

风能模拟的台风“摩羯”致灾危险性评价*

王振国²⁾ 逯敬一⁴⁾ 康煜杰¹⁾ 费伟⁵⁾ 冯旭光¹⁾ 高治国¹⁾

杨小鹏¹⁾ 王少华²⁾ 张化^{1,3)†}

(1)北京师范大学国家安全与应急管理学院,北京; 2)国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,杭州;
3)教育部巨灾模拟与系统性风险应对国际合作联合实验室,广东珠海; 4)北京师范大学系统科学学院,北京;
5)应急管理部国家减灾中心,北京)

摘要 近年来我国强台风频发,尤其是2411号超强台风“摩羯”对海南省造成了非常严重的经济损失和社会影响。本文基于台风登陆期间台风风场的风能密度累积计算和对比分析,有效地识别了台风风灾的致灾危险性特征和规律。主要结论:1)2411号“摩羯”在海南岛上,大于12级风的覆盖面积为1473 km²,大于13级风的覆盖面积为933 km²,大于14级风的覆盖面积为101 km²,重灾区主要位于文昌市、海口市;2)2411号“摩羯”台风风能整体高于1407号“威马逊”,文昌市地区“摩羯”台风风能总量超过“威马逊”13倍左右,约50万Kj;3)重灾区房屋倒塌、农业渔业损毁以及基础设施系统性功能受损,显示出此次台风风灾的复杂性和广泛性。气候变化背景下台风趋强趋频,建议基于台风风能估算结果提升抗风设计标准和基础设施韧性,尤其是农村住房、农业设施及电力、通讯等基础设施。

关键词 台风灾害;风能;致灾危险性;台风“摩羯”;巨灾

中图分类号

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2024223

0 引言

2024年9月6日16时,超强台风2411号“摩羯”在海南文昌市翁田镇登陆,登陆时中心附近风力达17级以上(62 m·s⁻¹),9月7日4时离开海南岛^[1]。台风“摩羯”是继2014年台风“威马逊”之后登陆我国的最强台风,也是新中国成立以来登陆我国大陆地区的最强秋台风。台风“摩羯”中心在海南岛停留时间约6 h,台风中心风力维持在17级,为历史罕见。12级以上风圈在海南岛的影响时间约9 h,当地监测到12级风力及以上且持续长达3 h的乡镇数量多达50个,14级风力及以上且持续长达3 h的乡镇数量多达16个,海南岛北部陆地及近海普遍出现了11至15级的阵风。此外,多地气象站点均突破有观测记录以来陆地极大风速的历史极值,海南岛南部陆地及近海也普遍出现了9~11级的阵风。此次台风“摩羯”的极端风力导致多个市县电力、通信、市政、交通、水利等基础设施受损,造成农业、林业大面积损毁,同时也造成房屋建筑、工矿商贸企业严重损失。如此巨灾却不是第一次遇到。2014年1409号台风“威马逊”

同样登陆海南文昌市,登陆强度达到70 m·s⁻¹,甚至略高于2411号台风“摩羯”62米/秒^[2]。不难看出,2场台风均为超强台风等级,且其路径和中心气压强度差异不大,但“摩羯”造成的直接经济损失却超过“威马逊”约5倍。巨大的损失差异,令社会各界人士质疑和不断追问。因此,如何科学、合理分析其原因,对于台风巨灾归因、快速核灾评估,以及有效防灾、减灾、救灾具有重要意义。

实际上,根据气象台站观测数据及灾情现场调研数据对比可知,“摩羯”台风期间暴雨、洪水的影响不大,总体甚至小于“威马逊”期间的暴雨、洪水影响,这也进一步说明了“摩羯”台风灾害的致灾类型主要为风灾致损。近些年来,国内外学者在台风灾害损失研究领域取得了显著进展,但大多数集中在台风暴雨或风雨综合致灾方向,而在台风风灾方面的研究偏少。比如,在中国知网平台主题为“台风暴雨”的文献2438条,而主题为“台风大风”或“台风风灾”的文献信息仅有158条。此外,台风风灾领域的研究中主要集中在台风风场模拟、风速极值分析、风灾风险评估等方面^[3-5],而在巨灾损失差异的分析上较少。例如,

* 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(B311DS240008);国家重点研发计划课题“多灾种快速评估与精准损失评估天空地一体化关键技术”资助项目(2022YFC3004404)

† 通信作者:张化(1979—),男,高级工程师,博士生导师,研究方向:自然灾害与区域可持续发展研究。E-mail: zhanghua2011@bnu.edu.cn

收稿日期:2024-10-25

Wu 等^[6]基于梯度平衡方程和可变压力场,获得了梯度风场.采用 Arya 的边界层模型,建立了梯度风速和地表风速的关系,并将其集成到行星边界层(PBL)风场模型中.基于改进模型,对中国 9 个城市的台风风灾进行了分析,采用圆形子区域方法估算了 50、100 a 一遇的极端风速.结果表明,这种改进的模型在准确性和效率方面都有很好的表现.Chen 等^[7]提出改进的热带气旋(TCs)全程跟踪模型,该模型基于统计动力学方法,使用改进的核概率密度函数来估计生成位置,避免了在陆地上分配生成概率的问题.Kwon 等^[8]提出了一种改进的台风蒙特卡罗模拟方法,通过使用在特定地点附近经过的台风数据来检验所提出的概率分布模型对台风参数的适应性.Huang 等^[9]提出了可用于预测设计台风的风速和剖面的一种改进的台风风场模型,该模型可以更准确地预测台风风速,为建筑物和结构物的设计提供更可靠的参考依据.Guo 等^[10]开发了一种基于台风经验路径模型分析的台风危险性评估方法,研究了不同极值算法模拟极端风速的差异.黄铭枫^[11]通过开展台风数值模拟和极值风速预测,精细化评估了台风危险性.在台风风灾风险评估方面,张京红等^[12]基于台风风速评估了海南橡胶树的损失风险,认为台风风灾是海南省橡胶产业面临的最大的自然灾害.陈纪航等^[13]研究了微地形风场对橡胶树台风风害损失的影响,认为台风灾害风险存在坡顶>坡底>坡中,迎风坡>侧风坡>背风坡等规律.钟兴春^[14]基于构件损毁调查数据仿真模拟了台风灾害期间农村低矮房屋易损性,分析了风力对农村房屋结构破坏的影响.包文轩等^[15]基于区域灾害系统论,结合最大风速和雨量因子开展了广东省台风灾害风险评估,强调风雨联合作用致灾的影响.另外大家知道,能量也是表达灾害强度的一种常用指标,但风灾能量或台风能量方面的研究更少.焦宝峰^[16]从台风风速动能、风场的性质以及动热力场协同演变等角度,讨论了台风登陆前后的发展演变机制.黄勇等^[17]研究认为超强台风“梅花”的能量变化与南亚高压、副热带高压的强度变化有明显关系,并研究了台风“烟花”在急剧增强过程中涡旋风动能的变化.

综上,国内外学者在台风风场模拟、台风风灾风险和台风能量等方面进行了研究,特别是在考虑台风路径、下垫面地形和粗糙度等影响下的高精度风场模拟方面进展较大;其次,针对橡胶树、低矮房屋等风灾的影响及脆弱性方面取得了一定进展;另外,也针对台风能量变化机理及其潜在影响进行了初步探讨等等.相关进展为台风灾害的深入研究及其防灾减灾工作提供了重要参考.然而,台风灾害的本质可

以理解为台风能量的释放过程对人类社会和自然环境造成的影响,但目前关于台风能量或台风风灾能量的研究较少,且集中于台风形成、发展、消亡等动态的物理机制分析上面,尚未能用于致灾危险性或灾情分析.此外,已有的风能评估多从资源利用角度分析,既考虑风速大小,也考虑有效时长等因素,这对于台风风灾损失评估来讲至关重要.因此,本文结合“摩羯”台风灾害现场实际情况,采用台风影响期间风能与灾损关联分析等方法,分析“摩羯”和“威马逊”两场台风致灾危险性的差异,以期揭示台风“摩羯”造成巨灾的原因.

1 研究数据与研究方法

1.1 研究数据 台风路径数据:历史台风样本数据来自中国气象局发布的 CMA 热带气旋最佳路径数据集.该数据集包括自 1949—2019 年西北太平洋(赤道以北,东经 180 度)生成的热带气旋,每年 4 月进行一次归档,未归档的台风数据来源于中国气象局发布的实时台风路径信息,路径信息包括台风路径点的经纬度、中心气压、风速等级等信息.

基础地理数据:包括数字高程 DEM 数据(空间分辨率 500 m),GlobeLand30 土地利用数据(空间分辨率 30 m)等基础数据.用于近地表风场的精细化修正.

1.2 基于 CFD 的台风风场模拟 近地面(10 m 高度处)台风风场模拟方法主要采用 Holland 参数化风场模拟、地形因子及地表粗糙度的边界层设置等方法,具体参考基于 CFD 的近地面高精度台风风场模拟方法^[18].由于大部分承灾体主要集中于近地面,因此相比高空风场来说,近地面 10 m 高度左右的风场模拟结果可以较好地反应承灾体遭受的真实风力水平.

1.3 基于梯度风场的台风风能评估模型 借鉴风力发电常用到的风能公式(实际上为风功率公式)^[19]:

$$E = \frac{1}{2} \rho s v^3,$$

式中: E 为风功率(单位: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$).

考虑到台风灾害中大风灾害的作用时间问题,对建筑物、设施及人员的危害影响,这里将风功率公式对时间积分,形成了可用于台风期间大风致灾危险性评估的“风能公式”:

$$E' = \int_0^T \frac{1}{2} \rho s v^3 dt,$$

式中: E' 为台风风灾的风能(单位: $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$); ρ 为空气密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); dt 代表灾害期间的任意时间间隔(单位: s); v 为风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); s 为受风面积(单位: m^2).

该方法不仅考虑了风速的瞬时值, 还将时间因素纳入考量, 使得灾害期间风能评估更加全面和灵活. 通过对风能密度在台风作用时间内的累积, 可更有效地识别台风期间灾害对特定区域的潜在威胁.

2 结果分析

2.1 近地面台风风场模拟及两场台风对比分析

2.1.1 台风“摩羯”近地面风场模拟 基于台风风场与风能模型, 模拟 2024 年 9 月 5—8 日台风“摩羯”近地面最大风速分布(图 1). 从台风路径与近地面风速的空间分布特征来看, 海南省东部和我国华南沿海

地区受台风影响最为显著. 台风“摩羯”登陆后, 海南沿海区域的风速达到 $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 风力等级达到 14 级以上, 由于海南省地处海洋腹地, 海洋提供的充足湿热条件助推了台风的强烈发展. 台风进一步向菲律宾、我国广西、云南内陆推进, 风速随之逐渐衰减. 这种衰减与地形条件密切相关, 内陆的山地和丘陵地带通过地形摩擦和阻隔效应有效削弱了台风强度, 导致风速降至 10 级以下. 海陆分布、地形特征等台风空间特征在一定程度上反映了台风的能量释放及衰减.

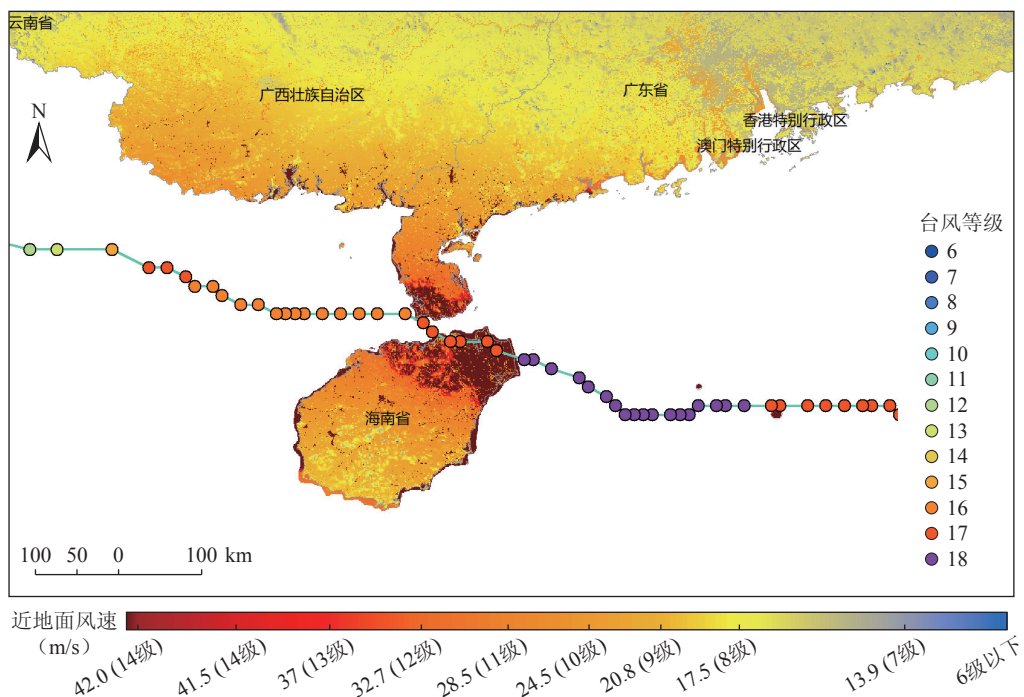


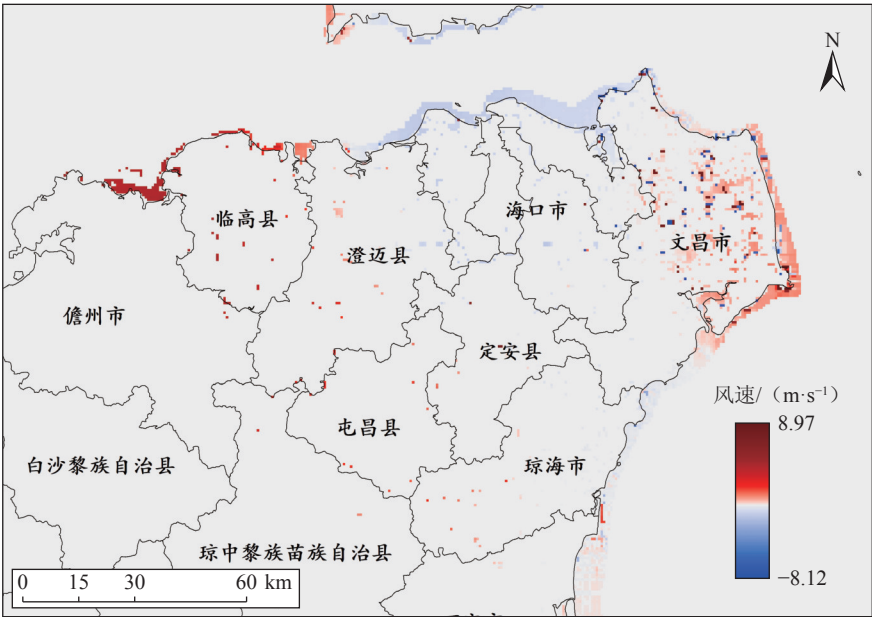
图 1 2024 年 9 月 5—8 日台风“摩羯”近地面风速分布

不同风力等级在海南省各市县的影响区域(见表 1). 大于 12 级风的总覆盖面积为 $1\,473 \text{ km}^2$, 具体影响了海南省的文昌市、海口市(美兰区、琼山区、秀英区、龙华区)、儋州市、三沙市、琼海市、澄迈县、万宁市、定安县、临高县、屯昌县、白沙黎族自治县、琼中黎族苗族自治县、昌江黎族自治县. 大于 13 级风的总覆盖面积为 933 km^2 , 具体影响了海南省的文昌市、海口市(美兰区、琼山区、秀英区、龙华区)、儋州市、三沙市、琼海市、澄迈县、定安县、临高县、屯昌县. 大于 14 级风的总覆盖面积为 101 km^2 , 主要影响了海南省的文昌市、三沙市.

2.1.2 两场台风近地面风场强度特征对比分析 图 2 为台风“摩羯”与台风“威马逊”在大于 12 级风速($32.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)下的差值分析. 图中红色区域表示“摩羯”风速高于“威马逊”, 而蓝色区域则代表“威马逊”

表 1 海南省市/县近地面风力面积汇总表

市/县	大于 12 级风 面积/ km^2	大于 13 级风 面积/ km^2	大于 14 级风 面积/ km^2
文昌市	486	230	73
海口市	148	112	0
儋州市	119	27	0
三沙市	118	118	28
琼海市	80	49	0
澄迈县	54	44	0
万宁市	33	0	0
定安县	25	20	0
临高县	24	24	0
屯昌县	11	6	0
白沙黎族自治县	10	0	0
琼中黎族苗族自治县	8	0	0
昌江黎族自治县	6	0	0



注：红色代表摩羯风速高于威马逊，蓝色则相反。

图 2 台风“摩羯”与台风“威马逊”大于 12 级风速($32.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)空间差值分析

风速更高。从空间分布特征来看,台风“摩羯”的近地面最大风速高于台风“威马逊”,其中文昌市较为显著,且沿海沿岸地区风速高出 $8.97\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,近地面最大风速提升至 13 级、14 级,局部微地形下的阵风则更强。在该风速等级下,大部分设施已经超过常规风荷载设防标准要求。两者风速空间分布的差异表明,“摩羯”台风更倾向于沿海区域造成较大的风速影响,可能是由于其路径和强度在登陆前的快速增强,而“威马逊”虽然也具备超强台风的特征,但对海南省海口市北部区域的影响更为突出。

图 3 进一步展示了两场台风在不同风速等级(>11 级风速)下的面积对比。可以看出,在 12 级风速范围,“威马逊”的影响大于“摩羯”,而在 13 级及以上风速下,“摩羯”的影响明显大于“威马逊”。

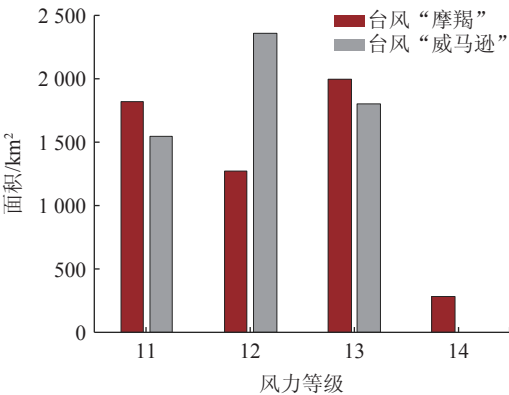


图 3 台风“摩羯”与台风“威马逊”大于 11 级风力影响的空间范围差异分析

为了更好地定量化描述两场台风之间的差异,将

“摩羯”和“威马逊”的不同风力等级影响的全国陆地面积进行详细的阐述,如下表 2。据表 2 可知,台风“摩羯”和台风“威马逊”在不同风力等级下对陆地面积的影响呈现出明显的差异。从总体分布上看,“威马逊”在低风速等级(<10 级)的影响面积远大于“摩羯”。在 9 级风速下,“威马逊”的影响陆地面积为 $26\,131\text{ km}^2$,而摩羯仅为 $16\,685\text{ km}^2$;在 10 级风速下,“威马逊”的影响面积为 $11\,556\text{ km}^2$,而“摩羯”则为 $17\,058\text{ km}^2$ 。“威马逊”在低至中等风速下的影响面积较大,反映出其在风力较小区域更为广泛的覆盖范围。

表 2 台风“摩羯”与台风“威马逊”模型估计影响范围

风力等级	台风“摩羯”影响 陆地面积/ km^2	台风“威马逊”影响 陆地面积/ km^2
14	284	0
13	1 993	1 801
12	1 277	2 355
11	1 828	1 565
10	17 058	11 556
9	16 685	26 131
8	47 681	51 573
7	79 125	71 006
6	221 321	170 128
<6	5 581 235	7 801 102

在 14 级风速下,“摩羯”影响面积为 284 km^2 ,“威马逊”为 0 km^2 。在 13 级风速下,“摩羯”的影响面积为 $1\,993\text{ km}^2$,“威马逊”为 $1\,801\text{ km}^2$;在 12 级风速下,

“摩羯”的影响面积为 $1\,277\text{ km}^2$ ，“威马逊”为 $2\,355\text{ km}^2$ 。这说明“摩羯”只有在 13 级、14 级风速的较小范围内有明显差异，而 12 级及以下区域总体差异并不十分明显，甚至 12 级大风的影响面积中，“威马逊”约是“摩羯”一倍。该结果与现场实际看到的灾情严重程度之间有巨大差异，事实证明用最大风速分布和影响范围来判识实际灾情是不可靠的。

2.2 基于风能模拟的台风风灾危险性评估 通过基于台风风能的评估方法模拟得到了“威马逊”和“摩羯”台风期间风能空间分布图。图中看出，风能分布整体形态和风圈相似，“摩羯”的风能极值在 600 万 kJ 左右。但在台风中心经过的地方，会因“台风眼”存在而导致总风能变小，故在台风“摩羯”在海南岛的风能极值约为 440 万 kJ。“威马逊”的风能极值为

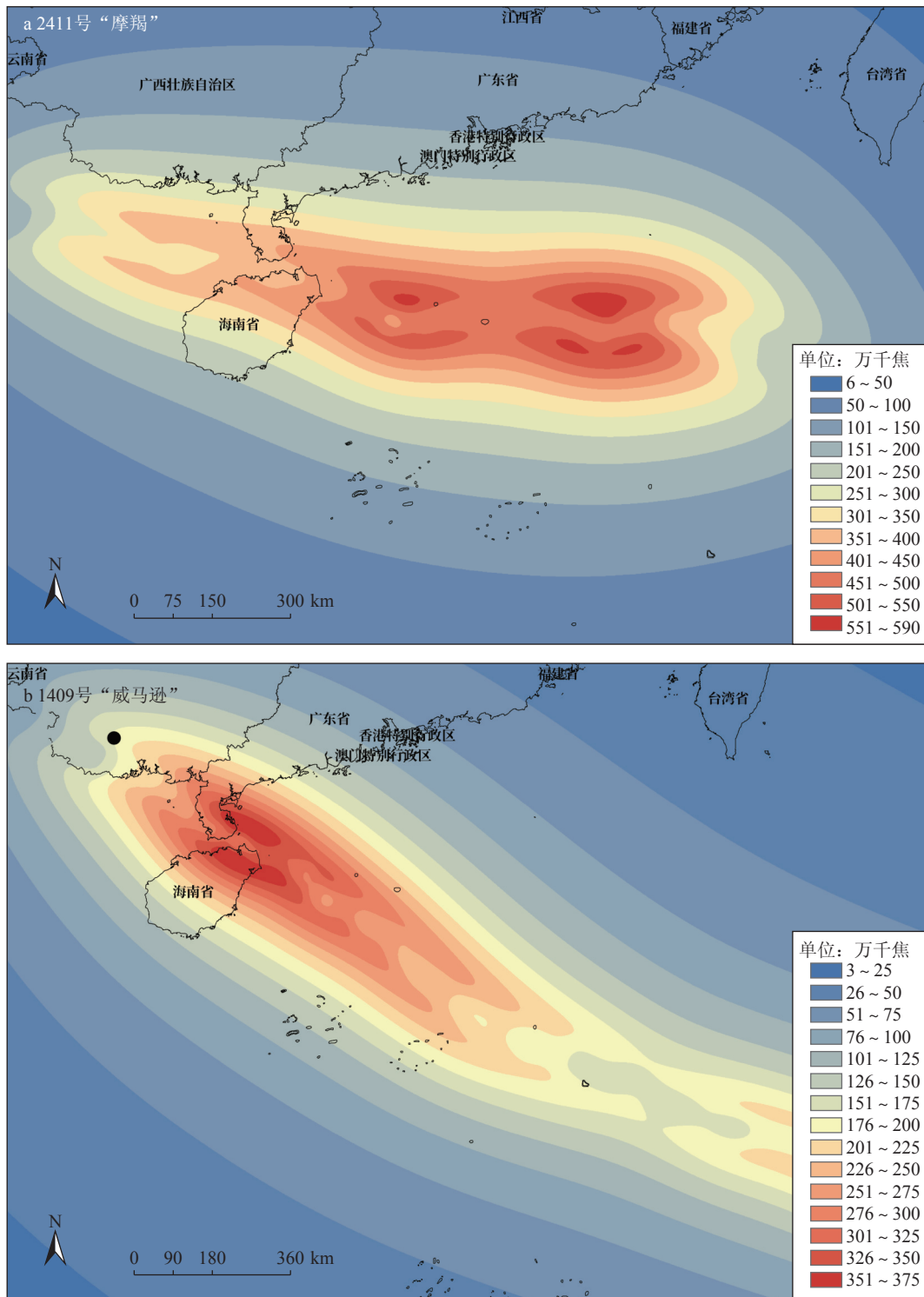


图 4 台风“摩羯”和“威马逊”风能空间分布

370 万 kJ 左右,最大能量区域相当于“摩羯”的 80% 左右. 统计分析可知,海南省台风“威马逊”风能密度平均要比台风“摩羯”低 80 万 kJ 左右. 这表明通过风能模型来解释风灾影响的差异性确有其优势所在,即“威马逊”和“摩羯”的极值风速相差不大,甚至在部分地区还要高于“摩羯”,但是无论从现场核灾的结果,还是从受灾乡镇工作人员和灾民的反馈而言,“摩羯”的破坏性、造成的直接经济损失均远远超过“威马逊”.

台风“摩羯”造成的直接经济损失中占比较大的是农林牧渔业和基础设施.“摩羯”台风灾害影响正值收获季节前期,农作物“头重脚轻”本易倒伏,风灾影响下倒损率较高,香蕉、甘蔗等均遭受较大影响;温室大棚等农业基础设施多数尽毁;高大林木受风面积大,反而变得“脆弱易折”. 传统渔排无法抵抗超强

台风袭击,在强风巨浪作用下大量破碎. 深水网箱结构损坏严重,90% 以上的网箱摧毁,养殖鱼类破网逃逸或受伤死亡;渔船渔港也受到不同程度的损坏. 文昌市、海口市、临高县、澄迈县等地区电力及通信设施受损严重,部分偏远地区电力和通信系统服务中断多日.

2.3 两场台风风灾能量对比分析 图 5 为台风“摩羯”与台风“威马逊”登陆海南岛期间(台风中心留停在岛内的时间)风能比较,分析可以得出以下几点结论:1)台风“摩羯”的风能整体高于“威马逊”;2)台风“摩羯”超高的风能主要集中在海南省东北部沿海地区,尤其是文昌市及其周边地区,包括海口市、临高县、澄迈县等地. 文昌市局部区域遭受台风“摩羯”的近地面风能总量超过台风“威马逊”约 13 倍,能量高出约 50 万千焦左右,海口市中心区域台风“摩羯”风能亦超过台风“威马逊”约 20% 左右.

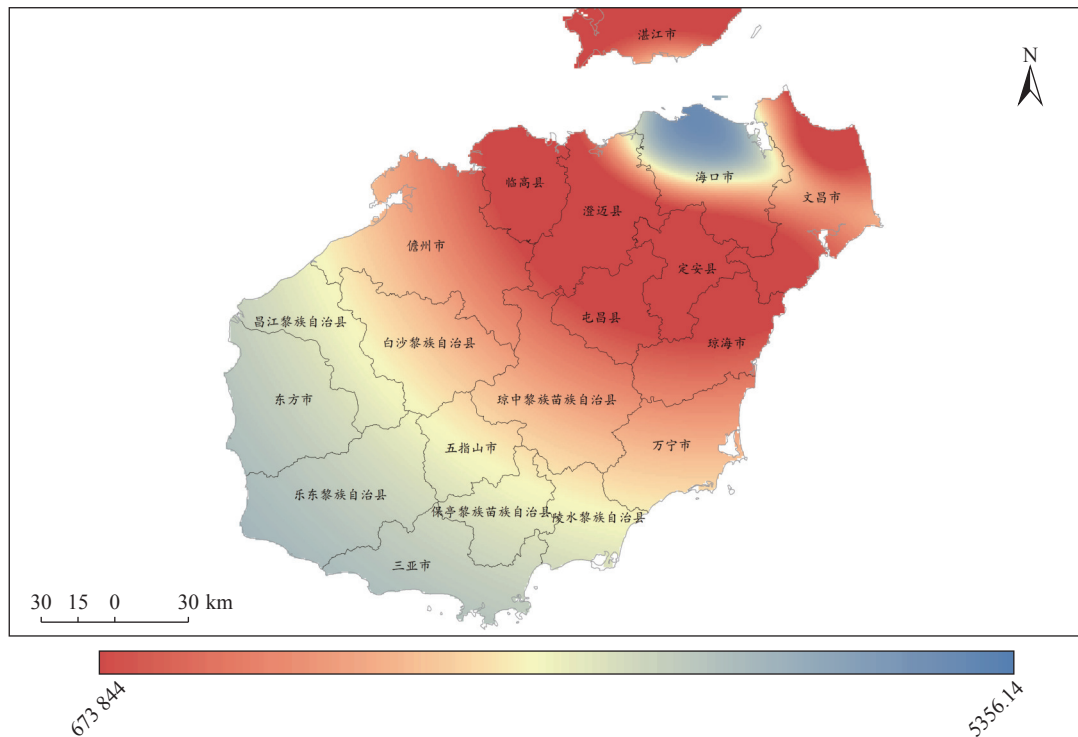


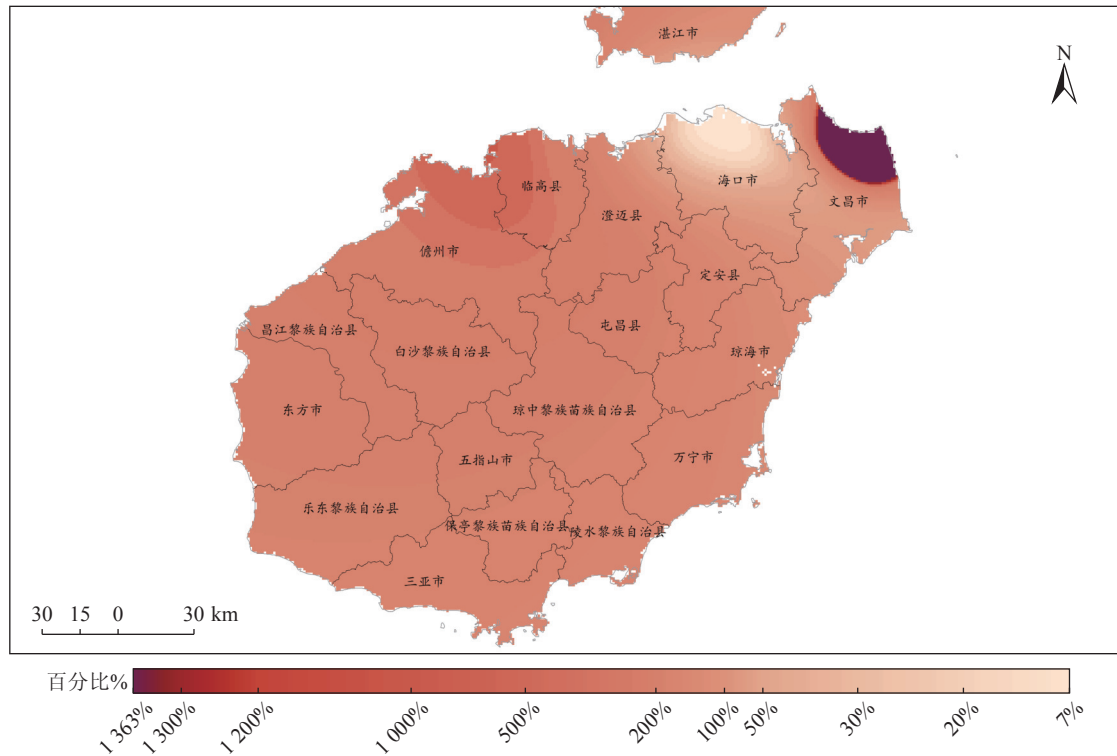
图 5 登陆海南岛期间台风“摩羯”与台风“威马逊”风能之间差值比较

从图 5 中可以看出,“摩羯”台风相较于“威马逊”台风风能呈现出明显空间差异. 整体上,风能在海南岛东北部最大,特别是在海口市、文昌市等地受到“摩羯”台风的影响较显著. 风能分布从东北向西南方向逐渐减弱,海南岛西部和南部地区如儋州市、东方市、五指山市和三亚市等地区风能值较低. 通过对台风“摩羯”和“威马逊”风能的比较,可知海南省文昌市遭受台风“摩羯”的致灾强度远高于台风“威马逊”,虽然 10 a 来海南省经济总量发生了较大变化(2014 年 GDP 为 3 449 亿元,2022 年 GDP 为 6 818 亿

元),但若只根据最大风速来判断灾损则明显不够充分. 事实证明,台风灾害的风能模拟结果可以较好地解释同级别的两场超强台风造成的直接经济损失巨大差异及传统认识分歧.

3 讨论

本文在台风风场模拟结果的基础上模拟了台风登陆期间的风能分布,其中台风风场采用了基于 CFD 的近地面风场模拟方法. 该方法考虑了地表典型山体的风速修正以及地表粗糙度等因素,但受数据



注: 文昌市区域深红色代表遭受台风“摩羯”的近地面风能总量超过台风“威马逊”约13倍; 海口市中心区域淡红色代表台风“摩羯”的近地面风能总量超过台风“威马逊”, 最低超过7%。

图6 登陆海南岛期间台风“摩羯”相对于台风“威马逊”风能的百分比

精度等因素影响,对于复杂地形或微地形风场、风能分布的真实反映可能存在不足,比如在城市不同街区等区域的风速、风能差异不明显。由于针对较大空间尺度台风的风场及风能快速模拟的需要,主要在兼顾数据精度和计算速度等方面进行了优化。未来可针对复杂地表区域尝试引入更精细化的地表参数和不同承灾体摩擦系数等指标,以提升小区域模拟结果的可靠性。本文研究方法中主要基于气象局发布的台风路径观测数据,对于近地表影响则给予地形因子及土地利用类型等进行了修正,在理论上具备一定的通用性。深入研究时,可选择不同地理、气候、经济条件的区域开展跨区域对比验证,如内陆丘陵地区、温带城市群等。通过区域间对比分析和模型扩展,逐步提升结论的普适性和指导价值;建立多区域数据库:通过积累不同区域和气候条件下的台风灾害数据,构建跨区域的风灾能量数据库,为未来模型优化提供支持,以增强该研究在其他区域的应用潜力。此外,台风中心气压是模拟风场的关键指标,而中心气压受大气湿度、温度等环境因素的潜在影响较大,特别是近地表区域。但考虑到湿度、温度等环境场数值模拟的难度和已有公开结果情况,本文直接采用了中国气象局发布的气压观测数据成果,且其具有权威性及代表性。因此针对大气湿度和温度变化可能对台风风能

的维持和衰减产生的潜在作用,深入研究时可考虑其对模型结果的影响,将其作为变量纳入模型,以提升风灾能量模型的全面性和精确度。

本文台风风能评估方法主要是用于大尺度下的台风致灾危险性评估,目前对于具体承灾体(例如,建筑物、农林牧渔业设施)的结构和材质等信息缺乏细节描述,这对后续的危害风险的精准评估有一定影响。针对台风灾害的评估工作,未来可结合承灾体具体信息,即考虑当地建筑物结构数据、农林牧渔业设施的材质特征进行分析,同时考虑接入住建部门或农业部门的易灾易损承灾体空间属性数据,增强对台风影响区域内各类风险因子的量化分析,以实际指导防灾减灾和救灾工作。对于乡村住房和农林牧渔业设施的抗风加固,经济成本往往是实施中的主要障碍。许多农村地区的经济条件有限,改进抗风性能可能需要额外的政府补贴或专项资金支持。因此,建议通过成本分摊、政府资助或低息贷款等方式帮助实现抗风加固。在资源有限的情况下,可根据风险评估结果对高风险区域的资源分配进行优先排序,例如重点加固高风险区域的基础设施和农业设施。这种差异化的资源配置策略可以提高资金使用效率,提高实际实施效果。此外,气候变化背景下强台风频率呈增加趋势,可以结合公众宣传和教育工作,增强居民对

抗风加固的认同感,从而提高主观能动性及参与意愿。

需要注意的是,本文主要聚焦于台风“摩羯”的风灾致灾危险性评价,尚未考虑台风伴随的暴雨、洪涝、风暴潮等其他灾害及其耦合作用对致灾效果的影响。实际上,这些灾害往往在台风期间同时或相继发生,其相互作用可能显著增强灾害后果。例如,强风破坏电力设施间接导致水利设施功能降低进而加重洪涝灾害的问题,短时暴雨引发的洪水或风暴潮会改变地表粗糙程度,从而加强了局地风场强度和分布,进一步加剧风灾损失等问题。未来研究可深入探讨多灾种耦合作用机制,将其纳入模型框架中,以提升台风灾害评估的综合性与准确性。

4 结论

1)台风“摩羯”灾情以风灾致损为主,对比台风“威马逊”发现,两场台风的风场分布特征存在一定差异,但并不十分显著。台风“摩羯”在登陆海南省文昌市期间,近地面最大风速达到 42 m/s(14 级以上),覆盖区域包括海南东北部及沿海多个市县。大于 12 级风的覆盖面积为 1 473 km²,大于 13 级风的覆盖面积为 933 km²,大于 14 级风的覆盖面积为 101 km²,主要集中在文昌市和三沙市等地。相比之下,“威马逊”在低风速等级下(如 9 级和 10 级风)的影响面积更大,而“摩羯”在高风速区域(13 级和 14 级风)对局部地区的破坏力更强。

2)基于风能公式(风功率)及风灾作用时间影响,构建了台风风灾能量计算模型。由于传统风灾评估中多以最大风速或极值风速为主要致灾因子,忽视了风灾作用的时间、风向多变、受风面积等多方面的影响。本文通过对时间积分的风能计算方法,构建了基于风灾能量的台风风灾危险性评估方法,可以更科学、合理地评估台风灾害对不同空间的实际破坏力,特别是明确了高风力等级区域,其能量相对更容易快速积累并导致灾害的发生。

3)基于风能评估的“摩羯”与“威马逊”台风致灾强度差异明显,可以解释两场等级别台风损失悬殊差异的原因。台风“摩羯”风能极值达到 600 万 kJ,海南岛的风能最大值为 440 万 kJ,而“威马逊”的最大风能值仅为 370 万 kJ。文昌市局部区域的风能总量高达“威马逊”的 13 倍,能量高出 50 万 kJ 左右;海口市中心区域“摩羯”的风能也高于“威马逊”20%。揭示了“摩羯”台风尽管最大风速不及“威马逊”,但其实际致灾损失却远高于后者的原因。

4)台风“摩羯”罕见造成海南省部分地区电力系统、通讯系统设施破坏,基于台风风灾能量的区划方

法具潜力。台风“摩羯”导致农林牧渔业受灾严重,农作物倒伏、温室大棚被毁、林木折断等损失显著;90% 以上的渔业网箱被摧毁,大量鱼类逃逸或死亡。基础设施方面,文昌市、海口市等地的电力和通信设施遭受毁灭性破坏,偏远地区电力和通信服务中断数日。未来可采用基于台风风能计算模型开展风险评估或防风区划,优化基础设施的抗风设防标准,尤其针对高风险区域加强抗风能力等级设计。强化区域综合防灾规划,结合风灾能量区划设计降低电力、通信等关键基础设施灾害发生概率,从而提升区域综合防灾减灾能力。

5 参考文献

- [1] 张鹏,张云霞,丁一,等. 超强台风“摩羯”致灾特点和对比分析[J]. 中国减灾, 2024(18): 8
- [2] 王海燕,张鹤,李永刚. 2014 年 09 号台风威马逊对广东省降水的影响及特征分析[J]. 吉林农业, 2019(18): 106
- [3] LU Y, REN F M, ZHU W J. Risk zoning of typhoon disasters in Zhejiang province, China[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(11): 2921
- [4] LIU Y, CHEN D, LI S, et al. A three-dimensional numerical simulation approach to assess typhoon hazards in China coastal regions[J]. *Natural Hazards*, 2019, 96(2): 809
- [5] YIN J, YIN Z E, XU S Y. Composite risk assessment of typhoon-induced disaster for China's coastal area[J]. *Natural Hazards*, 2013, 69(3): 1423
- [6] WU F B, HUANG G Q. Refined empirical model of typhoon wind field and its application in China[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2019, 145(11): 04019122.
- [7] CHEN Y, DUAN Z D. A statistical dynamics track model of tropical cyclones for assessing typhoon wind hazard in the coast of southEast China[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2018, 172: 325
- [8] KWON S D, LEE J H. Estimation of Extreme Wind Speeds in Southern and Western Coasts by Typhoon Simulation[J]. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 2008, 28(4): 431-438.
- [9] HUANG W, XU Y L, LI C W, et al. Prediction of design typhoon wind speeds and profiles using refined typhoon wind field model[J]. *Advanced Steel Construction*, 2017, 7(4): 387-402.
- [10] GUO Y X, HOU Y J, QI P. Typhoon wind hazard model and estimation on return period of typhoon wind speed[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, 39(2): 420
- [11] 黄铭枫,杜海,王卿,等. 我国东南沿海城市和近海海域的台风极值风速预测[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(5): 104
- [12] 张京红,张明洁,张亚杰,等. 1409 号超强台风“威马逊”对海南橡胶园的风害影响评估[J]. 气象科技进展, 2020,

- 10(4): 93
- [13] 陈纪航, 陶忠良, 邱育毅, 等. 地形与橡胶园风害的关系: 1409 号超强台风“威马逊”对海南橡胶园风害的调查[J]. 热带生物学报, 2015, 6(4): 467
- [14] 钟兴春, 方伟华, 曹诗嘉. 基于构件损毁模拟仿真的沿海农村典型低矮房屋台风风灾易损性研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(1): 51
- [15] 包文轩, 宫阿都, 徐滢, 等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估: 以“山竹”台风为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2023, 59(1): 94
- [16] 焦宝峰. 台风“彩虹”(2015)近海及登陆过程中能量演变特征和转化机制分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021
- [17] 黄勇, 王业桂, 蔡其发. 超强台风“梅花”急剧变化的环境特征和能量变化分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(6): 22
- [18] YANG Y T, DONG L, LI J Z, et al. A refined model of a typhoon near-surface wind field based on CFD[J]. [Natural Hazards](#), 2022, 114(1): 389
- [19] 薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 中国风能资源贮量估算[J]. 太阳能学报, 2001, 22(2): 167

Disaster risk assessment of Typhoon "Yagi" utilizing wind energy simulation

WANG Zhenguo²⁾ LU Jingyi⁴⁾ KANG Dengjie¹⁾ FEI Wei⁵⁾ FENG Xuguang¹⁾ GAO Zhiguo¹⁾
YANG Xiaopeng¹⁾ WANG Shaohua²⁾ ZHANG Hua^{1, 3)}

(1) School of National Safety and Emergency Management, Beijing Normal University, Beijing, China; 2) State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute., Hangzhou, China; 3) International Joint Laboratory for Disaster Simulation and Systemic Risk Response, Ministry of Education, Zhuhai, Guangdong, China; 4) School of Systems Science, Beijing Normal University, Beijing, China; 5) National Disaster Reduction Center, Ministry of Emergency Management, Beijing, China)

Abstract In recent years, there has been an augmentation in the frequency of intense typhoons, particularly Super Typhoon "Yagi" (Typhoon No. 2411), which has caused substantial economic losses and social impacts in Hainan Province in China. This study compares the wind disaster assessment method based on accumulated wind energy, thereby mitigating the limitations of traditional assessments based solely on maximum wind speed. The research findings indicate that the accumulated wind energy model more precisely reflects actual disaster losses, especially in high-vulnerability areas such as Wenchang and Haikou in Hainan Province. The coverage area of winds greater than level 12 is 1 473 km², level 13 is 933 km², level 14 is 101 km² in Hainan island. The overall wind energy of "Yagi" is higher than that "Rammasun", and the total wind energy of Typhoon "Yagi" in Wenchang City is about 13 times that of "Rammasun", about 500, 000 kJ. The study reveals the influence of factors such as typhoon wind speed, duration, and terrain on accumulated wind energy, thus elucidating the regional disparities in wind disaster risk. Under the background of climate change, it is recommended to improve wind resistance design standards and infrastructure resilience based on typhoon wind energy estimation results, especially for rural housing, agricultural facilities, electricity, communication and other infrastructure.

Keywords Typhoon; wind energy; disaster risk assessment; Typhoon "Yagi"; catastrophe

【责任编辑: 刘先勤】