
第三象限(SW)	4 488	185.4	82.3	2 458	103.2	46.9	1 593	65.9	26.8
第四象限(NW)	4 488	196.1	93.1	2 458	112.5	57.2	1 597	71.8	31.8

111.6 km、70.6 km,其均方差分别为91.4 km、54.4 km、29.9 km。由于热带气旋的风场具有非对称结构,导致不同象限的风圈半径会存在一定的差异。由表

中可以看出,不同级别的风圈半径在第一象限(NE)最大,第三象限(SW)最小,这一结果与前人研究结果较为一致^[11,17]。

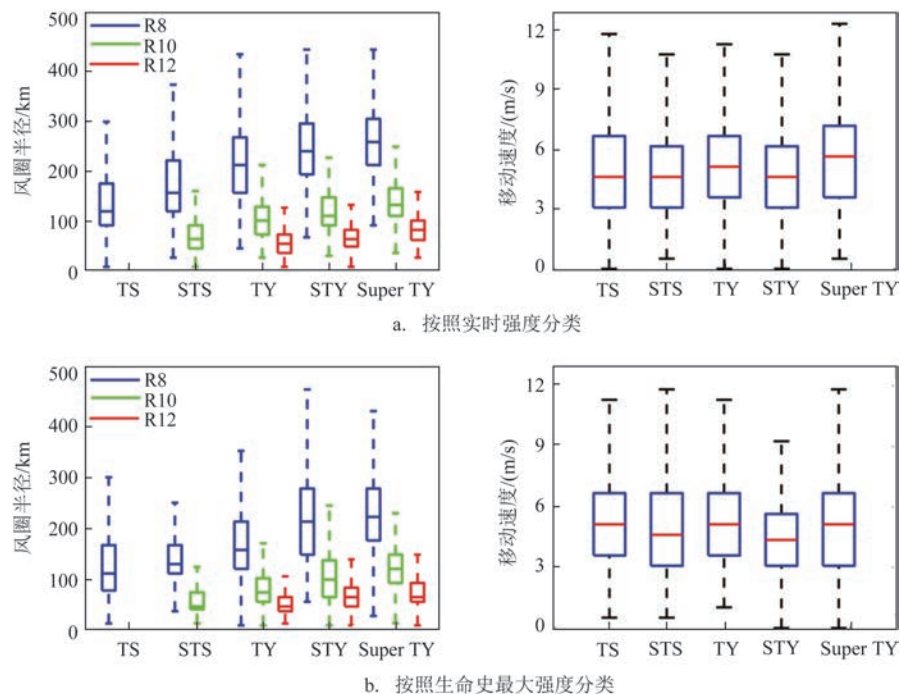
在了解风圈半径平均气候统计的基础上,进一步分别讨论风圈半径、移动速度与热带气旋强度级别的关系,结果见图2。在此特别说明,图2a是基于热带气旋实时强度进行分类,而图2b是基于热带气旋生命史中最大强度进行分类。两者的主要区别在于,以 Super TY 为例,在图2a中该组强度都是 Super TY 级别,而在图2b中该组数据可能还包括了 STY、TY 等弱于 Super TY 的级别,只要生命史最大强度达到了 Super TY 都划分到该组。从图中可以看出,无论是按照实时强度还是生命史最大强度划分,各级风圈半径都随着台风强度的增大而增加,其中 R8 增加的趋势最显著, R12 增加的趋势最小, R10 的增加趋势介于两者之间。结果表明,风圈半径和强度变化之间呈现正相关的变化趋势。然而,移动速度和强度变化之间则没有显著的相关性,且移动速度在不同强度等级的变化范围较小。

2.2 空间分布特征

下文将进一步分析登陆和可能影响中国的热带气旋的移动速度、强度、不同级别风圈半径的空间分布特征。为便于直观呈现不同变量场的空间

分布特征和空间变化趋势,本文首先对各特征变量的数据进行站点到格点插值预处理。具体来说就是将不同变量的数据基于不同时刻的热带气旋的中心经纬度位置信息,插值到规则的 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间网格上,从而得到各个变量场的空间分布特征。此外,还进一步计算了各个变量随纬度的变化趋势,即在 $16^\circ \sim 45^\circ \text{N}$ 范围内每间隔 3° 计算它们沿着经向的平均值,从而得到不同变量的线性变化趋势。

图3为热带气旋移动速度的空间分布特征及其变化趋势,其中 P 为显著性水平, R 为相关系数。从空间上可以明显看出,黄海海域的热带气旋普遍移速较大,而南海海域的热带气旋移速则较小。总体来说,移动速度随纬度增加有显著的增大趋势,且通过了 95% 的信度检验。这一结果与 YAMAGUCHI 等^[18]和 WANG 等^[19]最新的研究发现较为一致,两项研究都一致指出热带气旋一旦进入中纬度后容易受到引导气流速度增加的影响,气旋移速增加。如图4a所示,在我国台湾以东的广阔海域,热带气旋强度较大,前人的研究也指出这一区域是西北太平洋热带气旋发生快速加强的关键海域^[20]。相比之下,热带气旋在北上进入黄海之后强



注:方框的上下限表示四分位数,中心横线表示中位数,虚线端的短横线表示1.5倍的四分位数

图2 不同强度的风圈半径和移动速度频数分布

Fig.2 The frequency distribution of wind circle radius and motion speed for different intensities

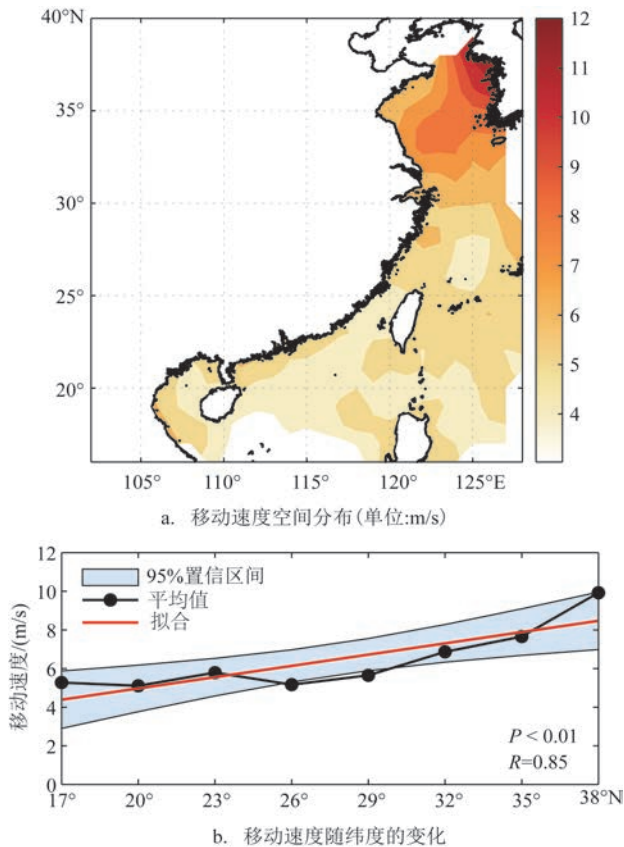


图3 热带气旋移动速度空间分布

Fig.3 Distribution of tropical cyclone speed

度减小。在我国沿海的近岸海域中,南部的广东和海南沿海一带的热带气旋较其他海域强度更强。总体来说,热带气旋强度呈现随纬度增加而减弱的趋势,且通过了95%的信度检验(见图4b)。

图5为热带气旋各级风圈半径的空间分布特征。从图中可以发现,R8的大值区主要分布在我国黄海和东海海域;R10不仅在东海和黄海海域存在大值区,而且在广东沿海也存在一个较明显大值区,但其强度弱于前两个海域;R12的大值区主要分布在南海尤其是广东和海南沿海,东海仍有大值区但离岸较远。从整体的空间变化特征来看,3种热带气旋风圈半径随纬度的变化存在显著差异,即:R8风圈半径随着纬度增加而增大;R10风圈半径总体变化较为平缓,不存在显著变化趋势;R12风圈半径随纬度增加而减小;其中R8、R12的变化趋势通过95%的显著性检验,R10由于存在振荡变化,没有通过显著性检验。

图6更直观地对比了各个变量在3个海域的频

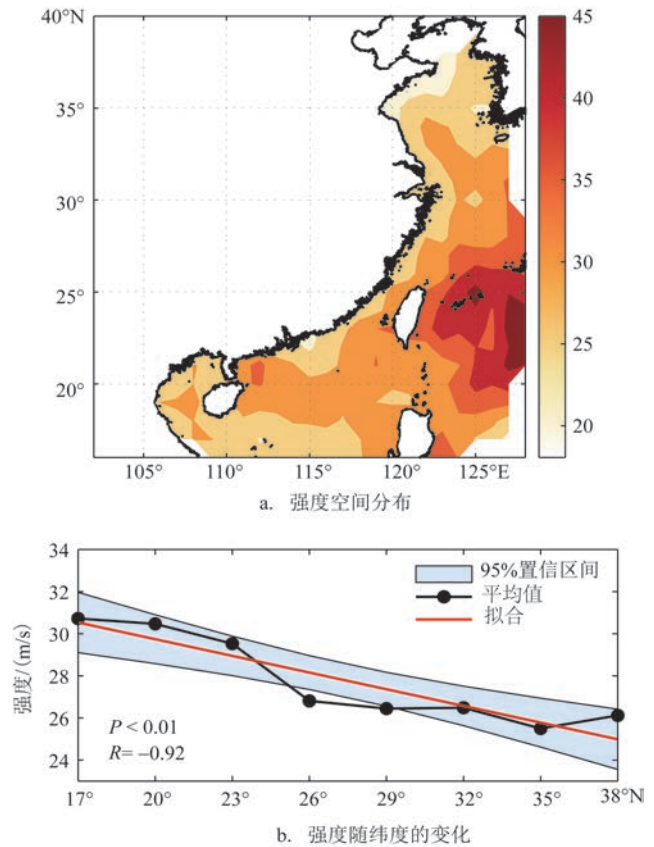


图4 热带气旋强度空间分布

Fig.4 Distribution of tropical cyclone intensity

数分布,图中误差棒表示95%的置信区间。R8风圈半径在南海最小,东海居中,黄海最大(见图6a);R10风圈半径在东海和黄海较为接近,南海最小;R12风圈半径在黄海最小,东海和南海较为接近。热带气旋的移动速度在黄海明显高于其他海域,南海最低(见图6b)。热带气旋的强度在东海最大,南海次之,黄海最小(见图6c)。这一海域分布规律与前文讨论的移动速度和强度随纬度的变化较为一致。

3 海上风电场灾害预警时间估计方法介绍及其应用

前文研究发现,各个海域热带气旋的移速、强度和风圈半径的空间分布存在显著差异,同时风圈半径与气旋强度存在一定的正相关关系。对于海上风电场的运营维护,不仅要考虑热带气旋登陆或者靠近前的灾害影响,还需要充分利用热带气旋所带来的风能需求。GUO等^[21]的研究表明,热带气旋

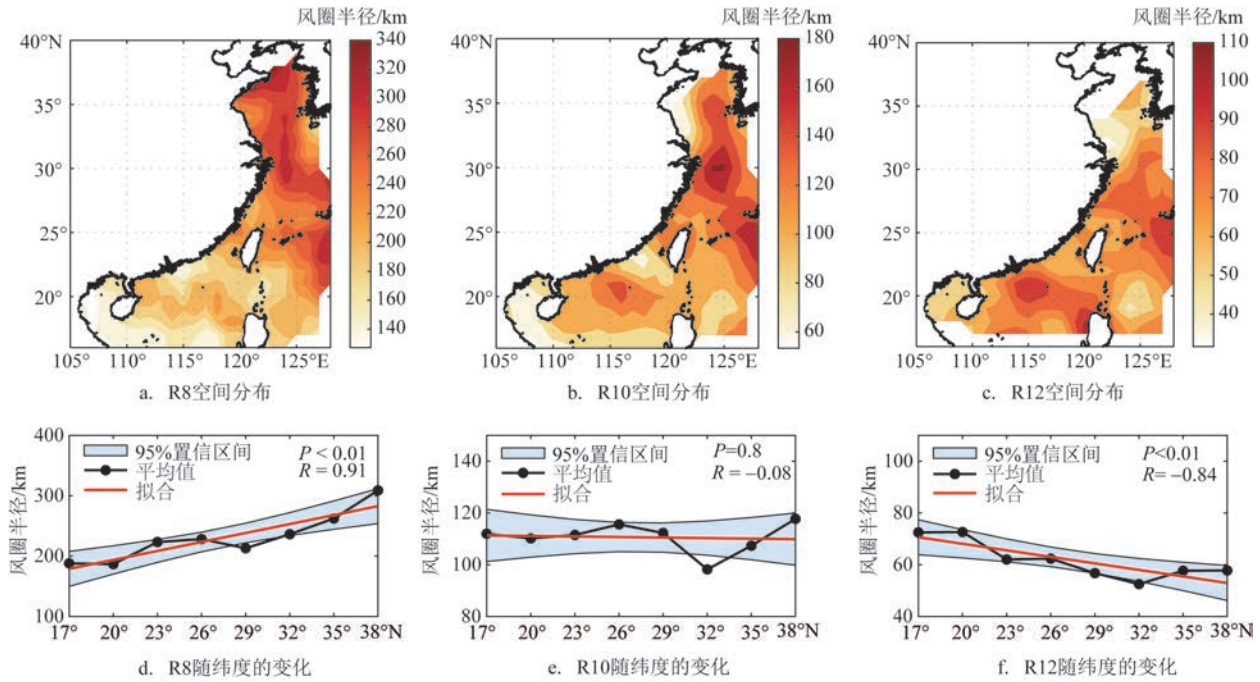


图5 热带气旋风圈半径空间分布

Fig.5 Distribution of tropical cyclone wind circle radius

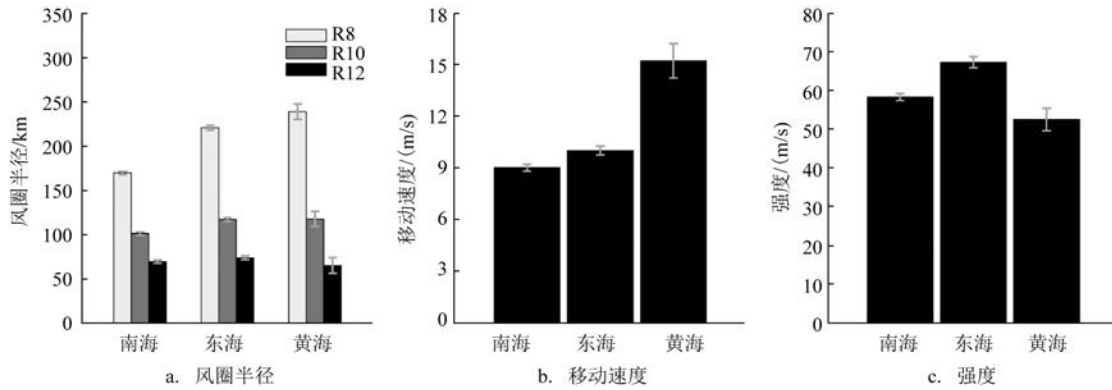


图6 各海域风圈半径、移速和强度频数分布

Fig.6 Distribution of wind circle radius, speed and intensity frequency in each sea area of China

的风圈半径大小与其强度并不完全是线性关系,风圈半径不能很好地描述热带气旋的强弱,因此,研究提出丰满度的概念来描述热带气旋尺度与其强度的关系。本文也在上述气候特征分析的基础上,综合考虑了热带气旋风圈半径与其本身的尺度以及风速大小等因素,提出一种新的海上风电场热带气旋灾害预警时间估计方法。该方法不仅考虑了各级风圈半径及其对应的风速大小对预警时间可能产生的影响,同时还考虑了丰满度因素,即热带气旋由于尺度和强度不同,其影响和破坏风电场的

程度也不一样,因此针对热带气旋防灾减灾所需要的预警时间也不一样。具体而言,预警时间计算公式如下:

$$T = \begin{cases} \frac{D - R}{V_s \cdot \left[1 - 0.65 \left(\frac{V_{\max}}{V_{34}} \right)^{-1.16} \right]} & D > R \\ 0 & D \leq R \end{cases}$$

式中: T 为预警时间(单位: h); D 为离岸距离(单位:

km); R 为风圈半径,分别取 R_8 、 R_{10} 、 R_{12} ,单位:km; V_s 为热带气旋移动速度(单位:km/h); V_{34} 为常数,即34 km/h; V_{max} 为热带气旋强度,即中心最大风速(单位:km/h)。公式中几个数值1和0.65以及-1.16没有明确的物理含义,是参考丰满度的定义(17 m/s的风速半径减去最大风速半径之差与17 m/s的风速半径之比,即热带气旋外围与内核区域范围之差相对于外围区域的大小)并通过统计历史上所有热带气旋线性拟合结果确定的。

通过公式可以看出,灾害预警时间的计算将热带气旋移动速度、中心最大风速以及离岸距离进行了有机结合,不同风力级别风圈计算得到的离岸距离也不同。利用所选取的热带气旋某一时刻的实时中心位置到中国大陆海岸线的距离再减去某一个风力等级的风圈半径(如: R_8 、 R_{10} 、 R_{12}),可以得到该时刻该等级风圈半径所对应的离岸距离。离岸距离越小,即表示热带气旋对该地区的影响可能越大。热带气旋移动速度越快,各级风圈半径范围影响的预警时间越短。预警时间的计算还加入GUO等^[21]提出的台风丰满度与强度的幂函数关系,以此来体现不同强度热带气旋与其本身尺度之间的联系,即当热带气旋强度越大、尺度越大时,热带气旋的灾害影响可能也越大,距离热带气旋登陆或影响所剩余的预警时间越短。需要特别指出,当离岸距离小于或等于风圈半径时,预警时间为零,即风圈半径的影响已覆盖到海岸范围,所剩余的预警时间为零。

如上所述,本文提出的灾害预警时间算法可以

有效地刻画风圈半径影响我国沿海的预警时间。与传统的单纯预警热带气旋登陆相比,该算法不仅有效体现了风圈半径的信息及影响,还考虑了热带气旋的移速、强度以及尺度等因素。图7为利用不同等级风圈半径计算得到的预警时间的空间分布特征。从图中可以看出,由于 R_{12} 风圈半径覆盖的范围最大,其预警时间最短,最长不足55 h; R_{10} 的预警时间在80 h以下;而 R_8 风圈半径由于覆盖范围小,预警时间最长可达到140 h。一般而言,根据不同风圈半径对应的风速来看, R_8 是有利于风机高效发电的风速, R_{10} 是接近并网极限的切出风速,对应控制关闭风机的时间, R_{12} 是对风机结构和稳定性构成危险的风速,应采取避险措施。在海上风电场的实际运维过程中,可以根据风电场的位置计算出不同风圈半径覆盖范围的预警时间,这样不仅可以充分利用热带气旋靠近登陆带来的风能资源,同时又可以根据预警时间实施抗台风灾害措施,减小热带气旋灾害带来的损失。

4 总结与讨论

本文利用2001—2019年IBTrACS最佳路径资料,统计分析了不同强度热带气旋的平均风圈半径气候特征,并给出了移动速度、强度和风圈半径的空间分布特征。主要结论如下:

①不同等级热带气旋风圈半径频数从大到小分别为 R_8 、 R_{10} 、 R_{12} ,其平均半径分别为198.2 km、111.6 km、70.6 km,其中东北象限风圈半径最大,西南

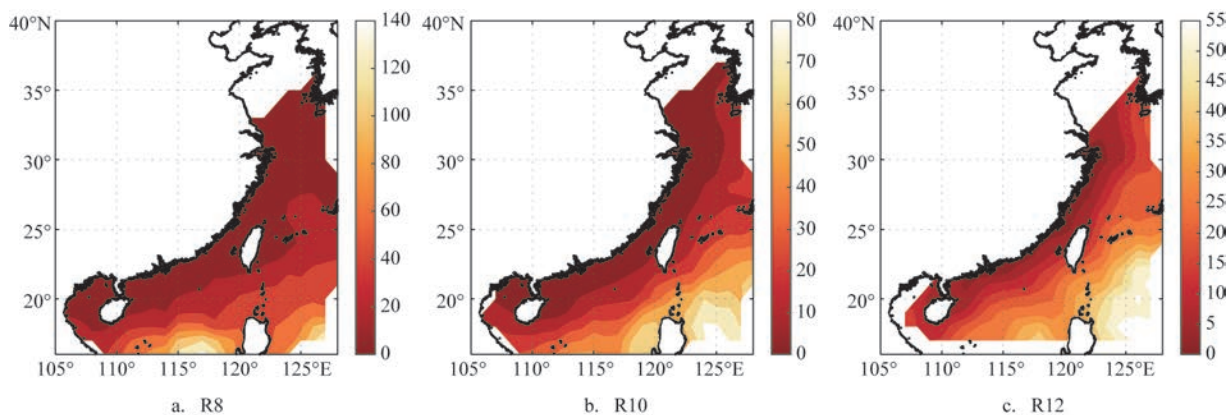


图7 各级风圈半径预警时间的空间分布(单位:h)

Fig.7 Distribution of warning time at all levels of wind circle radius (unit:h)

象限风圈半径最小。此外,风圈半径和强度变化总体呈现正相关,其中R8随着强度增大而增加的趋势最为显著,但是移动速度和强度变化没有显著相关性。

②热带气旋移速、强度和风圈半径的空间分布特征在不同海域均存在明显差异。总体来说,热带气旋移动速度整体随纬度增加而增大;强度随纬度增加而减弱;不同等级风圈半径随纬度变化有显著不同,随着纬度增加,R8风圈半径增大,R10变化较为平稳,R12减小。

③本文基于热带气旋移速、强度以及风圈半径提出了一种新的热带气旋灾害预警时间估算方法。该方法将热带气旋移动速度、中心最大风速以及离岸距离有机地结合起来,较好地反映出各变量对预警时间产生的影响。

本文主要利用建立的预警时间公式给出了基于气候统计分析的热带气旋风圈半径空间分布特征,而在实际的业务应用中,需要进一步基于实时的热带气旋观测数据或数值模式预报数据,结合给定的风电场位置信息,计算得到实时的热带气旋灾害影响预警时间。虽然通过观测或模拟得到的变量结果并不完全准确,存在一定的观测误差和模拟偏差,因而使得预警时间的计算结果存在一定的不确定性,但是该预警时间仍然有助于在热带气旋登陆或者靠近的过程中合理规划风机使用时间,以达到充分利用风能资源的目的,并为判断抗台风灾害措施的开展时机提供参考。

参考文献:

- [1] 王力雨, 许移庆. 台风对风电场破坏及台风特性初探[J]. 风能, 2012(5): 74-79.
WANG L Y, XU Y Q. Preliminary study on typhoon damage to wind farm and typhoon characteristics[J]. Wind Energy, 2012(5): 74-79.
- [2] 柳艳香, 袁春红, 朱玲, 等. 近12年来影响风电场安全运行的气象灾害因子分布特征[J]. 风能, 2013(5): 70-74.
LIU Y X, YUAN C H, ZHU L, et al. The distribution characteristics of meteorological disaster and its effects on the safe operation of wind farm in the past 12 years[J]. Wind Energy, 2013(5): 70-74.
- [3] 时智勇, 王彩霞, 李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力, 2020, 53(7): 8-17.
SHI Z Y, WANG C X, LI Q H. Key issues of China's offshore wind power development in the “14th Five-Year Plan” [J]. Electric Power, 2020, 53(7): 8-17.
- [4] 梁水林. 风能资源的评估及风电场场址的选择[J]. 电力勘测, 1997(3): 55-60.
LIANG S L. Evaluation of wind energy resources and selection of wind farm site[J]. Electric Power Survey, 1997(3): 55-60.
- [5] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
CHEN L S, DING Y H. Introduction to typhoons in the Western Pacific[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [6] 向纯怡, 吴立广, 田伟, 等. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用[J]. 气象, 2016, 42(11): 1315-1324.
XIANG C Y, WU L G, TIAN W, et al. Applications of MTCSWA data to the characteristic analysis of tropical cyclone structure[J]. Meteorological Monthly, 2016, 42(11): 1315-1324.
- [7] KNAFF J A, SAMPSON C R, DEMARIA M, et al. Statistical tropical cyclone wind radii prediction using climatology and persistence[J]. Weather and Forecasting, 2007, 22(4): 781-791.
- [8] KNAFF J A, LONGMORE S P, DEMARIA R T, et al. Improved tropical-cyclone flight-level wind estimates using routine infrared satellite reconnaissance[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2015, 54(2): 463-478.
- [9] 雷小途, 陈联寿. 热带气旋风场模型构造及特征参数估算[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 25-31.
LEI X T, CHEN L S. A method to construct tropical cyclone wind distribution models and estimate its characteristic parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 25-31.
- [10] SAMPSON C R, FUKADA E M, KNAFF J A, et al. Tropical cyclone gale wind radii estimates for the Western North Pacific [J]. Weather and Forecasting, 2017, 32(3): 1029-1040.
- [11] 陈可鑫, 陈光华, 向纯怡, 等. 基于MTCSWA风场资料对西北太平洋热带气旋风场结构的气候统计特征研究[J]. 气候与环境研究, 2020, 25(6): 588-600.
CHEN K X, CHEN G H, XIANG C Y, et al. Statistical characteristics of wind field structures of tropical cyclones over the Western North Pacific based on MTCSWA data[J]. Climatic and Environmental Research, 2020, 25(6): 588-600.
- [12] 李泳泽, 程正泉, 郭春迺, 等. 台风大风半径业务产品的应用简析[J]. 广东气象, 2020, 42(1): 49-52.
LI Y Z, CHENG Z Q, GUO C Y, et al. Brief analysis on Application of typhoon gale radius business product[J]. Guangdong Meteorology, 2020, 42(1): 49-52.
- [13] 张余得. 基于强风圈半径的台风风场模型研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
ZHANG Y D. The study of typhoon wind model based on the radii of wind circle[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [14] 郭春迺, 程正泉, 李泳泽, 等. 热带气旋风圈统计及业务应用[J]. 广东气象, 2020, 42(4): 56-59.
GUO C Y, CHENG Z Q, LI Y Z, et al. Tropical cyclone wind

- circle statistics and operational application[J]. *Guangdong Meteorology*, 2020, 42(4): 56-59.
- [15] 邱婷, 肖文军, 何佳玮, 等. 西北太平洋热带气旋非对称大风风圈半径预测[J]. *海洋预报*, 2021, 38(3): 68-75.
- QIU T, XIAO W J, HE J W, et al. Prediction of the asymmetrical gale force wind radii of tropical cyclones in the Northwest Pacific [J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(3): 68-75.
- [16] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [17] 薛霖, 李英, 王丙兰, 等. 海南岛附近区域热带气旋低层风场的变化特征[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(3): 299-310.
- XUE L, LI Y, WANG B L, et al. Characteristics of tropical cyclone-induced low-level wind fields over Hainan[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2018, 23(3): 299-310.
- [18] YAMAGUCHI M, CHAN J C L, MOON I J, et al. Global warming changes tropical cyclone translation speed[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 47.
- [19] WANG C, WU L G, LU J, et al. Interannual variability of the basinwide translation speed of tropical cyclones in the Western North Pacific[J]. *Journal of Climate*, 2020, 33(20): 8641-8650.
- [20] ZHANG D, ZHANG J H, SHI L M, et al. Interdecadal changes of characteristics of tropical cyclone rapid intensification over Western North Pacific[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 15781-15791.
- [21] GUO X, TAN Z M. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm intensity[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4324-4331.

Study and application on the method of estimating disaster warning time for offshore wind farms based on tropical cyclone radius

DU Mengjiao¹, LIU Ruixue², ZHONG Quanjia^{3,4*}, LI Xiang⁵, YI Kan¹

(1. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China; 2. Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 4. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 5. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China)

Abstract: Using the optimal trajectory dataset of typhoon from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) during 2001—2019, this study analyses the climatological characteristics of tropical cyclones in the Northwestern Pacific which affect the offshore areas of China, including their motion speeds, intensities and wind radii. The results show that: the mean wind radii of 34 kt (R_{34}), 50 kt (R_{50}), 64 kt (R_{64}) are 198.2 km, 111.6 km, 70.6 km, respectively. The cyclone-associated wind field is asymmetrical, with the maximum radii in NE quadrant and the minimum radii in SW quadrant. The mean wind radii have a positive correlation with the intensities of the tropical cyclones. Moreover, the spatial patterns of tropical cyclones' motion speeds, intensities and wind radii vary largely in different ocean areas, and significant difference exists in the wind radii with respect to different latitudes for R_{34} and R_{64} . Finally, based on the analysis of the climatological characteristics of tropical cyclones, an estimating method of disaster warning time for offshore wind farms is established, providing the spatial distribution of disaster warning time according to different wind radii. This method benefits for the effective utilization of offshore wind power.

Key words: wind radii; offshore wind power; tropical cyclone warning