研究论文|Research Article
热带海岛工程|Tropical Island Engineering

引用格式:李勋煜, 徐婧, 刘苑锟, 等. 台风“剑鱼”致典型建筑与农业温室结构破坏调查与分析 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(3): 337−350.

Citation: Li Xunyu, Xu Jing, Liu Yuankun, et al. Investigation and analysis of damages to typical buildings and agricultural greenhouse structures caused by typhoon Kajiki[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(3): 337−350.

台风“剑鱼”致典型建筑与农业温室结构破坏调查与分析

李勋煜[1], 徐　婧[2,3]✉, 刘苑锟[1], 雷　洋[2,3], 黄　斌[1]✉,
李　潇[2,3], 闫渤文[2,3], 杨庆山[2,3]

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045;
3. 山区土木工程安全与韧性全国重点实验室, 重庆 400045)

摘　要: 2025 年第 13 号台风“剑鱼”侵袭海南省三亚市, 成为该市有气象记录以来影响最严重的台风。基于“剑鱼”12 级风圈内的实地调研, 结合气象数据评估风力等级与风速回归期, 系统分析建筑屋面光伏结构、高层建筑围护结构及农业温室结构 3 类典型建筑与农业温室结构的风致破坏形式与机理。结果表明, 影响区风速回归期略低于 50 年一遇, 未超出一般建筑结构设计风压值, 因此未对其主体结构造成破坏。调查发现部分非主体结构仍出现了破坏。建筑屋面光伏结构具体破坏原因为连接螺栓失效; 高层建筑围护结构破坏多源于局部负压超限、脉动风致疲劳、环境致材料或构件耐久性衰减及材料性能不足; 农业温室结构破坏主因是覆膜老化致抗撕裂与抗风揭性能下降、结构整体稳定性与刚度不足。针对 3 类结构破坏特征与机理, 从设计、材料、构造、施工及运维 5 个方面提出抗风减灾措施, 以期为气象、住建和应急管理等部门的防灾减灾决策及工程防台风设计提供科学依据。

关键词: 台风“剑鱼”; 风灾调研; 建筑与农业温室结构; 风速回归期; 风致破坏; 抗风措施

中图分类号: TU312.3　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004-1729(2026)03-0337-14

DOI: 10.65658/j.hndk.2025092801　　CSTR: 32403.14.hndk.2025092801

Investigation and analysis of damages to typical buildings and agricultural greenhouse structures caused by typhoon Kajiki

Li Xunyu[1], Xu Jing[2,3]✉, Liu Yuankun[1], Lei Yang[2,3], Huang Bin[1]✉, Li Xiao[2,3],
Yan Bowen[2,3], Yang Qingshan[2,3]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China;
2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
3. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing 400045, China)

Abstract: Typhoon Kajiki (No. 2513) struck Sanya City, Hainan Province, with wind intensity reaching Beaufort scale 14, making it the strongest typhoon recorded in the region. Through field investigations within the typhoon's 12-level wind circle and an analysis of meteorological data to determine wind speed return

Received: 2025−09−28; **Revised:** 2025−11−20; **Accepted:** 2025−12−06; **Available online:** 2026−01−23.
✉ **Corresponding author(s):** Xu Jing, E-mail: xujing098@163.com; Huang Bin, E-mail: huangbin@hainanu.edu.cn.

periods, a systematic analysis was conducted on the wind-induced damage patterns and mechanisms of three typical structural types: rooftop photovoltaic (PV) arrays, high-rise building envelopes, and agricultural greenhouses. The results show that the wind speed return period in the affected area was slightly below the 50-year benchmark. Consequently, the resulting wind pressure did not exceed the design specifications for general building structures, and thus did not result in significant failure of primary structural systems. However, the investigation also found that some secondary structural elements sustained damage. The specific causes are as follows: damage to rooftop PV structures was chiefly caused by the failure of connection bolts. For high-rise building envelopes, damage primarily resulted from localized excessive negative pressure, fatigue due to fluctuating wind loads, environmental degradation of material durability, and inherent deficiencies in material performance. Damage to agricultural greenhouse structures was mainly due to the aging of covering films, which reduced their tear and wind uplift resistance, alongside insufficient overall structural stability and stiffness. Based on these damage mechanisms, wind resistance and disaster mitigation measures are proposed, addressing five key aspects: design, materials, detailing, construction, and operation maintenance. This study is expected to provide a scientific basis for disaster management decisions by meteorological, construction, and emergency management agencies, as well as for the typhoon-resistant design of engineering structures.

Keywords: typhoon Kajiki; wind disaster investigation; buildings and agricultural greenhouse structures; wind speed return period; wind-induced damage; wind resistance measure

0 引 言

台风作为典型自然灾害,对海南岛及沿海地区的建筑与农业温室结构造成严重破坏,引发显著经济损失与社会影响[1−2]。2025年第13号台风“剑鱼”以14级风力侵袭三亚市(注:在事后发布的最佳路径中被中国气象局认定为超强台风),导致多处典型建筑与农业温室结构受损严重,对当地经济与民生造成显著冲击。风灾现场调查与分析,可为评估风灾强度、揭示结构破坏机理及优化抗风设计提供宝贵的现场资料与数据支撑。

当前,中国建筑结构的风灾调研持续推进,成果丰硕。在台风灾害调研方面,金玉芬等[3]分析轻钢房屋台风损毁原因并提出改进措施。周华等[4−5]和齐洪威等[6]分别探讨超强台风“威马逊”作用下砌体、混凝土及轻钢结构的破坏特征,提出针对性加固建议。霍林生等[7]总结台风“苏罗迪”对福建低矮建筑造成的典型损毁形式,给出沿海地区防风减灾策略。黄鹏等[8]通过现场实测,揭示台风“浣熊”影响下近地风场与低矮房屋屋面风压分布规律。王国新等[9]基于风灾损毁数据构建风灾损失评估模型。贾宁等[10]对比分析台风“天鸽”与“山竹”的致灾差异与区域特征。钱钧珑[11]调研台风“莫兰蒂”致厦门轻钢结构的损毁情况,从设计与施工角度提出优化建议。在龙卷风灾害调研方面也取得系列进展,如Tao等[12]、杨庆山等[13−14]和胡松雁等[15]对国内数次龙卷风事件开展系统调研,揭示各类建筑结构在龙卷风作用下的破坏机理。针对农业温室结构风灾,杨小锋等[16−17]调研台风“凯萨娜”与“山神”造成海南南部温室结构的破坏,分析其抗风设计中存在的问题,并提出针对性改进措施。

上述研究为结构抗风减灾设计奠定了重要基础,但仍存在以下不足:(1)缺乏区域多类结构协同破坏分析:现有调研多聚焦单一结构类型,未能系统揭示区域内不同易损结构的破坏机理,难以满足区域工程设施协同抗风的实际需求。(2)非主体结构失效连锁效应关注不足:研究侧重主体结构损伤,对围护结构、连接节点等非主体构件的失效机制关注较少,未深入揭示“节点失效→构件损伤→整体破坏”的传导路径。(3)多因素耦合致灾机制研究薄弱:研究多以风速为核心参数,未能充分考虑台风强脉动、地形干扰与长持时特性对结构响应的耦合影响,难以全面揭示台风致灾的本质机制。(4)针对性全周期减灾策略匮乏:停留于破坏现象描述与定性分析层面,未结合具体风灾案例,提出覆盖全周期的针对性抗风措施

以支撑防灾决策。(5)农业设施风灾调研薄弱:农业温室作为典型风敏感结构,其系统性的风致破坏分类因评估体系尚未建立,相关调研与抗风研究滞后。

本文基于强台风“剑鱼”袭击三亚后的实地调查,首先结合气象数据反演评估了“剑鱼”的风力等级与风速回归期,然后系统分析了建筑屋面光伏、高层建筑围护结构和农业温室 3 类典型结构在台风作用下的破坏特征与多因素耦合致灾机理,最后从设计、材料、构造、施工与运维 5 个方面,提出具有针对性的抗风减灾综合对策,以期为台风频发区的工程防护与防灾决策提供依据。

1 风灾调研概况

1.1 “剑鱼”路径和风场信息 2025 年 8 月 22 日,热带低压于菲律宾吕宋岛以东洋面生成,23 日凌晨移入中国南海东部海域,随即沿西北路径移动。该热带低压于 23 日上午加强为热带风暴,命名为 2025 年第 13 号台风“剑鱼”,其移入南海后强度迅速增强,至 24 日 14 时已发展为强台风级。此时其中心位于海南省三亚市东南方向约 120 km 海面,中心附近最大风速 42 m·s^{-1},中心最低气压 955 hPa,如图 1 所示。截至 24 日 20 时,台风中心持续向三亚沿海靠近,移至三亚市西南方向约 30 km 海域,中心附近最大风速增至 45 m·s^{-1}(14 级),中心最低气压 950 hPa。(注:在事后发布的最佳路径中,中国气象局将“剑鱼”的峰值强度由强台风级(45 m·s^{-1}, 14 级)大幅上调至超强台风级(52 m·s^{-1}, 16 级),本文以较早前发布的实时报文数据为依据进行研究。)

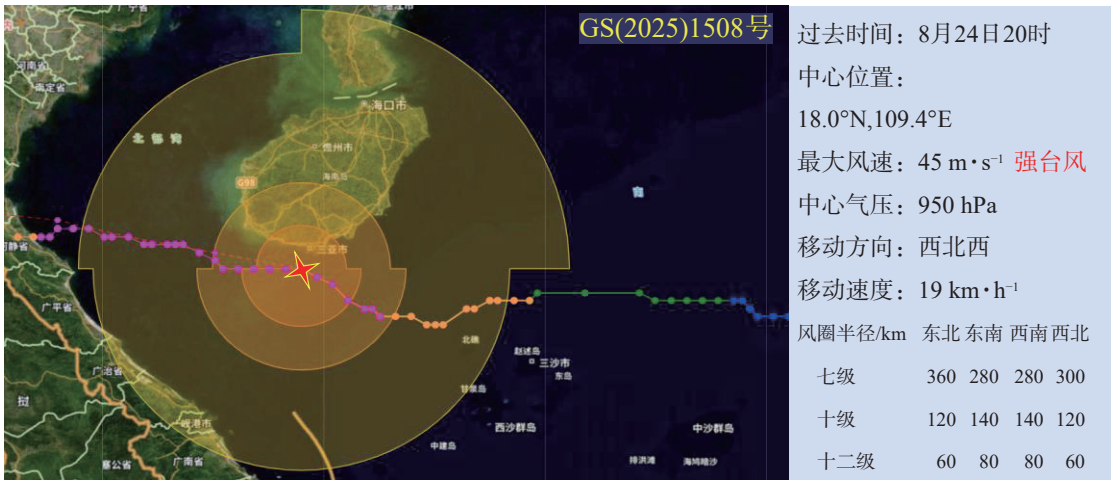


图 1 “剑鱼”路径和风场信息[18]

1.2 调研方法与地点选取 台风“剑鱼”过境后,调研组第一时间赶赴风灾现场,采用无人机航拍与三维建模、手持电子设备拍摄、现场测量及访问目击者等方式进行实地调研。

本文共涉及 40 处调研地点,覆盖三亚市天涯区、吉阳区、海棠区及崖州区,且均处于“剑鱼”12 级风圈范围内。综合考虑区域差异性、结构受损典型性及数据完整性等标准,本文选择其中 8 处调研地点进行重点分析(如图 2 所示),以精准揭示台风“剑鱼”对当地建筑与农业温室结构造成的典型风灾特征;分析对象聚焦建筑屋面光伏结构、高层建筑围护结构及农业温室结构 3 类典型结构—前 2 类分别是三亚城区的屋面光伏结构与高层建筑围护结构,后者则为热带海岛广为分布的特色农业基础设施。3 类结构均属风致破坏高发范畴,且对区域经济与民生安全影响显著。

1.3 调研数据收集 各调研地点的数据收集遵循标准化流程,主要包括:(1)系统拍摄受损结构的周边环境、整体破坏全景、关键部位细致破坏特征及区域三维建模等;(2)详细记录破坏形式,并测量损伤区域尺寸及标注构件规格等;(3)在条件允许情况下,访谈相关人员以获取结构建造年份、日常维护状况与风灾过程信息等;(4)所有现场数据于当日调研结束后立即整理、编号和归档,形成完整可追溯的数据库,以支撑后续深度分析。

2 台风风力等级与回归期估计

描述台风强度时,通常以风力等级和回归期(又称重现期)为主要指标。风力等级体系最早由英国学者 Francis Beaufort 于 1805 年提出,其与风速的对应关系可参照 GB/T 19201—2006《热带气旋等级》[19] 中的蒲福风力等级表确定。台风"剑鱼"影响期间,三亚吉阳区半山半岛气象站测得最大 3 s 阵风风速为 52.4 m·s^{-1},根据文献 [19] 可判定该观测点阵风风力达 16 级。

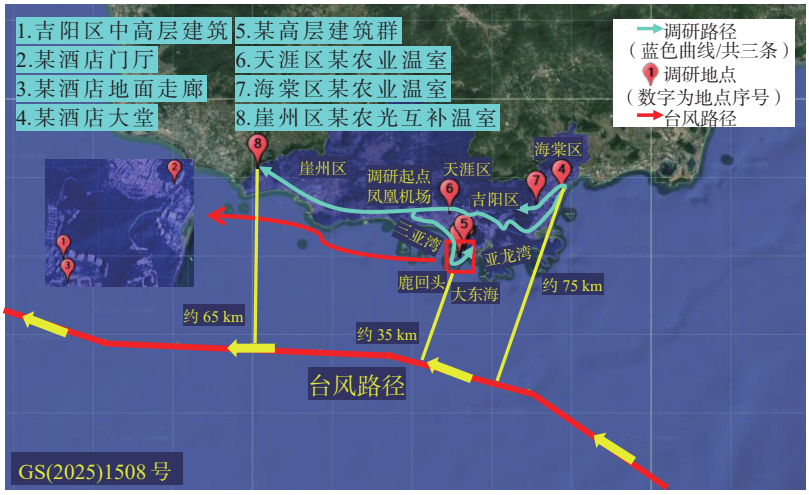


图 2 调研路径与典型结构风灾调研点

台风回归期用于表征某一强度台风的罕见性。根据中国 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》[20],三亚市 10 年、50 年和 100 年一遇基本风压值分别为 0.50、0.85 和 1.05 kN·m^{-2}。基于伯努利方程,由风压值可换算成风速值:

$$w = \frac{1}{2}\rho v^2 \tag{1}$$

其中,w为风压,kN·m^{-2};ρ为空气密度,取ρ=1.2 kg·m^{-3};v为风速,m·s^{-1}。由式(1)得到三亚市 10 年、50 年和 100 年一遇的风速值分别为 28.9、37.6 和 41.8 m·s^{-1}。根据荷载文献 [20] 中的定义,此时的风速值指离地 10 m 高度处,B 类地貌下的 10 min 平均风速。

依据半山半岛气象站测得的最大 3 s 阵风风速 52.4 m·s^{-1},可估算"剑鱼"影响期间站点周边区域风速的回归期。参考 Durst 等[21] 的研究,对该阵风风速进行时距换算,得到对应的 10 min 平均风速,具体风速的时距换算:

$$U_{\Delta t}(z) = U_{3\,600}(z)\left[1 + \frac{\sqrt{\beta}c(\Delta t)}{2.5\ln(z/z_0)}\right] \tag{2}$$

其中,$U_{\Delta t}(z)$指在离地高度z、时距Δt时对应的平均风速,取z=10 m;β为与地面粗糙长度z_0相关的无量纲系数,参考表 1,取β=6.0;$c(\Delta t)$为与时距Δt相关的无量纲系数,参考表 2,分别取c(3)=2.80、c(600)=0.36。

表 1 不同粗糙长度z_0对应的β取值

z_0/m	0.005	0.070	0.300	1.000	2.500
β	6.50	6.00	5.25	4.85	4.00

表 2 不同时距Δt对应的$c(\Delta t)$取值

Δt/s	1	3	5	10	20	30	50	100	200	300	600	1 000	3 600
$c(\Delta t)$	3.00	2.80	2.55	2.32	2.00	1.73	1.35	1.02	0.70	0.54	0.36	0.16	0

将半山半岛气象站处最大 3 s 阵风风速U_3(10)=52.4 m·s^{-1} 代入式(2),得到最大 10 min 平均风速为

$U_{600}(10)$= 36.1 m·s^{-1}。结合上述荷载规范中三亚市不同回归期的对应风速估算，“剑鱼”影响期间半山半岛气象站周边区域的风速回归期略低于 50 年一遇。

3 典型建筑与农业温室结构灾损分析

结合现场调研数据，梳理了 3 类典型结构的主要风致破坏形式及其占比，如表 3 所示。

表 3 典型建筑与农业温室结构主要风致破坏形式及破坏占比

结构类型	主要破坏形式	破坏占比/%
建筑屋面光伏结构	连接螺栓失效	60
	光伏面板风揭破坏	40
	支架扭曲变形	25
高层建筑围护结构	外装饰面板脱落	40
	门窗玻璃破碎	55
	幕墙板块脱落、开裂	25
	采光顶破坏	10
农业温室结构	覆膜撕裂、掀飞	85
	骨架节点连接失效	60
	骨架杆件变形	40
	整体倒塌	25

注：一个调研地点可能同时出现多种破坏形式。

3.1 建筑屋面光伏结构灾损分析 吉阳区调研地点 1 处的中高层建筑采用平行于屋面坡度的附加式屋面光伏结构，如图 3 所示。台风“剑鱼”过境期间，该区域多栋建筑屋面瓦片被掀落，屋顶光伏面板发生大面积风揭破坏，光伏面板与屋面之间的固定连接失效。由于该调研点与吉阳区半山半岛气象站直线距离仅 2.5 km，且地貌类别基本符合荷载规范中的 B 类地貌特征。因此可选取该气象站的风速观测数据，对该调研点中高层建筑屋面光伏结构开展相应的风荷载验算。



图 3 调研点 1 处建筑屋面光伏结构破坏

该建筑为双坡屋面，通过无人机航拍与三维建模，初步估算屋顶长边尺寸 B=21 m，短边尺寸 D=6 m，平均离地高度 H=45 m，屋盖的倾斜角度θ=30°。依据 GB/T 51368—2019《建筑光伏系统应用技术标准》[22]，建筑附加光伏发电系统的风荷载设计值 w_k：

$$w_k = \beta_{gz}\mu_s\mu_z w_0 \tag{3}$$

其中，β_{gz}为高度z处的阵风系数，受离地高度与地貌类别影响，取 1.56；μ_z为风压高度变化系数，受离地高度与地貌类别影响，取 1.57；w_0为基本风压，对应 50 年回归周期，取 0.85 kN·m^{-2}；μ_s为风荷载体型系数，计算如下：

$$\mu_s = \mu_{s0}\beta \tag{4}$$

其中，μ_{s0}为风荷载局部体型系数，受屋面类型和屋面坡度影响，取−0.7；β为调整系数，受屋面类型、屋顶高度及建筑迎风宽度影响；E 取 2H 和 B 中较小值，具体取值参考图 4。

在“剑鱼”影响期间半山半岛气象站最大 $U_{600}(10)$=36.1 m·s^{-1}，由式（1）得到相应的风压为 w_0= 0.782 kN·m^{-2}，进一步由式（3）得到图 5 所示的各分区风荷载设计值，对应调整系数为 1.1、1.0、0.7 和

0.5的风荷载值分别为1.475、1.341、0.938和0.670 kN·m^{-2}。

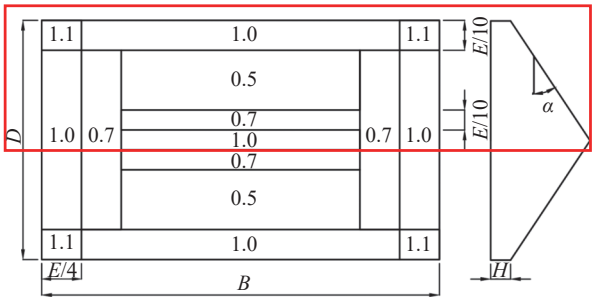


图4 调整系数分区域取值图[22]

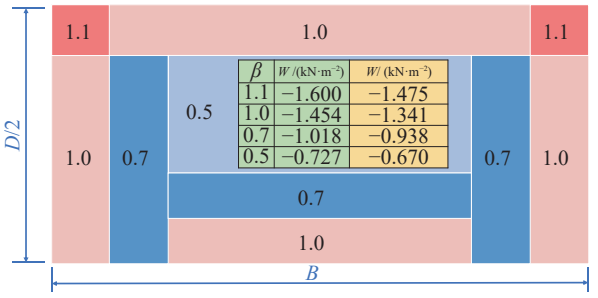


图5 建筑屋面光伏结构各分区风荷载设计值

计算结果表明,“剑鱼”作用于屋顶光伏面板的实际风压未超过其设计风压限值,理论上该建筑屋面光伏结构应能抵御此次台风作用荷载。但是现场调查却显示,光伏面板出现大面积脱落,且其与屋顶之间的连接构件存在明显变形与断裂失效。

为了定量揭示屋面光伏结构连接螺栓失效机理,对连接节点进行简化力学分析。该光伏面板结构由4个M8不锈钢螺栓通过夹具与屋面结构连接。根据GB 50017—2017《钢结构设计标准》[23],单个M8螺栓的有效截面积A_e为36.6 mm^2,其屈服强度为320 MPa,因此单个螺栓的屈服荷载约为11.71 kN。根据图5所示风荷载设计值,屋面边缘区域(调整系数为1.1)的风荷载值为1.475 kN·m^{-2}。屋顶光伏面板面积约20 m^2,则作用在单块面板上的总风吸力为29.5 kN。该风吸力由4个螺栓共同承担,假设荷载均匀分布,则单个螺栓承受的拉力N为7.38 kN。

计算结果表明,连接螺栓实际承受的荷载小于其设计承载力。但现场破坏特征显示连接结构已失效,一方面是因为风荷载在光伏面板表面并非均匀分布,在极端情况下,螺栓实际应力极易接近甚至超过其屈服强度,从而导致塑性变形乃至断裂。另一方面,螺栓预紧力不足、夹具与屋面接触不密实,均会显著降低节点的实际承载力,在长期风振作用下,螺栓连接逐渐松动,最终在极端风荷载下被完全拔出或拉断。

总体而言,“剑鱼”致建筑屋面光伏结构破坏的主要形式有:光伏面板风揭破坏、连接螺栓失效和支架扭曲变形。相应破坏机理表现为:光伏面板破坏多始于屋面边缘,该区域风吸力效应显著,易导致连接节点率先失效,进而在阵列内引发连锁反应,最终造成支架扭曲与面板大面积掀飞。

3.2 高层建筑围护结构灾损分析 “剑鱼”过境期间,三亚市沿海多家酒店发生不同程度的围护结构破坏。位于调研地点2和3的某酒店,其门厅及地面走廊等区域的装饰面板发生脱落如图6a和6b所示。结合破坏位置和台风期间的风向分析推测,迎风前檐因流体分离效应产生极值负压,导致该区域面板局部脱落;初始破损出现后,气流侵入面板与主体结构间的空腔,致使内外压差急剧增大,进而引发周边面板连续脱落,最终造成更大范围破坏。



a 调研地点2 b 调研地点3 c 调研地点4

图6 酒店装饰面板及采光顶玻璃脱落

调研地点4的某酒店大堂采光顶发生多块玻璃面板脱落,如图6c所示。该采光顶通过螺栓与固定槽连接玻璃板,风荷载作用下,部分连接件失效,引发玻璃面板坠落。该破坏进一步导致大面积渗漏与室内积水,不仅严重影响酒店正常运营,而且还构成显著安全隐患。

调研地点5为三亚市区河口区域的高层建筑群,周边无建筑或地形可对台风来流形成有效遮挡。该

小区建筑迎风立面窗户玻璃几乎完全破碎，其他立面破坏则较轻，如图 7 所示。调研未发现明显飞掷物撞击痕迹，推测其迎风立面窗户破坏主要由极值正压冲击导致；侧立面窗户多远离迎风前沿，未承受显著极值负压，故基本完好。



图 7　调研地点 5 高层建筑围护结构破坏

总体而言，“剑鱼”尚未对三亚高层建筑造成主体结构破坏，其围护结构破坏的主要形式有：玻璃（幕墙）破坏、门窗破坏、外装饰面板破坏。相应破坏机理主要包括：（1）局部负压超限，在建筑角部、檐口、凹口等区域气流分离显著，形成强风吸力，导致局部负压超过设计限值，拉拽作用引发面板脱落或胶缝撕裂；（2）脉动风致疲劳破坏，台风中阵风对围护结构反复冲击，使胶缝、连接件等疲劳损伤累积，在瞬时极值风压作用下失效；（3）环境致材料或构件耐久性衰减，高温、高湿和高盐的严酷环境加速构件、连接件及胶缝的腐蚀与老化，致使其承载力大幅下降；（4）材料选型与性能不足，部分老旧小区高层建筑仍采用单层普通玻璃，其抗风压性能无法满足强台风作用需求，在迎风正压冲击下易破裂或脱落。

3.3　农业温室结构灾损分析　调研地点 7 处同一区域内东西走向的农业温室结构发生严重损毁或倒塌（如图 8 所示），南北走向的温室则整体相对完好。该差异主要源于“剑鱼”沿东南—西北走向逆时针移动，调研区域均位于台风路径以北，故主要受东向强风作用。南北走向温室凭借流线型拱顶引导气流顺畅通过，避免了风压集中作用，故受损较轻。相比之下，东西走向温室的山墙正面迎风且与来流方向垂直，导致风荷载集中作用于山墙面。此外，东西走向温室的纵向拉杆数量不足，且多数节点仅采用铁丝绑扎，纵向拉杆所受拉力远大于铁丝节点的承载力，因此在东向强风作用下更易发生严重倒塌。



a 东西走向　　b 南北走向

图 8　农业温室结构倒塌方向与风向示意图

根据 GB/T 51183—2016《农业温室结构荷载规范》[24]，农业温室围护结构的风荷载标准值计算公式如下，据此估算作用于薄膜表面的风荷载值约为 2.0 kN · m^{-2}。

$$w_k = \mu_{s1}\mu_z w_0 \tag{5}$$

其中，μ_{s1}为风荷载局部体型系数，取−1.5；μ_z为风压高度变化系数取 0.81；w_0为按时距为 3 s 风速确定的风压值，取 1.647 kN · m^{-2}。

柔性薄膜受均匀风压作用时，风压会转化为薄膜的张力，张力进一步转化为拉伸应力。假定薄膜为四边固定的柔性薄膜，仅考虑风压产生的轴向拉伸应力（忽略小变形下的弯曲效应），对单位宽度（取 1 m）、支撑间距 L（取 2 m）的薄膜进行简化力学计算。基于现场调研数据及文献 [25] 已有研究，农业温室普遍采用厚度为 0.12 mm 的 PE（polyethylene）薄膜，其无耐候的抗拉强度约为 12.34 MPa。在台风作用下，风压使薄膜产生微小挠度，张力 T 的水平分力平衡风压，小变形下风压合力 F 可简化为 2 倍的张力。应力是单位面积的张力，因此薄膜的拉伸应力与风压的关系：

$$F = w_k \times L \times 1 \tag{6}$$

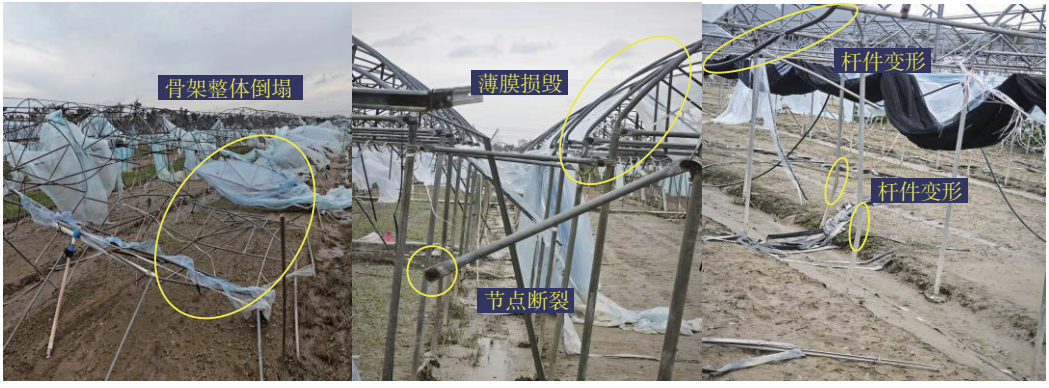
$$T = \frac{1}{2}F \tag{7}$$

$$\sigma = \frac{T}{t} \tag{8}$$

其中,F 为薄膜所受风压合力,kN;T 为两端骨架对薄膜的张力,kN;t 为薄膜厚度,mm;σ为应力,MPa。

在台风“剑鱼”作用下,单位宽度薄膜所承受的风压合力 F 达 4.0 kN,由此在 PE 薄膜中产生的应力约为 16.67 MPa,已显著超过其无耐候条件下的抗拉强度,成为导致覆膜撕裂破坏的关键因素。从结构细观层面来看,卡槽和压条等连接部位存在的应力集中现象进一步加剧了局部破坏的风险。此外,从膜材自身的力学与耐候性能角度分析,“三高三强”的环境因素会加速材料老化,其与风荷载形成协同作用,导致薄膜力学性能严重退化,共同促成了结构的最终失效。

3.3.1 薄膜温室结构灾损分析 调研地点 6 处的圆拱形塑料薄膜温室在台风中主要表现为整体倒塌、薄膜撕裂、节点连接失效及杆件变形等破坏形式,如图 9 所示。该温室采用铰接与铁丝捆扎结合的连接方式,上风向温室的轻钢骨架发生整体倒塌,且产生明显塑性变形。该温室位于台风 12 级风圈内,结构所用圆钢管管径偏小,严重倒塌区的管径仅 25 mm,且纵向拉杆均通过铁丝绑扎固定,导致结构整体刚度与连续性不足,抗风能力显著降低,最终遭受严重破坏。相比之下,未整体倒塌区域温室的圆钢管管径为 30 mm,且右侧增设工字形钢构件作为辅助支撑。从结构力学角度来看,当管径由 25 mm 增至 30 mm,惯性矩提升约 2.07 倍,抗弯刚度显著增强。该加强措施有效提升温室结构整体性与稳定性,增强风荷载传递与分散效率,降低主体构件变形及破坏风险。



a 棚体部分骨架整体倒塌 b 薄膜损毁及节点断裂 c 杆件变形

图 9 调研地点 6 处薄膜温室结构破坏形式

调研地点 7 的圆拱形塑料薄膜温室群体包括单栋和连栋 2 类结构(如图 10 所示),其连接节点采用细圆钢管,通过铁丝与螺栓固定。本次风灾中单栋温室覆膜与骨架损毁严重,超 50% 的薄膜撕裂或脱落,主体骨架出现明显弯曲与变形,如图 10a 所示。连栋温室结构受损则明显较轻,上风向区域仅发生局部倒塌与薄膜损毁,下风向区域则无明显风致破坏,如图 10b 所示。连栋温室结构通过将多栋单栋结构连接为整体,形成空间协同受力体系,借助构件间的相互连接与支撑,显著增强结构整体稳定性及抗风性能。

总体而言,“剑鱼”致薄膜型农业温室结构破坏的主要形式有:覆膜撕裂、覆膜整体掀飞、骨架节点连接失效、骨架杆件变形和整体倒塌。农业温室结构作为一种特殊的大跨度轻骨架式膜结构,其风致破坏机理为覆膜易老化,抗撕裂与抗风揭性能下降,强风下易撕裂或损毁;结构整体稳定性与刚度不足,难以抵御强风荷载,进而引发节点连接失效、杆件变形甚至整体倒塌。

3.3.2 农光互补型温室灾损分析 调研地点 8 为农光互补型温室结构,单块光伏面板尺寸为 2.2 m × 1.1 m,光伏阵列间距为 2 m,如图 11 所示。光伏面板通过夹具与螺栓固定于金属支架,支架与立柱采用焊接和螺栓组合连接,构成牢固整体。光伏面板下方的温室结构骨架采用圆钢管搭建,主要通过螺栓与水泥立柱连接,杆件间以焊接为主;温室薄膜则通过压条等构件固定于骨架。该温室东北侧临近山体,山

体形成天然挡风屏障，有效削弱台风影响，仅少数光伏面板发生风揭破坏。因上方光伏阵列间距较小，对气流形成干扰，显著降低下部温室顶部的实际风压，故温室结构保持完整，无明显损伤。



a 单栋群体温室结构　　b 连栋群体温室结构

图 10　调研地点 7 处薄膜温室结构破坏



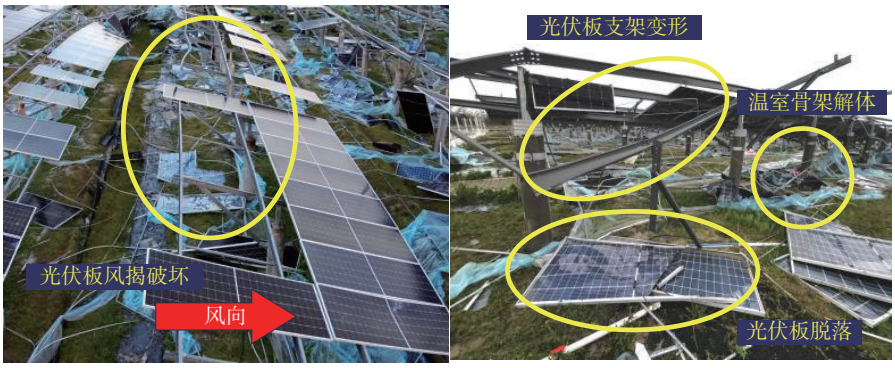
a 光伏结构　　b 农光互补温室结构

图 11　调研地点 8 处农光互补型温室结构破坏

3.3.3　超强台风“摩羯”致文昌农光互补温室破坏分析　为深入探究农光互补型温室结构在不同地形条件与台风作用下的破坏形式、灾损程度及主导因素的差异性，引入 2024 年超强台风“摩羯”的案例作为比对，从而更全面地评估此类结构在台风风场中的潜在风险，以增强风致破坏机理研究的系统性与普适性。

2024 年 9 月 6 日，超强台风“摩羯”登陆海南文昌翁田镇，中心附近最大风速 62 m・s^{-1}（风力 17 级），致使当地农业温室严重受损。紧邻超强台风“摩羯”路径一处的农光互补型温室破坏尤为严重，如图 12 所示。该温室光伏面板发生大规模风揭，约 40% 上檐口面板脱落，下檐口边缘明显翘起。其破坏机制主要为上檐口风速大、遮挡弱，来流直接冲击并发生流动分离；同时光伏面板具有一定倾角，承受显著气动升力，最终诱发风揭。该温室边缘区域因缺乏遮挡而直接承受强风作用，导致该处光伏面板几乎全部脱落，支撑骨架也发生严重变形。其中温室结构采用圆钢管骨架，依靠 3 根纵向拉杆与横向拱架通过铁丝绑扎连接，风灾中整体骨架倒塌解体。破坏原因包括：倾斜布置的光伏面板加剧近地面风速与风压；温室结构整体抗风能力不足；上方光伏阵列整体破坏严重，丧失对下方温室结构的风压屏蔽效应。上述因素共同导致温室结构整体严重倒塌。

调研地点 8 处的农光互补型温室结构，其东北侧有山脉作为天然风屏障，能够有效地减弱台风风力，且所处区域风力未达到 12 级，因此该处仅出现个别光伏面板的风揭破坏；同时，该温室上方的光伏阵列间距较小，可干扰气流并降低温室顶部风荷载，因此圆钢管骨架保持完整，无明显损伤。而受超强台风“摩羯”影响的农光互补型温室无任何遮挡，不仅处于 17 级风圈内且靠近台风路径，中心附近最大风速达 62 m・s^{-1}，因此该处温室边缘区域的光伏面板几乎全部脱落。此外，倾斜布置的光伏面板加剧了近地面风速，其下方温室骨架的纵向拉杆与横向拱架仅依靠铁丝绑扎连接，整体抗风能力薄弱，最终导致温室结构倒塌解体。因此，风场特性（强脉动性）、地形效应（三亚多山沿海地形的剧烈干扰）与结构响应的多重耦合作用，是导致 2 处农光互补型温室风灾差异的根本原因。



a 光伏板风揭破坏　　b 光伏板支架变形和板面脱落

图 12　超强台风“摩羯”致农光互补型温室结构破坏

4　抗风减灾措施与建议

4.1　建筑屋面光伏结构抗风减灾措施及建议　基于建筑屋面光伏结构的风致破坏特征与机理，建议从5个方面优化提升其抗风性能：(1)优化屋面光伏板布局，以降低风致升力并减弱气动干扰效应；(2)选用防松螺栓、预紧式夹具等高可靠性连接件，设计阶段重点复核螺栓、夹具及压块等关键连接件在极端风荷载作用下的承载力，确保设计承载力高于风荷载效应且预留充足安全裕度；(3)需特别加强边缘与角部区域的抗风构造措施，以有效抵御台风作用；(4)严格把控施工质量，并建立定期检查维护机制，重点关注节点松动与疲劳损伤；(5)推广光伏建筑结构一体化(BIPV)施工，从根本上提升其抗风可靠性。

4.2　高层建筑围护结构抗风减灾措施及建议　基于高层建筑围护结构的风致破坏特征与机理，建议从设计、材料、构造、施工和运维5个方面，全面提升其抗风性能：(1)在设计阶段，确保风荷载的精准取值，优化结构选择以满足抗风需求；(2)在材料方面，提出核心材料选择标准，确保材料强度与耐久性满足热带海岛环境的抗风要求，如夹层玻璃、耐候钢、中性硅酮耐候胶等；(3)在构造方面，在风压敏感区和连接薄弱区强化构造措施，并优化传力路径，确保风荷载高效传递至主体结构；(4)在施工阶段，严格落实设计意图，开展风压模拟测试和抗风揭测试等专项检查与验收；(5)在运维阶段，建立定期监测机制，对已腐蚀或老化的构件、连接件及胶缝，及时加固、修复或更换。

4.3　农业温室结构抗风减灾措施及建议　基于农业温室结构的风致破坏特征与机理，可从风荷载精准取值、围护材料选择、骨架结构加固优化、群体布局优化、防风设计及智能防灾6个方面进行系统优化，以提升其抗风性能：(1)在风荷载精准设计方面，结合现场实测、风洞试验与数值模拟，揭示近地面风场特性、温室结构的风荷载特性及风致响应机理[26]，为风荷载精准取值提供依据；(2)在围护材料选择方面，优选适用于热带海岛台风多发区的温室高耐候膜材，提升温室覆膜的抗风耐久性；(3)在骨架结构加固优化方面，以增强结构整体稳定性为目标，引入“V”形或“X”形斜向支撑，并推广采用螺栓连接、焊接或专用卡具等更可靠的节点连接形式构造；(4)在群体布局优化方面，采用合理的温室布置间距与方式，降低温室间风荷载干扰效应；(5)在防风设计方面，建议在温室周边设置挡风设施或防风林，改善局部风场环境，降低温室表面风荷载；(6)在智能防灾方面，增设可快速收卷的覆膜主动防风装置，安装风场联动的智能预警与应急响应系统(强风预警时自动启动覆膜固定与泄压装置)，构建全链条的数字化防灾应急体系，通过数字孪生等技术，整合感知预警、指挥调度、响应评价和韧性恢复，实现农业温室结构从灾前监测到灾后修复的全流程数字化管理，显著提升应急响应效率。

5　结　论

本文基于强台风“剑鱼”袭击三亚后的实地灾害调研，系统研究了建筑屋面光伏结构、高层建筑围护结构和农业温室3类典型结构的风致破坏特征，并从风荷载作用机制、结构响应、材料性能及多因素耦合等角度深入剖析了各类破坏形式的成因，得出以下主要结论：

（1）“剑鱼”影响期间，三亚市半山半岛气象站周边区域的阵风风力达 16 级，风速回归期略低于 50 年一遇，未超出中国一般建筑结构以 50 年回归期为基准的设计风压值。此次风灾主要为常规建筑围护结构和农业温室结构的风致破坏，未造成建筑主体结构破坏。

（2）建筑屋面光伏结构的主要破坏形式为面板风揭、连接螺栓失效和支架扭曲变形，其破坏由屋面边缘的强风吸力导致连接节点率先失效，进而引发光伏阵列内连锁反应，最终造成支架扭曲和面板大面积掀飞。通过优化面板布局、增强关键连接件可靠性、强化边缘与角部抗风构造、严控施工质量和建立维护机制并推广 BIPV 施工等措施，提升屋面光伏结构抗风性能。

（3）“剑鱼”未破坏高层建筑主体结构，其围护结构主要破坏形式为玻璃（幕墙）破坏、门窗破坏和外装饰面板破坏。其破坏机理包括局部负压超限产生拉拽作用，引发面板脱落或胶缝撕裂；脉动风致疲劳使胶缝和连接件等损伤累积，在极值风压作用下失效；环境致材料或构件耐久性衰减，导致承载力大幅下降；材料性能不足，在迎风正压冲击下易破裂。从设计、材料、构造、施工及运维 5 个方面，提出高层建筑围护结构抗风减灾的主要措施。

（4）“剑鱼”致农业温室结构的主要破坏形式为覆膜撕裂、覆膜整体掀飞、节点连接失效、杆件变形和整体倒塌。其破坏机理为覆膜易老化，抗撕裂与抗风揭性能下降，强风下易撕裂或损毁；结构整体稳定性与刚度不足，强风下易局部损伤或整体倒塌。从风荷载精准设计取值、围护材料选择、骨架结构加固优化、群体布局优化、主动防风设计和智能防灾 6 个方面，提出农业温室结构抗风减灾的主要措施。

（5）“剑鱼”的致灾机制是风场特性、地形效应与结构响应多重因素耦合作用的结果，而非单一风速因素。与常规强风相比，“剑鱼”致灾的独特性体现在其强脉动性、长持续时间和剧烈的地形干扰效应，这些特性共同导致典型结构疲劳与连接失效的风险显著增加。因此，工程抗风设计与减灾需构建涵盖局部风场评估、气动外形优化、节点连接可靠性强化及地形效应等因素的综合防御体系。

参考文献：

[1] 欧进萍，段忠东，常亮. 中国东南沿海重点城市台风危险性分析 [J]. 自然灾害学报，2002，11（4）：9−17.
Ou J P, Duan Z D, Chang L. Typhoon risk analysis for key coastal cities in southeast China[J]. Journal of Natural Disasters, 2002, 11(4): 9−17.

[2] 李昊，黄斌，刘建，等. 热带海岛地区薄膜温室建筑抗风研究综述 [J]. 自然灾害学报，2022，31（5）：13−23.
Li H, Huang B, Liu J, et al. Review on wind resistance of thin-film greenhouse buildings in tropical islands[J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(5): 13−23.

[3] 金玉芬，杨庆山，李启. 轻钢房屋围护结构的台风灾害调查与分析 [J]. 建筑结构学报，2010，31（增刊 2）：197−201，231.
Jin Y F, Yang Q S, Li Q. Typhoon damage investigation of claddings of light steel buildings[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2): 197−201, 231.

[4] 周华，韩琴，花立春，等. 2014 年“威马逊”超强台风作用下建筑结构灾损调查与分析：砌体结构 [J]. 建筑结构，2016，46（3）：100−105.
Zhou H, Han Q, Hua L C, et al. Reconnaissance and analysis of damages of building structures caused by super typhoon Rammasun in 2014: masonry structures[J]. Building Structure, 2016, 46(3): 100−105.

[5] 周华，张江利. 2014 年“威马逊”超强台风作用下建筑结构灾损调查与分析：钢筋混凝土结构 [J]. 建筑结构，2016，46（6）：100−105.
Zhou H, Zhang J L. Investigation and analysis of damages of building structures caused by super typhoon Rammasun in 2014: reinforced concrete structures[J]. Building Structure, 2016, 46(6): 100−105.

[6] 齐洪威，韩琴，罗海燕，等. 2014 年“威马逊”超强台风作用下建筑结构灾损调查与分析：轻钢结构 [J]. 建筑结构，2015，45（15）：27−35.
Qi H W, Han Q, Luo H Y, et al. Reconnaissance and analysis of building structure damages caused by super typhoon Rammasun in 2014: light steel structures[J]. Building Structure, 2015, 45(15): 27−35.

[7] 霍林生, 王银坤, 李永鑫, 等. 台风“苏迪罗”对福建沿海村镇房屋破坏情况的调研 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(2): 315−322.
Huo L S, Wang Y K, Li Y X, et al. Investigation of building damage conditions of coastal towns and villages in Fujian Province by typhoon “Soudelor”[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(2): 315−322.

[8] 黄鹏, 夏波文, 顾明. 台风“浣熊”影响下近地风特性及低矮房屋屋面风压实测研究 [J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊1): 53−57.
Huang P, Xia B W, Gu M. Studies on near-ground wind characteristics and wind pressures on a low-rise building roof under typhoon “Neoguri”[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 53−57.

[9] 王国新, 李明鑫. 风灾致村镇建筑损失评估及台风灾害管理系统 [J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 96−102.
Wang G X, Li M X. Loss assessment of rural buildings under wind disaster and typhoon disaster management system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(1): 96−102.

[10] 贾宁, 刘强, 石先武, 等. 基于现场调查的台风“天鸽”(1713)和台风“山竹”(1822)风暴潮灾害影响和致灾对比分析 [J]. 海洋预报, 2022, 39(5): 94−99.
Jia N, Liu Q, Shi X W, et al. Comparative analysis of the impact of typhoon storm surge disaster and the disaster-causing difference between typhoon “Hato”(1713) and “Mangkhut”(1822) based on field survey[J]. Marine Forecasts, 2022, 39(5): 94−99.

[11] 钱钧珑. 超强台风造成轻型房屋钢结构灾损调查与反思 [J]. 福建建筑, 2018(5): 24−28.
Qian J L. Investigation and reflection of damage to steel structure of light-weight buildings caused by super typhoon[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018(5): 24−28.

[12] Tao T Y, Wang H, Yao C Y, et al. Performance of structures and infrastructure facilities during an EF4 tornado in Yancheng[J]. Wind and Structures, 2018, 27(2): 137−147.

[13] 杨庆山, 王雨, 回忆, 等. 辽宁开原7·3龙卷风致结构破坏调研与分析 [J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 183−190.
Yang Q S, Wang Y, Hui Y, et al. Investigation and analysis of structural damage induced by the 3 July tornado in Kaiyuan, Liaoning Province[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(9): 183−190.

[14] 中国工程建设标准化协会抗风减灾与风能利用专业委员会风灾调研工作组重庆大学团队. 2024年7月5日山东东明县龙卷风灾害调研报告 [J]. 工程建设标准化, 2024(8): 53−59.
CECSA Committee of Wind Disaster Mitigation and Energy Utilization, Chongqing University Team. Research report on the tornado hitting Dongming County of Shandong Province on July 5, 2024[J]. Standardization of Engineering Construction, 2024(8): 53−59.

[15] 胡松雁, 吴健, 杨易, 等. 广州钟落潭镇龙卷风灾害调查与分析 [J]. 建筑结构学报, 2025, 46(3): 182−192.
Hu S Y, Wu J, Yang Y, et al. Investigation and analysis of tornado disaster in Zhongluotan Town, Guangzhou City[J]. Journal of Building Structures, 2025, 46(3): 182−192.

[16] 杨小锋, 李劲松, 杨沐, 等. 台风“凯萨娜”对海南南部设施农业的影响及相关思考 [J]. 热带农业科学, 2009, 29(10): 68−69, 74.
Yang X F, Li J S, Yang M, et al. Influence of typhoon Ketsana on protected agriculture in south Hainan[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2009, 29(10): 68−69, 74.

[17] 杨小锋, 李劲松, 杨沐, 等. 台风“山神”对海南南部设施农业的影响及思考 [J]. 农业工程技术(温室园艺), 2013(1): 20−25.

[18] 中央气象台台风网. 2513剑鱼路径信息. [EB/OL]. (2025−08−22)[2025−09−17]. http://typhoon.nmc.cn/web.html.

[19] GB/T 19201—2006 热带气旋等级 [S].
GB/T 19201—2006 Grade of tropical cyclones[S].

[20] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S].

[21] Durst C S. Wind speeds over short periods of time[J]. Meteorological Magazine, 1960, 89: 181−187.

[22] GB/T 51368—2019 建筑光伏系统应用技术标准 [S].
GB/T 51368—2019 Technical standard for photovoltaic system on building[S].

[23] GB 50017—2017 钢结构设计标准 [S].
GB/T 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].

[24] GB/T 51183—2016 农业温室结构荷载规范 [S].
GB/T 51183—2016 Code for the design load of horticultural greenhouse structures[S].

[25] 王文想, 黄斌, 刘喜杰, 等. 热带海岛温室建筑膜材的力学性能与耐候性能 [J]. 自然灾害学报, 2025, 34(2): 173−187.
Wang W X, Huang B, Liu X J, et al. Mechanical and weathering properties of building membranes for tropical island greenhouses[J]. Journal of Natural Disasters, 2025, 34(2): 173−187.

[26] Huang B, Liu J K, Li Z N, et al. Analysis of wind pressure characteristics of typical agricultural greenhouse buildings on tropical islands[J]. Advances in Aerodynamics, 2024, 6(1): 1.

作者贡献声明

李勋煜和徐婧负责风灾现场实地调查, 收集调研数据并整理, 并撰写初稿、修订内容、润色语言等。刘苑锟和雷洋负责风灾现场实地调查, 收集调研数据并整理, 并使用统计工具进行调研数据分析。黄斌、李潇、闫渤文和杨庆山负责对论文内容提出关键修改意见和逻辑调整, 提供学术指导和学术方向把握, 并提供经费与资源支持。

利益冲突声明

作者声明, 不存在已知的可能影响本论文所报告工作的竞争性经济利益或个人关系。

AI 使用声明

本文的英文题名、摘要和关键词采用 Deepssek-V3.2 翻译生成, 并进行了部分修改。

伦理声明

不适用: 本文不涉及人类或动物的生物学研究。

电子补充材料(如需要)

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025092801。

数据可用性

支持论文结论所需的所有数据均已包含在稿件和/或电子补充材料中。如需获取与本文相关的其他数据, 可向通信作者提出申请。

致谢/Acknowledgements

本文得到国家自然科学基金地区基金项目(52568072、52068019)、海南省自然科学基金高层次人才项目(522RC605)、海南省自然科学基金青年基金项目(520QN231)和海南省研究生创新科研课题基金项目(Qhys2023-122)支持。

This work was supported by the Regional Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (52568072, 52068019), High-level Talent Project of the Hainan Provincial Natural Science Foundation (522RC605), Young Scientists Fund of Hainan Provincial Natural Science Foundation (520QN231), Hainan Provincial Postgraduate Innovation Research Project Fund (Qhys2023-122).

作者简介

李勋煜(2001—), 男, 福建泉州人, 海南大学 2023 级土木水利专业硕士研究生。E-mail: 1214691957@qq.com。

徐　婧(2002—),女,四川资阳人,重庆大学2024级土木工程专业硕士研究生。E-mail: xujing098@163.com。

刘苑锟(2002—),男,河北衡水人,海南大学2024级土木水利专业硕士研究生。E-mail: 547449083@qq.com。

雷　洋(1998—),女,河南郑州人,重庆大学2024级土木工程专业博士研究生。E-mail: 20241601027@stu.cqu.edu.cn。

黄　斌(1989—),男,湖南益阳人,工学博士,海南大学副教授,博士生导师与博士后合作导师,海南省高层次人才,"结构风工程"海南省人才团队核心成员。研究方向:工程结构抗风与抗震、工程结构多灾害作用与防护研究。主持国家自然科学基金、海南省自然科学基金高层次人才项目、海南省自然科学基金青年基金等,主研国家自然科学基金、省部级重大科技计划、省重点研发计划以及省自然科学基金等10余项。已在国内外权威期刊发表学术论文70余篇,授权专利5项。E-mail: huangbin@hainanu.edu.cn。

李　潇(1991—),男,广东中山人,博士,重庆大学教授,博士生导师。担任中国灾害防御协会风与风灾分会副秘书长,中国工程建设标准化协会抗风减灾与风能利用专业委员会青年委员等。研究方向:结构抗风减灾基础理论与分析方法研究。主持或参与了国家自然科学基金项目、科技部重点专项项目、欧洲研究理事会高级基金项目等国内外多个重大科研项目。已在《J. Struct. Eng. ASCE》《J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.》等结构工程、风工程学科领域内顶级SCI期刊发表论文30余篇。E-mail: lixiao_seanli@cqu.edu.cn。

闫渤文(1989—),男,河南南阳人,博士,教授,博士生导师,重庆市英才计划-青年拔尖人才,重庆市"百人计划"特聘专家。近年来主持国家自然科学基金青年基金1项和面上项目2项,科技部外国专家重点支撑计划1项,重庆市科委面上项目1项和中国博士后面上项目1项。发表与结构风工程相关的期刊论文74篇,其中SCI收录62篇,EI收录12篇;获权发明专利12项,软件著作权7项,实用新型13项,参编教材3部,参编省部级标准3部。E-mail: bowenyancq@cqu.edu.cn。

杨庆山(1968—),男,河北石家庄人,博士生导师。研究方向:风工程、风能和结构工程。主持制定屋盖结构风荷载规范一部,以第一作者出版专著3部,发表SCI/EI论文500余篇,授权专利30余项,Google Scholar H指数34,入选全球前2%顶尖科学家榜单。获得国家科技进步奖二等奖(2项)、国家级教学成果奖二等奖、华夏建设科学技术奖一等奖(3项)、重庆市科学技术奖一等奖(3项)、中国钢结构协会科学技术特等奖、教育部科技进步二等奖(2项)、西藏自治区科技进步二等奖、北京市科技进步二等奖、高等学校科技进步二等奖、国际薄壳与空间结构协会Hangai Prize、国际学术会议ICSSCS的Highly Recommendable Paper Award等科技奖项,获得国务院政府特殊津贴、重庆英才计划优秀科学家、教育部首届青年教师奖、詹天佑科技奖、光华工程科技奖青年奖、中国空间结构优秀青年奖、茅以升北京青年科技奖、太阳膜结构优秀青年奖等荣誉。E-mail: qshyang@cqu.edu.cn。

(责任编辑:高　喆,英文校对:张海滨)

勘　误

《海南大学学报(自然科学版)》2024年第42卷第4期论文《海南软土地区深基坑排桩支护的变形特性》(作者:叶俊杰、韩建刚,DOI:10.15886/j.cnki.hdxbzkb.2023091801)存在一处笔误,现更正如下:原文作者简介中"海南大学土木工程专业2021级研士研究生"表述有误,更正为"海南大学土木工程专业2021级硕士研究生"。

特此声明。

海南大学学报编辑部

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0, https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

© The Author(s) 2026. Published by Journal Editorial Department of Hainan University.