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

引用格式:刘婉秋, 王奇, 霍旭杰, 等. 海南岛超强台风“摩羯”建构筑物灾害调研与防灾减灾 [J]. 海南大学学报(自然科学版中英文), 2026, 44(3): 239−336.

Citation: Liu Wanqiu, Wang Qi, Huo Xujie, et al. Field investigation of building and structural damage induced by Super Typhoon Yagi in Hainan Island and implications for disaster prevention and mitigation[J]. Natural Science of Hainan University, 2026, 44(3): 239−336.

Open Access

海南岛超强台风“摩羯”建构筑物灾害调研与防灾减灾

刘婉秋[1,2], 王　奇[2], 霍旭杰[2], 蒋伊琳[2], 孙天舒[2], 钟有亮[3], 姜　柳[2], 尚喆雄[2], 张海滨[2], 段书苏[2], 张友良[2], 王珍珍[2], 上官贝琪[2], 邰嘉浩[2], 陆晓婉[2], 付建存[2], 杨　虓[2], 冯业宝[2], 李雨龙[2], 杜小月[2], 王子龙[2], 罗崇航[2], 黄　斌[2], 刘豫安[2], 姜　霖[2], 朱丽玮[2], 赵　雁[2], 张亿先[2], 钟昌廷[2], 张素馨[2], 魏斐斐[2], 李玉梅[3], 班启昌[2], 黄均溢[2], 陈世赢[2], 李勋煜[2], 李昆锦[2], 苏永辉[2], 陈　焰[2], 何光元[2], 陈　宇[2], 杨忻峰[4], 董立业[2], 韩飞宇[2], 李少康[2], 刘大聪[2], 薛发榜[2], 王少斐[2], 张　冲[2], 赵　涛[2], 胡　波[2], 马　未[5], 余宇秉[2], 王予红[6], 曾加东[2], 李良勇[2], 单　波[2], 肖天崟[2], 曾晓辉[2], 任学斌[7], 贾俊峰[8], 乔冠东[2] ✉, 周　智[1,2] ✉, 欧进萍[9]

(1. 热带海洋工程材料与评价全国重点实验室, 海南 海口 570228; 2. 海南大学 土木建筑工程学院, 海南 海口 570228; 3. 海南省气象局 海南省气象台, 海南 海口 570100; 4. 海南大学 信息与通信工程学院, 海南 海口 570228; 5. 上海建工集团股份有限公司, 上海 200080; 6. 香港理工大学 土木与环境工程系, 香港 999077; 7. 海南省设计研究院有限公司, 海南 海口 571100; 8. 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124; 9. 哈尔滨工业大学(深圳) 智能土木与海洋工程学院, 广东 深圳 518055)

摘　要: 热带气旋(“飓风”或“台风”)是全球最具破坏性的自然灾害之一, 其影响范围广泛, 造成的生命财产损失巨大。现有数据表明, 全球气候变化使得热带气旋的移速减缓, 但由热带气旋引发的降雨量与移速呈现反比关系; 此外, 虽然全球热带气旋总数呈下降趋势, 但 4 ~ 5 级飓风(即超强台风)活动频率整体上升。2017 年大西洋飓风季造成美国 1 250 亿美元的经济损失; 2025 年美国德克萨斯州飓风引发强降雨, 导致逾 130 人丧生。海南岛处于台风生成及移动的区域, 是中国受台风影响最频繁的地区之一。2014 年超强台风“威马逊”登陆文昌市, 成为有气象记录以来登陆中国的最强台风(登陆强度 70 m · s^{-1}), 海南岛因灾死亡或失踪 24 人, 直接经济损失达 110 亿元人民币。2024 年, 超强台风“摩羯”以仅次于超强台风“威马逊”的强度(登陆强度 62 m · s^{-1}), 同样登陆文昌市, 其破坏力却远超超强台风“威马逊”, 造成海南岛死亡 4 人, 直接经济损失超 600 亿元人民币。

超强台风“摩羯”(国际编号: 2411)于 2024 年 9 月 1 日在菲律宾以东洋面生成, 6 日在文昌市翁田镇沿海登陆(中心最低气压 915 hPa), 后穿过海口市和澄迈县等地移入琼州海峡, 随后移入北部湾海面。海南岛

Received: 2025−11−28; **Revised:** 2026−03−09; **Accepted:** 2026−03−11.
✉ **Corresponding author(s):** Qiao Guandong, E-mail: guandong-qiao@hainanu.edu.cn; Zhou Zhi, E-mail: zhizhou@hainanu.edu.cn.

12级及以上风圈覆盖区域受影响超9 h,远超2014年超强台风“威马逊”的3 h,文昌测得的最低气压和最强风速均突破中国所有台风过程陆地实测值。4~8日,海南岛普降暴雨到大暴雨,最大降雨量为乐东县尖峰镇691.2 mm,文昌市降雨量突破当地历史9月的日最大降雨量极值。海口市转移群众超过10万人,倒塌房屋约400间,房屋损坏超过3万间,农作物受灾面积达570 km^2,直接经济损失超过263亿元;文昌市房屋受损达2.5万余间,农作物受灾面积约180 km^2,绝收面积高达110 km^2,经济损失约达327亿元。近年来海南省通过修订工程建设与设施设备使用规范,并完善灾前应急预案,显著提升了台风防御能力,使得人员伤亡数量明显下降。但随着沿海地区人口与经济持续增长,超强台风所带来的风险不断攀升,造成的经济损失也愈发难以承受。

在世界范围内,从气象角度的热带气旋生成发展基础理论及预报研究已成体系,相关研究成果在降低热带气旋灾害上发挥了重要作用,但超强台风登陆的偶发性和区域差异显著等特征,使得其强大动力对地表影响研究相对匮乏,尚缺乏充分的数据和经验来系统揭示其致灾规律,对于其适应性及防灾减灾策略还未形成成熟的解决方案。作为重大灾害评估及科学研究的基本手段,系统的现场调研至关重要。超强台风“摩羯”过境海南岛后,海南大学土木建筑工程学院组织近百名师生,成立多学科交叉的台风灾害调研团队,赴受灾区域开展实地调研工作,主体调研历时十余日。调研范围覆盖超强台风“摩羯”10~17级风圈区域,以受灾明显的9类建构筑物(建筑围护结构、高层建筑、高耸结构/钢结构、临时建筑、农业温室建筑、道路基础设施、光伏结构、电力通信设施和风力发电系统)以及海岸侵蚀和树木倒伏状况为调研对象,涉及调研单体(场地)超1 000个(处)。调研采用“空-天-地”多源数据采集方法,通过实地走访了解建构筑物背景信息,记录结构损伤形态与程度,结合手持激光测距仪和加速度传感器等设备量化破坏参数;利用卫星遥感与无人机航拍数据分析海岸侵蚀及树木倒伏情况;采用问卷调查与主观感知量化高层建筑风致振动舒适度。数据处理上,依据功能和区位分布等特征对调研对象进行分类,并对灾害损失情况进行等级划分,从而总结灾害损伤规律,同时选取典型单体对象,深入分析灾损成因。调研工作得到了海南省气象局、海南省住房和城乡建设厅、海南省交通运输厅、海南省应急管理厅、海南省自然资源和规划厅等单位的支持和指导。临高县东英镇人民政府、定安县水冲坡村、耕读山房和美鳌村村委会等单位在实地考察和信息收集方面提供了大量帮助。海南信义矿业有限公司、海南浙联钢构集团有限公司、海南海控中能建工程有限公司、文昌鲁能希尔顿酒店、海南智普农业科技发展有限公司和海南雅邦集成房屋有限公司等企业也给予了积极配合与支持。

调研结果显示,海口市和文昌市多处气象站录得的风压超建筑设计荷载标准,部分地区因地形效应出现风速增强现象,如海口湾附近高层建筑群因狭管效应导致局地风速增幅达20%~30%,迎风面建筑围护结构承受的动态风压峰值超过5 kPa(超出常规建筑设计荷载标准近50%);现有建筑围护结构、临时建筑、电力设施和农业温室建筑抗台风能力不足,针对台风灾害易损区域,亟需修订相关建设规范;文昌市砂质海岸线整体呈现米级后退,需高度重视并制定长期保护方案;强降雨和树木倒伏等次生灾害严重影响公路和城市道路使用寿命,需结合排水系统和行道树设计等提高韧性;树木倒伏状况与其种类、所处地理位置及周边建筑环境都有直接关系,合理的空间布局能降低灾害损失。超强台风“摩羯”的防灾救灾工作再一次证明,通信、交通和水电的保障是应急处置的核心,对于降低灾害损失、减少人员伤亡具有关键作用,要加强相关标准建设以及新防灾减灾技术的应用。超强台风“摩羯”的作用区域及破坏程度与其所处的地理位置、地形和土地利用等因素直接关联,具有显著地域性。鉴于有记录以来登陆中国的2次最强台风均在文昌市登陆,并给海南岛造成了巨大的经济损失,建议在海南岛成立台风防灾减灾研究中心,系统研究海南岛台风灾害发生规律、防灾避灾减灾与灾后恢复重建等方面的创新技术、法律法规及政策措施,开展国际交流与合作,服务政府科学决策。

关键词:超强台风“摩羯”;建构筑物;风灾调研;破坏模式;防风减灾

中图分类号:U416 **文献标志码**:A **文章编号**:1004-1729(2026)03-0239-98

DOI: 10.65658/j.hndk.2025112802 CSTR: 32403.14.hndk.2025112802

Field investigation of building and structural damage induced by Super Typhoon Yagi in Hainan Island and implications for disaster prevention and mitigation

Liu Wanqiu[1,2], Wang Qi[2], Huo Xujie[2], Jiang Yilin[2], Sun Tianshu[2], Zhong Youliang[3],

Jiang Liu[2], Shang Zhexiong[2], Zhang Haibin[2], Duan Shusu[2], Zhang Youliang[2], Wang Zhenzhen[2], Shangguan Beiqi[2], Tai Jiahao[2], Lu Xiaowan[2], Fu Jiancun[2], Yang Xiao[2], Feng Yebao[2], Li Yulong[2], Du Xiaoyue[2], Wang Zilong[2], Luo Chonghang[2], Huang Bin[2], Liu Yu'an[2], Jiang Lin[2], Zhu Liwei[2], Zhao Yan[2], Zhang Yixian[2], Zhong Changting[2], Zhang Suxin[2], Wei Feifei[2], Li Yumei[3], Ban Qichang[2], Huang Junyi[2], Chen Shiying[2], Li Xunyu[2], Li Kunjin[2], Su Yonghui[2], Chen Yan[2], He Guangyuan[2], Chen Yu[2], Yang Xinfeng[4], Dong Liye[2], Han Feiyu[2], Li Shaokang[2], Liu Dacong[2], Xue Fabang[2], Wang Shaofei[2], Zhang Chong[2], Zhao Tao[2], Hu Bo[2], Ma Wei[5], Yu Zibing[2], Wang Yuhong[6], Zeng Jiadong[2], Li Liangyong[2], Shan Bo[2], Xiao Tianyin[2], Zeng Xiaohui[2], Ren Xuebin[7], Jia Junfeng[8], Qiao Guandong[2] ✉, Zhou Zhi[1,2] ✉, Ou Jinping[9]

（1. State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou 570228, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Hainan Meteorological Observatory, Hainan Meteorological Service, Haikou 570100, China; 4. School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 5. Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai 200080, China; 6. Department of Civil and Environmental Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China; 7. Hainan Design and Research Institute Co., Ltd., Haikou 571100, China; 8. State Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing 100124, China; 9. School of Intelligent Civil and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen 518055, China）

Abstract: Tropical cyclones (also known as hurricanes or typhoons) are among the most destructive natural disasters globally, causing huge fatalities and economic losses annually. Existing data indicate that global climate change has slowed the translation speed of tropical cyclones, and an inverse relationship exists between translation speed and cyclone-induced rainfall. Furthermore, while the total number of tropical cyclones worldwide shows a declining trend, the frequency of Category 4~5 hurricanes (i.e., super typhoons) has increased overall. The 2017 Atlantic hurricane season caused economic losses of US$125 billion in the United States. In 2025, a hurricane in Texas triggered heavy rainfall, resulting in over 130 fatalities. Hainan Island is located along the core generation and movement path of typhoons, making it one of the regions in China most frequently affected by these storms. In 2014, Super Typhoon Rammasun made landfall in Wenchang, Hainan Province, becoming the strongest typhoon on record to strike China (landfall intensity 70 $m \cdot s^{-1}$). It caused 24 deaths or missing persons on Hainan Island and direct economic losses of RMB¥11 billion. In 2024, Super Typhoon Yagi, with a landfall intensity second only to that of Super Typhoon Rammasun (62 $m \cdot s^{-1}$), similarly made landfall in Wenchang, Hainan Province. However, its destructive impact far exceeded that of the Super Typhoon Rammasun, causing 4 deaths and direct economic losses exceeding RMB¥60 billion in Hainan Island.

Super Typhoon Yagi (international designation: 2411) formed over the ocean east of the Philippines on September 1, 2024, and made landfall along the coast of Wengtian, Wenchang on September 6 (minimum central pressure 915 hPa). It then crossed Haikou and Chengmai before moving into the Qiongzhou Strait and subsequently entering the Beibu Gulf. The area on Hainan Island covered by Force-12-and-above winds was affected for over 9 hours, far exceeding the 3 hours during Super Typhoon Rammasun in 2014. The minimum pressure and maximum wind speed recorded in Wenchang both broke all previous land-based observational records for typhoons in China. From September 4 to 8, Hainan Island experienced widespread heavy to torrential rain, with a maximum accumulated rainfall of 691.2 mm at Jianfeng town, Ledong. Wenchang's precipitation broke its historical daily maximum rainfall record for September. In Haikou, more than 100,000 people were evacuated, about 400 houses collapsed, over 30,000 houses were damaged, the crop-affected area reached 570 km^2, and direct economic losses exceeded RMB¥26.3 billion. In Wenchang, more than 25,000

houses were damaged, the crop-affected area was about 180 km^2 (with 110 km^2 of total crop failure), and economic losses amounted to approximately RMB¥32.7 billion. In recent years, Hainan Province has significantly improved its typhoon defense capabilities by revising engineering construction and equipment-use standards and refining pre-disaster emergency plans, leading to a notable reduction in casualties. However, with continued population and economic growth in coastal areas, the risks posed by super typhoons continue to rise, and the resulting economic losses are becoming increasingly difficult to bear.

Worldwide, foundational theories and forecasting research on the generation and development of tropical cyclones from a meteorological perspective have been well established, and related findings have played a significant role in reducing tropical cyclone disasters. However, the sporadic occurrence of landfalling super typhoons and their marked regional variability have resulted in relatively limited research on their powerful dynamic impacts on the ground. There is still a lack of sufficient data and experience to systematically reveal their disaster-causing mechanisms, and mature solutions for adaptation and disaster prevention and mitigation strategies have yet to be developed. As a fundamental means for major disaster assessment and scientific research, systematic field investigations are crucial. Following the passage of Super Typhoon Yagi across Hainan Island in 2024, the School of Civil Engineering and Architecture of Hainan University organized an interdisciplinary typhoon disaster investigation team composed of nearly one hundred faculty and students. The team conducted field surveys in the affected areas for over ten days. The survey covered regions within the Force-10-to-17 wind circles of Super Typhoon Yagi and focused on nine categories of buildings and structures that showed obvious damage (building envelopes, high-rise buildings, tall/steel structures, temporary buildings, agricultural greenhouse buildings, road infrastructure, photovoltaic structures, power and communication facilities, wind power generation systems), as well as coastal erosion and treefall conditions. More than 1,000 individual structures/sites were surveyed. A multi-source “space-air-ground” data acquisition approach was adopted: field studies were carried out to collect background information and record structural damage patterns and severity; handheld laser rangefinders and accelerometers were used to quantify damage parameters; satellite remote sensing and UAV(Unmanned Aerial Vehicle) aerial imagery were employed to analyze coastal erosion and treefall; questionnaire surveys and subjective perception assessments were applied to quantify wind-induced vibration comfort in high-rise buildings. For data processing, most surveyed objects were classified according to function, location distribution, and other characteristics, and disaster losses were graded to summarize damage patterns. Representative cases were selected for in-depth analysis of disaster causes. The investigation received support and guidance from the Hainan Meteorological Service, Hainan Provincial Department of Housing and Urban-Rural Development, Hainan Provincial Department of Transportation, Hainan Provincial Department of Emergency Management, and Hainan Provincial Department of Natural Resources and Planning. Substantial assistance during field visits and data collection was provided by the People’s Government of Dongying Town in Lingao County, Gengdushanfang, the Mei’ao Village Committee, and Shuichongpo Village in Ding’an County. Enterprises including Hainan Xinyi Mining Co., Ltd., Hainan Zhelian Steel Structure Group Co., Ltd., Hainan Holdings & Energy China Co., Ltd., Wenchang Luneng Hilton Hotel, Hainan Zhipu Agricultural Technology Development Co., Ltd., and Hainan Yabang Integrated Housing Co., Ltd. also offered active cooperation and support.

The investigation results show that many meteorological stations recorded wind pressures exceeding the design load standards for buildings, and wind-speed amplification due to topographic effects was observed in some areas. For instance, the high-rise building cluster near Haikou Bay experienced a local wind-speed

increase of 20%~30% due to the Venturi effect; the peak dynamic wind pressure on windward building envelopes exceeded 5 kPa (nearly 50% above the design load for conventional buildings). Existing building envelopes, temporary structures, power facilities, and agricultural greenhouse buildings exhibited insufficient resistance to super typhoons, indicating an urgent need to revise relevant construction codes in typhoon-prone regions. The sandy coastline in Wenchang showed shoreline retreat on the order of meters, necessitating heightened attention and the formulation of long-term protection strategies. Secondary hazards such as heavy rainfall and treefall severely impacted the service life of highways and urban roads; resilience should be enhanced through improved drainage systems and roadside tree planning. Treefall patterns were directly related to geographic location, surrounding built environment, and tree species; rational spatial planning can help reduce disaster losses. The disaster prevention and emergency response to Super Typhoon Yagi once again demonstrated that securing communications, transportation, and water and power supply is central to emergency management and plays a key role in reducing losses and casualties. It is essential to strengthen relevant standards and promote the application of new disaster prevention and mitigation technologies in these sectors. The impact area and damage severity of super typhoons are directly linked to geographical location, terrain, land use and other factors, exhibiting marked regional characteristics. Given that the two strongest typhoons on record to strike China both landfall in Wenchang, Hainan Province, causing enormous economic losses to Hainan Island, it is recommended to establish a Typhoon Disaster Prevention and Mitigation Research Center in Hainan Island. The center would systematically investigate the occurrence patterns of typhoon disasters, innovative technologies for disaster prevention, avoidance, mitigation and post-disaster recovery, as well as related laws, regulations and policy measures, while fostering international exchange and cooperation to support scientific decision-making by the government.

Keywords: Super Typhoon Yagi; buildings and structures; wind damage investigation; failure mode; wind disaster prevention and mitigation

0 引 言

热带气旋(tropical cyclone)是全球最具破坏性的极端天气系统之一,其伴随的狂风、暴雨及风暴潮灾害链,对沿海城市群的安全韧性构成了持续且严峻的挑战[1−3]。在全球气候变暖的背景下,热带气旋的演变特征正发生显著改变:虽然生成总数呈波动下降趋势,但高强度(4~5级飓风/超强台风)事件的发生频率显著上升,且伴随着移速减缓、降雨增强及路径不确定性增加等新特征[1,4]。现有研究表明,海洋热含量的增加为台风强度的爆发性增长提供了能量基础[5−6],使得“超强台风”逐渐从偶发性灾害演变为沿海地区的常态化威胁[7−8]。例如,2017年大西洋飓风季造成美国高达1 250亿美元的经济损失;2025年7月美国德克萨斯州的飓风引发了灾难性强降雨,直接导致超过130人遇难;中国沿海地区同样深受其害[9],2014年超强台风“威马逊”登陆文昌市,创下登陆中国最强台风纪录;仅隔10年,2024年超强台风“摩羯”再次以极高强度袭击同一地区,造成的直接经济损失远超前者,达600亿元人民币以上。

虽然超强台风有演变至常态威胁的趋势,但仍属偶发性灾害,目前尚缺乏充分的数据和经验来系统揭示其致灾规律并发展出高效防御措施[10],灾害现场调研是反映现场受灾情况的最直接研究方法[11−12]。通过细致全面的灾害调研,能够准确掌握受灾区域的范围、受灾程度、人员伤亡和财产损失等关键信息,为政府部门科学制定救援方案、合理调配救援物资及高效组织抢险救灾提供重要依据。同时,灾害调研结果也是发布灾情报告、评估灾害风险、制定防灾减灾政策以及编制灾后恢复重建规划的重要参考。以2017年登陆美国的“哈维”飓风为例,相关SCI收录文章已近千篇,显示出该领域的研究活跃度和重要性。

针对房屋建筑受灾破坏与抗风性能研究,是防灾减灾现场调研的重点。围护结构的破坏往往先于主

体结构[13],是造成经济损失和功能瘫痪的主要原因。现有研究指出,建筑围护结构(如玻璃幕墙[14]、金属屋面[15])在强风作用下的局部瞬时极值负压是导致幕墙玻璃破裂和铝板掀翻的主要诱因,且风致飞掷物的撞击效应会显著加剧破坏程度[15−17];对于高层建筑,风致振动引起的人体舒适度问题日益受到关注[18−19]。实测表明,在超强台风作用下,狭管效应和高空风速放大效应会导致高层建筑顶部的加速度响应显著增大,引发居住者恐慌与不适,甚至造成非结构构件(如吊顶和隔墙)的累积损伤[20−21]。此外,高层建筑振动舒适度不仅涉及建筑结构的物理响应特性,更直接影响居住者的生理健康、心理感知及工作效率,是衡量建筑品质的重要维度。研究表明,仅依靠人体对振动的感知阈值可能不足以全面评估舒适度[22]。风致振动除引起不适感甚至恐惧外,还影响居住者的认知工作表现和平衡能力,甚至增加跌倒风险[23];在钢结构与高耸结构领域,轻质钢结构屋面因自重轻、刚度小,在风吸力作用下极易发生连接件疲劳失效或局部屈曲破坏,进而导致整个屋盖系统失效[24−26]。此外,临时建筑(如活动板房、集装箱房)作为建筑工地的主要设施,由于设计标准低、锚固措施简陋,在强风中极易发生整体倾覆或解体[27],是人员伤亡的高风险点,但目前的抗风规范对其关注度仍然不足[16,28−29]。

在市政基础设施领域,道路、电力、光伏和风电设施的级联失效已成为现代城市台风灾害的主要特征[8,30]。道路基础设施因台风受灾的主要源于强降雨引发的路基冲刷、边坡塌方以及行道树倒伏造成的交通阻断[31−33],热带沿海地区冠大、木质脆和根系浅的园林树木常遭受台风侵袭后出现大量折断、倒伏,严重影响交通安全性,也是灾后救援首要障碍。树木倒伏是城市风灾中最直观的现象[34],其破坏模式主要分为树干折断和根系拔起。研究表明,树种力学特性、树冠形态、土壤含水率以及周边建筑引起的峡谷风效应是影响树木抗风能力的关键参数[35−36],且树木倒伏往往是导致电力中断和道路堵塞的直接诱因[37]。Gazzea 等[38] 的研究指出,道路交通的中断很大程度上源于行道树倒伏,并提出了一种基于高分辨率卫星图像的自动定位算法,用于检测道路上树木倒伏区域,强调了路与树在基础设施防灾中的重要性;在电力通信设施领域,已有研究多聚焦于输电塔线的风振响应及倒塌模式,发现微地形加速效应和不均匀风荷载是导致塔身屈曲和线路断裂的关键因素,且单一节点的失效往往会引发大面积停电和通信中断的连锁反应[8,39]。光伏电站组件的风致飞脱和支架的塑性变形是主要破坏形式,尤其是平单轴跟踪系统在极端风角下的气动失稳问题尚待解决[40−42]。而对于风力发电机组,虽然其本身设计用于利用风能,但在超切出风速的极端台风下,叶片的颤振破坏、塔筒的整体失稳以及机舱罩的损毁屡见不鲜,亟需建立针对超强台风工况的易损性评估模型[43−45]。

在风暴潮引发的海岸侵蚀方面,风暴潮与巨浪联合作用,会导致沙滩断面的剧烈变化和岸线的快速后退[46−48]。针对热带海岛砂质海岸的研究显示[49],一次极端台风事件造成的泥沙流失量可能相当于常态下数年的累积量,严重威胁沿海防护林及旅游设施的安全[50−52]。Yang 等[53] 基于水体观测数据及表层沉积物粒度分析,研究了台风“麦德姆”过境后的泉州湾水动力演变和沉积物“源—汇”过程,发现台风动力作用下湾内沉积物被重新分布,扩展了粗颗粒沉积区。海岸侵蚀不仅威胁沿海工程安全,更破坏生态屏障。San Antonio 等[54] 结合遥感影像与激光雷达技术,评估了飓风对佛罗里达海岸线的影响,发现天然沙丘在植被恢复与适应性方面优于加固沙丘。针对生态系统的直接物理损伤,乔沛阳等[34] 和从辰宇等[55] 分别研究了台风对红树林与土壤侵蚀的影响,发现红树林受损程度与距台风路径距离、树高、胸径呈正相关,且小流域水土保持措施能有效减少侵蚀。Chavez 等[56] 则建立了红树林地上枯死物质 AGN(above ground necromass)模型,量化了飓风导致的生物量损失。

海南岛处于台风生成及移动的区域,是中国受台风影响最为频繁的地区之一,其沿海社会经济活动密集、基础设施高度集中,风灾造成的损失在深度和广度上均呈现新特征,“强风−暴雨−风暴潮”复合风灾链效应加剧。2014 年超强台风“威马逊”登陆海南文昌市时强度达 70 m·s^{-1},仅时隔 10 年,2024 年超强台风“摩羯”登陆强度(62 m·s^{-1})虽次于“威马逊”,但其破坏力却远超超强台风“威马逊”,且其带来的最低气压和最强风速均突破中国所有台风过程陆地实测值;海南岛 12 级及以上风圈覆盖区域受影响超 9 h,远超超强台风“威马逊”的 3 h。受超强台风“摩羯”外围环流影响,海南多地降雨量达到 350 mm 以上,局地最大降雨量为乐东县尖峰镇 691.2 mm,全省受灾人口 547 万人,因灾死亡 4 人、95 人受伤,直接经济损

失超 600 亿元。尽管全球气候变化导致极端天气事件的灾难性与不确定性日益凸显，但近年来海南省通过修订工程建设与设施设备使用规范、完善灾前应急预案，显著提升了超强台风防御能力，使得人员伤亡数量明显下降。但随着沿海地区人口与经济持续增长，超强台风所带来的经济风险仍在不断攀升，造成的经济损失也愈发难以承受。因此，系统性地开展超强台风灾后调研，准确掌握超强台风过境后海南岛工程设施受灾状况数据，深入剖析致灾机理，对进一步提升热带海岛工程抵御极端灾害能力、增强区域安全韧性以及提升应急处置能力具有重大意义。

1 超强台风的形成及登陆

1.1 热带气旋分级 热带气旋是在热带或副热带洋面形成的、具有组织对流及确定性气旋式环流的非锋面性天气尺度系统，其能量主要源于暖海面水汽凝结释放的潜热。在北半球，东太平洋和大西洋海域上生成的风力达到 12 级的热带气旋被称为飓风，在西太平洋海域被称为台风。

成熟热带气旋结构通常包括台风眼、眼壁和螺旋雨带 3 个关键组成部分。根据国家标准 GB/T 19201—2006《热带气旋等级》[57]，热带气旋按照其中心附近地面的最大平均风速进行划分，如表 1 所示。

表 1 热带气旋等级划分表

等级	英文名称	中心附近最大风速/(m・s^{-1})	对应风力/级
热带低压	Tropical Depression	10.8 ~ 17.1	6 ~ 7
热带风暴	Tropical Storm	17.2 ~ 24.4	8 ~ 9
强热带风暴	Severe Tropical Storm	24.5 ~ 32.6	10 ~ 11
台风	Typhoon	32.7 ~ 41.4	12 ~ 13
强台风	Severe Typhoon	41.5 ~ 50.9	14 ~ 15
超强台风	Super Typhoon	≥ 51.0	≥ 16

1.2 超强台风形成条件 超强台风的形成依赖于一系列海洋与大气条件协同作用，其关键形成条件如下：

(1)较高的海表温度：通常要求持续不低于 26.5 ℃ 的暖海面及较厚的暖水层，为系统提供通过水汽凝结释放潜热所必需的能量。

(2)充足的低层水汽：低层大气需保持较高湿度，以支持持续的潜热释放，维持台风“暖心”结构，促进系统增强。

(3)较弱的垂直风切变：过强的垂直风切变会破坏台风的垂直结构，抑制其发展，因此稳定的环境有利于超强台风形成。

(4)一定的地转偏向力：在距赤道一定纬度以外，足够的地转偏向力(科里奥利力)为气旋性环流的组织提供必要条件。

(5)合适的大气扰动：在具备上述环境场条件下，初始扰动(如东风波、季风槽等)作为触发机制，为系统发展提供底层辐合与初始涡旋。

当上述条件在特定时空范围内同时具备并持续作用时，初始扰动可能在 24 ~ 48 h 内经历爆发性增强，最终发展为结构完整、强度极强的超强台风。

1.3 超强台风“摩羯”的登陆及影响区域 2024 年 9 月 6 日 16 时 20 分，超强台风“摩羯”以巅峰强度在海南省文昌市沿海地区登陆。中央气象台数据显示，登陆时其中心附近最大风力达到 17 级以上(62 m・s^{-1})，中心最低气压为 915 hPa。超强台风“摩羯”由此成为有气象记录以来秋季登陆中国的最强台风，也是近 10 年来登陆中国的最强台风之一。超强台风“摩羯”登陆后横穿海南岛北部，随后进入北部湾，并对广东西部及广西南部地区造成了持续、严重的影响。

超强台风“摩羯”对海南岛造成的巨大损失，显示出该区域面对极端天气事件时的高度脆弱性，这也是海南岛独特的地理环境、社会经济结构与基础设施状况等多重因素复杂叠加的结果：

(1)完全暴露的地理环境。海南岛四面环海，超强台风“摩羯”登陆后的路径上，距风眼近百公里无高

山阻挡(几乎涵盖整个10级风圈),穿岛过程中未能发生显著的能量消耗。海岸线漫长且直接暴露于超强台风“摩羯”带来的强风、巨浪和风暴潮威胁之下。当超强台风“摩羯”登陆时,沿海低洼地区,特别是水产养殖区和沿海村镇,往往首当其冲,承受风、浪、潮和雨等多灾种的叠加冲击。

(2)脆弱敏感的社会经济结构。海南省的经济活动高度集中于海口市、三亚市和文昌市等沿海城市带,区域人口密集、资产集中,且承载了全省关键产业。农业(如橡胶、香蕉和芒果等热带经济作物)与旅游业作为支柱产业,对气象灾害极为敏感:强风可导致农作物大面积倒伏及农业设施损毁;暴雨及灾后影响则直接冲击旅游消费,引发游客退订和设施损坏,并对海南省“阳光海岛”的旅游形象造成长期负面影响。

(3)基础设施抗灾能力仍存短板。近年来,海南省基础设施整体水平虽显著提高,但在面临超强台风带来的极端风荷载与强降雨冲击时,部分设施仍表现出防灾能力不足的问题。2014年超强台风“威马逊”曾造成大范围停电及大量房屋倒塌,反映出电力基础设施、轻钢结构与老旧建筑在抗风设计方面存在明显缺陷。超强台风“摩羯”则进一步暴露了此类薄弱环节,并且大规模基础设施损毁往往诱发次生灾害:例如电力与供水中断、通信基站瘫痪等;通信的中断阻碍灾情信息上报与救援协调;道路及桥梁损毁则影响救援力量与物资进入灾区,导致部分地区出现“孤岛效应”,造成显著的间接经济损失。

(4)气候变化加剧未来灾害风险。全球变暖推动海温上升,为更强台风的形成提供了能量基础;海平面上升则抬高了风暴潮的基准水位,会进一步增强其破坏力。此外,台风移速减缓会延长灾害持续时间,增加降雨量,海南岛更需应对“强风–极端暴雨–城市内涝–山体滑坡”构成的复合型灾害链,灾变耦联会极大地增加防灾减灾难度。

综上所述,超强台风“摩羯”对海南岛的社会经济安全构成严峻且日益加剧的威胁。仅依靠理论推演与非专业分散灾情上报统计已难以适应当前风险态势,亟需开展系统性的现场风灾调查,深入揭示具体致灾机制,评估各类承灾体的实际性能,从而为提升区域防灾减灾能力提供科学依据。

2 超强台风“摩羯”基本数据发布情况

2024年第11号超强台风“摩羯”(国际编号:2411)具有中国南海快速加强、强度极强和破坏力极大等特征,成为有气象记录以来秋季登陆中国的最强台风,也是登陆越南的最强台风。其破坏程度远超2014年重创海南岛的超强台风“威马逊”,超强台风“摩羯”中心在海南岛停留时间约5 h,12级以上风圈影响长达19 h。文昌市、海口市和澄迈县遭遇17级大风,其中,文昌市龙楼镇测得最大阵风66.7 m·s^{-1}(17级以上),文昌市冯坡镇最低气压达918.4 hPa,最低气压和最强风速均突破中国所有台风过程陆地实测值。

2.1 超强台风“摩羯”基本气象数据

(1)风场发展与演化过程

超强台风“摩羯”于2024年9月1日23时在菲律宾以东洋面生成,随后向西北方向移动并缓慢增强;9月3日上午移入中国南海东部海面后转偏西行,20时加强为强热带风暴级;9月4日继续连升3个强度级别达到超强台风级(8时加强为台风级,14时加强为强台风级,23时加强为超强台风级);9月5日8时中心附近最大风力达到17级以上(62 m·s^{-1}),随后略减弱至17级(58 m·s^{-1});9月5日23时再次加强至17级以上(62 m·s^{-1}),并维持至9月6日16时20分在文昌市翁田镇沿海登陆(中心最低气压915 hPa),登陆后穿过海口市和澄迈县等地,移入琼州海峡,随后移入北部湾海面;12级风圈于9月7日5时离开海南岛,9月7日15时30分在越南广宁省南部沿海登陆(17级,58 m·s^{-1}),登陆越南后强度迅速减弱。

9月1~8日超强台风“摩羯”中心附近最大风速、移速和中心最低气压的定时观测结果,如图1所示。其中,中心附近最大风速与气压变化呈现良好的负相关关系,风速由9月1日8时的13 m·s^{-1}逐渐增强,于9月5日8时达到峰值62 m·s^{-1},此后虽略有波动,但整体呈减弱趋势,最终降至8日20时的13 m·s^{-1}。该风速演变进一步印证了台风强度的生命史特征;其次,在移动速度方面,超强台风“摩羯”的移速整体表现为波动状态,初期较为缓慢,随后在9月2日14时出现第一个峰值(5.6 m·s^{-1}),之后在9月5日~6日期间再次出现较为显著的加速过程,最大移速达5.3 m·s^{-1},随后逐渐减缓,末期9月8日

14 时移速降至 2.2 m·s^{-1}。移速的变化可能与大气环流背景及内部结构变化有关；最后，超强台风“摩羯”的中心最低气压呈现明显的先下降后上升趋势。由 9 月 1 日 8 时的 1 004 hPa 逐渐下降，9 月 5 日～6 日间中心气压均处于较低水平，在 5 日 8 时和 23 时，6 日 2、5、8、11 和 14 时亦出现最低值约 915 hPa，随后逐渐回升，至 9 月 8 日 20 时恢复至 1 002 hPa。该变化过程反映了台风强度经历了增强至巅峰再逐渐减弱的过程。因此，超强台风“摩羯”在发展过程中表现出典型的强度演变特征，其气压降低与风速增强阶段对应台风的快速发展期，而气压回升与风速减弱则标志着其进入衰减阶段。

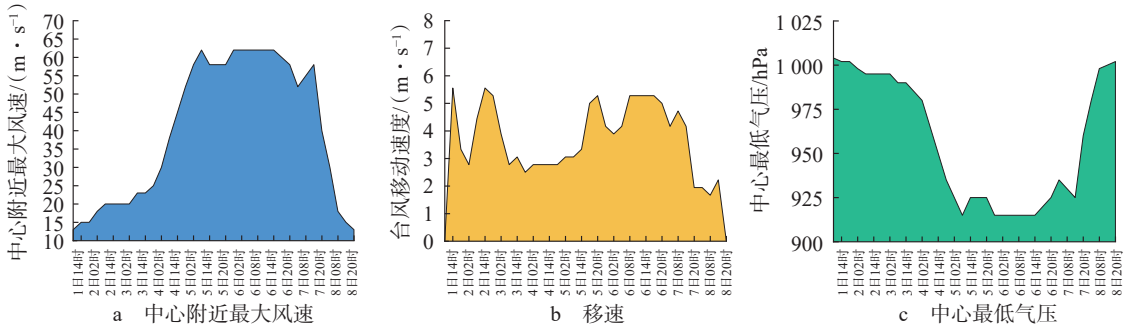


图 1 超强台风“摩羯”中心附近最大风速、移速和中心最低气压演变曲线

超强台风“摩羯”移动路径，如图 2 所示。由图 2 可知，其于海南岛东部的文昌市登陆后直接过境海口市，导致文昌市翁田镇和海口市美兰区等地遭受了最为严重的风灾影响。在风圈影响方面，12 级风圈覆盖海口、文昌、定安、澄迈及临高等市县；10 级风圈在此基础上进一步扩展至洋浦经济开发区、儋州市、琼海市、屯昌县、白沙黎族自治县和琼中黎族苗族自治县北部。超强台风“摩羯”的影响范围超过海南岛面积的一半，致使该区域灾情严重，并造成重大人员伤亡和经济损失。

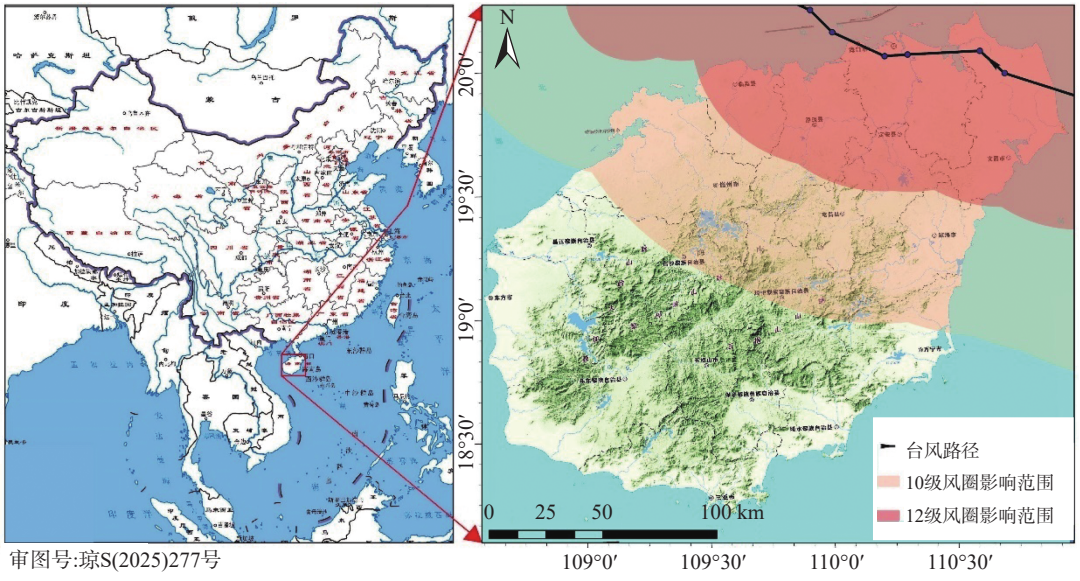


图 2 超强台风“摩羯”过境海南岛线路径及风圈分布图

(2)最大风力分布

9 月 4 日 20 时—8 日 8 时海南岛极大风力实况如图 3 所示。由图 3 可以看出，9 月 6 日 14 时～23 时，受超强台风“摩羯”影响，海南岛北部及近海普遍出现 11～15 级阵风，文昌市龙楼镇录得最大阵风为 66.7 m·s^{-1}(17 级以上)，海南岛南部及近海则普遍出现 9～11 级阵风，多处气象站录得风压超建筑设计荷载标准。此外，部分地区因地形效应出现风速增强现象，如海口市海口湾附近高层建筑群因狭管效应导致局地风速增幅达 20%～30%，迎风面建筑围护结构承受的动态风压峰值超过 5 kPa，超出常规建筑的设计荷载标准近 50%。

(3)降雨量及风雨耦合

9月4日20时~9月8日8时全岛各地降雨量,如图4所示。由图4可知,海南岛普降暴雨到大暴雨,北部、西部和南部地区局地有特大暴雨,其中,最大降雨量出现在乐东黎族自治县尖峰镇(691.2 mm)。9月5日20时~6日20时,文昌市累计降雨量为267.8 mm,突破当地历史9月的日最大降雨量极值,定安县、东方市累计降雨量为233.9和196.4 mm,分别位居当地9月最大降雨量的第2位和第3位。此外,超强台风"摩羯"与天文大潮叠加,引发显著的风暴潮增水,导致沿海低洼地区严重内涝,进一步加剧了风雨耦合灾害效应。

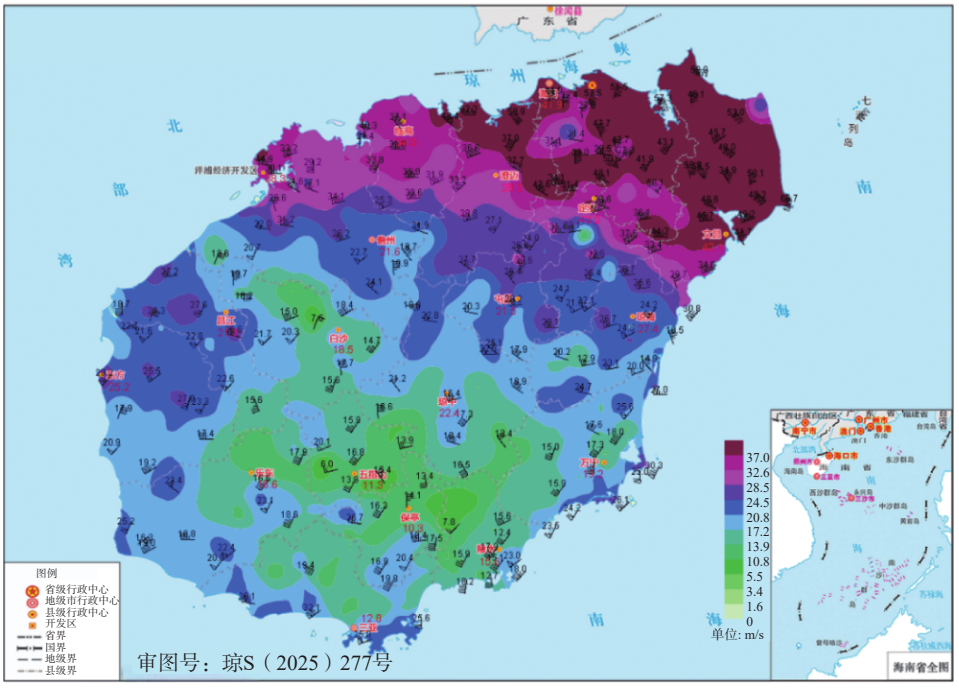


图3 9月4日20时~9月8日8时海南岛极大风力实况(单位:m·s^{-1})

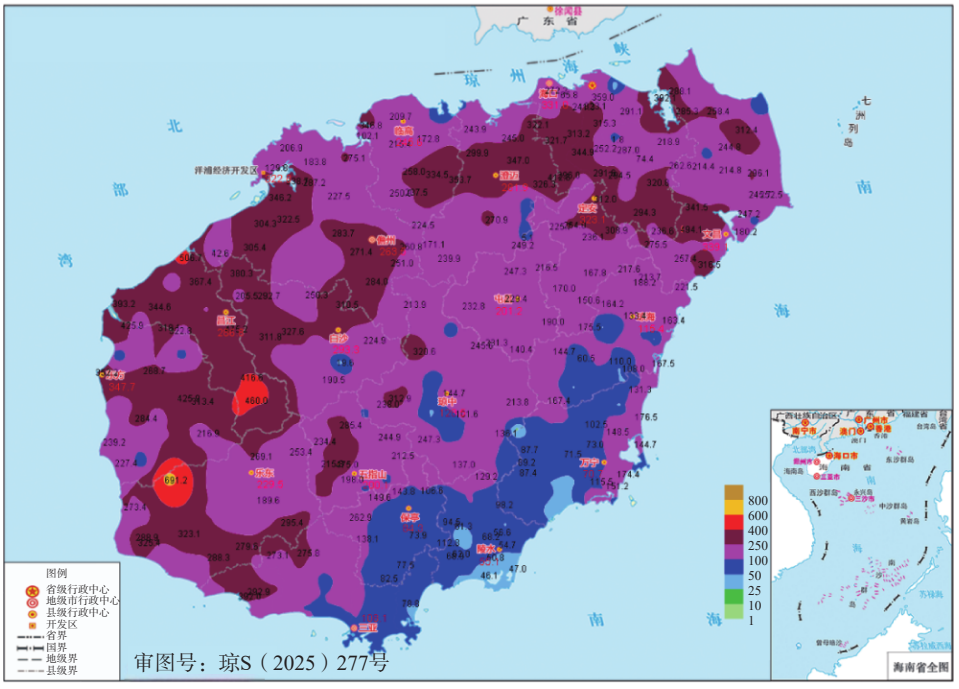


图4 9月4日20时~9月8日8时全岛各地降雨量(单位:mm)

2.2 超强台风“摩羯”灾害统计数据 根据海南省应急管理厅发布的统计数据，超强台风“摩羯”共造成全省多个市县超过 500 万人受灾，紧急避险转移超 31 万人，累计转移安置 14 万人，因灾死亡 4 人，受伤 95 人，伤亡人数相对较低主要得益于及时的预警和大规模的人员转移。从区域分布来看，海口、文昌、临高和澄迈等沿海市县受灾最为严重，呈现出明显的空间集中特征。其中，海口市转移群众超过 10 万人，倒塌房屋约 400 间，房屋损坏超过 3 万间，农作物受灾面积达 570 km^2，直接经济损失初步估计超过 263 亿元；文昌市作为超强台风“摩羯”直接登陆区域，灾情尤为严峻，房屋受损达 2.5 万余间，农作物受灾面积约 180 km^2，绝收面积高达 110 km^2，预计经济损失达 327 亿元，成为经济损失最严重的单一行政区域。

基础设施受损情况统计显示，住建、电力、通信和交通等系统的统计数据揭示了超强台风“摩羯”对城市运行支撑体系的系统性冲击。房屋结构受损情况集中反映了建筑抗风能力[58]的区域差异与薄弱环节，全省范围内大量民房及公共建筑出现不同程度损坏[59]。电力系统遭受严重破坏，全省负荷损失达 523.10 MW，跳闸未恢复线路 463 条，影响用户超 121 万户，主要集中在文昌市和海口市等核心受灾区域，电力中断时间较长，严重影响居民基本生活与应急救援作业。通信网络亦出现大规模退服现象，全省共 1.7 万个通信基站中断服务，退服率高达 35.4%，其中文昌市和海口市的通信网络退服率分别达 67% 和 57%，通信链路的中断显著削弱了灾情信息的实时传递与应急指挥调度能力。交通系统方面，全省信号灯路口停用 772 个；高速公路监控设备停用 1 346 台；174 km 道路护栏和 3 985 个交通标志牌损坏；全省公路、水运、道路运输、民航及在建交通项目损失合计达 8 亿元；海口市和文昌市等地中心城区连续 3 ~ 5 d 处于“瘫痪”状态；琼州海峡客滚船舶因风浪影响全面停航，海口美兰国际机场因设施受损未能及时恢复运行，凸显了关键交通节点在极端天气事件中的高度脆弱性。

农业领域遭受毁灭性打击，是灾害中经济损失最为集中的领域之一。全省农作物受灾面积达 940 km^2，其中成灾面积约 519 km^2，绝收面积约 297 km^2，减产约 24.65 万 t，直接经济损失达 31.74 亿元。数据显示，海口市和文昌市主要作物如水稻、橡胶、槟榔和热带水果等大面积倒伏、淹水或遭受盐渍化影响，不仅导致当季农业产出归零，还对长期土地生产力构成潜在威胁。结合前期全国自然灾害统计，前三季度中国洪涝与地质灾害已造成重大农业损失，而超强台风“摩羯”的叠加影响进一步加剧了华南地区农业系统的承灾压力。

次生灾害风险在超强台风“摩羯”影响期间显著上升，应急管理数据显示，强降雨与地质条件耦合作用下，山洪、泥石流和滑坡等隐患显著提升。海南省消防救援队伍在灾后 48 h 内共接处警 664 起，其中社会救助与抢险救援占比超过 80%，成功营救被困人员 152 人，疏散转移群众 833 人，反映出次生灾害已成为威胁公众生命安全的重要因素。

2.3 现行台风防御与应急策略 面对台风灾害威胁，中国已构建贯穿“监测预警—应急响应—资源防护—灾后恢复”全链条的多层级防御体系，依托国家、省、市三级联动机制，形成应急治理格局。

(1)监测预警与信息发布

中国气象局依托高精度网格化预报技术，提前发布风力等级分布预警。省级层面，气象部门联合住建、交通等部门建立工程设施风险评估机制，针对关键设施开展专项风险预警；同时，对易发生内涝的道路基础设施区域进行动态洪水风险评估，并通过应急广播、社区网络平台推送防护指南。市县气象台则进一步细化预警内容，聚焦风暴潮、巨浪及城区内涝风险区，联合基层社区对沿海高层建筑、临时建筑等抗风能力薄弱区域开展隐患排查，发布风振响应与围护结构破坏风险提示。

(2)应急协同响应机制

国家防汛抗旱总指挥部依据《国家防汛抗旱应急预案》，统筹交通运输部、能源局、电力与通信主管部门等，制定专项响应方案，保障电力通信设施跨区域抢修能力，强化道路基础设施的应急监测。省级部门同步启动紧急动员机制，例如，超强台风“摩羯”登陆前，住建部门对在建工地的临时建筑实行强制停工并实施加固措施；光伏电站运营商提前调整光伏阵列角度，风力发电机组进入顺桨保护模式，最大限度降低设备损毁风险；强化航空应急救援体系建设，提升极端情况下的救援效率。市县层面精准落实各项防护举措，例如，海口市组织对高层建筑门窗、幕墙等部位进行紧急加固；文昌市则重点推进农业大棚锚固，

确保高风险设施防护全覆盖。

(3)资源调度与重点防护措施

国家层面聚焦关键工程设施的薄弱环节,组织专业队伍对输电塔和通信基站的基础螺栓进行预紧加固,为高层建筑塔吊加装防风制动装置,并预置钢结构焊接抢修设备和光伏组件连接件等应急物资。同时,有序组织危房住户、临时建筑人员及低洼易涝区群众转移至应急避难场所,督促渔船回港避风,确保海上作业人员全部安全撤离。省级部门统筹调配应急物资,向台风路径沿线市县调拨彩钢板加固件和树木支撑钢管等专用材料;协调电力企业提前部署应急发电车,保障光伏电站控制系统供电稳定;在易涝区域预置移动排涝泵、沙袋和挡水板等防汛物资,并联合通信运营商保障通信网络畅通。市级层面针对具体对象实施精细化防护:海口市对轻钢结构厂房屋面连接节点和高耸构筑物进行全面排查与加固;三亚市组建市政抢险队伍,提前清理道路两侧易倒伏树木,修剪浓密树冠,及时处置道路阻塞、断电及高空坠物等安全隐患。

(4)灾后恢复与建设

国家层面组织能源、通信和交通等部门开展灾情评估,优先抢通电力与通信设施;对受损围护结构和高层结构等进行安全鉴定和加固,指导光伏阵列、风力发电机组开展精准定损,并制定系统性恢复重建计划。海南省在总体规划中优化临海建筑布局,限制建筑高度;进一步完善DBJ 46-070—2024《海南省民用建筑外门窗工程技术标准》、DBJ 46-071—2024《海南省建筑光伏系统建设技术标准》和DBJ 46-012—2017《海南省太阳能热水系统与建筑一体化设计施工及验收标准》,适度提高台风频发地区的抗风设计标准;财政部门设立工程设施修复专项资金,对农业大棚和光伏电站等受灾设施提供重建补贴。市级层面通过简化审批流程,优先推进道路、电力、通信基站及风力发电机组等关键基础设施的恢复重建;并对沿海高层建筑、临时建筑以及生态环境受损区域(如树木倒伏和海岸侵蚀)开展专项整治,构建高效和可持续的全链条灾后恢复体系。

2.4 已开展的针对超强台风"摩羯"灾害调研情况 在台风致灾和防灾研究领域,多支研究团队已针对超强台风开展了灾后调研工作,通过现场勘测、无人机航拍、数值模拟和卫星数据分析[60]等多种技术手段,初步揭示了建筑物、道路基础设施以及生态环境[61]在极端风荷载作用下的破坏特征与失效机制,为完善抗风设计理论和防灾减灾策略[62]提供了重要基础资料。

超强台风"摩羯"对建筑结构造成了广泛而显著的破坏,主要集中于围护结构、高耸结构与钢结构、临时建筑及高层建筑等类型。围护结构普遍受损,其中金属屋面与膜结构表现出明显的抗风脆弱性,大量房屋出现门窗破碎和屋顶掀翻等现象。海口市五源河体育场的金属围护结构在强风作用下发生风致破坏,飞射物进一步割裂膜结构屋面,引发大面积损毁。中小型金属屋面迎风前缘区域普遍出现局部风揭破坏,螺钉连接与咬合式节点在极端风压下易发生变形或断裂,长期锈蚀与温度疲劳显著加剧了节点失效风险[63]。例如,海口市美兰区多处住宅断桥铝落地窗仅剩窗框,高层建筑因外窗破损导致雨水倒灌,室内装修与家具严重受损。高耸结构中,塔吊等设备抗风稳定性不足,事故频发;超强台风"摩羯"过境海口市期间,阳光巴洛克广场工地塔吊倒塌,吊臂撞击居民楼,造成墙体开裂及车辆损毁。临时建筑如活动板房因材质轻质且锚固措施薄弱,极易整体倾覆或解体。农业与养殖大棚受灾尤为严重,文昌市养鸡大棚几乎全部倒塌,经济损失巨大,暴露出其抗风能力严重不足。高层建筑主体结构虽整体稳定,但角隅区域因气流分离产生显著负压[64],极易导致玻璃幕墙与金属幕墙频繁发生风揭破坏。海口市丽思卡尔顿酒店外立面金属面板在强风下脱落,部分飞射物飘落至百米外,对周边建筑造成二次破坏。此类飞射物(如玻璃碎片、瓦片、金属构件)显著加剧了次生灾害风险,反映出当前海岛建筑设计中对外围护结构抗风性能,尤其是极端风荷载与飞射物冲击防护的重视程度不足。

道路及基础设施在超强台风"摩羯"影响下遭受严重破坏。近三分之一道路因树木倒伏而中断通行,众多路面普遍存在积水、破损与塌陷等问题。G98环岛高速、海琼高速和海三高速等多条主干道因倒树阻断,国省干线公路的路段、桥梁与涵洞亦出现不同程度损坏。电力通信设施如电线杆、路灯等在强风中折断,造成大范围停电,部分地区供电恢复周期长达15~30 d。光伏发电站受损呈现多样化特征,海南

海控中能建工程有限公司项目部及徐闻县渔光互补光伏电站的组件、逆变器、支架、电缆桥架及管桩等设施均出现不同程度破坏。采用单立柱大地支撑结构的光伏电站，支架与立柱连接部位在强风下承受较大弯矩与剪力，导致多处弯曲变形甚至整体失稳，部分光伏面板因螺栓连接强度不足被风力抬起并脱离支架。部分区域光伏阵列面板均遭破坏[65]，面板边框出现变形，纵向稳定桁架脱落，索结构断裂等，严重影响太阳能发电效率。风力发电设施损毁严重[66]，华能文昌风电厂风机抗风等级低于超强台风“摩羯”登陆时的实际风力，且尚处施工阶段，无法启动设计抗台风控制策略。木兰湾风电场机组因偏航系统失效引发塔筒局部屈曲，最终导致整机倒塌[67]。上述现象表明，海南岛地区道路与基础设施的抗风设计亟需强化对动态风荷载[50]、复杂地形效应、飞射物冲击及连接节点强度等关键因素。

超强台风“摩羯”引发的大范围树木倒伏现象极为突出，椰子树、槟榔树和香蕉树等高大植物因根系浅或茎干纤细，在强风下普遍会被折断或连根拔起。文昌市椰子树“拦腰折断”现象普遍，香蕉树因假茎抗倒能力弱而成片倒伏，不仅造成重大农业经济损失[68]，而且加剧了交通阻断与次生灾害风险。文昌、临高和万宁等市县古树名木受损超过 400 株，部分主根空心古树在风力作用下自薄弱处断裂。海口市统计显示，胸径 10 cm 以上倒伏树木达 17.6 万株。航拍资料显示，文昌市城区绿化树木大面积损毁，多个乡镇海防林成片倒伏，海防林遭受严重破坏，东郊椰林及白石村区域椰树损毁尤为严重。海岸侵蚀在风暴潮[69−70]作用下显著加剧，海口市东海岸防护设施受损[71]，岸线侵蚀进一步恶化[53]；西海岸部分海上构筑物变形损毁，海水漫滩高度超过 1.2 m。文昌市铺前港附近因风暴潮与巨浪叠加增水，导致铺前村部分民房进水[72]。

超强台风“摩羯”过后，政府部门和各类科研机构积极赴灾害现场，或通过数据上报程序开展了各种形式的灾后调研工作，但还存在诸多局限性。政府部门的调研数据以逐级上报的经济损失为主，缺乏细致和专业的致灾因素分析及工程结构上的灾害量化数据；科研机构开展的调研工作虽然涉及的调研对象种类较多，但调研规模有限，因此总结的相关规律不够全面和深入。在建筑物领域，对围护结构受损情况缺乏分类量化基础数据，未深入研究高层结构和钢结构力学风荷载破坏机制，临时建筑受灾调研缺乏系统性受灾分析，高层建筑抗风动力响应检测不足；道路及基础设施方面，对道路的致灾受灾数据不足，电力通信设施脆弱性评估体系不全面[73−74]。在光伏发电站方面，尚缺乏针对不同构造、不同组件和安装方式的抗风设计和施工要求。对于风力发电机，对风机叶片在强台风下的疲劳损伤机理、塔筒在复杂地表风场下的力学响应[75−77]、设计标准[78−79] 和风电功率[80] 等关键问题的基础数据不足，制约了抗风性能的有效提升[81]；生态及环境方面，对于树木倒伏，仅停留在表面现象观察与受损数量统计，对不同树种、树龄、根系结构与倒伏关系尚未制定科学的城市绿化树种选择和树木养护、损伤恢复策略[17,82]。海岸侵蚀方面，缺乏长期连续的数据积累，难以准确评估海岸侵蚀在风灾影响下的长期演变趋势，不利于制定有效的海岸防护措施。

3 灾害调研方案

3.1 调研对象 台风对环境的荷载作用主要表现为 3 类力学机制：(1)直接风压荷载，包含平均风压(与风速平方成线性关系)和脉动风压(湍流引起的动态分量)；(2)风雨耦合作用，包括雨滴动能的冲击、雨水侵蚀和积水引起的附加重力荷载；(3)次生气象灾害荷载，如风暴潮引发的波浪冲击力和洪水漂浮物的撞击荷载。

根据边界层理论，地球表面的粗糙物体会使大气流动受阻，该摩擦阻力随高度的增加而逐渐减弱，风速在地表面等于零。因此，突出于地表的物体均有承受台风直接风压荷载的风险，且随着高度的增加，承受荷载呈现增加趋势。风雨耦合作用除了增加了物体承受的雨水荷载外，雨水在地表的入渗也会影响土壤的稳定性，影响物体埋地基础部分的固定效果。

为了全面评估超强台风“摩羯”登陆对地表，尤其是地表建构筑物造成的影响，调研组主要选取其过境 12 级风圈范围内海南岛上的房屋建筑和典型市政基础设施为研究对象(具体类型及位置如图 5 所示)，开展实地走访，重点关注对风敏感结构安全内容，全面了解不同区域和不同类型工程设施的受灾状况。同时，以案例分析的形式，研究了树木倒伏特征与建筑环境的关系以及高层建筑在超强台风“摩羯”

作用下引发的舒适度问题。

风暴潮及海浪荷载仅对陆地海岸线及其周边产生影响,根据历史数据及建模分析可知,波浪形式和高度决定其对海岸的破坏程度,海浪浪高的极值与台风风眼同步出现,且台风过境的路线在海南岛引起破坏力最高级别波浪的台风路线上[71]。由于超强台风"摩羯"风眼过境海南岛的路线仅经过文昌市和海口市,因此选取了文昌市、海口市和澄迈县共14个海岸区域开展调研,包括文昌市的铺前镇、木兰湾、景心角、翁田镇、月亮湾、淇水湾海滩和东郊椰林,海口市的拾贝公园、华彩海口湾海滩、白沙门海滩、碧桂园中央半岛阅海台、海口湾和金沙湾滨海公园;澄迈县永庆寺后海等,具体位置如图5所示。

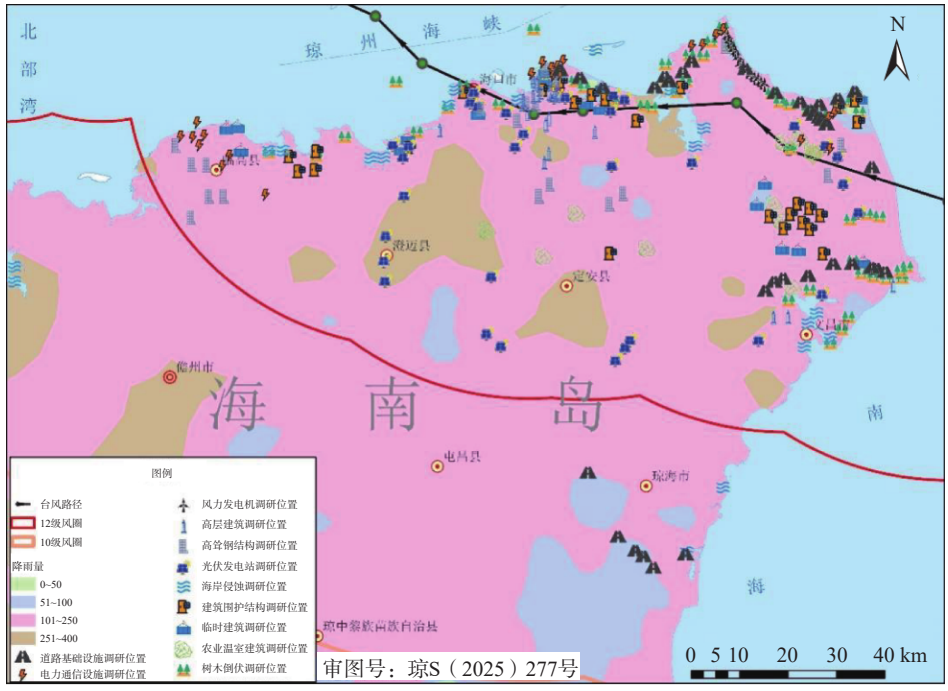


图5 调研地点分布图

3.2 调研方法 在海南大学专项经费的支持下,海南大学土木建筑工程学院组织了近百名师生,成立了多学科交叉的灾害调研团队,在超强台风"摩羯"过境后短期内即刻启动受灾情况调查,整体调研历时十余日。根据调研对象类型,将调研人员分成14个小组,涉及建筑围护结构、高层建筑、高耸结构/钢结构、临时建筑、农业温室建筑、道路基础设施、光伏结构、电力通信设施、风力发电系统、海岸侵蚀、树木倒伏以及风致振动舒适度等具体对象,涉及调研单体(场地)超过1 000个(处)。

调研以"空-天-地"多源数据为基础,综合运用实地勘察、遥感监测与社会调查等多种技术方案。调研团队积极深入典型受灾场景,现场踏勘受损厂房、民居、道路、电力设施和农业大棚等,记录结构损伤形态,配合手持激光测距仪和风速计等设备量化破坏参数,并借助无人机航拍获取了建筑屋面和高耸结构顶部等危险区域的近景影像;针对高层建筑风致振动舒适度问题,采用量化表对188名受灾居民进行心理生理响应调查,结合建筑加速度传感器数据,构建居民主观感知与建筑客观振动的关联模型;对于海岸侵蚀量化,利用卫星影像进行灾前灾后对比分析。

面对海量的现场数据与图像资料,本研究在信息整理阶段采用宏观与细观相结合的分析方法,首先依据功能、区位分布等特征对大部分调研对象进行分类,并对灾害损失进行等级划分,从而总结灾害损伤规律,同时选取典型单体对象,深入分析其灾损成因。具体调研技术路线详见图6。

4 房屋建筑受灾情况

在房屋建筑的结构设计中,风荷载是一项必须考虑的重要因素,通常按静力荷载作用于建筑物,或通过风致振动响应进行分析。根据相关规范,基本风压通常按50年重现期确定;对于高层建筑、高耸结构

以及对风荷载较为敏感的结构，应适当提高重现期要求。以海口市为例，50 年重现期对应基本风压换算为平均风速约为 34 m・s^{-1}，100 年重现期约为 37.5 m・s^{-1}。相比于超强台风“摩羯”的最高 10 min 平均风速约 52 m・s^{-1}，已显著超出规范设防标准，因此亟需对其造成的房屋建筑灾损情况进行科学定量化评估。

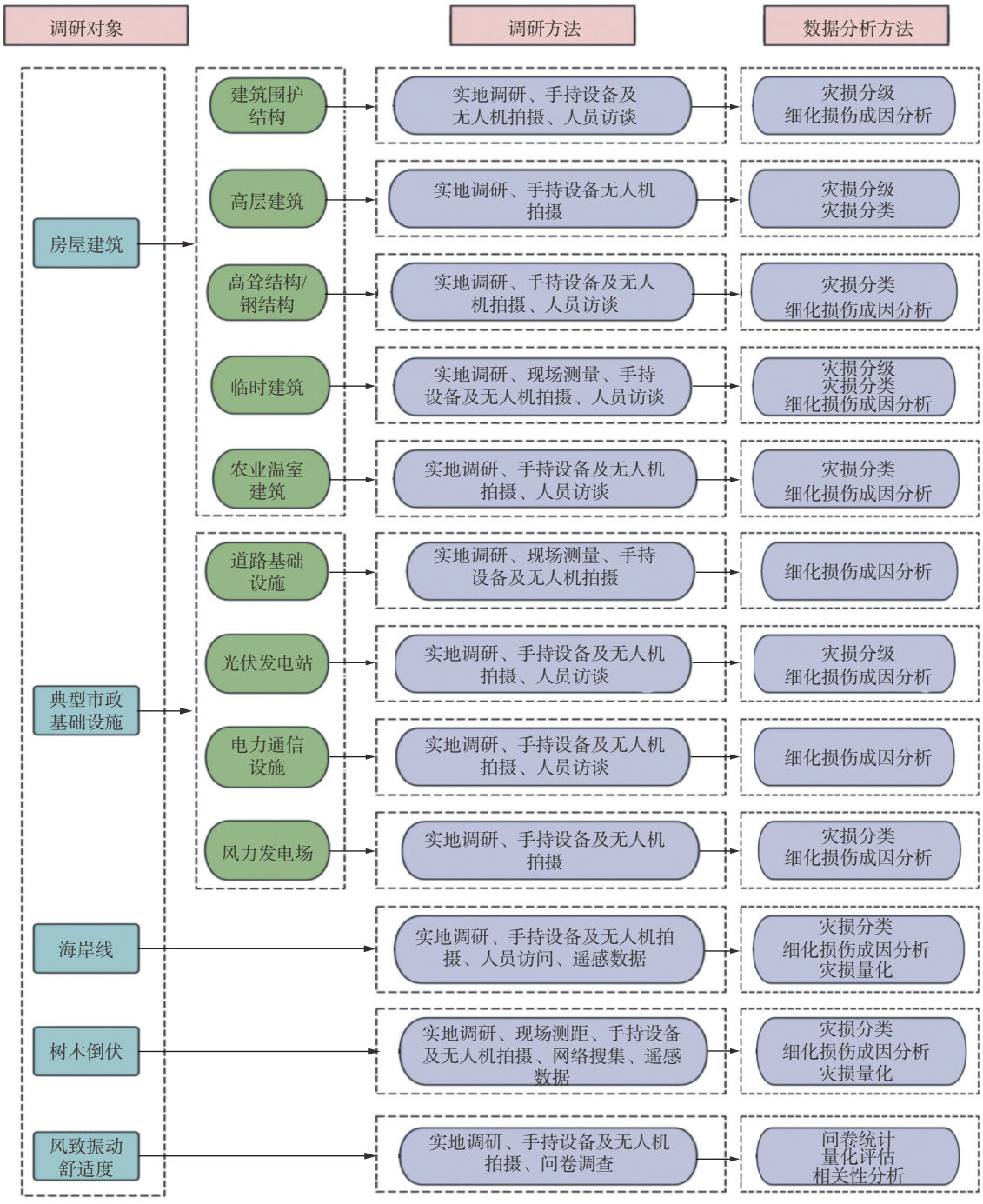


图 6　调研技术路线图

海南岛位于欧亚板块、印澳板块和菲律宾板块的交汇区域附近，大地构造位置独特，受板块相互作用、弧后盆地的多期扩张活动影响，海南岛及邻区地质构造复杂，区域地壳构造、地震和火山活动强烈。海南省全岛处于抗震设防区，9 个市县处于Ⅶ度及以上抗震设防区，根据 GB/T50011—2010《建筑抗震设计标准》，海口市抗震设防烈度为 8.5 度，对应的设计基本地震加速度值为 0.3g，是全国抗震设防要求最高的省会城市之一。文昌市抗震设防烈度为 7.5 度，对应的设计基本地震加速度值为 0.2g。较高的抗震设

防标准使得该地区房屋建筑在侧向荷载作用下表现出较强的整体性和抗震能力。

低层居住建筑由于刚度大、基频高,超强台风“摩羯”的高频风压荷载不易引发共振,换算静力荷载也不足以导致主体结构破坏,其破坏多集中于围护结构。高层和超高层建筑基频较低,水平荷载随建筑高度的增加弯矩显著增大,加之风压随高度递增,风荷载往往成为其控制荷载而非地震作用。公共建筑、工业建筑和农业建筑常因跨度大、屋面迎风面积广,导致承受的总风压荷载过大,易发生结构性破坏。临时建筑因预期使用时间短、材料轻质和基础处置简单,其设计抗震与抗风设防标准通常低于永久性建筑,在超强台风“摩羯”的风雨耦合作用下更易发生失稳或严重损坏。因此,本研究重点针对超强台风“摩羯”灾害破坏风险较高的建筑围护结构、高层建筑、高耸结构/钢结构、临时建筑和农业温室建筑等开展调研,系统评估不同类型结构破坏程度,并深入分析其致灾机理与破坏规律。

4.1 建筑围护结构 围护结构可划分为外围护结构和内围护结构。其中,外围护结构包括屋面、外墙和外门窗等,承担着抵御风雨、隔声隔热和防水保温等功能。海岛工程结构常年处于高温、高湿、高盐雾、高辐射和强风等“五高”严酷环境,并频繁面临地震和台风等极端灾害的威胁,其安全性与耐久性面临严峻挑战。由于风致破坏首先主要发生于外围护结构,其抗台风能力,尤其是抗超强台风的性能,成为保障海岛工程结构安全的关键因素。另一方面,海岛工程中量大面广分布的住宅和工业建筑多为低矮结构,此类结构的强风致损通常是由于围护结构破坏引发,此类破坏受到台风持时效应和时变破坏效应的显著影响[20−26]。因此,围护结构台风风灾易损性分析中,需充分考虑台风的全过程作用。

为研究超强台风“摩羯”对建筑围护结构的破坏影响,本研究聚焦于屋面板、墙(侧)板、外幕墙、外门窗以及围护结构与主体结构连接部件等几类量大面广的典型围护结构。在分析其破坏特征与灾损机制的基础上,提出具有针对性的防风减灾建议与措施,为建筑围护结构的防风设计与工程实践提供科学依据。

调研工作共在超强台风“摩羯”风眼路径附近区域选取26个点位,如图7所示。调研位置分布于12级风圈范围内的文昌、海口、临高和澄迈等市县。调研对象涵盖12栋门式刚架结构、9栋框架或框剪结构、14栋砌体结构、17栋简易轻型钢结构和1栋网架结构。



图7 建筑围护结构调研位置

4.1.1 总体破坏情况 为了合理评估各类围护结构的受损程度,根据其受损面积占比和修复难易程度,

共划分为 5 个破坏等级，即基本完好（未见明显损坏）、轻度破坏（0 ~ 10%）、中度破坏（11% ~ 30%）、严重破坏（31% ~ 50%）和完全损坏（超过 50%）。在此基础上，以单栋建筑中所有围护构件中的最高破坏等级，作为该建筑围护结构的整体破坏等级。不同结构体系的围护结构受损情况汇总于表 2。

统计发现，不同结构体系围护结构的风损特征差异明显。除部分简易轻型钢结构出现框架柱屈曲或柱脚脱离基础并导致整体坍塌的情况外，其余建筑的主体结构均未见明显损伤。门式刚架结构和简易轻型钢结构的围护结构受损最为严重，主要表现为屋面彩钢板大面积损毁。框架或框剪结构的围护结构受损较轻，破坏形式以低楼层门窗玻璃破碎和走廊吊顶损坏为主。砌体结构多为村民自建房屋，其屋面通常采用木屋架与屋面瓦构成的双坡形式，由于屋面材料老化严重且年久失修，易出现屋架断裂、瓦片散落以及侧墙局部坍塌等破坏。3 类典型围护结构的受损情况结果汇总于表 3。由表 3 可知，轻钢结构工业厂房的彩钢板屋面和卷帘门在超强台风“摩羯”中受损最为严重，多数已无法修复。侧墙板、外幕墙和吊顶等围护结构呈现轻度和中度破坏，可局部修复或更换。

表 2　不同结构体系围护结构的受损情况　　单位：%

结构类型	基本完好	轻度破坏	中度破坏	严重破坏	完全损坏
门式钢架结构	8.3	8.3	0	25.0	58.4
框架或框剪结构	33.3	55.6	11.1	0	0
砌体结构	0	28.6	28.6	42.8	0
简易轻型钢结构	0	0	0	0	100.0
网架结构	0	100.0	0	0	0

表 3　典型围护结构的受损情况　　单位：%

围护结构类型	基本完好	轻度破坏	中度破坏	严重破坏	完全损坏
彩钢板屋面	7.7	7.7	7.7	23.1	53.8
卷帘门	14.3	14.3	0	0	71.4
侧墙板、外幕墙和吊顶	0	58.3	33.3	8.4	0

4.1.2　屋面板灾损情况与分析

（1）彩钢板屋面

多数厂房的屋面采用彩钢板或夹心彩钢板，通过螺钉与檩条连接，未做抗风压条，抗风能力薄弱。在强气流作用下，典型风损破坏特征为在风吸力作用下发生面外剪切破坏，呈条带状大量被撕裂（如图 8a 和图 8b 所示），部分结构的屋面板 100% 被掀飞（如图 8c 所示）。彩钢板自身的强度和刚度不足，或是彩钢板之间以及彩钢板与檩条之间连接不牢靠，都会导致屋面破坏失效。一旦屋面板局部被掀开，内风压瞬间增大，内风压和外风压产生荷载效应叠加，在内、外风压共同作用下，可能引发屋面板的连续破坏。

彩钢板在屋脊、檐口以及坡屋面转角区域受损更加严重，表现为锁边处被撕开、翻卷和弯折（如图 8d 所示），主要原因是强气流在屋脊、檐口和墙角等角部区域产生更大的局部脉动风压。如果锁边质量存在缺陷，在负风压引起的吸力作用下锁边首先被拉开，造成屋面板发生整体侧移。某大型厂房的彩钢板屋面未受损，原因是设计了 0.6 mm 厚彩钢板，选用螺钉的承载力更高，且做到了严控施工质量（如图 8e 所示）。另有 2 栋相邻的厂房结构，一栋未设置压条，超强台风“摩羯”过后屋面受损严重（如图 8f 所示）；另一栋的屋面设置了抗风压条，超强台风“摩羯”过后屋面完好无损（如图 8g 所示），充分证明抗风压条能够显著提高屋面板的抗风性能。该工艺技术简单，成本低廉，在台风频发的海南省具有较高的推广应用价值。

简易轻型钢结构也多见采用彩钢板屋面。简易轻型钢结构是指由方钢、圆钢和小角钢组成的轻钢骨架或轻钢屋架结构，主体结构也可采用砌块砌筑，常见于一些简易工棚。这类结构的抗侧力性能普遍较差，框架柱的强度和刚度明显不足，框架柱端部和混凝土底板连接不牢靠，最终导致框架柱弯折倒伏和屋面整体坍塌（如图 8h 所示）。



a 屋面板整体撕裂



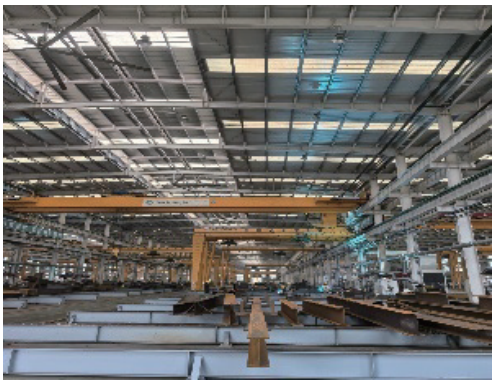
b 屋面翻卷板撕裂



c 屋面板完全破坏



d 屋面板料撕裂



e 屋面板整体完好



f 无抗风压条受损



g 有抗风压条无损



h 屋面局部塌落

图 8 彩钢板屋面受损现场

(2)其他类型屋面

超强台风“摩羯”对水泥混凝土屋面的直接影响较小,但屋面材料在风吹雨淋、温差变化等室外环境的长期作用下可能导致腐蚀老化,并导致渗漏水等现象。屋顶桥架和机电设备等易遭受破坏(如图 9a 所示)。木屋架−屋面瓦双坡屋面常见于村民自建房,结构形式多为砖石砌体结构。典型破坏现象为木屋架结构受损,包括木檩条及屋面大梁断裂、散落,屋面瓦片大面积脱落,结构的侧墙发生局部坍塌等。屋面瓦片常采用瓦钉、金属挂钩或扣件连接至屋面檩条上。部分老旧瓦房也有采用泥浆固定瓦片。在日常室外环境的长期作用下(如风吹雨淋、温差变化等)可能引起瓦钉松动,挂钩和扣件生锈老化,进而导致连接强度下降。瓦片和檩条连接松动等是造成屋面损伤的主要原因(如图 9b 所示)。



a 水泥混凝土屋面受损 b 木屋架−屋面瓦双坡屋顶损坏

图 9 其他类型屋面的受损现场

4.1.3 门窗灾损情况与分析 卷帘门易发生面外剪切破坏,强气流将卷帘门掀起,彩钢板被逐条撕开,最终导致失效。卷帘门破坏的主要原因是卷帘门的迎风面积大,表面风压分布不均匀,表面易发生弯曲和扭转变形。彩钢板自身的强度和刚度不足,由于剧烈扭转首先在连接处被撕裂。随着风压的持续作用,被撕裂的钢板带逐渐增多,最终引发卷帘门的整体失效(如图 10a 所示)。

门窗的破坏形式包括边框受损和玻璃碎裂等。对于多、高层建筑,超强台风“摩羯”造成多处玻璃门窗的碎裂(如图 10b 所示)。低楼层的门窗玻璃常见发生碎裂,主要原因是强气流中夹杂的树枝和石子等风致飞掷物以及楼上坠物掉落飞溅将玻璃击碎(如图 10c 所示)。对于低矮建筑,常见的破坏现象包括铝合金窗框局部屈曲并严重变形,导致弯折、断裂或脱落(如图 10d、图 10e 和图 10f 所示),窗户玻璃随窗框脱落或碎裂。导致窗户损坏主要有 2 个方面原因:(1)建筑老化严重,铝合金窗框与过梁及周边墙体的连接强度不足,膨胀螺丝等紧固件松动,在强风压作用下窗框弯曲变形,与周边的连接松动,最终失效破坏;(2)强气流中夹杂的树枝和石子等飞掷物将玻璃击碎(如图 10g 所示)。此外,在玻璃窗内部设置有多对交叉支撑,可有效提高窗户侧向刚度,窗框和墙板连接未见明显局部损伤,一定程度上提高了窗户抗风能力(如图 10h 所示)。

4.1.4 侧墙板、外幕墙和吊顶等风损破坏分析 轻钢工业厂房侧墙板的破坏多始于转角区域,表现为板材被撕开和平面外弯折翻转,最终形成竖向贯通的缝隙,如图 11a 所示。主要原因是侧墙板转角处等存在几何形状突变的地方,风载体型系数在某些风向角下要比面平均风载体型系数高得多,局部脉动风压高,侧墙板的厚度薄,抗剪能力差,容易发生面外剪切破坏,导致彩钢板沿着竖直方向整条被撕开,出现竖向贯通的缝隙。

外幕墙的破坏特征表现为玻璃或外挂石材幕墙局部碎裂并脱落(如图 11b 和图 11c 所示),龙骨基本保持完好。受损的主要原因是玻璃幕墙或外挂石材幕墙与龙骨连接的强度不足,无法抵抗表面风荷载。此外,低区幕墙易受风中飞射物(如树枝和石子)撞击而破损。

走廊吊顶受损的主要特征为吊线外露,吊顶悬空或散落于地面(如图 11d 所示)。受损的主要原因是气流从门窗洞口进入建筑内部,在走廊区域产生较大的负风压。常采用铝合金龙骨配合木制百叶吊顶,通过钢丝连接,该工艺连接处的承载力较低,无法抵抗负风压产生的拉力从而遭受破坏。

砌体房屋的承重墙或围墙,当墙体迎风面作用的风压荷载超过墙体的面外抗剪承载力以后,易发生

局部倒塌(如图11e和图11f所示),或者沿45°方向发生整体坍塌(如图11g所示)。此类结构材料腐蚀老化严重,钢筋锈蚀致使墙体的承载力和延性下降,墙面的迎风面积大,在强风压作用下,墙体沿着面外方向发生剪切脆性破坏并倒塌。一些简易轻型钢结构的侧墙板由彩钢板制成,侧墙板的厚度薄,抗弯和抗剪刚度小,与主体钢框架连接不牢靠。这类临建结构的密闭性不佳,侧墙板和屋面板一旦受损,气流涌入室内后,将进一步加剧侧墙板的大面积破坏(如图11h所示)。



a 卷帘门损坏　b 玻璃窗碎裂

c 门窗玻璃碎裂　d 窗框局部断裂

e 窗户整体脱落　f 窗框局部损坏

g 玻璃冲击破碎　h 交叉支撑未受损

图10 门窗受损现场



a 转角墙板撕裂　b 玻璃幕墙损坏

c 石材幕墙损坏　d 吊顶损坏

e 砌体结构侧墙倒塌　f 砌体结构墙体倒塌

g 砌体结构侧墙坍塌　h 侧板被撕裂

图 11 侧墙板、外幕墙和吊顶等受损现场

4.1.5 围护结构与主体结构连接部件风损破坏分析 工业厂房的玻璃窗出现铝合金窗框局部屈曲并严重变形的情形。固定窗框的自攻钉螺丝被拔出，窗框沿着轴向被拉裂(如图 12a 所示)，窗框的屈曲、弯折和连接失效导致窗户在风吸力作用下整体被掀起。门框和窗框失效在高层建筑中也较为常见。部分门框发生局部弯折或扭转变形，窗框由于局部失稳发生屈曲(如图 12b 所示)。造成以上损伤的主要原因：铝合金边框自身的强度和刚度较低、铝合金边框的连接强度不足；门窗玻璃的表面风压传递至门框和窗框，引起剧烈振动并产生应力集中；当边框的应力水平超过局部失稳的临界应力时，可能发生局部屈曲；在边框连接不牢靠的情况下，剧烈振动极易造成边框的开裂和扭转变形，加剧门窗的损坏。因此，提高门框和窗框的材料强度或提高连接件的强度，是减缓窗户受损的有效方法。

现场调研发现，围护结构与主体结构连接部件存在受损情况有：石材挂件出现局部变形并与其连接

的面板脱离,周边密封胶发生脱落;部分石材板出现局部断裂;用于固定挂件与次龙骨的螺栓存在不同程度的锈蚀。上述破坏的主要原因可能是在风荷载作用下,石材板表面所受负风压产生较大吸力,导致挂件连接部位出现应力集中,当应力超过石材自身抗拉强度时即引发局部断裂。此外,螺栓锈蚀会削弱挂件与副龙骨之间的连接强度,引起挂件松动,加剧石材板在风荷载下的振动响应,引发长期疲劳损伤进一步恶化(如图 12c 和图 12d 所示)。



a 工业厂房窗框失效　b 窗框局部失稳

c 幕墙–龙骨连接失效　d 幕墙–龙骨连接失效

e 柱脚螺栓失效　f 轻钢框架倒塌

g 屋架节点断裂　h 屋架节点局部屈曲

图 12 围护结构与主体结构连接部件受损特征

简易轻型钢结构由于整体性差，连接构造强度不足，现场出现多处钢架柱屈曲折断和屋面整体倒塌的案例。钢架柱的基础埋深浅，部分钢架柱脚螺栓失效，螺栓被拔出，致使钢架柱脚埋板与基础脱离（如图 12e 所示）。调研中还发现大量轻钢框架结构坍塌（如图 12f 所示），倒塌的原因是部分框架梁柱节点以及屋架钢桁架节点断裂，框架柱多处屈曲弯折，无法继续承载。此类简易轻型钢结构的侧向刚度小，与基础连接不牢靠，节点多处发生锈蚀，节点的强度被削弱。轻钢骨架多由圆钢管焊接而成，部分钢屋架桁架梁的节点发生断裂（如图 12g 所示）。由于调研地点靠海附近，空气湿度大及锈蚀离子含量高，在腐蚀环境的长期作用下，多处门窗框、框架梁柱和屋架等金属构件发生锈蚀。钢屋架节点锈蚀尤其严重，导致强度降低，容易发生断裂。钢屋架梁的锈蚀和强度降低会导致构件发生局部失稳破坏，表现为局部屈曲和弯折（如图 12h 所示）。

4.2 高层建筑 全球超高层建筑在规模、高度与结构复杂性方面持续突破，建筑高度已攀升至 600 m。高层建筑虽在空间利用效率与城市景观视野等方面具有优势，并已成为现代城市天际线的重要组成部分，但其特有的结构形式也带来了复杂的风致响应问题。尤其是在中国沿海台风高发区域，随着高层建筑的持续开发与既有建筑的老龄化，其抗风安全性与适用性日益成为工程界关注的焦点。

高层建筑普遍呈现出轻质、高柔和低阻尼等典型结构特点，在强台风作用下易诱发显著动力响应[83]，直接影响结构的安全性、使用性与舒适性。风荷载作为主要水平荷载，其引起的应力响应与建筑高度的平方呈正比，是高层结构设计的控制重点。当前，高层建筑普遍采用框架结构与幕墙体系，该类结构形式虽满足建筑功能与立面需求，但也导致整体结构挠度增大、阻尼减小，致使结构固有振动周期接近或小于风速变化的卓越周期，从而加剧风致动力效应。

因此，在抗风设计中需合理选取风荷载参数、优化建筑体型和增强抗侧力系统，并可采用泄风措施或高强度材料体系，以提升整体抗风性能。其中，结构侧向刚度是高层建筑抗风设计的核心控制指标之一。中国现行规范通过层间位移角限值来体现对侧向刚度的控制要求。尽管严格的位移角控制可有效保障主体结构在极端台风作用下不发生严重破坏[84]，但若围护结构（如幕墙）及附属构件（如外部广告牌）抗风能力不足，仍可能成为台风灾害中的主要受损部位[85]。此外，台风作用下飞掷物引发的次生灾害亦构成重要破坏来源[86]。目前，针对台风风场特性及建筑风致响应已形成较为系统的综述研究[87]，并基于实际案例对结构破坏机理与台风响应特征[88] 开展了深入分析。

为深入研究超强台风“摩羯”对海南岛北部沿海高层建筑的具体影响，本研究基于实地调研，系统分析了超强台风“摩羯”的风场特性及其对高层建筑造成的破坏特征，旨在为热带沿海地区高层建筑的抗风设计、结构优化与防灾减灾策略提供参考。调研工作聚焦于受灾较为严重的海口、文昌和澄迈等市县。结合超强台风“摩羯”路径与灾情分布特征，研究团队共实地勘察 31 处高层建筑，包括 16 个住宅小区与 15 座商业综合体，其分布如图 13 所示，基本概况汇总于表 4。其中，所选建筑类型以高层住宅、酒店及商业综合体为主，结构体系多为框剪结构形式。

调研结果表明，在超强台风“摩羯”极端风荷载作用下，所有受考察建筑的主体结构均保持完好，未出现明显损伤，反映出当前主体结构设计具备较强的抗风安全性。然而，围护结构与附属构件破坏较为普遍和严重，此二类结构类别划分及其功能特征如表 5 所示。其中，高层住宅建筑以外门窗玻璃破碎为主要破坏特征；酒店与商业综合体则普遍出现幕墙板块破损、广告牌结构脱落甚至整体坠落等现象。此外，风致飞掷物撞击造成的玻璃门窗与幕墙孔洞状破坏也较为常见，显示出围护系统在强风与次生抛射物共同作用下的薄弱性。

4.2.1 受损情况划分 整体而言，调研区域内建筑物的受损程度与其地理位置呈现出显著关联，如表 6 所示。根据表 6 的统计结果，大多数调研对象的受损等级为局部损坏。被判定为严重损坏的高层建筑数量约占全部调研样本的 30%，且这些建筑主要分布于海南岛北部及东北部沿海区域，具体分布如表 7 与表 8 所示。相比之下，位于海口市中南部的中**城和望海**广场等调研对象基本未观测到明显损伤，友谊·**城等个别建筑仅出现轻微损坏，进一步印证了建筑风致响应与超强台风“摩羯”路径及局地风场强度的空间相关性。



图 13　高层建筑调研位置

表 4　调研点信息表

标号	名称	东经/(°)	北纬/(°)	距离/km	方位角/(°)
1	中央*岸	110.285	20.040	5.4	−67.888
2	滨海*际	110.352	20.079	10.4	−61.551
3	滨江**玺湾	110.354	20.054	8.0	−53.502
4	中央**海熙府	110.363	20.088	10.9	−69.604
5	中央**海玥府	110.364	20.088	10.8	−70.324
6	中央**天玺湾	110.348	20.079	10.3	−116.274
7	中央**天御湾	110.348	20.079	10.3	−114.687
8	中央**壹湾汇	110.363	20.088	10.7	−69.720
9	海**城	110.745	19.610	32.4	80.792
10	美*沙	110.310	20.071	8.4	−94.682
11	鲁******二西区	110.116	19.986	13.1	100.208
12	文昌教**区	110.764	19.609	32.3	84.271
13	观**免税城	110.328	19.920	8.7	106.420
14	海口**洲际酒店	110.307	20.058	6.9	−92.582
15	丽思***酒店	110.327	19.918	8.9	105.337
16	海**广场	110.308	20.058	7.0	−93.875
17	世**厦	110.281	20.021	3.7	−50.305
18	鲁能***酒店	110.990	19.646	19.0	53.990
19	友谊·**城	110.291	19.998	1.4	−14.824
20	海口**城	110.310	20.029	3.8	−99.042
21	中环**广场	110.311	20.032	4.1	−100.120
22	望海**广场	110.341	20.032	5.6	−134.196
23	全球**之窗	110.350	20.020	5.5	−150.542

表 4 调研点信息表(续)

标号	名称	东经/(°)	北纬/(°)	距离/km	方位角/(°)
24	中国农/工*银行	110.347	20.020	5.3	−148.631
25	海口**中心	110.318	20.048	6.1	−104.387
26	迎**园	110.336	19.982	3.7	156.976
27	中**城	110.335	19.977	3.8	147.481
28	美兰**城	110.432	19.963	5.1	132.039
29	绿地城**里	110.432	19.963	5.1	132.260
30	华*悦府	110.314	20.033	4.3	−103.754
31	黄金**大酒店	110.315	20.033	4.2	−105.664

注:(1)距离表示该调研建筑物到最近风眼(风眼根据超强台风“摩羯”移动路径每隔1 h定位一次)距离。
(2)调研建筑物的方位角在−180°~180°的范围内;0°代表东(E),90°代表北(N),180°(或−180°)代表西(W),−90°代表南(S)。
(3)除了澄迈县鲁******二西区受超强台风“摩羯”作用时间为4 h,其他调研对象受超强台风“摩羯”的作用时间均为5 h。

表 5 受损结构类别

结构类别	定义	功能作用	结构关系	设计要求
围护结构	利用围合、分隔空间,抵御外界环境影响的构造,如外墙、外门窗和幕墙等。	形成空间并提供保护,创造舒适室内环境。	与主体结构连接紧密,是整体的一部分,参与抵抗外力。	重点考虑保温、隔热、防水和气密等性能,及防火、抗震、抗风等安全要求。
附属结构	附着于主体结构,起辅助和装饰作用的构件,如阳台、雨篷、广告牌、空调室外机搁板、装饰线条和吊顶等。	作用较多样,如阳台供活动,雨篷遮雨,空调搁板安置设备,广告牌用于宣传,装饰线条美化建筑。	相对独立,虽依赖主体结构支撑,但对整体结构受力影响小。	除满足安全,阳台和雨篷要考虑人体工程学,装饰线条要注重美观与整体协调。

表 6 受损等级划分

未见损坏	轻微损坏	局部损坏	严重损坏
该建筑物未受到破坏,基本完好。	建筑物仅有极个别玻璃受损或有其他轻微受损情况,几乎无需修复。	部分结构破坏,可明显看到该建筑物破坏情况。	结构大面积破坏,损伤情况严重,建筑物受损率约40%。

表 7 高层住宅楼受损情况

标号	名称	受损类型	受损等级
1	中央*岸	围护结构损坏	局部损坏
2	滨海*际	围护结构损坏	局部损坏
3	滨江**玺湾	围护结构损坏	严重损坏
4	中央**海熙府	围护结构损坏	局部损坏
5	中央**海玥府	围护结构损坏	严重损坏
6	中央**天玺湾	围护结构损坏	严重损坏
7	中央**天御湾	围护结构损坏	局部损坏
8	中央**壹湾汇	围护结构损坏	局部损坏
9	海**城	围护结构损坏	局部损坏
10	美*沙	围护结构损坏	局部损坏
11	鲁******二西区	围护结构损坏	严重损坏
12	文昌教**区	围护结构损坏	局部损坏
13	迎**园	围护结构损坏	轻微损坏
14	中**城	—	未见损坏
15	绿地城·**里	围护结构损坏	局部损坏
16	华*悦府	围护结构损坏	局部损坏

表8 酒店及商业综合体受损情况

标号	名称	受损类型	受损等级
1	观**免税城	附属结构损坏	局部损坏
2	海口**洲际酒店	围护结构损坏	严重损坏
3	丽思***酒店	围护结构损坏	严重损坏
4	海**广场	围护和附属结构损坏	严重损坏
5	世**厦	围护结构损坏	局部损坏
6	鲁能***酒店	围护结构损坏	严重破坏
7	友谊·**城	围护结构损坏	轻微损坏
8	海口**城	围护和附属结构损坏	严重损坏
9	中环**广场	围护结构损坏	局部损坏
10	望海**广场	—	未见损坏
11	全球**之窗	围护结构损坏	严重损坏
12	中国农/工*银行	围护结构损坏	轻微/局部损坏
13	海口**中心	围护结构损坏	轻微损坏
14	美兰**城	附属结构损坏	严重损坏
15	黄金**大酒店	围护结构损坏	轻微损坏

4.2.2 调研数据分析

(1)高层住宅楼

调研团队结合超强台风“摩羯”的运动轨迹,选取了海口市美*沙和澄迈县鲁******二西区等16个新建的高层住宅小区作为调查对象。此类住宅建筑的风致损伤类型以门窗类围护结构破坏为主(如图14所示),表现出较强的共性特征。因此,进一步选取中央**海玥府、滨江**玺湾、中央**天御湾、美*沙及中央**天玺湾5处具有典型风损破坏的案例,重点分析其受损程度、空间分布规律与破坏形态特征。

①门窗玻璃破碎 位于海口市新埠岛北部沿海的中央**海玥府小区,因地处开阔沿岸地带,在超强台风“摩羯”影响期间直接暴露于其核心风圈范围内,如图15所示。由图15可知,该小区高层住宅外窗出现局部玻璃破碎,而底层门窗则发生大面积破损。破坏主要原因包括2个方面:超强台风“摩羯”作用下产生的极值风压远超玻璃设计承载力;阳台、装饰性阁楼等外围护结构在强风中变形过大,导致玻璃平面内变形超出容许限值。此外,部分门窗系统在设计与施工阶段未充分考虑极端气候条件,其构造连接与材料抗风性能存在不足,进一步加剧了损伤程度。

②飞掷物破坏 典型飞掷物破坏现场、滨江**玺湾破坏现场和中央**天御湾破坏现场分别如图16~图18所示。由图17可知,位于海口市海甸岛东南沿江地带的滨江**玺湾小区,其外窗玻璃及楼顶装饰性阁楼幕墙出现典型的孔洞状贯穿破坏,形态特征表明该损伤主要由强风裹挟的飞掷物高速冲击所致。由图18可知,中央**天御湾项目中低区阳台外窗亦存在因飞掷物撞击引发的局部玻璃破碎与整体失效现象。上述案例共同揭示了在超强台风“摩羯”作用下,飞掷物次生灾害对玻璃围护系统的严重威胁,同时也反映出当前相关构件在抗冲击设计与防护措施方面仍存在不足。

③窗体整体脱落 典型窗体整体脱落和美*沙小区、中央**天玺湾破坏现场如图19~21所示。由图20可知,位于海甸岛东部沿海的美*沙小区在超强台风“摩羯”影响期间承受了更为直接和强烈的风荷载作用。该小区内多栋高层住宅的门窗系统受损严重,普遍出现外窗玻璃破裂、窗框塑性变形乃至整体窗体脱落等结构性破坏,且上述破坏在建筑角隅区域分布尤为集中。由图21可知,中央**天玺湾亦在建筑角隅部位发生多起窗体脱落事件,进一步印证该区域在强风作用下的脆弱性。综合分析表明,在超强台风“摩羯”作用下,建筑角隅区域因气流分离与绕流效应形成显著的局部风压放大与涡激振动,导致实际风荷载远超常规设计取值,从而成为围护系统的抗风薄弱环节。除风致机制外,窗体脱落现象还与多种非风致因素密切相关,包括材料长期腐蚀、角隅区域构造设计强度不足、施工质量控制不严及后期维

护缺失等, 反映出该类破坏的多因性与复杂性。



图 14　门窗类围栏结构破坏

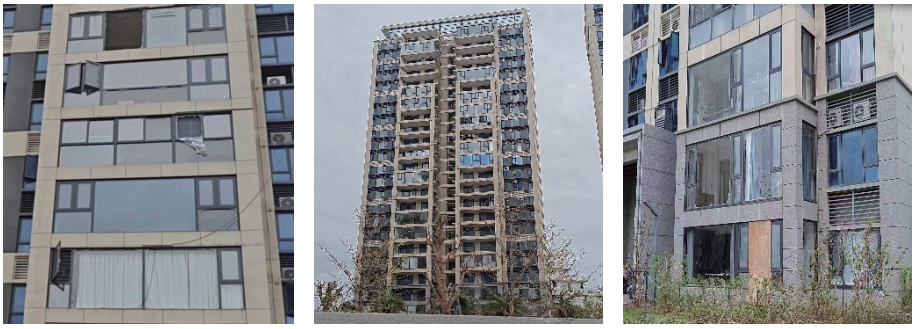


图 15　中央海玥府现场破坏情况**

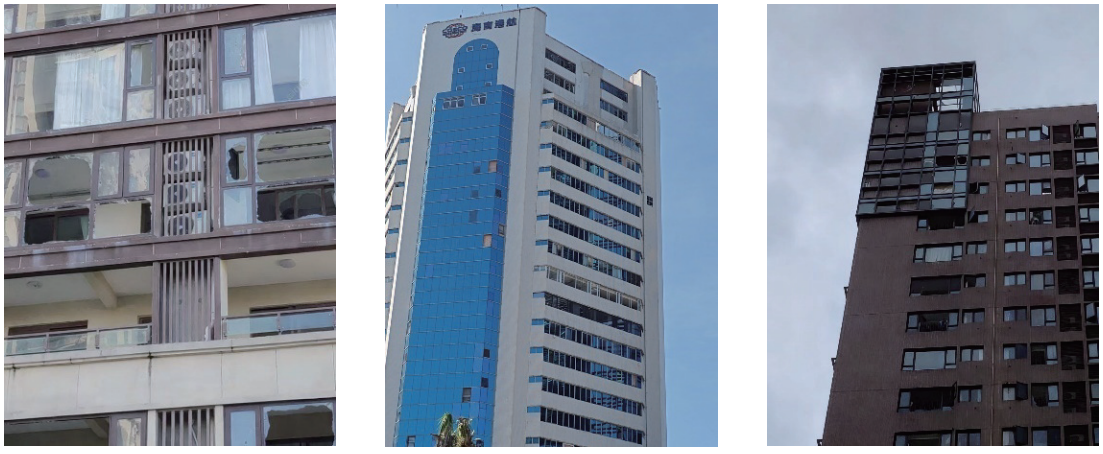


图 16　典型飞掷物破坏现场




图17 滨江**玺湾破坏现场

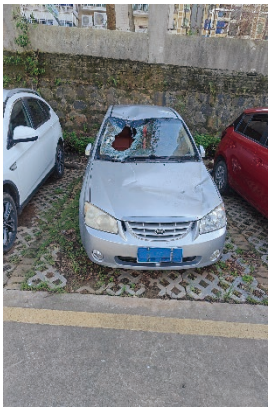



图18 中央**天御湾破坏现场

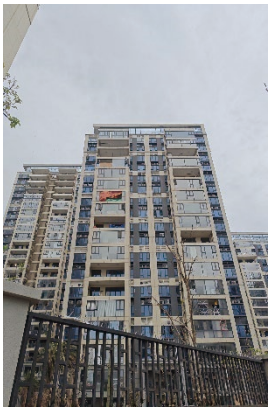
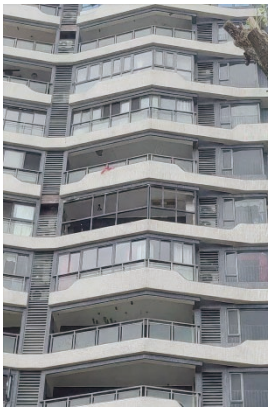
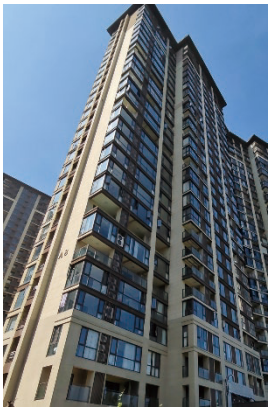





图19 窗体整体脱落现场



图20 美*沙小区破坏现场



图21 中央**天玺湾破坏现场

(2)酒店及商业综合体

为了解海南岛酒店及商业综合体受损情况,调研组选取海口观**免税城和海口丽思***酒店等15处地点开展调研。根据受损结构划分,选取观**免税城、海**广场、美兰**城、丽思***酒店和鲁能***酒店5处典型风损破坏案例进行分析。

①附属结构损坏 雨篷、天花板及吊顶:观**免税城雨篷在强风下风荷载激增,因实际风力远超其设计荷载,导致大面积撕裂破坏。海**广场大楼也受损严重,其外走廊天花板玻璃因飞掷物撞击而损坏,内部轻质吊顶因建筑围护结构破坏后,风压剧增,承受荷载远超其设计承载能力,发生大面积断裂脱落,如图22和图23所示。

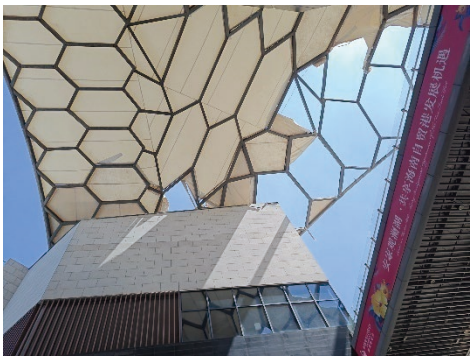


图 22　观免税城破坏现场**

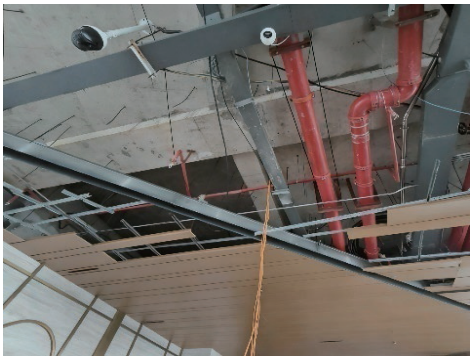
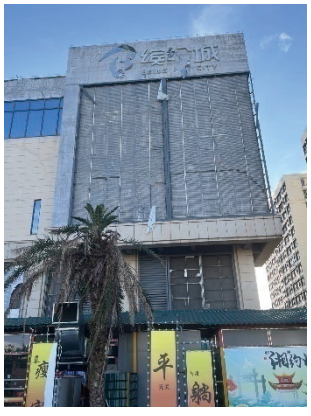



图 23　海广场破坏现场**

②广告牌损坏　位于海口市美兰区南渡江东的美兰**城，其外侧墙面广告牌在超强台风“摩羯”过境期间遭受严重破坏，如图 24 所示。现场调研发现，广告牌在强风作用下发生撕裂，边角部位破损尤为显著。这种特征性破坏与风场中广告牌受力不均、边角应力集中密切相关，暴露出其设计及安装对极端风荷载的适应性严重不足。广告牌破坏同时产生了大量高速飞掷物，包括灯具、金属构件、连接件、线缆及碎片等。这些碎片在强风裹挟下，对周边环境及人员安全构成重大威胁，显著加剧了次生灾害风险。



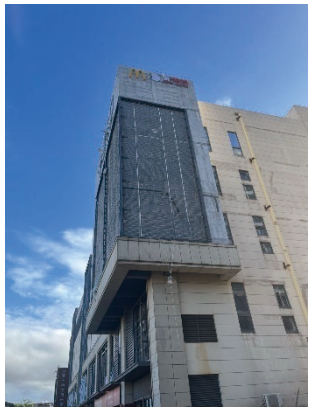


图 24　美兰城现场破坏情况**

③围护结构损坏　幕墙作为酒店及商业综合体建筑的主流外围护结构，在超强台风“摩羯”登陆期间发生损坏，如图 25 所示。幕墙已成为该类建筑在风灾中的主要破坏部位，典型案例包括中环**广场大楼、全球**之窗等项目。幕墙破坏呈现出明显的区域相关性：高层区域普遍出现玻璃碎裂现象，其主要原因在于玻璃材料自身强度不足，在风荷载作用下产生的应力与变形超出其承载极限；同时，高层主体结构刚度不足、柔度较大，在超强台风“摩羯”作用下导致过大的层间位移，超出幕墙玻璃平面内的允许变形范围。但在中低层区域，幕墙则普遍表现为孔洞状破损，主要由高速飞掷物撞击引起，反映出次生灾害对幕墙结构造成的显著破坏影响。

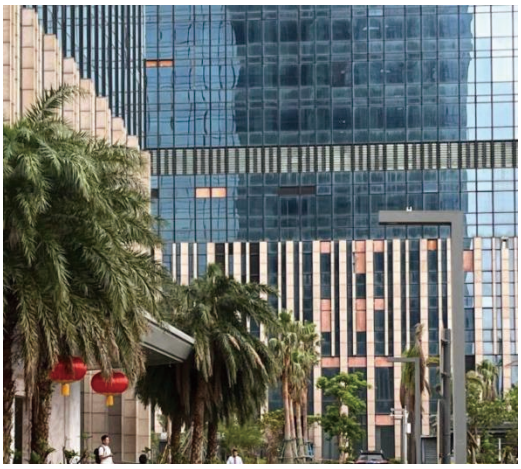


图 25 玻璃幕墙破坏现场

丽思***酒店破坏现场如图 26 所示。由图 26 可知,海口市中心的丽思***酒店的铝制幕墙遭受严重破坏,东北侧边角区域受损尤为严重。超强台风“摩羯”持续高风压导致铝板大面积脱落。其破坏主因:持续高风压使铝板连接部件松动失效,引发幕墙整体或局部失稳脱落。同时,边角区域受局部涡流及风压放大效应,荷载远超设计承载能力。此外,幕墙施工工艺或日常维护的不足亦削弱了其抵御极端长期风荷载的能力。幕墙脱落不仅严重破坏建筑立面完整性,更产生大量高速飞行的铝板碎片及连接件,直接威胁下方行人及车辆安全。



图 26 丽思***酒店破坏现场

④玻璃围栏损坏 文昌市鲁能***酒店楼顶平台玻璃围栏受损严重,如图 27 所示。木质与玻璃围护结构受强风冲击,出现大面积破损和失稳。强风作用及涡流、压力差效应,加剧了构件破坏,大幅削弱了围护结构抗风能力,严重威胁住客与工作人员安全。海口市海甸岛西南部近海的海**广场大楼受损严重,如图 28 所示。外部电梯栏杆被强风扭曲,显示出抗风结构设计不足;外电梯及平台围护结构的部分玻璃出现脱落,对使用者及周边行人安全构成威胁。

4.2.3 高层建筑受损典型案例分析

(1)高层住宅楼

①鲁******二西区:澄迈县鲁******二西区北侧临海,虽受超强台风“摩羯”影响时间较短,但损坏情况却极为严重,如图 29 所示。北侧楼栋的受损程度明显高于南侧楼栋,同一楼栋南面受损程度也明显小于北面。角隅区域门窗破坏情况比墙面中部更加严重。窗体以整体脱落为主,并伴有飞掷物撞击损伤。主要原因在于超强台风“摩羯”的逆时针旋转,使北侧风速高于南侧,导致临海北侧楼栋直接遭受强风冲击。建筑角隅区因流场分离形成强烈负压区,风荷载远超中部均匀风压区,致使门窗更易失效脱落。



图 27 鲁能***酒店破坏现场



图 28 海**广场大楼破坏现场



图 29 鲁能****东二西区破坏现场

②滨江**玺湾：海甸岛东南部沿江滨江**玺湾项目在风灾中被评定为严重损坏，如图 30 所示。由图 30 可知，主要表现为楼顶阁楼区域的围护玻璃及门窗玻璃出现大面积破损，存在大量因飞掷物撞击造成的孔洞状损伤。各楼栋中部的门窗玻璃亦受损严重，主要归因于风致压力差超过其承载能力，导致玻璃发生破碎。建筑内部吊顶系统出现大面积脱落，金属构件裸露。其原因主要包括 2 个方面：(1)建筑围护结构失效后，内部狭小空间风压重新分布，引发压力突变而导致破坏；(2)轻型吊顶在风振效应下动力响应显著放大，致使连接构件松动、脱落。



a 滨江**玺湾门窗玻璃破坏 b 滨江**玺湾吊顶破坏 c 滨江**玺湾围护结构破坏

图 30 滨江**玺湾破坏现场

(2)酒店及商业综合体

①中环**广场大楼及黄金**大酒店：中环**广场和黄金**大酒店现场破坏情况如图 31 和图 32 所示。

由图 31 和图 32 可知，位于海口市万绿园南侧的中环**广场大楼在风灾中受损较为严重，出现了大面积的幕墙脱落，尤其在结构角部区域破坏更为显著。相比之下，与其相邻、同样临海的黄金**大酒店则仅出现少量幕墙脱落，受损程度轻微。该酒店表现出较好的抗风性能，主要得益于其采用的圆形流线型结构设计。该设计有效削弱了风荷载作用下的“角部效应”，降低了局部应力集中，从而显著提升了围护

系统的抗风能力。



图31 中环**广场现场破坏情况



图32 黄金**大酒店现场破坏情况

②鲁能***酒店 鲁能***酒店破坏现场情况如图33所示。由图33可知,位于文昌市的鲁能***酒店屋檐受损严重,阁楼天花板大面积破损,内部木质骨架暴露。门前支柱的外层结构被风力剥离,露出内部钢筋混凝土结构。在超强台风"摩羯"的影响下,建筑外部空气流速快、气压低,而屋檐内部相对为高压区,这种压力差会对屋檐内部结构产生向外的作用力。当压力差足够大时,可能会破坏屋檐内部的结构。



图33 鲁能***酒店破坏现场

4.3 高耸结构/钢结构 现有研究针对台风及强台风作用下建筑损毁情况的调查,多集中于轻钢结构与低矮房屋结构[89],对风敏感型建筑的灾损机制与破坏特征研究仍较为欠缺。具体而言,高耸结构在强风作用下易发生显著震颤,进而引发结构损伤甚至严重安全隐患;膜结构对风荷载亦极为敏感,例如2005年超强台风"达维"登陆海南岛期间,导致三亚"美丽之冠"及琼海博鳌亚洲论坛主会场的顶部膜材严重损毁;而现代高层建筑结构日趋轻柔、阻尼减小、基本自振周期延长,其自振频率更易与风荷载振动频率接近,因而对风致振动响应也更为敏感。

本研究选取4类典型风敏感建筑,包括易受风灾的轻钢结构、张拉体系薄弱的膜结构和震颤效应显著的高耸结构,以及与风荷载易发生共振的高层建筑,开展了系统性灾害调查。结合超强台风"摩羯"的路径特征,调查区域涵盖超强台风"摩羯"登陆点文昌市、12级风圈范围内的海口市以及10级风圈所及的临高县、澄迈县和定安县等地(如图34所示)。

4.3.1 调研建筑的风灾致损等级定义 为系统评估建筑的损伤状况,本研究将风灾致损程度划分为4个等级:未见损坏、局部损坏、严重损坏和结构失效,具体定义如表9所示。基于该分类体系,本研究将从定量与定性2个维度,对4类典型风敏建筑的灾后调查数据展开分析。在定量分析方面,以调查团队采集的现场照片集及其对应的风灾致损等级作为数据样本,系统梳理并统计各类建筑的破坏分布特征;在定性分析方面,则重点从破坏现象、破坏特征及其成因机制等角度进行深入探讨。



图 34　高耸/钢结构调研位置

表 9　典型建筑风灾致损等级划分

风灾致损等级	破坏定义
未见损坏	围护结构和主体结构完好，未见到明显损坏；无需修理仍可继续使用。
局部损坏	围护结构出现轻微破坏，但主体结构完好；无需修理或稍加修理即可继续使用。
严重损坏	围护结构破坏严重，造成财产损失；主体结构轻微破坏；需修理后才可继续使用。
结构失效	围护结构完全破坏；主体结构严重破坏，濒于崩溃或整体倒塌；难修复或无法使用。

4.3.2　超强台风“摩羯”灾后调查情况与分析

（1）轻钢结构调查情况与分析

灾后调查共实地走访了 100 个轻钢结构项目点位，根据建筑类型和特点可以分为工业厂房和厂房式大棚。灾后调查照片及不同项目点位的轻钢结构灾损情况如表 10 所示。79% 的轻钢结构出现了局部损坏和严重损坏，16% 的轻钢结构失效，仅有 5% 的轻钢结构未见损坏。

表 10　不同项目轻钢结构灾损情况分析　　单位：%

钢结构类型	风灾致损等级				合计
	未见损坏	局部损坏	严重损坏	结构失效	
工业厂房	2	16	17	3	38
厂房式大棚	3	19	27	13	62
总计	5	35	44	16	100

屋顶和外围护结构是工业厂房主要的破坏点。在超强台风“摩羯”的强风作用下，屋顶材料被大片掀起，外围护表皮部分区域大面积脱落，进而导致生产设备暴露在风雨中，造成财产和经济损失。其中，与未损坏或局部轻微损坏的工业厂房屋顶相比，严重损坏的屋顶檩条本身没有破坏，屋顶压型钢板与檩条连接的可靠性应是造成损坏的主要原因，如图 35 所示。

厂房式大棚也以屋顶和外围护结构破坏为主，且因长期暴露于腐蚀性环境，强风与雨水、盐雾协同加速了结构锈蚀和承载能力下降，更容易造成结构失效的损坏情况。位于同一地点的 2 座厂房式大棚，

其中一座大棚的支撑结构锈蚀后被风吹折断,同时,柱脚节点与地面的连接件不牢,整体结构出现坍塌,导致棚内车辆和设备被全部压埋;而另一座大棚则由于屋顶和支撑结构连接承载力较高,未出现灾损,如图36所示。



a 屋顶全部损坏 b 屋顶局部损坏

图35 工业厂房屋顶风灾致损的情况对比



a 大棚完全坍塌 b 大棚未出现灾损

图36 厂房式大棚风灾致损的情况对比

(2)膜结构调查情况与分析

膜结构建筑因造型轻盈、形式多样,广泛应用于滨海餐厅、休闲广场、商业中心与体育场馆等开放式建筑中。本研究选取了海口市、文昌市和临高县的12个膜结构建筑,调查统计结果如表11所示。由表11可知,未见损坏的3处膜结构均位于较为内陆地区或建筑外围设有遮挡保护;相比之下,临海区域膜结构破坏更为严重。

表11 不同项目(点位)膜结构灾损的情况分析 单位:个

调查项目(点位)	风灾致损等级				合计
	未见损坏	局部损坏	严重损坏	结构失效	
海口市某近海税务局建筑	0	1	0	0	1
海口市某旅游度假区	0	1	1	0	2
海口市某近海医院园区	1	1	0	0	2
海口市某商业购物城	1	1	1	0	3
海口市某近海大型体育场	0	0	1	0	1
海口市某滨海餐厅	0	1	0	0	1
临高县某滨海餐厅	0	0	0	1	1
文昌市某产业园区	0	0	1	0	1
总计	2	5	4	1	12

采用半球形建筑设计的海口湾边缘某高档餐厅,四周环绕的玻璃因强风和海浪冲击出现大面积破

碎，餐厅的膜结构因失去玻璃的保护暴露在强风与海浪下，出现撕裂和变形。临高县某滨海餐厅采用了相似建筑形式，其采用的轻钢支撑结构在超强台风“摩羯”作用下出现结构失效和整体失稳的破坏情况，如图 37 所示。



a 灾损现场海口湾边缘某高档餐厅　　b 临高县某滨海餐厅的灾损现场

图 37 滨海餐厅膜结构风灾致损情况

(3)高耸结构调查情况与分析

本研究重点考察了文昌市和海口市的旅游观光塔和输电塔及烟囱等高耸结构。分析表明，该类结构的破坏程度与超强台风“摩羯”路径存在明显关联。位于超强台风“摩羯”登陆中心翁田镇的某输电塔发生拦腰折断的严重破坏，如图 38a 所示；随着超强台风“摩羯”推进至海口市，风力虽有所减弱，但仍造成海口市某产业园区内烟囱出现整体失稳，如图 38b 所示；某近海旅游观光塔顶层观光玻璃产生轻微裂痕等局部损伤，如图 38c 所示。



a 文昌市翁田镇电塔折断　　b 海口市某烟囱整体失稳　　c 海口市旅游观光塔局部破坏

图 38 高耸结构风灾的致损情况

(4)高层建筑调查情况与分析

根据对 81 个高层建筑项目的灾后调查，不同使用功能的高层建筑风灾损伤情况统计如表 12 所示。从整体受灾情况来看，高层建筑主体结构基本保持完好，破坏形式主要集中于外围护系统，典型现象包括外墙饰面脱落、屋面结构破坏以及门窗玻璃碎裂等，如图 39 所示。此外，受鞭鞘效应影响，部分高层建筑顶部突出的附属结构受损较为严重。例如，临高县某商业综合体顶部女儿墙在超强台风“摩羯”作用下发生整体坍塌，对周边行人安全构成严重威胁。

表 12 不同项目(点位)高层建筑的灾损情况分析　　单位：个

高层建筑类型	风灾致损等级				合计
	未见损坏	局部损坏	严重损坏	结构失效	
酒店	3	4	4	0	11
商业综合体	6	8	4	0	18
写字楼	4	16	4	0	24
住宅建筑	7	17	4	0	28
总计	20	45	16	0	81



a 玻璃幕墙大片脱落 b 屋面瓦局部破坏 c 门窗局部脱落

图39 高层建筑风灾的致损情况

4.4 临时建筑 近年来,海南岛重大在建项目数量从129个增加至554个,增幅约329.5%;总投资额由782亿元增长至1 647亿元,增幅达110.6%。在此背景下,临时建筑作为在建项目的现场指挥部与人员宿舍,为建设项目的高质量推进提供了必要的空间保障。同时,凭借其经济性、灵活性、形式多样与建设高效等特点,临时建筑也被广泛应用于文旅项目、林下经济及农渔养殖等领域。例如,海口白沙门文创市集等大型文旅项目已成为重要的旅游吸引节点,充分体现了临时建筑在功能承载与场景营造方面的潜力。总体来看,临时建筑以其"量大面广"的分布特征,已成为支撑海南岛基础设施建设快速推进的关键要素之一。

依据JGJ/T 188—2019《临时性建筑应用技术标准》规定,临时建筑结构主体抗风等级,通常按不低于8级风设计(20.8 m·s^{-1}),沿海地区需提高至10~12级。围护结构如彩钢夹芯板的板材抗风压性能需大于3.0 kPa(相当于12级台风),但是海南岛台风发生频率和强度均远超内陆省份,设计标准常难以应对实际风灾。2014年的"威马逊"台风和2024年超强台风"摩羯"都达到了17级以上,近15年遭遇12级以上台风的概率也达到了年均0.6次,超强台风对海南岛临时建筑造成了严峻的挑战,12级以上风力圈范围内的临时建筑普遍受到不同程度的破坏。

对于临时建筑而言,台风过境时产生的强风是其最主要的致灾因子,且风眼附近区域的风速通常最大。为此,本研究主要沿超强台风"摩羯"的风眼路径,在12级风圈所覆盖的海口市、文昌市、临高县和澄迈县等范围内,选取了17个具有代表性的调研点位,共采集141栋临时建筑作为研究样本,选点涵盖了海边空旷地区、内陆开阔地带、乡村密林区域以及城市建筑密集区等不同类型的地理环境,如图40所示。

临时建筑因其设计使用年限较短,且通常基于成本控制与施工效率考量,广泛采用轻型材料与装配式结构体系。此类建筑的结构主体及围护系统在抗震与抗风方面的设防等级普遍较低,导致其整体稳定性难以长期适应热带海岛地区的特殊气候条件。另一方面,超强台风"摩羯"中心最大风力达17级,而海南岛作为典型的风灾高风险区域,现行临时建筑的抗风设计标准通常仅为12级,远低于实际极端风荷载的破坏能力,极易导致其应灾能力严重不足,最终在超强台风"摩羯"作用下出现大范围的损毁现象。

4.4.1 *破坏整体情况* 本研究所涵盖的临时建筑功能类型主要包括:工地临时项目部办公区及工棚、临时商业设施、工农业生产大棚、渔业临时设施、教学实训基地以及停车楼等市政服务设施。在结构载体方面,主要包括轻型钢结构、活动板房、打包箱与集装箱等类型,如图41所示。

轻型钢结构多采用冷弯薄壁型钢作为主骨架,节点以螺栓连接或焊接方式固定,围护结构常采用彩钢夹芯板或金属压型板,具有自重轻、延性低的特点。活动板房则以预制墙板与钢框架组合为主要形式,基础多采用简易锚固或配重块方式处理。打包箱与集装箱建筑以标准模块为基本单元,通过横向或竖向拼接形成使用空间,其整体刚度主要依赖于角件连接及箱体之间的拼装性能。

根据破坏形态与部位的不同,将临时建筑单体的破坏类型划分为主体结构破坏、围护结构破坏、室内陈设破坏及设备设施破坏4类,并依据破坏严重程度划分为完全失效、严重破坏、局部破坏和未见破坏4个等级。本研究涉及的临时建筑基本信息及具体破坏情况详如表13所示,临时建筑不同破坏类型的4种破坏等级占比如表14所示。调查结果表明,围护结构破坏是临时建筑中最普遍的破坏形式,

90% 以上的样本均出现不同程度的围护系统损伤。但是建筑主体结构、室内陈设和设备设施方面的破坏发生频率较低，半数以上建筑在这些方面未观测到明显损伤；即便发生破坏，其程度也普遍较轻。此外，空间分布上距离超强台风“摩羯”中心路径越近的临时建筑，其受损程度通常更为严重；而在相同条件下，建筑高度相对较低的临时建筑表现出更强的抗风性能，受损程度相对较轻。

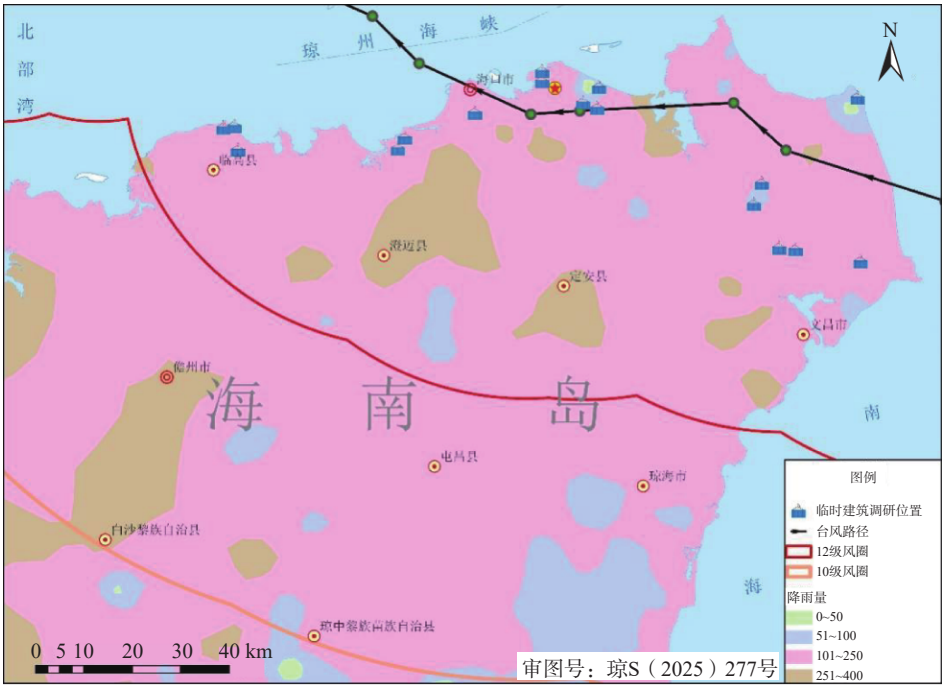


图 40　临时建筑调研位置



a　轻型钢结构



b　活动板房



c　打包箱



d　集装箱

图 41　临时建筑的载体类型

表 13　所调研的临时建筑基本情况一览表　　单位：个

序号	名称	地理坐标	建筑结构类型	建筑单体总数	主体结构破坏				围护结构破坏				室内陈设破坏				设备设施破坏			
					完全失效	严重破坏	局部破坏	未见破坏	完全失效	严重破坏	局部破坏	未见破坏	完全失效	严重破坏	局部破坏	未见破坏	完全失效	严重破坏	局部破坏	未见破坏
1	海口市白沙门公园夜市	110° 12′ E 20° 02′ N	a,b,c	45	3	2	11	29	8	8	23	6	4	5	16	20	6	8	11	20
2	海南大学土木工程实训基地	110° 11′ E 20° 02′ N	a,c,d	12	1	1	2	8	10	1	1	0	1	1	4	6	0	1	6	5
3	文昌市航天城某项目部	110° 33′ E 19° 22′ N	a,b,d	5	0	2	1	2	1	2	1	1	1	1	2	1	0	1	3	1
4	海口市某住宅小区项目部	110° 24′E 20° 00′N	a,c,d	7	1	3	2	1	3	3	1	0	3	3	1	0	3	3	1	0
5	海口市江东新区某项目部	110° 28′E 20° 00′N	b	8	4	3	1	0	3	3	2	0	6	2	0	0	5	3	0	0
6	澄迈县海南津桓建材科技大棚	110° 24′E 20° 02′N	a,c	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
7	临高县汇元文澜世家工棚	109° 43′E 19° 57′N	a,d	7	2	0	5	0	2	3	2	0	2	0	5	0	2	0	3	2
8	临高县昌拱村口农贸市场	109° 04′E 20° 00′N	c	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1
9	文昌市抱罗镇竹仔山村农业养殖大棚	110°44′E 19°44′N	c	4	3	1	0	0	3	1	0	0	0	0	2	2	0	0	2	2
10	文昌市华侨路大豆培育厂	110°47′E 19°41′N	c	4	1	1	2	0	2	1	1	0	2	1	1	0	1	1	0	2
11	文昌市翁田镇湖心港虾苗养殖基地	110°56′E 20°01′N	c	24	1	2	0	21	12	6	4	2	0	0	0	24	0	0	0	24
12	文昌市潭牛镇罗非鱼渔场养殖基地	110°47′E 19°43′N	c	3	0	0	1	2	0	0	3	0	0	0	0	3	0	0	1	2
13	临高县长岛蓝湾项目部	109°43′E 20°00′N	b,d	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	3	0	0
14	澄迈县佳园杭萧钢构有限公司	110°02′E 19°56′N	c	2	0	0	1	1	2	0	0	0	2	0	0	0	2	0	0	0
15	文昌市海大生物科技有限公司工棚	110°26′E 19°29′N	b,c	5	0	1	1	3	2	2	1	0	0	0	1	4	0	0	2	3
16	海口市永泰花苑小区停车棚	110°14′E 20°01′N	c	2	0	0	0	2	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
17	海口市海南中箱装配式建筑科技有限公司生产基地	110°07′E 19°35′N	a,b,c	8	0	0	2	6	2	3	1	2	0	0	0	8	0	0	0	8

注: 结构形式: a打包箱; b集装箱; c轻型钢结构; d活动板房。

表 14　所调研的临时建筑在不同破坏类型下的 4 种破坏等级占比　　单位：%

破坏类型	破坏等级			
	完全失效	严重破坏	局部破坏	未见破坏
建筑结构破坏	11.7	10.3	24.5	53.5
围栏结构破坏	35.4	27.1	30.4	7.1
室内陈设破坏	14.9	12.1	22.7	50.3
设备设施破坏	13.7	14.4	20.4	51.5

4.4.2　临时建筑破坏特征分析

（1）强风致主体结构破坏灾损情况与分析

在本研究的临时建筑中，主体结构破坏程度较高的主要为轻型钢结构与活动板房。打包箱与集装箱建筑的主体结构虽亦有损伤，但多数表现为局部变形，未出现整体失效情况。

①轻型钢结构破坏特征　轻型钢结构临时建筑广泛用于工农业临时工棚、生产大棚以及文创市集中的小型剧场和露天遮阳棚等。其主体多采用小截面镀锌方钢管或圆钢管，并以 H 型和 C 型等型钢作为连接构件进行焊接，导致整体结构稳定性普遍偏低。在超强台风“摩羯”的影响下，此类结构损毁严重，主要破坏形式可归纳为 4 种：柱体截断引发的屋顶坍塌、结构整体倾斜变形、梁柱构件拉裂与变形和节点连接破坏，如图 42 所示。



a 柱体截断引发的屋顶坍塌　b 结构整体倾斜变形

c 梁柱构件拉裂与变形　d 节点连接破坏

图 42　轻型钢结构的破坏现场

②活动板房主体结构破坏特征　活动板房的主体结构通常采用轻型钢框架，常见体系为门式刚架，其梁柱连接主要有 2 种形式：型钢构件之间的满焊连接和承插连接（即 C 型钢地梁与立柱通过钢制连接件插接，并利用预设铆孔完成铆接）。该类结构梁柱构件普遍截面小、壁厚较薄，在侧向风荷载作用下易发生变形。同时，焊接区与铆接节点等连接部位常因锈蚀影响其可靠性，导致在强风作用下出现大面积损毁。按其损毁程度从重到轻划分，主要破坏模式包括：节点区域断裂与坍塌、结构层间断裂与错动、构

件局部断裂或损坏和梁柱弯曲与折损变形,如图43所示。



a 节点区域断裂与坍塌　b 结构层间断裂与错动



c 构件局部断裂或损坏　d 梁柱弯曲与折损变形

图43 活动板房主体结构的破坏特征

③打包箱与集装箱主体结构破坏特征　打包箱和集装箱属于模块化结构,其整体性能由单元模块骨架刚度和各模块单元之间的连接牢固性决定。打包箱顶板和底板一体成型工艺,角柱与上下板靠螺栓连接,形成模块骨架,各框架单元之间由角部8个穿孔螺栓连接,共同构成整体结构。本研究当中,打包箱与集装箱主体框架结构破坏的情况罕见,仅1处主体结构发生了梁下弯变形,其他案例未见破坏,箱体之间连接螺栓局部松动,但未影响整体稳定性,此类结构的主体表现出良好的完整性,如图44所示。



a 梁下弯变形　b 打包箱未破坏　c 集装箱未破坏

图44 打包箱与集装箱主体结构的破坏现场

(2)强风致围护结构破坏灾损情况与分析

围护结构在此次风灾中普遍遭受严重破坏,如图45所示。据统计,位于持续4 h以上12级强风风圈范围内时,常用的复合墙板围护体系大多失效。主要的破坏模式包括屋面与墙板的变形、撕裂乃至剥离以及门窗的位移、损坏等。其中,打包箱与活动板房的围护系统,因普遍采用抗风能力较弱的轻质板材,且板间连接多依赖于卡槽连接密封胶嵌缝等措施,缺少锚固和焊点加强,损毁尤为严重。相比之下,采用压型钢板并通过焊接或可靠机械连接(如利用压条对屋面板进行有效固定)的围护系统,其破坏程度相对较轻,多表现为局部损伤,如表15所示。



a 玻璃门窗 b 复合墙板 c 压型钢板复合板 d 定制金属板



e 轻质膜 f 临建门窗 g 大跨屋顶

图 45 围护结构的破坏现场

表 15 围护结构破坏特征及机理统计表

形式	破坏主要特征	破坏机理
玻璃门窗	玻璃门合页构件失效致使门扇掉落碎裂	拉剪破坏
	幕墙与结构框架脱离扭转或整体侧倾	撞击破坏
	被强风裹挟物击中发生破坏	
复合墙板	大面积失效脱离主体框架	变形脱离框架
	局部撕裂变形	连接构造的强度不足
		节点腐蚀
压型钢板复合板	墙身卷折、凹陷、变形、局部破损和断裂等	截面有效面积减小
		节点强度不足
定制金属板	未见失效情况	
	因风裹挟重物撞击凹陷	撞击破坏
轻质膜	材料在锚固节点处拉裂	膜材抗拉强度不足
	整体脱离结构框架	膜材与主体连接失效
临建门窗	门框和门板变形扭转脱落	密封材料老化
	窗户单独被异物击碎	局部应力集中
	窗户墙板脱离框架	撞击破坏
	窗户墙板整体移位破损	
大跨屋顶	顶部装饰面板脱落	连接强度不足
	隔热材料散落	
	局部破损撕裂	局部失效
	整体剥落	屋面厚度不足

玻璃幕墙等重型围护系统，在本次风灾中表现出良好的抗风性能，即便出现个别局部损坏，但多集中于隐框门等因构造或施工原因导致连接强度偏弱的细部节点。此种情况也不排除因为围护结构中轻质墙板首先被破坏，为强风创造了泄压通道而保全了幕墙等重型围护结构的可能性。

(3)强风及强降雨致建筑设施与室内陈设灾损情况与分析

台风引发的强风一旦侵入建筑围护结构，往往会对室内设备与陈设造成严重损坏。当围护结构发生

局部破坏甚至脱落时,室内受损情况主要为吊顶装饰材料脱落、灯具坠落损坏以及家具移位等。

临时建筑内部的设施设备,尤其是沿墙敷设的电力、空调及给水管网系统,受损较为集中,多数出现拉裂或折断情况。具体为电路系统断裂、开关插座脱落、主电缆外露以及空调室内外机发生坠落、倾覆、移位或进水,部分上水管线也被拉裂,如图46所示。



a 屋顶砸损破坏 b 墙板完全脱落

c 设施设备受损 d 结构整体倾覆

图46 设备设施受损示意图

相比之下,围护结构保持完整的建筑,室内陈设大多维持完好状态;而在围护结构发生局部破坏或完全失效的建筑中,室内陈设普遍出现压损、散落、浸水以及重物挤压造成的损坏,如图47所示。

4.5 农业温室建筑 作为中国重要的热带农业生产基地,海南岛的温室设施在反季节蔬菜种植、花卉培育与种苗繁殖等高附加值农业中具有不可替代的作用。但当前普遍采用的轻钢结构配合塑料薄膜或玻璃覆盖的建筑形式,在强风作用下易出现覆盖材料破损与结构整体失稳等问题,导致内部作物失去防护并遭受严重损失。据统计,本轮风灾中海南全省农作物受灾面积达940 km^2,其中成灾面积约519 km^2,绝收面积约297 km^2,减产约24.65万t,直接经济损失达31.74亿元。

本研究在12级风圈范围内选取了11个农业基地开展温室建筑灾损调研(如图48所示)。其中,文昌市的锯齿大棚、升降大棚、文昌大棚1期及岛东林场点位于17级强风圈内;澄迈县永发菜篮子基地、海口市马坡洋村附近、三门坡谷桥村海口菜篮子基地、海口铁新线、文昌市西宅水库附近、公坡水北村水北小学南部、苑东路及海南大学温室基地则位于12级风圈范围内。

农业温室建筑高度通常控制在2~3 m,低于普通单层民居。该类建筑多建于农田等开阔地带,近地面风场受遮挡较少,风流效应显著,而且普遍采用的轻钢–覆膜(或玻璃)结构体系,抗风能力较弱。在强风荷载下极易发生覆盖材料破损与主体结构失稳,最终导致农作物暴露于灾害环境,损失严重。

基于风灾实地调研,农业温室建筑的风致破坏场景可归纳为以下方面:

(1)围护结构材料破坏

农业温室的围护材料主要包括覆盖于主体承重结构上的塑料薄膜或玻璃。塑料薄膜多采用压条和

绑带等简易机械方式与支撑结构连接。在强风反复作用下，固定点周边易形成应力集中，造成薄膜大面积撕裂或整体掀落。玻璃材料虽具有较高刚度，但由于温室建筑跨度大、迎风面积广，所受风压显著，易发生脆性破裂，或由于与框架连接部位松动、损坏而导致脱落，如图 49 所示。



a 陈设压损　　b 家具散落

c 家具浸水　　d 重物砸损

图 47 室内陈设破坏示意图

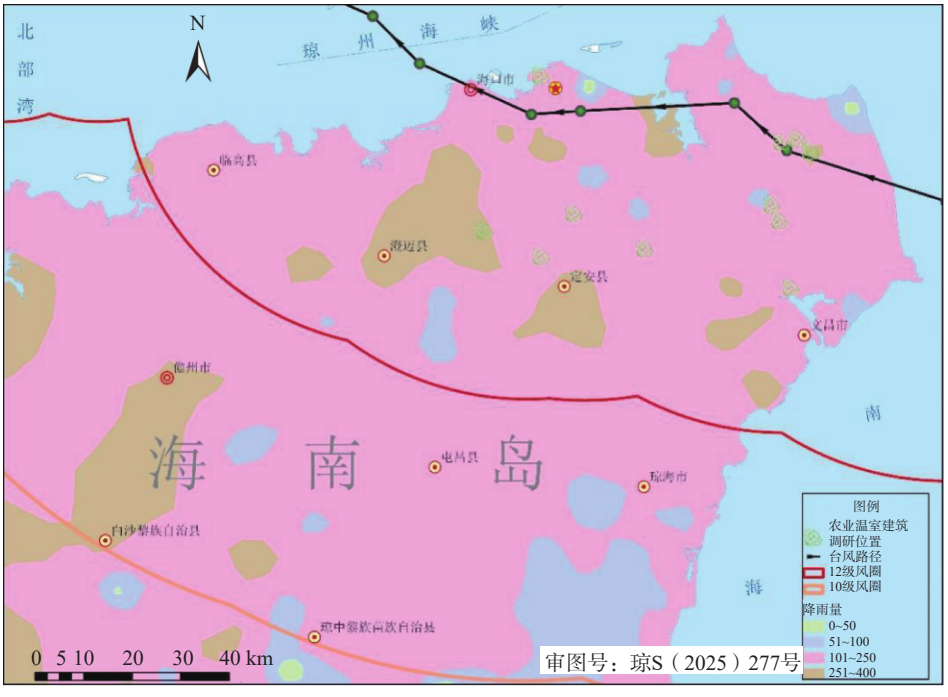


图 48 农业温室调研位置



a 塑料薄膜破坏 b 玻璃覆顶破坏

图49 农业温室建筑的破坏现场

(2)承重构件受损

农业温室建筑在设计过程中通常未计入脉动风压影响,其基本风压取值基于30年设计基准期确定,因此在荷载设计标准上低于普通房屋建筑。在超强台风"摩羯"作用下,若顶部覆膜未发生破坏,主体结构将承受远超其材料承载极限的风荷载,从而引发多种破坏模式,包括拱架杆件侧向弯曲、螺栓连接部位疲劳失效和焊接节点处微观裂纹扩展并断裂等。相反,若覆膜在风荷载作用下迅速完全破坏,结构所受风荷载将显著减小,主体承重体系反而可能基本保持完好,如图49a所示。

(3)整体倒塌

在主体结构已发生损伤的基础上,农业温室建筑可能因风荷载作用方向、节点连接方式及基础稳定性等因素进一步发生整体失稳甚至倒塌。在竖向风荷载作用下,若拱杆与基础的连接强度不足,或立柱抗压承载力偏低,可能引发局部屈曲,进而导致整体结构失稳。在水平风荷载作用下,温室顶部及角区因气流分离效应产生显著风吸力,形成向上的升力。若温室顶部与侧山墙之间缺乏有效的抗拔措施(如未设置抗拔锚栓或拉结系统),且基础埋深不足,风荷载所产生的倾覆力矩可能超过结构自重的抗倾覆能力,最终导致结构整体倾覆。在极端风荷载条件下,温室结构中的薄弱环节(如焊接质量不良、螺栓连接松动或杆件强度不足)可能首先失效,进而触发连续性倒塌。

5 典型市政基础设施受灾情况

根据功能与结构特征,市政基础设施可分为交通设施、供排水设施、能源设施、环卫设施、园林绿化设施、综合类设施、信息通信设施及其他市政设施。本研究以超强台风"摩羯"过境海南岛期间12级风圈范围内的道路基础设施、光伏发电站、风力发电场及电力通信设施为主要调研对象,旨在掌握其受灾情况并分析风灾作用机理。

如前所述,直接风压荷载对地下或隐蔽结构基本不产生影响,但对地面结构及设施,其影响程度则随高度增加而显著增强。因此,本研究未将埋地式供排水设施纳入研究范围。此外,环卫设施通常高度较低,且其倾覆所造成的直接经济损失相对有限,故亦未列为本研究重点调研对象。

5.1 道路基础设施 道路在保障人民基本生产生活、军事运输及促进区域经济发展中具有关键作用。在海南岛,公路货运量与旅客周转量长期占据总运输规模的近50%。超强台风"摩羯"通过直接风压、风雨耦合及次生风暴潮等多种致灾机制,对道路基础设施造成显著冲击,引发边坡失稳、行道树倒伏、路面破坏与路基沉陷等一系列问题,严重影响行车安全与通行效率。因此,灾后救援工作的首要任务通常是恢复交通功能。

文昌市和海口市等市县作为超强台风"摩羯"风眼直接穿行的区域,承受了最强的风压荷载;临高县和五指山市等市县受外围风圈与螺旋雨带叠加影响,降雨具有历时久、范围广的特点,导致道路设施在风雨耦合作用下出现复合型破坏。基于上述灾损特征,本研究针对超强台风"摩羯"对海南岛道路基础设施的影响,选取文昌市、海口市、临高县和五指山市等市县共47个典型路段作为调研对象,涵盖沿海、城区及山区等不同地理环境类型,如图50所示。



图 50　道路基础设施调研位置

在道路基础设施的风灾响应中，致灾因素主要分为 2 类：强风和强降雨。除了强大的风压荷载外，道路基础设施对极端降雨敏感性也较高。分别从强风与强降雨 2 个维度，分析超强台风“摩羯”对道路基础设施的破坏特征与作用机理。

5.1.1　强风致道路基础设施灾损情况与分析　风荷载是台风作用于建筑物的最直接形式。在大气边界层内，风速通常随高度增加而增大。由于道路的路基和路面等主体结构紧贴地面，所受风荷载影响相对较小。调研结果表明，在单纯风荷载作用下，高速公路路基路面结构一般无明显破坏；城市道路因与行道树距离较近，树木倒伏时常因树根移动牵拉路基，对其稳定性造成直接影响，多处可见明显损坏。此外，数月后在海口和文昌等市县的城市道路中仍观察到多处明显沉陷现象。另一方面，电线杆、路灯和广告牌等突出于地面的道路附属设施，由于迎风面积相对较大，受风荷载影响较为显著。因此，本研究主要依据道路附属设施的类型，对其破坏状况及成因进行系统分析。

(1)行道树

行道树是道路基础设施中兼具生态与服务功能的特殊组成部分，其受损是台风导致道路及其附属设施灾害的显著特征之一，主要表现为断枝、折干、倒伏和拔根等形式。2014 年第 9 号超强台风“威马逊”造成海口市约 9.65 万株树木倒伏或折断；2018 年第 22 号超强台风“山竹”导致深圳市约 11 680 株树木倒伏，约 4 241 株树枝损毁；超强台风“摩羯”过境后海口市道路状况如图 51 所示。由图 51 可知，超强台风“摩羯”造成海口市树木严重倒伏。行道树破坏常引发供电与通信中断，损毁道路主体结构，严重影响社会正常秩序。例如，海口市和文昌市等中心城区曾连续 3 ~ 5 d 基本处于瘫痪状态，乡镇和农村地区最长达 23 d 未能恢复供电。此外，处理受损树木过程中产生的碳排放也损害了城市的生态韧性与安全格局。

强风是导致树木破坏的主要因素，不同道路环境下树木表现出差异化的灾害形态与致灾机制。例如，文昌市沿海防风林带中超过 90% 的林木在强风作用下发生“拦腰折断”，如图 52a 所示。典型海防林树种木麻黄在超强台风“摩羯”中易出现倒伏和折断，其原因在于其叶片不易脱落，持续维持较大迎风面积，加之其浅根系与宽大树冠的结构特点，使其难以抵抗强风引起的倾覆力矩。若将树木简化为底部固定的悬臂梁(忽略根茎拔起破坏)，风力所产生的倾覆力矩与迎风面积成正比。当该力矩超过根系−土壤系统的抗倾覆阈值时，树木因锚固力不足而发生倒伏。同时，横向风推力在树干与树枝连接处和树干基部等部位产生剪切应力，若超过材料抗剪强度则引发风折。在高速公路沿线，由于地势平坦开阔，风场稳

定持续,树木缺乏遮挡,直接承受强风水平推力。以海南岛环岛S206公路为例,椰子树大多未受明显影响,而松树则出现倒伏与折断(如图52b所示)。两者在相同风场环境中抗风性能的差异主要源于根系分布与树形结构:椰子树茎干粗壮直立,根系深入土层,稳定性较好;松树则通常根系较浅,树形高大且枝叶茂密,受风面积大,更易受损。在城市道路环境中,建筑群引起的狭管效应可使局部风速增强20%~30%,风道汇聚效应进一步增大风速,造成树木大量受损(如图52c所示)。因此,行道树在超强台风"摩羯"中的破坏程度与模式主要受道路地理环境与树木自身结构特征的影响。



图51 超强台风"摩羯"过境后海口市道路状况



a 防风林 b 高速公路行道树 c 城市道路行道树

图52 行道树风致破坏

行道树受风力连根拔起后,常引发严重的路基与路面损毁,如图53所示。从根土相互作用机制来看,树木受风载时,根系与土体形成复杂力学耦合体系:背风面根系承受弯矩与压力,迎风面土体因根系上拔而产生拉拔与剪切作用。该机制类似于钢筋混凝土梁中钢筋的加劲作用,即根系通过摩擦与锚固将风荷载传递至土体,形成协同受力体系[87]。但在超强台风"摩羯"作用下,若根系锚固能力不足或土壤因降雨饱和导致抗剪强度下降,该体系易迅速失效。此外,超强台风"摩羯"带来的强降雨渗入路基,造成土颗粒流失与基础掏空,进一步削弱根土界面黏结力。由此可见,"树倒-路损"灾害链体现了风与雨耦合作用下多灾种叠加的破坏特征。



图53 树木风害致道路结构受损

5.1.2 配电线路电杆 配电线路电杆既是道路电力供应的基础设施,也是道路安全运行的功能节点,其

可靠性直接影响道路服务能力与公共安全。受超强台风“摩羯”影响，海南岛范围内中低压配电杆塔受损数量达到 61 487 座，受损线路长达 14 203 km。相较于同为超强台风级别的“威马逊”（致海南岛断杆 9 020 座，倒、斜杆 14 324 座）损失更为突出[88]。

强风力作用下，配电线路电杆出现倾斜、倒伏及断杆等灾害，其致灾机理与结构特性、设计缺陷及荷载特性密切相关。电杆埋深不足导致抗倾覆能力低下，常规埋深设计难以承受水平推力产生的倾覆力矩，易引发整体倾斜或倒伏。电杆自身强度不足是断杆的直接原因，混凝土电杆材质抗风性能有限，脉动风荷载下杆身承受高频弯曲应力，超过强度极限时会从薄弱处断裂，甚至出现混凝土剥落、钢筋裸露（如图 54 所示）。现行设计规范基于良态风荷载采用静力等效原则简化分析，忽略台风脉动风的动力放大效应，导致计算风荷载小于实际荷载，结构极端荷载冗余度不足[89]。此外，电杆倒塌还易通过导线拉力引发“串倒”连锁反应，对道路路基产生直接或间接破坏。综上所述，电杆的风致破坏是结构固有缺陷与设计标准不足的结果，需从提升结构强度、修订设计规范及建立监测预警机制等方面改进。



a 倒杆 b 断杆

图 54 电线杆风致破坏

5.1.3 其余道路设施 超强台风“摩羯”导致海南岛范围内 772 个路口信号灯停用，1 346 台高速公路监控设备失效，以及约 17.4 万 m 道路护栏与 3 985 个交通标志牌损毁。道路与桥梁护栏出现大范围弯曲变形或断裂倒塌，如图 55 所示。其主要原因：在强风长时间作用下，连接部位的构件易发生疲劳损伤，加之其自身结构强度不足，导致局部破坏后引发连续的链式倒塌效应。道路指示牌（杆）与路灯的支撑柱通常通过地脚螺栓或直接嵌入基础的方式与地基连接（如图 56 和图 57 所示）。对于采用地脚螺栓的连接方式，在周期性风荷载反复作用下，螺栓可能发生松动，从而削弱灯柱的整体承载能力，最终导致结构破坏。



a 道路护栏变形 b 桥梁护栏吹毁

图 55 护栏风致破坏



图 56 道路指示牌倒塌



图 57 路灯风致破坏

5.1.4 强降雨致道路基础设施灾损情况与分析 超强台风“摩羯”伴随的强降雨常对海岛地区道路基础设施造成严重破坏。例如,在五指山市附近区域,多处公路出现显著边坡失稳与路基塌陷;同年台风“潭美”引发的公路边坡滑坡甚至导致严重人员伤亡。

中国台风主要登陆区域包括广东、台湾、海南、福建和浙江等东南沿海省份。其中,广东省最大降雨量记录为2024年台风“格美”期间揭阳市揭东区玉湖镇的645.2 mm;福建省最高为2023年台风“海葵”期间仓山区盖山镇的548.9 mm;浙江省最高为2024年台风“康妮”期间宁波市镇海区的394.2 mm。2024年台风“潭美”在琼海市会山镇累计降雨量达1 062.8 mm,表明海南省琼中黎族苗族自治县周边是中国台风降雨量最为集中的区域之一。

强降雨引发路基水毁是典型破坏形式。白沙黎族自治县361国道某段发生明显路基沉降(如图58所示),道路一侧下沉,路面出现断裂与错位。经测量,边缘分离高度约95 cm,宽度约55 cm,主要为路基被雨水掏空所致。图59所示路段破坏更为严重,损毁长度达17.6 m,深度9.5 m,掏空进深26.0 cm,反映长时间暴雨渗入路基导致土体强度显著下降并最终坍塌。琼中G9811高速公路某段发生边坡滑坡(如图60所示)。该区域主要土壤类型为砖红壤与赤红壤,质地涵盖砂质壤土至黏土,渗透系数约在10^{-3} ~ 10^{-6} cm·s^{-1}范围内。降雨入渗不仅增加边坡土体含水量,还形成地表径流对其坡面产生冲刷,共同加剧边坡失稳风险。

此外,超强台风“摩羯”降雨叠加风暴潮增水,导致海口、临高和文昌等市县出现严重道路积水,影响民众与车辆通行(如图61和图62所示)。道路排水设施失效的主要原因在于降雨强度超出其设计排水能力。以海口市为例,大部分区域排水管网按1 ~ 2年一遇暴雨重现期设计(对应小时雨强35 ~ 50 mm),而超强台风“摩羯”期间局部地区6 h降雨量达300 mm,远超排水系统承载能力,导致多处市政道路积水。同时,在多雨条件下,排水设施失效与道路结构安全问题相互交织。例如,海口市人民大道多次因排

水设施损坏引发路面塌陷，近年来约每 5 年需进行一次大修。2010 年 8 月，降雨导致该路段绿化带发生约 2.5 m 深的塌陷，并波及辅道路基；2012 年，污水主管道损坏与海水倒灌共同造成约 108 m^2 路基土被掏空；2025 年初，海口市投资 8.42 亿元实施排水管网改造，人民大道相关工程为其重要组成部分。



图 58　路基沉降



图 59　路基坍塌



图 60　道路边坡滑坡

5.2　电力通信设施　在全球气候变化加剧、极端天气事件频发的背景下，电力通信设施作为维系社会经济运行、民生保障和应急响应的重要基础设施，其灾害韧性至关重要。超强台风“摩羯”对海南岛的电力与通信系统造成了系统性打击：不仅引发全省范围大面积停电和通信基站大规模退服，更导致文昌市等核心灾区的断网、断电比例接近 90%，部分区域的应急救援“生命线”陷入瘫痪，严重制约灾情评估与救援

行动的有效开展。



图61 海口市道路积水



图62 临高县道路积水

为系统探究超强台风“摩羯”对电力通信设施的破坏规律,本研究在灾后实地调查设计中围绕以下2个目标:厘清不同类型电力通信设施的风致破坏特征与致灾机理,重点调查分析电线杆、电线电缆、通信基站、输电塔和配电箱等典型设施;明确超强台风“摩羯”强度与各类设施破坏程度之间的关联性。因此,依据超强台风“摩羯”行进路径,选取4个市县进行对比分析,其中,将位于超强台风“摩羯”路径中心线附近,承受较强风力(最大17级)的文昌市、海口市和临高县作为强风影响代表区;将距离路径中心线110 km以外,承受风力相对较弱(最大10级)的定安县作为参照区域。在实地调查中,研究团队共深入17个典型受灾点,累计采集并记录了超过200项受损设施的详细数据。超强台风“摩羯”路径及调查区域分布如图63所示。



图63 电力通信设施调研位置

5.2.1 受损设施类型及破坏等级分类

(1)按受损设施类型分类

电力通信设施在结构组成与破坏特征方面具有高度多样性。为便于系统开展研究分析,本研究依据

设施的主体结构形态，将其划分为杆塔类、箱体类和线缆类 3 大类型，具体如下：

①杆塔类设施：该类设施的主体结构为高耸型构筑物，结构特征以竖向维度为主，具有明显的离地高度。主要包括电线杆、通信杆和路灯等杆形结构，以及通信基站和输电塔等塔式结构。

②箱体类设施：该类设施通常具有封闭或半封闭的外壳结构，内部一般安装有电气设备或控制系统。主要包括配电箱、变压器及充电桩等设备。

③线缆类设施：该类设施几何形态呈柔性线状，用于长距离能量传输或信息传递，主要包括电力输配中所用的电线、电缆以及通信网络中使用的光缆与光纤。

（2）按破坏等级划分

调查结果显示，不同区域和不同类型的电力通信设施在超强台风“摩羯”灾害中的破坏程度存在差异。目前，尚无专门针对电力通信设施破坏等级划分的相关标准，因此参考现行国家标准 GB/T 24335—2009《建（构）筑物地震破坏等级划分》[90]，本研究对受损设施的破坏等级进行了划分，将受损设施的破坏等级按破坏程度划分为以下 3 类，如图 64 所示。



a 轻微破坏　b 中度破坏　c 严重破坏

图 64 破坏等级划分（以电线杆为例）

①轻微破坏　设施主体结构基本完好，仅附属构件出现轻微变形、松动或错位。设施功能基本不受影响，结构稳定性未见明显变化。此类破坏无需紧急处理，或在短时间内即可修复至完好状态。

②中度破坏　设施的组成部件或局部结构区域出现损坏、变形、松动或功能异常。主体结构尚存，整体稳定性未完全丧失。此类破坏可能导致设施性能下降或部分功能中断，并存在进一步恶化为严重破坏的风险。通常可通过紧急维修、部件更换或局部加固等方式恢复功能。

③严重破坏　设施主体结构发生严重变形、失稳，甚至出现倒塌、折断或解体等现象，导致结构完整性严重受损。此类破坏意味着设施功能大部分或完全丧失，或因修复成本过高而需整体更换。

5.2.2 灾损分析与结果

（1）破坏等级与受损设施类型的相关性分析

①破坏特征分析　依据上述建立的破坏等级评估标准，研究团队采用人工方式，对现场收集到的受损构件样本逐个完成等级判定与分类，同时详细记录了各类受损构件样本在不同损伤等级下的数量占比情况。具体统计结果如表 16 所示。其中，杆塔类设施的破坏形式以中度破坏为主（50.1%），严重破坏（30.2%）次之。线缆类设施的受损程度以严重破坏为主（60.2%），而中度至严重破坏的比例合计接近 90%。相比之下，箱体类设施的受损情况则相对轻微，其破坏等级主要集中于轻度（39.2%）至中度破坏（50.1%），两者占比合计超过了该类别总数的 90%。

表 16 电力通信设施各类型破坏等级统计　单位：%

电力通信设施分类	轻微破坏	中度破坏	严重破坏
杆塔类	19.7	50.1	30.2
箱体类	39.2	51.1	9.7
线缆类	11.3	28.5	60.2

电力通信设施的破坏特征具体表现为:杆件类设施中度破坏的典型特征表现为结构倾斜(如图65a所示),严重破坏表现为结构倒塌或折断(如图65b所示);塔类设施中度破坏特征主要表现为设备连接件松动,以及塔体上部结构(如塔尖、平台或附属设施)的局部变形或损坏(如图65c所示);箱体类设施的中度破坏特征表现为外壳局部变形或脱落,进而导致内部元件受潮或浸水(如图65d所示);线缆类设施的中度破坏的典型特征为部分绝缘层破损或脱落,致使线芯暴露(如图65e所示),而严重破坏主要表现为线缆大面积断裂、下坠,或者沿敷设路径发生整体性坍塌及脱离支撑(如图65f所示)。



a 通信杆倾斜



b 路灯折断



c 输电塔局部变形



d 配电箱箱门脱落



e 电线保护层脱落



f 电缆整体坍塌

图65 电力通信设施典型破坏特征

②结果分析 调研结果表明,杆塔类与线缆类设施因其高耸或长距离悬挂的线性结构特征,长期大面积直接暴露于外部环境。同时,两者之间存在较强的物理依存关系,杆塔的倾斜或倒塌极易引发线缆的连锁性坍塌,结构上的脆弱性与功能上的联动性,使得这2类设施的损坏程度与中、重度破坏等级之间呈现出显著的正相关性。相比之下,箱体类设施在设计上以保护内部元件为主要目的,结构更为紧凑坚固,整体发生结构性坍塌的概率较低,其损坏程度主要集中在轻微至中度破坏范围,与严重破坏等级则表现出显著的负相关关系。因此,电力通信设施在结构形态与系统功能方面的根本差异,决定了其在灾害作用下的主要破坏模式及等级分布特征存在明显区别。

(2)破坏等级与设施所处受灾区域的相关性分析

①破坏特征分析　由于中度和重度破坏等级对电力通信系统的功能完整性与运行稳定性构成最为直接和严重的威胁，是灾后应急抢险与恢复工作的关键对象。因此，本研究选取了中度和重度破坏作为分析重点，中度和重度破坏等级的电力通信设施在 2 大受灾区域中的分布比例如表 17 所示。由表 17 可知，不同类型电力通信设施在不同受灾区域内的中、重度破坏（包括中度破坏与严重破坏）占比存在明显差异。具体而言，杆塔类设施的中、重度破坏绝大多数（超过 85%）集中于核心影响区域。与之相比，箱体类与线缆类设施的中、重度破坏在区域间分布相对均匀。尽管箱体类与线缆类设施在 2 个区域的中、重度破坏占比相近，其破坏程度却存在本质区别：箱体类设施在 2 个区域均以中度破坏为主，而线缆类设施在 2 个区域中均表现为严重破坏为主。3 类设施在核心与外围影响区域中的破坏程度对比如图 66 所示。

表 17　不同受灾区域各类型电力通信设施中、重度破坏统计　　单位：%

受灾区域	杆塔类	箱体类	线缆类
核心影响区域	85.3	56.1	59.4
外围影响区域	14.7	43.9	40.6



a　核心影响区域受损设施



b　外围影响区域受损设施

图 66　不同受灾区域下电力通信设施的破坏程度对比

②结果分析　调研结果表明，不同类型电力通信设施的破坏程度与所处受灾区域之间的相关性存在显著差异。具体而言，杆塔类设施的破坏程度与其所处受灾区域呈显著相关性，说明该类设施的结构性损坏与超强台风“摩羯”峰值强度直接相关。相比之下，箱体类和线缆类设施的破坏程度与受灾区域的相关性较弱，且表现出更为复杂的破坏特征。这 2 类设施的中、重度破坏在空间分布上较为均匀，表明其在整体受灾范围内普遍易损，超强台风“摩羯”强度并非其破坏程度的主要决定因素。因此，杆塔类设施的损毁情况可直接反映灾害的核心强度；对于箱体与线缆类设施，其固有的结构脆弱性与典型的失效模式是导致破坏的主因。相比之下，区域超强台风“摩羯”强度的影响则居于次要地位。

5.3　光伏发电站　为评估超强台风“摩羯”对光伏发电站的影响，研究团队依据其 12 ~ 17 级风圈范围，确定了 4 个调研区域，下设 32 个调研地点，具体如图 67 所示。区域的设置考虑了与超强台风“摩羯”中心的相对位置：区域 1 最为接近登陆点；区域 2 的布局与超强台风“摩羯”中心路径基本吻合；区域 3 和 4 则位于相对远离超强台风“摩羯”中心的区域。调研工作覆盖海南省文昌市翁田镇、海口市多个辖区（美兰区、

秀英区和琼山区)、澄迈县、屯昌县及周边光伏发电站,共对35个光伏阵列的受灾情况进行现场调研,光伏发电站破坏现场如图68所示。

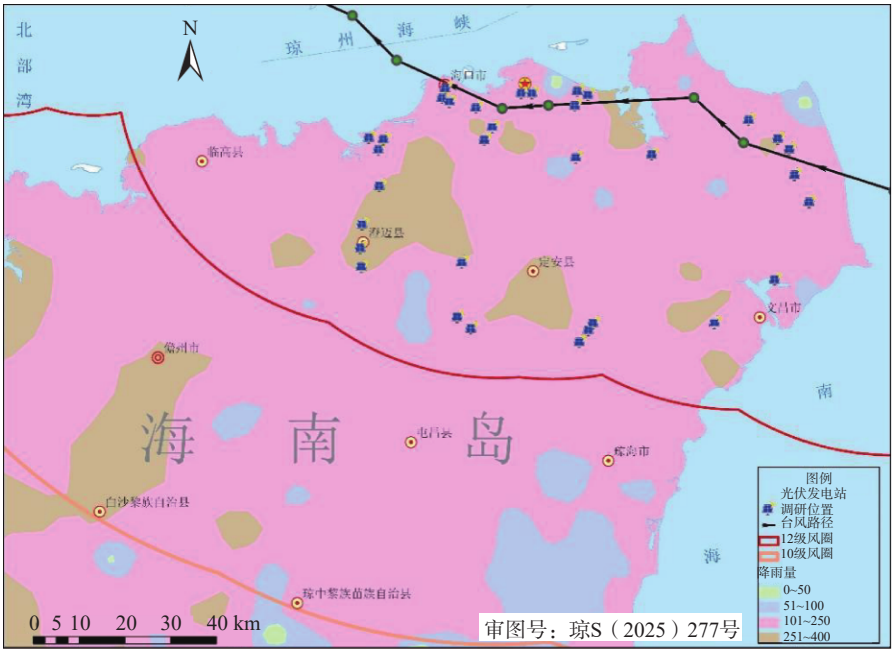


图67 光伏发电站受灾区域调研位置



a 基本完好 b 轻微破坏

c 中等破坏 d 严重破坏

图68 不同受灾区域下光伏发电站的破坏现场

5.3.1 结构破坏等级 本次受灾光伏阵列按安装形式可分为以下几类:地面光伏阵列(包括柔性支架1个、单列单坡固定支架16个)、屋面光伏阵列(包括双列单坡固定支架,其中支架高度在1.8 m及以上8个、1.8 m以下4个,平行于屋面坡度的附加式屋面光伏5个)以及水上漂浮式光伏电站1个。

为合理评估灾害损失，参考土木工程结构风灾易损性评估的相关研究[66−67]，依据受损光伏板数量占总数的比例，将光伏阵列的破坏等级划分为 4 个级别：基本完好（0 ~ 5%）、轻微破坏（6% ~ 20%）、中等破坏（21% ~ 60%）和严重破坏（61% ~ 100%）。根据该分类标准统计，基本完好和轻微破坏的光伏阵列共计 19 个，中等破坏 6 个，严重破坏 10 个，破坏等级的具体划分标准参见表 18。

表 18　超强台风“摩羯”下光伏阵列破坏等级及百分比　　单位：%

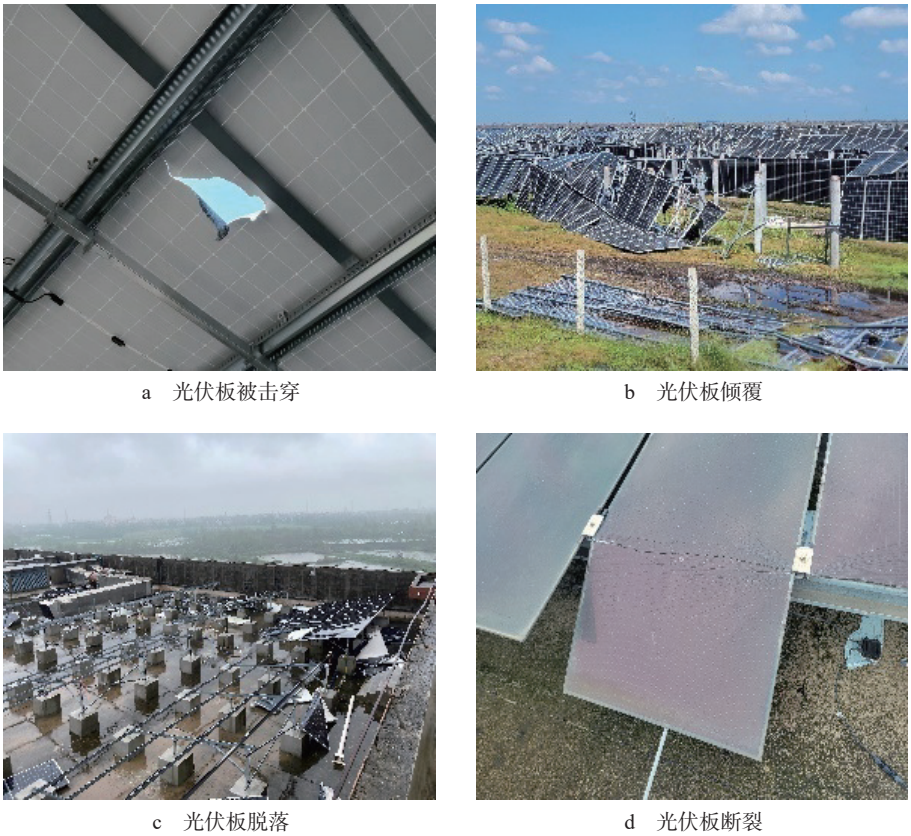
破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
区域1	0	16.7	16.7	66.6
区域2	6.3	37.5	25.0	31.2
区域3	14.3	57.1	14.3	14.3
区域4	33.3	66.7	0	0

从各区域受损情况分析，整体破坏程度呈现由区域 1 向区域 4 逐级递减的趋势。主要原因在于：区域 1 位于超强台风“摩羯”登陆点附近，风速最强，加之该区地处沿海开阔地带，地面粗糙度较低，且缺乏周边建筑群的遮挡作用，因此光伏阵列受损最为严重；随着超强台风“摩羯”中心向区域 2（海口市区周边）移动，该区域建筑密度增大，地面粗糙度升高，对风速产生一定削弱，故其光伏阵列破坏程度较区域 1 有所减轻；区域 3 与区域 4 距离超强台风“摩羯”中心相对较远，风速进一步减弱，破坏程度显著低于前 2 个区域；尤其是区域 4，因距超强台风“摩羯”中心最远，受影响最小，受损程度最为轻微。

5.3.2　各类构件破坏特征及原因分析

（1）光伏板

光伏板结构从外至内依次为玻璃面板、胶膜、电池片及背板。其破坏形式主要表现为 4 种：击穿、倾覆、脱落和断裂，如图 69 所示。所有受损阵列均存在光伏板破坏现象。



a　光伏板被击穿　　b　光伏板倾覆

c　光伏板脱落　　d　光伏板断裂

图 69　典型光伏板的破坏形式

①击穿　此类破坏由强风裹挟的高速飞射物冲击光伏板所致。击穿产生的碎片可能引发区域性连

锁破坏,进一步加剧结构损伤,如图69a所示。

②倾覆 在超强台风“摩羯”作用下,大尺度稳态强风导致光伏板出现单向倾覆特征,如图69b所示。超强台风“摩羯”中心附近最大风力达17级,超过当地12级的设防标准,致使位于超强台风“摩羯”中心路径上的光伏阵列承受风压超过风荷载标准值,从而发生倾覆。

③脱落 光伏板脱落可分为局部脱落与整体脱落,如图69c所示。其主要原因在于螺栓节点强度不足。尤其在未脱落光伏板的北侧设有突出的楼梯间,该结构在超强台风“摩羯”中心过境前有效阻挡了北向来风,对光伏板起到一定保护作用。

④断裂 采用玻璃背板的光伏板易发生断裂破坏,其机制在于压件紧固效果良好,但在局部形成应力集中。相比之下,采用复合材料背板的光伏板虽未完全脱落,但仍残存于支架上,如图69d所示。

(2)连接件

调研显示,光伏板的破坏均伴随连接件的失效,具体涉及螺栓紧固工艺和压块连接形式。其破坏形态如图70所示。

①螺栓节点破坏 如图70a所示,受热带海岛气候环境影响,碳钢螺栓易锈蚀导致有效截面减小,在超强台风“摩羯”作用下更易发生断裂。在相同风速条件下,背风侧风荷载系数大于迎风侧,使得螺栓承受更大拉力,进而导致光伏板铝合金边框预留的螺栓孔发生风致撕裂,如图70b和图70c所示。

②压块节点破坏 上部光伏板在风力作用下产生周期性振动。当采用双孔压件或π型压件时,节点在动力荷载作用下,原有水平压面受到扭曲与剪切作用,发生严重变形甚至断裂,并出现上翻超过30°的现象,完全丧失固定功能,如图70d和图70e所示。

(3)支架

支架结构中,檩条主要采用冷弯薄壁型钢,包括槽钢和方钢2种形式,具体破坏形态如图71所示。发生支架破坏的光伏阵列占总损坏阵列的38%,且主要集中在光伏板严重损毁区域。

①檩条弯扭变形 槽钢檩条的侧向刚度低于方钢檩条,因而更易发生扭转与弯曲变形,如图71a所示;相比之下,方钢檩条基本保持完好,未见明显变形。

②檩条连接点破坏 檩条出现大幅起伏变形甚至断裂,是由于连接节点处承受的弯矩超过连接件及其螺栓乃至焊接节点的承载能力所致,如图71b和图71c所示。

③下部支架破坏 在双列单坡支架中,立柱与交叉剪刀撑之间的连接螺栓因风振作用发生松动,最终脱落,如图71d所示。对于单列单坡支架,斜梁作为压弯构件,在光伏板迎风受压作用下超出其承载能力,发生弯曲变形,如图71e、图71f和图71g所示。

④柔性支架破坏 缆索的弹性模量和直径等参数影响其振动特性与承载力。在强风周期性激励下,柔性缆索因刚度较低产生过大变形,导致光伏板之间相互挤压,进而造成横梁脱落或折断,如图71h所示。

(4)支架柱

支架柱分为金属结构和钢筋混凝土结构2类,均为偏心受力构件。金属支架柱常见柱底螺栓破坏;钢筋混凝土立柱则出现受弯及斜截面受剪破坏,具体形态如图72所示。调研发现,发生支架柱破坏的阵列共3处,占总损坏阵列的9%,均位于区域1与区域2。

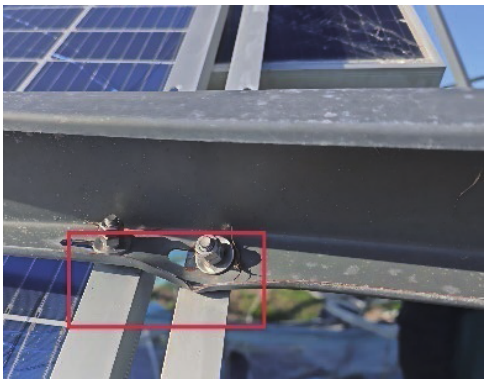
①金属支架柱底破坏 金属支架柱的铰接柱脚通常通过地脚螺栓与基础连接。在风荷载的反复作用下,地脚螺栓易发生松动,如图72a所示;此外,柱底连接区域也易出现显著变形,如图72b所示。

②钢筋混凝土柱底断裂 柱底区域出现钢筋断裂及混凝土均匀分布的弯曲裂缝,如图72c所示;当风荷载产生的剪力超过立柱的极限抗剪承载力时,整柱发生脆性断裂,如图72d所示。

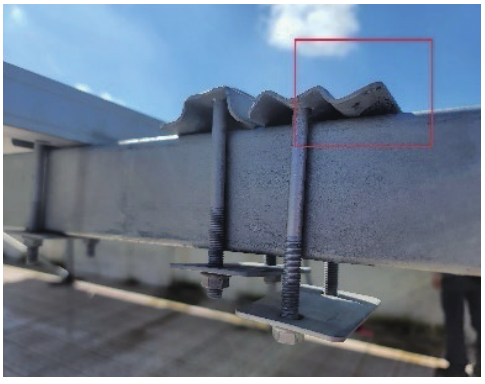
5.4 风力发电场 海南岛作为中国风能资源开发的重点区域,其风电产业长期面临台风频发带来的严峻挑战。近年来,全球风电技术正朝着单机容量大型化和结构形态高柔化的方向快速发展,在提升发电效率的同时,也使风电机组在极端风荷载下的动力稳定性与结构安全性问题日益凸显。特别是针对大型机组在强风作用下表现出的复杂气动弹性响应、极限承载力及长期疲劳损伤等关键问题,现有抗台风设计规范、智能控制策略以及全生命周期运维管理均面临新的挑战。



a 螺栓锈蚀



b 螺栓孔撕裂变形



c 双孔压件压片起翘变形



d π型压件压片剪切破坏



e 双玻组件压块上下分离

图 70 典型连接件的破坏形式

超强台风“摩羯”过后的现场调研表明，海南省内多数风电场未出现严重结构损毁，但文昌市木兰湾风电场内部分新建大型机组发生了结构性破坏。具体而言，该风场中多台尚未投运的 6.25 MW 机组发生倒塌，而已投运的 2 MW 机组基本保持完好。这种在相近风场环境下不同机组表现的差异提示，除风速因素外，机组自身的运行状态与控制策略等也可能是影响其抗台风安全的关键。因此，本研究选取木兰湾风电场为研究对象（如图 73 所示），通过现场勘查与数据分析，旨在系统探讨受损机组的破坏特征及潜在的致灾机理。

5.4.1 超强台风“摩羯”致风电场破坏情况 超强台风“摩羯”过境后，对木兰湾风电场造成了严重的结构性破坏。现场调研团队通过细致勘查，系统地记录了风电机组的多种失效模式。宏观上，多台机组发生整机倒塌，巨大的结构残骸散落现场；从部件层面看，作为主要承力构件的塔筒出现了显著的弯折、褶皱甚至断裂，而作为关键气动部件的叶片与轮毂也遭受了严重冲击，呈现出破碎和撕裂等破坏形态。这些

破坏现象高度集中在新建且尚未投运的6.25 MW机组上,与同场址已投运机组的完好状态形成鲜明对比,为后续机理分析提供了重要依据。将依据现场勘查资料,对整机倒塌、塔筒失效以及叶片等部件的具体破坏特征进行详细阐述。



a 檩条弯曲变形



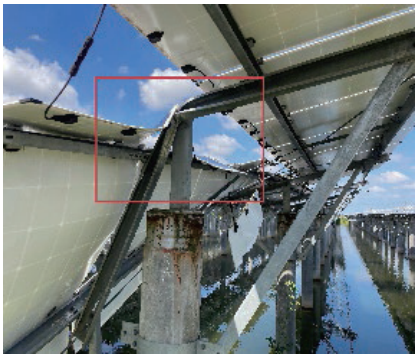
b 檩条焊接节点断裂



c 檩条螺栓节点断裂



d 交叉剪刀撑脱落



e 斜梁弯曲变形



f 抱箍变形



g 支撑完全脱落



h 柔性缆索支架折断

图71 典型支架的破坏形式



a 支架柱底螺栓拔出　　b 支架柱底变形过大



c 支架柱底部弯曲裂缝　　d 支架柱剪切破坏

图 72 典型立柱的破坏形式



图 73 风力发电机调研位置

(1)整机倒塌情况

木兰湾风力发电机设施破坏情况如图 74 所示。由图 74 可知, 倒塌的 8 台风机均为 6.25 MW 的抗台型风机, 而 2 台 2 MW 风机因采取偏航和顺桨等抗风措施而未遭受显著破坏。风力机的倒塌姿态和方向

均朝向岸边倒塌,与周围树木的倾倒方向基本一致,且普遍呈三段式断裂,测得风力发电机机舱高度为110 m。



a 风机倒塌情况 b 风机结构残骸

图74 木兰湾风力发电机设施破坏情况

(2)塔筒弯折与断裂

风机塔筒作为高耸悬臂式薄壁结构,在重力与风荷载共同作用下发生显著弯曲变形,呈现典型压弯破坏特征:迎风面受拉,背风面受压。图75显示了塔筒的典型损坏:其弯折常表现为三段式破坏,底部区域伴随明显褶皱如图75a所示;部分塔筒在极端风荷载下则直接断裂,断口呈不规则撕裂和剪切破坏如图75b所示。表明超强台风"摩羯"期间,风速与风向的剧烈变化导致塔筒局部应力集中,最终导致材料强度失效或结构失稳。



a 塔筒底部弯折褶皱 b 塔筒断裂口特征

图75 塔筒破坏情况

(3)轮毂/线缆破坏

倒塌风机的叶片均遭受严重损坏,多因随塔筒坠落撞击地面而断裂或破碎,如图76所示。叶片断口多不规则,伴有明显的撕裂和复合材料分层剥离现象。从断裂边缘可以观察到叶片内部的复合材料结构(玻璃纤维)的破坏形态。轮毂部分也因塔筒倒塌受到冲击而损坏。



a 转子残骸1 b 转子残骸2

图76 转子损坏情况

WT-9 风机作为“以大代小”项目中新建的风机，在超强台风“摩羯”来袭时尚未投入使用。在极端的风速作用下塔筒发生显著的弯折破坏。同时，这股强大的底部剪力和弯矩作用，不仅对塔筒本身造成破坏，也极有可能导致其基础连接部位（如地脚螺栓）或基础结构本身发生损伤。风机倒塌及强风作用还破坏了周边道路和电缆沟等附属设施，造成线缆裸露与结构残骸散落，如图 77 所示。



a 线缆外露　　b 清理现场

c 风机塔筒切面　　d 塔筒底部螺栓

图 77 附属设施受损图片

5.4.2 超强台风“摩羯”致风电场破坏机理分析 为进一步厘清现场倒塌机组的致灾机理，弥补实测数据在结构动态响应方面的缺失，在现场灾损调研的基础上，从致灾风荷载重构与结构动力学响应 2 个维度展开定量推演。首先，针对超强台风“摩羯”的极端风场特性，采用 Batts 参数化模型与 TurbSim 湍流模拟相结合的方法，生成高保真的三维脉动风场，并通过功率谱密度（power spectral density, PSD）校核验证了模拟风荷载的准确性。其次，鉴于倒塌机组为新建未投运状态，选取结构特征相近的国际通用 NREL5.0 MW 基准机型，利用 OpenFAST 建立包含精细化网格划分的气动−弹性全耦合数值模型。在此基础上，重点模拟风机在未投运状态下，受极端平均风速、高强度湍流及偏航误差多场耦合作用下的动力响应，通过分析塔筒关键截面的内力演化规律，揭示其弯折破坏的临界条件与根本原因。

（1）超强台风“摩羯”风场模拟与验证

为确保仿真输入的风荷载能够真实反映超强台风“摩羯”的破坏力，本研究采用 Batts 台风场模型[91] 与 TurbSim 湍流模拟软件相结合的方法。木兰湾风场与超强台风“摩羯”登陆地点翁田镇直线距离为 50 km，与其路径最近距离为 7 km，其中心气压均为 920 hPa。基于表 19 中实测超强台风“摩羯”数据，由 Batts 模型计算出超强台风“摩羯”在木兰湾风电场处的最大风速为 63 m・s^{-1}；根据风切变指数（取 0.12）可计算出 90 m 高度处风速[29] 为 82 m・s^{-1}。随后，利用 TurbSim 软件基于 Kaimal 谱生成三维湍流风场文件。为了验证风场模拟的准确性，模拟生成的轮毂高度处风速时程曲线及其功率谱密度函数如图 78 所示。

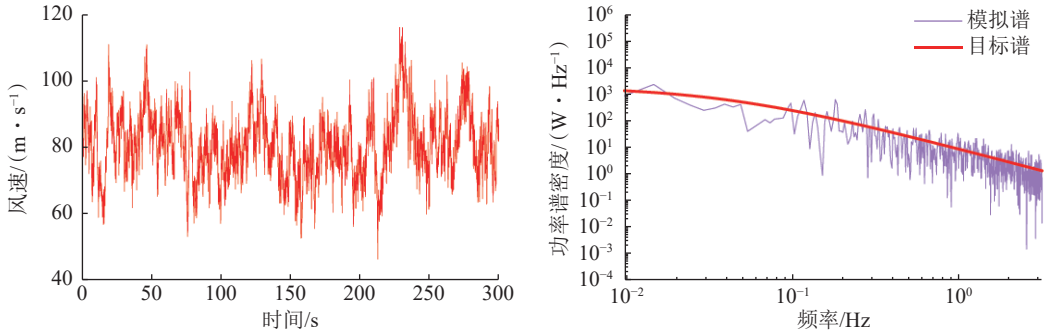
由图 78 可知，模拟风速的统计特征（平均风速和湍流强度）与 Batts 模型计算的理论值高度吻合，且风速功率谱密度主要能量集中在低频区，符合超强台风“摩羯”风场的湍流能量分布规律。这表明所建立的风场模型能够准确重现超强台风“摩羯”的极端风况，为后续的结构破坏机理分析提供了可靠的荷载输入。

（2）基于 Openfast 仿真的风机结构响应分析

风机抗台风策略分为被动式和主动式。被动式抗台风策略是指通过被动方式抵御台风的影响,利用变桨系统让3个叶片顺桨,风轮处于自由转动状态,偏航系统进入锁定状态;主动式抗台风策略是指3个叶片顺桨,风轮处于自由转动状态并且启动偏航系统。

表19 用于Batts模型仿真的超强台风"摩羯"主要参数

参数名称	参数值
纬度/(°)	19
中心气压差Δ*P*/hPa	90
最大风速/(m·s^{-1})	63
最大风速半径/ km	26
整体移动速度/(m·s^{-1})	5.28
外围大风区半径/km	350



a 模拟风速时程(82 m·s^{-1}) b 模拟谱与目标谱对比

图78 模拟风速时程及其功率谱密度

超强台风"摩羯"作用下风机塔筒主要受到风荷载和上部叶片和机舱的重力作用。超强台风"摩羯"过境期间风机在停机顺桨状态下塔筒所受风荷载甚至大于上部叶片风荷载。塔筒振动会产生较大的惯性力,进而放大塔筒的整体内力。

①风机数值模型与网格划分 鉴于无法获取现场倒塌风机的详细气动和结构内部参数,本研究选取与倒塌机组结构形式相似、发电功率相近的国际通用NREL5.0MW基准风机作为研究对象。利用气动弹性仿真软件OpenFAST建立整机动力学模型。该高度处风速为82 m·s^{-1},湍流强度暂定为A级,利用Turbsim软件生成相应的风文件。

NREL5.0MW风机采用三叶片、上风向和变速变桨距控制设计,其关键结构参数如表20所示。在OpenFAST的ElastoDyn模块中,塔筒和叶片被模拟为柔性梁结构。为了精确捕捉塔筒在超强台风"摩羯"荷载下的非线性动力响应及高阶模态特征,同时兼顾计算效率,将塔筒沿高度方向离散为10个等长的欧拉–伯努利梁单元(Euler-Bernoulli beam),包含11个计算节点。该网格划分密度能够满足对塔顶位移及塔底应力集中区域的计算精度要求。仿真工况模拟了机组在超强台风"摩羯"过境时的停机顺桨状态,即关闭桨距控制(叶片顺桨至91°),并设置不同的偏航角度(5°、10°、15°和20°)以模拟主动/被动抗台风策略。

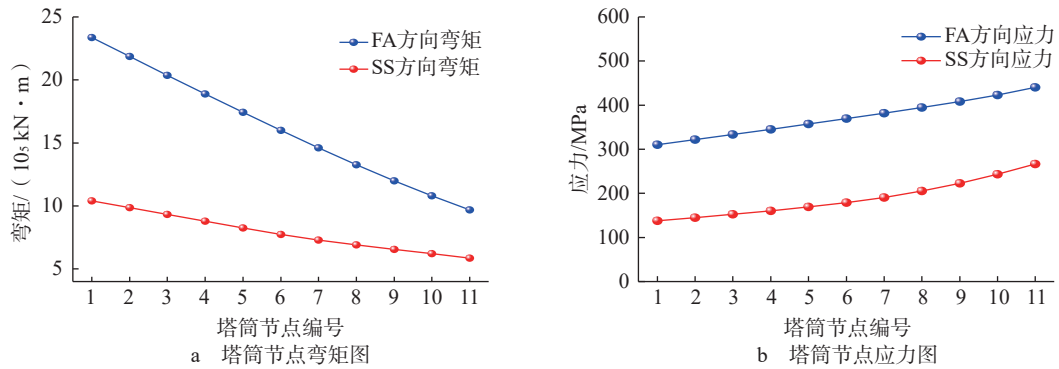
②仿真结果 仿真工况下塔筒的内力响应与应力分布特征,如图79所示。由图79a弯矩图可知,塔筒所承受的弯矩大体自塔基沿高度向上呈非线性递减趋势,其在塔筒基底截面产生的弯矩峰值已超过了结构设计所对应的极限承载能力。相较于弯矩的分布规律,图79b所呈现的弯曲正应力则表现出沿塔高向上的增长特性,其最大值集中于塔筒上段区域。模拟结果进一步表明,即便在理想对风条件下,此上段区域塔筒内壁关键节点(包括顺风向FA及横风向SS)的应力水平均已普遍超过350 MPa。

为进一步分析不同风速、湍流强度和偏航角的影响,图80给出了轮毂高度风速分别为82、50和40 m·s^{-1},湍流强度分别为A级和C级,塔筒底部最大弯矩和最大应力随偏航角的变化情况。仿真结果

清晰地揭示了偏航角对塔筒荷载，特别是横风向（SS）荷载的决定性影响。在 82 m·s^{-1} 的极端风速下，结构必然破坏，但偏航角增大了横风向荷载，加剧了破坏。关键在于 50 m·s^{-1} 风速工况，此时若无偏航误差，结构尚处安全状态；但随着偏航角增大，横风向应力迅速攀升，当角度超 15°时，应力即可超出材料许用值，导致结构静力破坏。而在 40 m·s^{-1} 风速下，虽然结构处于静力安全范围，但高湍流（A 级）与大偏航角（20°）的耦合致使横向应力激增（约 218 MPa）并远超顺风向，揭示了非极端风速下潜在的动力响应与疲劳风险。此结果定量解释了为何失去主动对风能力的未投运机组会发生倒塌，与现场观察高度吻合。

表 20　NREL5.0MW 风机的主要技术参数

参数类别	参数名称	参数取值
运行策略	切入风速/(m·s^{-1})	3.0
	额定风速/(m·s^{-1})	11.4
	切出风速/(m·s^{-1})	25.0
	切入转速/(r·min^{-1})	6.9
	额定转速/(r·min^{-1})	12. 1
叶片	长度/m	61.50
	质量/kg	17 740
	面内一阶频率/Hz	0.70
	面外一阶频率/Hz	1.12
	一阶阻尼比/%	0.48
机舱及轮毂	机舱质量/kg	240 000
	轮毂质量/kg	56 780
	轮毂直径/m	3.00
	轮毂高度/m	90.00
塔筒	高度/m	87.60
	顶部直径/m	3.87
	底部直径/m	6.00
	质量/kg	267 650
	一阶阻尼比/%	1.00



a　塔筒节点弯矩图　　b　塔筒节点应力图

图 79　塔筒节点荷载图

（3）破坏原因分析

结合现场调研与数值模拟结果，木兰湾风电场风电机组在超强台风“摩羯”作用下的破坏原因及相关影响因素可归纳如下：

①极端风速超越设计极限　超强台风“摩羯”登陆时木兰湾风电场所受最大风速经 Batts 模型计算亦达到 63 m·s^{-1}（轮毂高度处风速 82 m·s^{-1}）。仿真结果显示，在此极端风速（82 m·s^{-1}）下，无论湍流强

度或偏航角如何,NREL5.0 MW 参考风机塔筒所受应力均远超材料屈服强度(如 FA 方向最大应力可达 393.59 MPa, SS 方向可达 1 008.27 MPa),表明结构发生的主要是静力破坏。

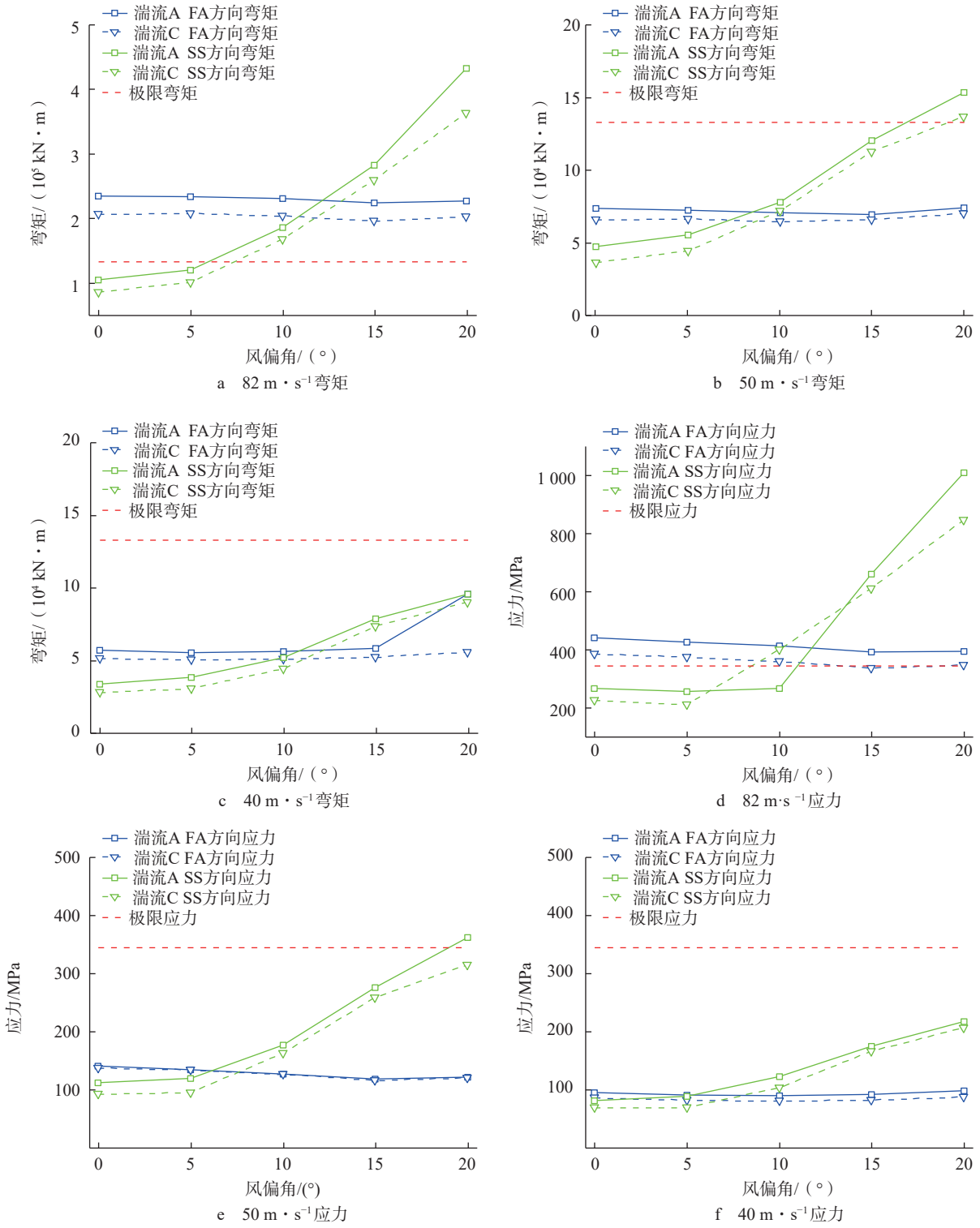


图 80 不同风偏角下塔架弯矩和应力大小

②风速、偏航角与湍流强度的复合影响 中高风速下的风险累积:当轮毂高度风速降至 50 m·s^{-1}(10 m 高度处风速 38.4 m·s^{-1})时,若风机偏航角为 0°,塔筒底部最大应力约为 140.05 MPa,结构尚能保持相对安全。然而,一旦偏航角增大(例如超过 15°),塔筒 SS 方向的荷载和应力便会显著增加,无论湍流强度如

何，塔筒应力均可能超过材料的许用应力值，导致结构发生静力破坏。

在 40 m·s^{-1} 风速下，塔筒应力未超 345 MPa 极限，结构静力安全。但仿真揭示了偏航角与湍流的显著叠加效应：横风向（SS）应力随偏航角增大而急剧攀升，且 A 级（高）湍流荷载远高于 C 级（低）湍流荷载。在 A 级湍流和 20°偏航角耦合下，SS 方向应力（约 218 MPa）远超顺风向 FA 方向应力（约 92 MPa）。这表明，即使风速未达极端，高湍流与大偏航误差（如未投运机组无法对风）的组合也会导致横向动态荷载激增，可能诱发动力响应或疲劳损伤。

6 风暴潮引发的海岸侵蚀

海南岛的海岸线总长度约为 1 944 km。其中，海南岛砂质海岸线长度为 785.7 km[92]，占全省海岸线总长度的 43.1%，而侵蚀岸段占砂质海岸线长度的 43.97%[93]。根据统计，海南岛每年约有 7 个月受台风影响，超强台风“摩羯”带来的强风、暴雨以及风暴潮对海南岛的海岸线造成了严重侵蚀。尤其是文昌市的沙滩出现了显著的后退现象，沙丘和滩涂的消失严重影响了当地生态系统的稳定性。此外，风暴潮造成的海水倒灌对海岸线的地貌形态产生了长期性影响，使得一些低洼地区的海岸线变得更加脆弱，增加了未来极端天气事件对海南岛海岸的威胁。在文昌市铺前港附近调查时发现（如图 81 所示），超强台风“摩羯”引起的风暴潮和海浪带来的增水最高达 3.0 ~ 3.5 m，远超过日常水位。调研组在超强台风“摩羯”过境后对海岸侵蚀状况开展详细调研工作，可为海岸侵蚀问题的研究、海南岛海岸管理和灾害防治提供科学依据。



图 81 海岸侵蚀调研位置

海南岛主要海岸类型分为河口岸线、基岩岸线、砂质岸线、生物岸线、淤泥质岸线和人工岸线等。文昌市和海口市等地作为超强台风“摩羯”风眼穿行地带，其海岸主要为砂质岸线和人工岸线，本次的调研的数据及结果按照海岸线类型呈现，采用现场调研与遥感数据相结合的分析方法，海岸附近的基础设施破坏状况通过现场调研显示，而海岸线后退现象则通过对比超强台风“摩羯”前后遥感影像进行定量评估，调研区域概况统计数据见表 21。

6.1 海岸线侵蚀现场调研

6.1.1 *砂质岸线* 超强台风“摩羯”过境期间，强风和大浪会对海滩产生巨大的冲击力，导致沙子和沉积

物被迅速搬运,引发海岸线后移,同时强降雨增加地下水流动,加剧路基土壤冲刷与流失,造成路面底部空洞或路面坍塌(如图82所示)。若无直接可用于对比的信息(如现场标记、不同时期图片对比等),砂质海岸线的侵蚀情况难以通过现场观察做出判断。根据《海南省沿海防护林总体规划(2024—2035年)》,应在大潮高潮线后100 m处设置一线防护带,200 m处设置二线防护带。在文昌市砂质海岸现场调研发现,迎风面的防风林(如图83所示)距海岸线均不足百米,间接说明与防风林建设期相比,海岸线可能存在后移情况。

表21 海岸侵蚀量化调研结果汇总表

灾害类型/结构	调研区域/地点	调查结果	备注
防风林倒伏	文昌市沿海(平均)	80%	登陆点核心区
	文昌市局部(埔前镇)	90%	
	海口市金山湾	70%	
	淇水湾	50%	下风向
	东郊椰林(椰子树)	5%	优异抗风性
防护栏损毁	海口市拾贝公园	约30%(约1 km)	
	海口市白沙门	约30%(约2 km)	
	海口市湾休闲区	约40%(约2 km)	
海滩侵蚀	文昌市海岸(卫星平均)	侵蚀退1 ~ 2 m	
	拾贝公园	宽度约20 ~ 50 m,厚度约20 cm,	
海水倒灌损失	嘉积镇	经济损失1.2亿元,农作物绝收16.67 km^2	安全转移17 198人
建筑物损毁	文昌市淇水湾	屋顶损毁率约50%	距海200 m,玻璃和木瓦结构



a 假日海滩冲刷 b 淇水湾海滩冲刷 c 新埠岛阅海台海滩冲刷

图82 海滩路面底部掏空



a 铺前镇海边 b 东郊椰林

图83 文昌市砂质岸线

6.1.2 *海堤防浪石冲刷破坏* 海堤在保护沿海地区免受风暴潮和海浪侵袭方面发挥着重要作用,其类型

多样，常见的有斜坡式、陡墙式和混合式。本研究的海堤均为斜坡式，斜坡式海堤（如图 84 所示）通常由土堤和护坡组成，适用于海边较浅的水域。台风带来的强风和巨浪会直接冲击海堤，而且台风引发的风暴潮会使海水水位迅速上升，增强海浪的冲击力和越浪量，且越浪量增大，造成海堤损坏、财产损失和人员伤亡等严重后果[94]。海口市白沙门海滩处的防浪石破坏最为明显，其岸边的海堤防浪石部分冲毁，海堤护体内部有掏空迹象（如图 85 所示）。海口湾也出现了海堤冲刷引发的路岸塌陷情况（如图 86 所示）。

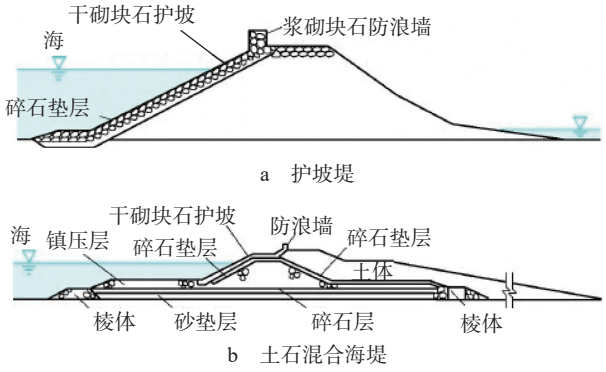
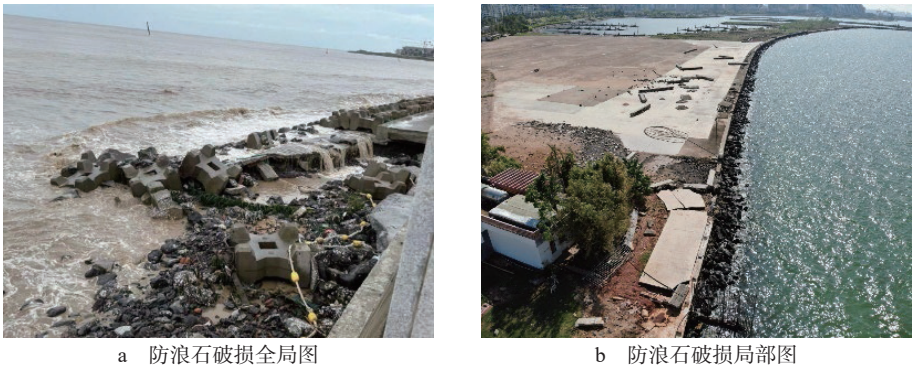


图 84 海堤结构示意图



a 防浪石破损全局图　　b 防浪石破损局部图

图 85 白沙门海堤防浪石破损



图 86 海口湾海堤路面破坏

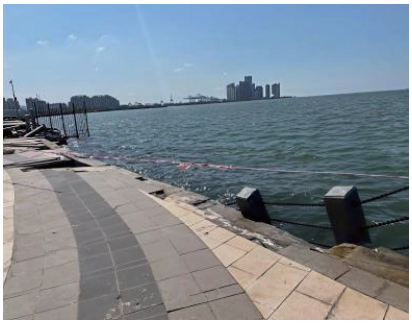
6.1.3 *海堤防护栏破坏* 常见于观光旅游型基岩海岸或海湾的防护栏，既用于保障人员安全，也具备一定的防浪功能。调研显示，海口市拾贝公园附近的海堤防护栏总长约 1 km，约 50% 防护栏全部冲毁（如图 87a 所示）。海口市白沙门海滩海堤长度约 2 km，约 30% 防护栏冲毁（如图 87b 所示）。海口湾休闲区附近海堤防护栏全长约 4 km，约 60% 护栏在超强台风“摩羯”中损坏（如图 87c 所示），局部为石头混凝土墙的海口湾海岸防护栏也遭到严重破坏，在巨浪和强风联合作用下出现整面墙体发生倒塌的现象（如图 87d 所示）。部分调研地点的护栏为钢筋连接混凝土桩，在海边高湿、高盐、高温及高紫外线环境影响下断裂后可见其内部钢筋早已遭到严重腐蚀（如图 88 所示）。



a 拾贝公园海堤护栏损坏



b 白沙门公园海堤护栏损坏



c 海口湾海堤防护栏损坏



d 海口湾海堤防护墙体倒塌

图87 海堤防护栏结构损坏





图88 防护栏内部钢筋腐蚀

6.2 利用遥感数据对海岸侵蚀的定量评估 遥感技术具有监测范围广、速度快、成本低及便于长期动态观测等优势,已在岸线动态变化与海岸侵蚀研究中得到广泛应用[95–97]。本研究采用基于遥感影像数据识别的海岸侵蚀监测与评估方法,利用地理信息系统平台(GIS)对比不同时期的遥感影像数据,定量分析岸线侵蚀状况。

6.2.1 *数据源* 本研究所用的卫星遥感数据源自开放的美国NASA的陆地卫星(Landsat)以及中国国家高分辨率对地观测系统(Gaofen),其中Landsat数据获取于美国地质调查局官网(https://earthexplorer.usgs.gov)。Landsat数据分别选取2023年8月5日(L230805)、2024年6月3日(L240603)、2024年8月6日(L240806)和2024年10月1日(L241001);Gaofen数据分别选取2024年8月3日(G240803)和2024年9月16日(G240916),具体数据如表22所示。

6.2.2 *Landsat砂质海岸线变位分析* Landsat 8-9遥感数据的空间分辨率为30 m,而超强台风"摩羯"引起的海岸线后移尺度通常整体上不足30 m。由于海域与陆地在光谱特征上存在显著差异,当海岸线发生米级明显变化时,30 m × 30 m像元内海域与陆地的面积占比将发生明显改变,从而导致像元整体光谱特

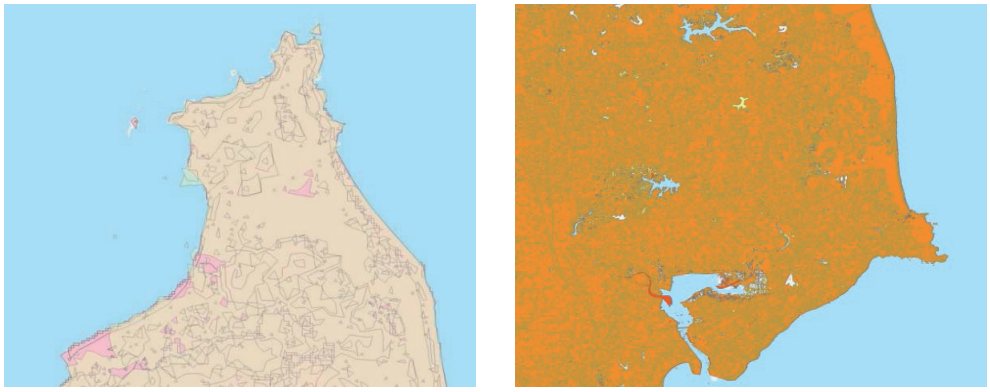
征产生可辨识的差异，并进一步反映在基于遥感数据反演的海岸线图像重构位置差异上。

表 22　卫星遥感数据来源

序号	遥感数据类型	获取日期	空间分辨率/m
1	Landsat 8-9 OLI/TIRS	2023−08−05	30
2	Landsat 8-9 OLI/TIRS	2024−06−03	30
3	Landsat 8-9 OLI/TIRS	2024−08−06	30
4	Landsat 8-9 OLI/TIRS	2024−10−01	30
5	GaoFen_2	2024−08−03	0.80
6	GaoFen_7	2024−09−16	0.75

为开展海岸侵蚀分析，将 4 组 Landsat 数据集导入 ArcGIS 软件，基于属性提取获取卫星影像所示区域海岸线信息。受云层覆盖影响，不同数据集提取结果存在一定差异，部分小岛在拍摄期因云层遮挡使得影像无法提取。经人工选点比对验证，主岛海岸线的提取结果基本可靠。文昌市海岸线以砂质为主，且呈大范围连续分布，故本研究重点对该区域进行分析。

超强台风“摩羯”登陆前 Landsat 数据提取海岸线位置对比如图 89 所示。提取超强台风“摩羯”登陆前一年（L230805）及一个月（L240806）卫星影像的海岸线数据，分别与登陆前 2 个月（L240603）提取的海岸线数据进行对比。图 89a 展示了将上层 L240603 数据设置为透明色后，与下层 L230805 数据的局部放大对比，可见海岸线重合度较高；图 89b 为将上层 L240806 数据设置为透明色后，与下层 L240603 数据的局部放大对比，海岸线同样重合良好，未见明显位置变化。说明超强台风“摩羯”登陆前一年内该区域海岸线未发生明显变化。



a L230805与L240603对比　　b　L240603与L240806对比

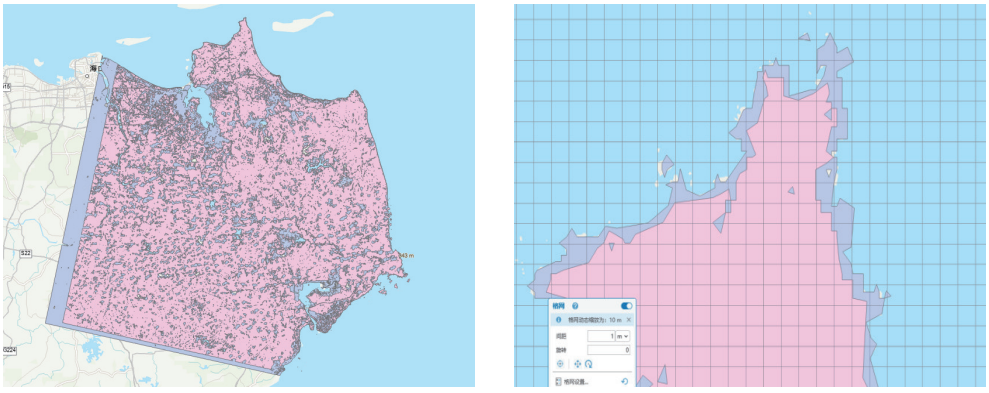
图 89　超强台风“摩羯”登陆前 Landsat 数据提取海岸线的位置对比

再将 L240806 对比超强台风“摩羯”登陆后一个月内的 L241001 数据提取的海岸线图像（如图 90 所示），并由局部放大图（如图 90b 所示）可以看出，L241001 数据海岸边界明显回缩，结合软件网格测距功能可以看出 2 组数据图在海岸边界有米级差异

6.2.3　高分数据砂质海岸线变位分析　高分数据在提取前需在 ENVI 软件中进行预处理。具体流程包括：对多光谱数据实施辐射定标、大气校正与正射校正；对全色数据进行辐射定标与正射校正。随后，将多光谱与全色数据融合（如图 91a 所示），并导入 ArcGIS Pro 3.4 软件以提取海岸线图像。

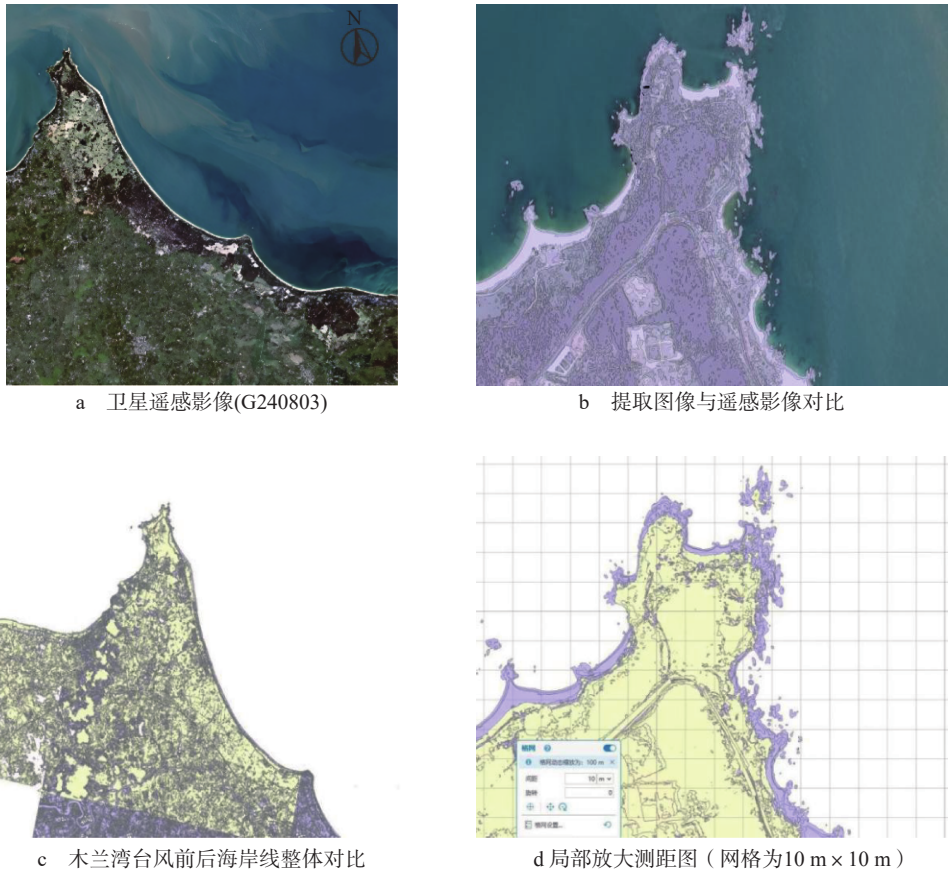
基于 Landsat 数据分析结果显示，木兰湾附近海岸线变位较为显著，故同时选取该区域的高分影像进行验证分析。首先，将提取的海岸线边界置于上层并设置为透明色，下层叠加预处理后的遥感影像（如图 91b 所示），两图对比表明所提取的海岸线边界完整可靠，进一步将超强台风“摩羯”登陆前一个月及登陆 10 d 后的遥感数据获取的海岸线图像进行叠置比对（如图 91c 所示），结合软件网格测距功能（如图 91d 碎石），2 组数据提取的海岸边界普遍存在数米差异，反映出超强台风“摩羯”过后木兰湾附近发生了明显

的海岸侵蚀。该结果也验证了 Landsat 低分辨率数据在米级岸线变位初步分析中具有一定的适用性。



a 文昌海岸线整体　　b 局部放大测距图（网格为1 m × 1 m）

图 90 超强台风“摩羯”登陆前后 Landsat 数据提取海岸线位置数据对比(L240806 与 L241001)



a 卫星遥感影像(G240803)　　b 提取图像与遥感影像对比

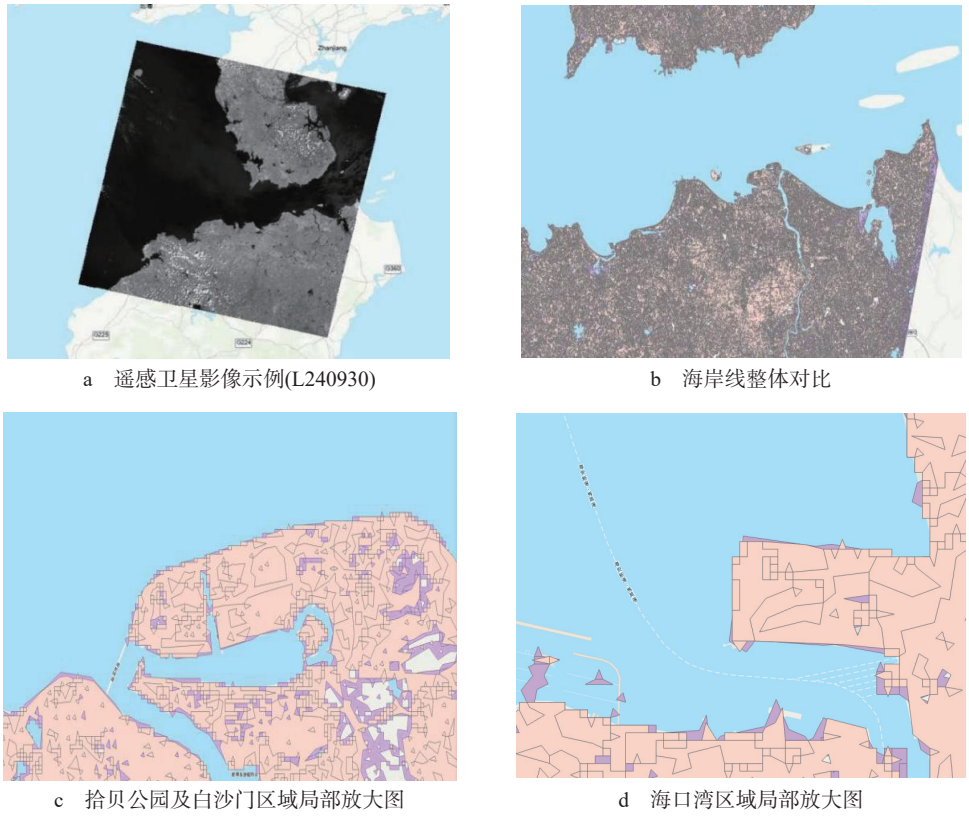
c 木兰湾台风前后海岸线整体对比　　d 局部放大测距图（网格为10 m × 10 m）

图 91 高分数据及对比图

本研究基于 4 组不同时期文昌砂质海岸线的 Landsat 影像进行对比分析，结果显示：在超强台风“摩羯”过境前，文昌附近海岸线未出现明显位置变化；而在超强台风“摩羯”过境后，该区域海岸线出现不同程度的后退情况。通过与高分辨率 Gaofen 数据的分析结果进行比对，验证了 Landsat 数据可用于初步识别米级尺度的海岸线位置变化。

6.2.4 人工海岸线变位分析 海口市附近有较多人工海岸线，本研究分别选取 2024 年 8 月 5 日和 2024 年 9 月 30 日(L240805 和 L240930)海口市附近的 Landsat 遥感数据，分析现场调研区域(拾贝公园、白沙门及海口湾)的岸线变位情况。如图 92b 所示，上层淡粉色为 L241 001 数据，下层深紫色为 L240806 数据。通过局部放大拾贝公园及白沙门附近海岸线和海口湾附近海岸线(如图 92c 和图 92d 所

示)，并未发现明显变位，表明堤防护结构有效减轻了超强台风“摩羯”对岸线的侵蚀影响。



a 遥感卫星影像示例(L240930)　b 海岸线整体对比

c 拾贝公园及白沙门区域局部放大图　d 海口湾区域局部放大图

图 92 海口海岸线 Landsat 数据及对比分析图

7 案例分析一：树木抗风与城市环境关系

园林树木是城市绿地的主要元素，也是城市建成环境的重要组成部分。沿海地区的园林树木常因台风侵袭而遭受重大损失[32]。位于热带海洋气候的海口市内大量的热带树木，其特点是冠大、木质脆且根系浅，遭受超强台风“摩羯”侵袭后出现大量折断和倒伏，严重影响交通安全性，也成为灾后救援首要障碍，突显了城市环境下抗风树种选择的重要性。

海南大学位于海口市海甸岛内，校园内植被种类丰富，有热带和亚热带树木共 10 970 棵，品种 111 种，主要品种包括紫檀、椰子、榕树、小叶榄仁、非洲楝和木棉等。校园风貌与植被紧密相连，而其建筑布局同样呈现出多样化的特点。大量 5 ~ 8 层的学生宿舍楼、教学楼、研究所、实验室及家属楼密集组团分布，中间穿插着食堂、澡堂和快递站等低层建筑；零星分布着 10 ~ 20 层高层建筑；大大小小的草地、少量树木组成的开阔空间；硬化地面组成的大小广场以及各类水体分布在校园内各处。超长的建设时间、多元的建筑风格、多样的建筑功能形成了校园内楼间距不均、建筑密度分布广、容积率多样、空间分布多元的特点，是研究典型热带树木风灾受损特点理想的场所。

本研究以超强台风“摩羯”过境后受损严重(主干折断、连根拔起和倒伏)的 333 棵树木为基础，分析各类典型热带树木在大学校园这一特殊城市环境下的受损特征，探讨其根系、树冠和树干特性，定量评估树木灾损与建筑面积和容积率和局地气候之间的关系，旨在对超强台风影响区域的城市园林树木选择和布置提供科学依据。

7.1 树木灾损调查 超强台风“摩羯”过境后，发现风害程度位于 4 ~ 5 级(树木主干折断、连根拔起、倒伏和根系离开地面)的受损树木 333 棵，树种受损形态信息如表 23 所示，具体位置分布情况如图 93 所示。遭受损害最严重的主要是紫檀和小叶榄仁。相比之下，椰子和棕榈等树种抗风能力较强，受损较少。

表 23 海南大学海甸校区严重受损树木调研情况表

树木种类	拉丁名	数量/棵	科	属	损伤形态
香蕉	*Musa nana* Lour	10	芭蕉科	芭蕉属	折断
非洲楝	*Khaya senegalensis*	20	楝科	非洲楝属	折断、倒伏、连根拔起
紫檀	*Pterocarpus indicus* Willd	131	豆科	紫檀属	折断、倒伏、连根拔起
小叶榄仁	*Terminalia neotaliala*	89	使君子科	榄仁树属	折断、倒伏、连根拔起
椰子	*Cocos nucifera*	16	棕榈科	椰子属	折断、倒伏、连根拔起
榕树	*Ficus microcarpa*	25	桑科	榕属	折断、倒伏、连根拔起
木麻黄	*Casuarina equisetifolia*	6	木麻黄科	木麻黄属	折断、倒伏、连根拔起
蒲葵	*Livistona chinensis*	3	棕榈科	蒲葵属	倒伏、连根拔起
木棉	*Bombax ceiba*	27	锦葵科	木棉属	倒伏、连根拔起
棕榈	*Trachycarpus fortunei*	6	芭蕉科	棕榈属	倒伏、连根拔起

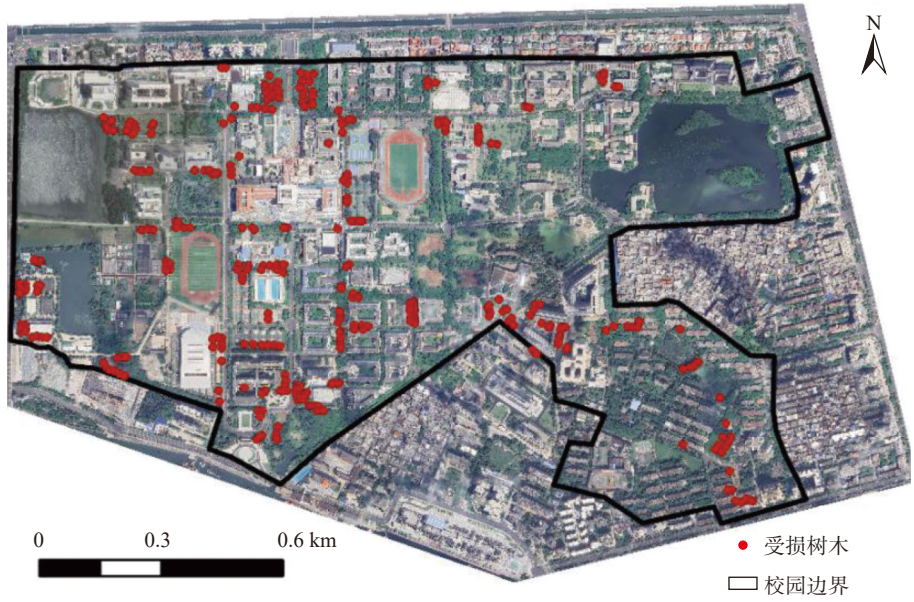


图 93 海南大学海甸校区严重受损树木调研分布点

7.2 受灾树木空间环境分析 海南大学校园内建筑形态、体积、层高多样,与树林、水体、广场交错,形成了独特的建筑空间及独特风环境。校园空间分为2个层面:地块控制指标层面涵盖了建筑密度、容积率[98],反映了城市形态的总容量和体量;地块街区建筑的组织层面,涉及街区整合度与建筑离散度,并引入局地气候分区(local climate zones, LCZ)[99],该分区在街区尺度上刻画了不同密度类型的街区特征,同时考虑了植被和水体等下垫面因素。

基于地理信息系统,采用投影坐标系为CGCS2000 3 Degree GK CM 111E的海口市2024年矢量基础地理信息数据,具体信息有建筑轮廓、建筑布局和建筑层数等,具体信息如表24所示。基于ArcGIS Pro平台,利用空间统计、空间分析和可视化等功能研究受损树木在建筑密度和容积率空间上的分布特征。

表 24 空间数据来源与用途

数据类别	数据类型	数据范围	来源	用途
地理信息	校区边界数据	校区范围	国家测绘局, https://www.webmap.cn/	制图
	0.3 m分辨率 校园卫星影像	校区范围	地理空间数据云 https://www.gscloud.cn/	
统计与观测资料	建筑白模数据	校区范围	中科星图	计算建筑密度、容积率
	局地气候分区(LCZ)	校区范围	世界城市数据库网站 https://www.wudapt.org	提取各气候分区

7.2.1 基于建筑密度和容积率的分析 本研究分析了建筑密度和容积率结果，通过反复校验，选定了网格区域为 100 m × 100 m，统计获得了容积率图与受损树木数据叠加结果，如图 94 和图 95 所示。同时，统计了每个网格内受损树木数量，如图 96 和图 97 所示。

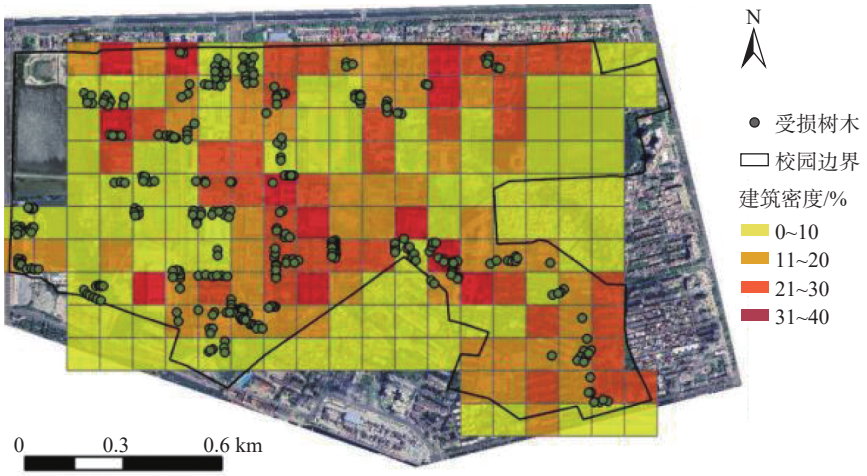


图 94 树木与建筑密度图的叠加图

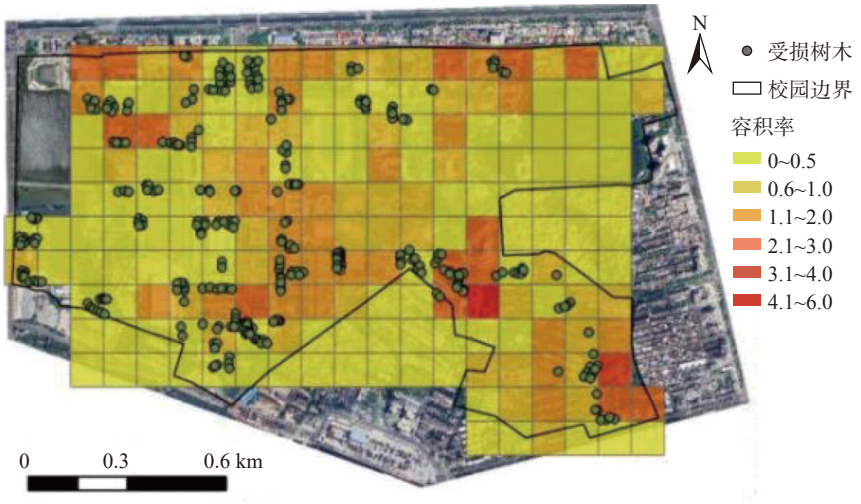


图 95 受损树木与容积率图的叠加图

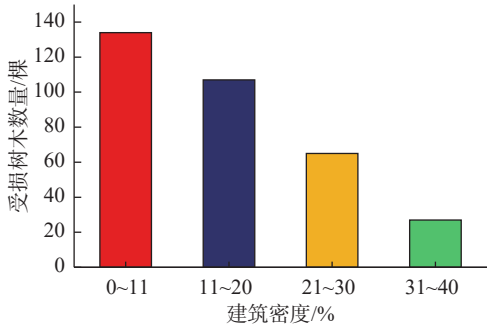


图 96 密度对应的受损树木占比

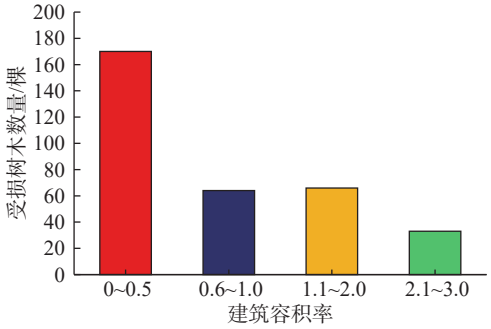


图 97 容积率对应的受损树木占比

结果表明，受损树木主要分布在建筑密度为 20%以下的区域，占比约为 72.4%；且主要分布在容积率为 0 ~ 0.5 的区间，占比约为 51.1%。从建筑密度（0 ~ 20%）与容积率（0 ~ 0.5）的组合来看，整体区域呈现出建筑较少、相对开阔空间较多的布局特点。超强台风“摩羯”来袭时，此类布局难以有效阻挡风流，风得

以长驱直入,缺乏缓冲与分流机制,使校园内风力持续较强。同时,低容积率带来的开阔性使树木缺乏周边建筑的遮蔽,完全暴露于强风之中。不仅使得树木承受的风力荷载骤增,还因缺乏建筑群分担风压而单独受力,导致根基不稳的树木被连根拔起,枝干在持续强风作用下也易发生断裂。

7.2.2 基于LCZ分析 LCZ是一种专用于描述城市及其周边区域气候特征差异的分类系统[100]。依据校园内不同区域的建筑特征、植被覆盖以及地形等因素,运用LCZ分类系统将校园划分为多个不同的类型,分区精度为100 m × 100 m,如图98所示。考虑到校园内的各局地类型分布非常不均,且数量差距显著,倒伏数量有可能受到某一局地气候数量的影响,故对数据做了归一化处理:即用各LCZ类型内受损树木数量除以该类型的单元数量,得到单位区域平均受损树木数量。

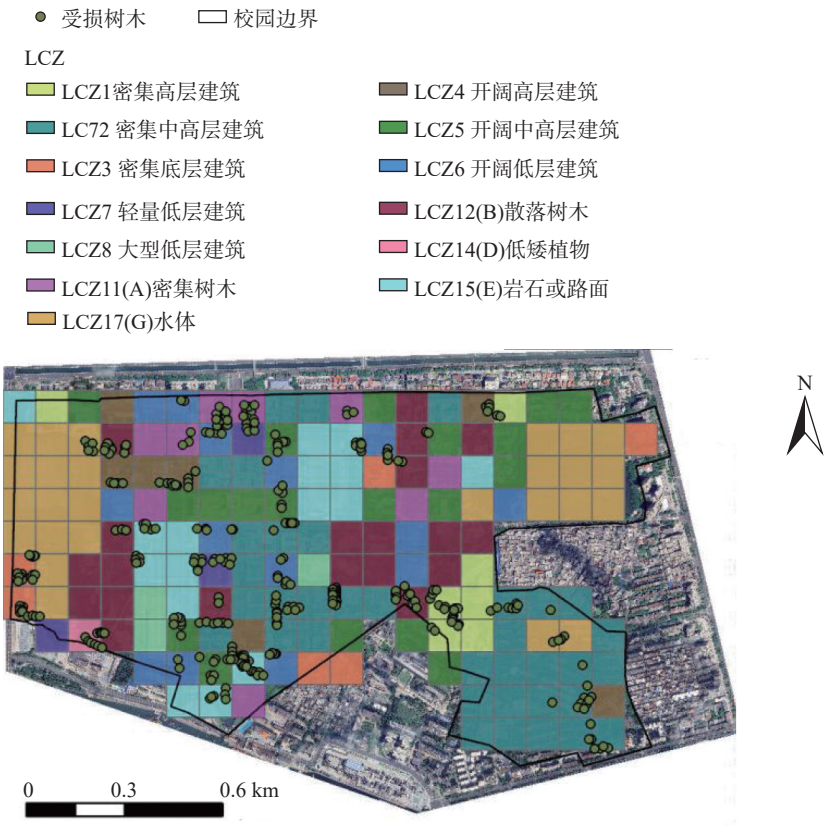


图98 校区内LCZ分区与受损树木叠加

各局地气候分类的平均受损树木量如图99所示。由图99可知,在局地气候为LCZ1(密集的高层建筑)、LCZ3(密集的低层建筑)、LCZ7(轻量级低层建筑)和LCZ15(岩石或者铺筑的地面)中,平均每100 m × 100 m范围内受损树木数量大于3棵,而受损树木总量最多的LCZ2(密集的中高层建筑),对应校园内的宿舍区、教学楼区,平均树木受损数量较低(1.8棵)。分析原因如下:

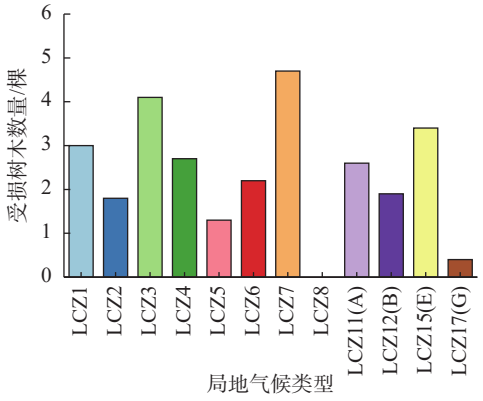


图99 各局地气候分类的平均受损树木量

(1)高层建筑狭口区加剧树木受损

LCZ1区域为高层建筑之间形成的狭口街区。由于街道风通道截面收窄,风速增大;同时高层建筑阻挡上部气流导致下沉,与街道峡谷风汇合,在建筑底部形成强湍流,增加树木受损风险(如图100所示)。

(2)密集或者轻量的低层建筑区加剧树木受损程度

LCZ3 和 LCZ7 区域在校园中多为临时建筑或低层实验室(如图 101 所示)。该类区域树木受损机制与开阔区类似,缺乏有效防风屏障。



图 100　高层建筑狭口区



图 101　低层多层区树木破坏

(3)具有大型构筑物的开阔区

开阔区展现的局地气候为 LCZ15(岩石或者铺筑的地面),若周边存在校门或者高架桥等构筑物,树木受损更为严重。开阔地形促进气流加速,构筑物进一步扰乱风场,形成强风且风向多变的恶劣环境,树木更易发生枝干扭曲与断裂(如图 102 所示)。

(4)密集中层建筑区有效减少树木受损

校园内广泛分布的 LCZ2 区域主要为 5 ~ 9 层的学生宿舍、教学楼和实验楼,建筑高度在 15 ~ 30 m 之间。该类区域单位受损树木数量少,表明其密集的建筑布局形成有效的防风空间,显著降低了树木的风损风险(如图 103 所示)。



图 102　具有大型构筑物的开阔区



图 103　密集中层建筑区

8　案例分析二:超强台风“摩羯”作用下建筑物风致振动舒适度

高层建筑作为现代城市主体居住形态,其在极端风荷载下的振动舒适度问题已成为工程领域关注重点。振动舒适度不仅涉及建筑结构的物理响应特性,而且更直接影响居住者的生理健康、心理感知及工作效率,它是衡量建筑品质的重要维度。因此,深入研究高层建筑在超强台风“摩羯”下的风致振动及其对舒适度的影响,对于保障建筑使用功能和提升人居环境质量具有重要意义。

本研究通过问卷调查,结合受访者的个人信息、主观感受、建筑特性及周边环境因素等信息,采用 Borg CR-10 作为舒适度评价指标[101],探讨超强台风“摩羯”作用下建筑物风致振动舒适度的影响因素,为优化高层建筑结构抗风设计标准和提升建筑宜居性能提供参考依据,为韧性城市设计提供人因工程学依据。

8.1　调查问卷设计与初步统计结果

8.1.1　研究区域　超强台风“摩羯”登陆时,其中心附近最大风力为 17 级,风速达到 60 m · s^{-1},其 7 级风

圈(半径约350 km)覆盖整个海南岛,12级风圈(半径约60 km)持续影响海南岛北部沿海地区。鉴于超强台风“摩羯”影响范围,本研究选取海口、文昌和临高3个市县作为代表性重灾区。

现场调研发现,高层建筑的围护结构和附属结构遭受不同程度破坏,如门窗变形、幕墙破裂等,严重影响居民生活。因此,问卷设计综合考虑了风致振动的感知与评价,以及居民的心理和生理反应。

8.1.2 调查问卷设计 调查问卷主要包括:受访者的基本信息及所在建筑物的相关特征;风环境与影响因素,着重建筑物周边环境特征;关注风致振动的感知与评价,包括受访者对振动的感知强度、持续时间及作用方向等;采用Borg CR-10量表,评估超强台风“摩羯”期间建筑风致振动对舒适度的影响。

8.1.3 受访对象基本信息 为保证调研结果的准确性和时效性,本次调查问卷于超强台风“摩羯”过境后一周(2024年9月20日起)在线发放。共收集有效受访者188人,其中男性110人,占58.51%,女性78人,占41.49%。年龄分布方面,18~30岁受访者最多,有94人,占50.00%;其次为31~50岁,有66人,占35.11%;51岁以上22人,占11.70%;18岁以下有6人,占3.19%。受访者集中在18~50岁之间,尤其以18~30岁群体占比最高。受访者所在建筑物类型中,165人(87.77%)在住宅建筑,13人(6.91%)在宿舍楼,5人(2.66%)在酒店,4人(2.13%)在办公楼,仅1人(0.53%)位于商业综合体。

在设计问卷调查时,鉴于多数受访者可能不清楚所在建筑物的具体高度,因此采用楼层信息作为替代描述,以确保准确性。从图104可知,受访者所在建筑物总楼层分布为:1~3层(低于10 m)41人,占21.81%;4~6层(10~24 m)61人,占32.45%;7~10层(24~40 m)21人,占11.17%;11~30层(40~100 m)61人,占32.45%;30层以上(100 m以上)4人,占2.12%。

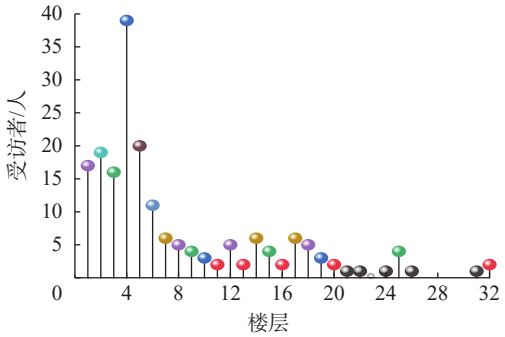


图104 受访者居住楼层统计情况

在建筑物主要朝向统计中,样本呈现典型南北轴向集聚特征,南朝向69人最多,占36.70%;其次是不清楚主要朝向的受访者,有53人,占28.20%;北朝向27人,占14.36%;东南朝向15人,占7.98%;东朝向10人,占5.32%;西南朝向和西朝向均为7人,各占3.72%。大部分受访者由于缺乏专业知识,难以准确辨别建筑物的主要朝向。南北朝向建筑物的总和约占65%,明显高于其他朝向建筑物,符合当前国内住宅类建筑设计的普遍趋势。故在本次分析中,剔除了朝向不明确的样本,并将南北朝向合并为一类。

在调研中,受访者主要集中在海口市,其中美兰区的受访者最多,有122人,占64.89%;秀英区21人,占11.17%;琼山区16人,占8.51%;龙华区15人,占7.98%;文昌市6人,占3.19%;临高县8人,占4.26%。本次调查对象以海口市为主,特别是受灾严重的美兰区,占据了较大比例。

8.1.4 超强台风“摩羯”环境与影响因素 受访者所在建筑物周围特征因素统计如图105所示。从图105可知,在受访者所在建筑物周围特征因素的总响应频次(共255次)中,中高层建筑楼群占比最高,接近44%(112次);其次为风口,占比约24%(60次);再次为靠近水体约15%(38次)和空旷区域约11%(29次),其他因素约6%(16次)。

受访者所认为超强台风“摩羯”对建筑物的影响如图106所示。从图106可知,就超强台风“摩羯”对建筑物的影响的统计中,37 % 受访者报告“台风强度大,但建筑物振动不明显”,35% 受访者感知“台风风速明显作用于建筑物,振动明显”。该结果可能与居住楼层有关,尤其是4~6层与11~30层的受访人数

较多导致了感知差异。

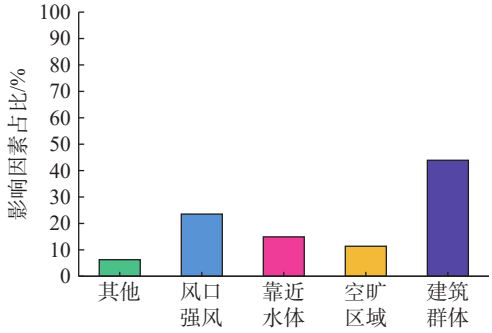


图 105　受访者所在建筑物周围特征因素统计

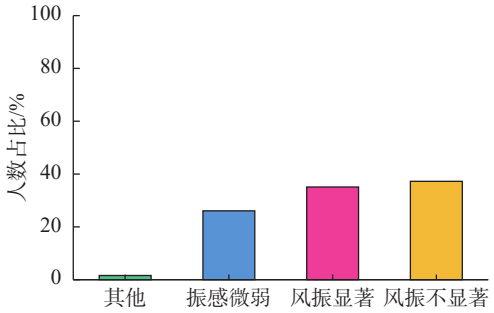


图 106　受访者所认为超强台风“摩羯”对建筑物的影响

从表 25 可知，通过建筑物总楼层与超强台风“摩羯”影响的交叉分析，居住在 1 ~ 10 层的受访者多认为“无影响”、“建筑物结构坚固，振动不易察觉”或“台风强度大，但建筑物振动不明显”；而居住在 11 层及以上的受访者则普遍认为“台风风速明显作用于建筑物，振动明显”。

表 25　受访者所在建筑物总楼层与超强台风“摩羯”对建筑物的影响的交叉分析统计情况　　单位：人

类别	1 ~ 3层	4 ~ 6层	7 ~ 10层	11 ~ 30层	30层以上	总计
风振显著	7	10	7	39	3	66
振动不显著	17	30	9	14	0	70
振感微弱	16	20	4	8	1	49
其他	1	1	1	0	0	3
总计	41	61	21	61	4	188

8.1.5　风致振动感知与评价　建筑物风致振动的感知调查结果如图 107 所示。为了真实反映风致振动感知，本问题设计为多项选择，包括振动不明显、轻微晃动、垂直振动和水平振动以及其他振动情况等 5 个选项，对受访者 188 人，收集了 224 条数据。其中，53% 受访者报告存在“结构轻微晃动”或“不明显但可察觉的振动”。结果表明，尽管振动幅度有限，多数受访者仍能够感知到风引起的结构振动。在 58 名感知到水平振动的受访者中，53 人居住于南北朝向的建筑，占比高达 91.40%；而在感知到垂直振动的 3% 受访者中，全部居住于南北朝向建筑。此外，在认为存在“结构轻微晃动”或“不明显但可察觉的振动”的 53% 受访者中，60 人居住于南北朝向建筑，占比为 84.51%。

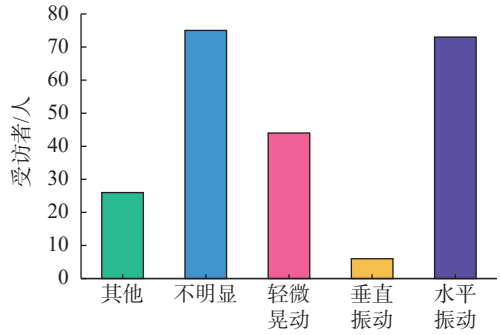


图 107　受访者感知建筑物振动表现统计情况

总体而言，受访者普遍能够感知到程度较轻的风致振动。当超强台风“摩羯”风力达到峰值时，受访者对风致振动的感知明显，且多数能够识别以水平方向为主的振动特征。感知水平振动的受访者数量显著多于感知垂直振动的受访者，这种方向性差异与风荷载的作用方向密切相关，即建筑物的水平振动方向与风荷载的施加方向一致。

8.1.6 基于 Borg CR-10 的舒适度评价 采用 Borg CR-10 量表量化评估超强台风“摩羯”期间建筑物风致振动强度及舒适度,如表 26 所示。表 26 中评分越高,振动感知和不适感越明显。基于 Borg CR-10 量表的振动强度感知及舒适度评分的统计如图 108 所示。由图 108 的统计可知,122 人选择 1 ~ 4 分(65%),表明大多数人感知到中等轻微的振动,未感到明显不适;37 人选择 7 ~ 10 分(20%),表明感受到较强振动,出现焦虑不安甚至头晕恶心等不适症状。这 37 人均属于“经常感知建筑风致振动”的群体中,且主要集中在高层建筑(11 层及以上)以及风口或强风区域。这些区域的建筑在超强台风“摩羯”作用下振动更为显著,对居住舒适度的影响更为突出。

表 26 受访者在超强台风“摩羯”期间感知建筑物风致振动强度及舒适度 Borg CR-10 评估表

评分	振动强度感知
0	无振动:无感知,感觉良好
1	极轻微振动:几乎感觉不到振动,需要集中注意力才能察觉到
2	非常轻微振动:可以感受到轻微的振动,偶尔会注意到
3	轻微振动:可以感觉到持续的轻微振动,引起轻微的不适
4	中等轻微振动:振动清晰可感,偶尔感到轻微干扰
5	中等振动:振动明显且持续,时不时会引起注意,感到中等不适
6	中等偏强振动:振动较强,持续时间长,有时感到明显不适
7	强烈振动:振动非常明显,频繁且持续,可能引发焦虑或不安
8	非常强烈振动:极其明显,出现轻微生理反应(如头晕或恶心)
9	极其强烈振动:几乎无法忍受,伴随严重的生理反应(如眩晕、恶心)和明显的心理不适反应
10	极限振动:强度达到极限,完全无法忍受,伴随极端不适感,生理反应如剧烈头痛、眩晕、恶心感加剧,出现恐慌情绪

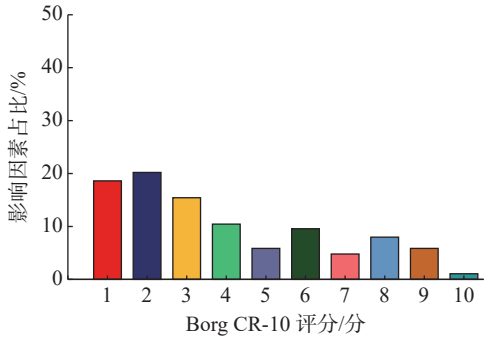


图 108 基于 Borg CR-10 量表的振动强度感知及舒适度评分的统计情况

8.2 舒适度影响因素统计分析

8.2.1 基于 Borg CR-10 的舒适度统计分析 本研究利用 Borg CR-10 量表对受访者在超强台风“摩羯”期间感知的风致振动舒适度进行评估。该量表的评分越高,表明受访者对振动的感知和不适感越明显。调研结果显示,全体受访者对建筑物振动舒适度评分均值为 3.95,显示出全体受访者舒适度总体评价结果为中等轻微振动,不适感处于中低水平。

8.2.2 性别差异对受访者舒适度评分的影响分析 受访者的舒适度评分与性别的差异分析结果如表 27 所示。统计结果显示,男性受访者的均值评分显著低于女性。结果表明女性受访者往往表现出对振动更高的敏感性。超强台风“摩羯”来袭期间,建筑物振动及其他外部环境变化更容易引发女性的心理和生理不适反应,反映出性别在感知振动强度和舒适度上的显著差异。

8.2.3 年龄差异对受访者舒适度评分的影响分析 根据受访者的年龄不同,对舒适度评分进行差异分析如表 28 所示。从表 28 中可知,18 岁以下与 18 ~ 30 岁受访者的评分显著低于 31 ~ 50 岁与 51 岁以上的受访者。这反映出随着年龄的增长,个体面对外部环境变化,生理和心理承受能力等都会逐渐减弱。年

龄较大的受访者在舒适度的主观评分上更高,显示出更强的不适感。

表 27 不同性别受访者对舒适度的差异分析

	性别	受访者/人	均值
Borg CR-10 评分	男	110	3.45
	女	78	4.65

表 28 不同年龄对象对舒适度的差异分析

	年龄	受访者/人	均值
Borg CR-10 评分	18岁以下	6	3.17
	18 ~ 30岁	94	3.15
	31 ~ 50岁	66	4.95
	51岁及以上	22	4.59

8.2.4 建筑物楼层和舒适度评分分析 受访者所在建筑物总楼层及居住楼层的样本数量以及基于 Borg CR-10 量表的舒适度评分均值,结果如表 29 和表 30 所示。

表 29 不同建筑物总楼层与舒适度评分分析

	您所在建筑物总楼层:	受访者/人	均值
Borg CR-10 评分	1 ~ 3层(低于10 m)	41	3.12
	4 ~ 6层(10 ~ 24 m)	61	3.05
	7 ~ 10层(25 ~ 40 m)	21	3.76
	11 ~ 30层(41 ~ 100 m)	61	5.34
	30层(不包括30层)以上(100 m以上)	4	6.00

表 30 受访者所在楼层对舒适度评分的差异分析

受访者所在楼层	受访者/人	均值	受访者所在楼层	受访者/人	均值
1	17	2.35	17	6	7.00
2	19	2.84	18	5	6.40
3	16	3.56	19	3	8.00
4	39	2.56	20	2	4.00
5	20	4.65	21	1	1.00
6	11	2.82	22	1	8.00
7	6	4.17	23	—	—
8	5	4.40	24	1	8.00
9	4	4.50	25	4	8.00
10	3	3.67	26	1	4.00
11	2	6.00	27	—	—
12	5	6.80	28	—	—
13	2	8.50	29	—	—
14	6	3.67	30	—	—
15	4	4.75	31	1	9.00
16	2	4.00	32	2	6.00

注:“—”表示空白。

从表 29 可知,建筑物总楼层与受访者舒适度评分关联紧密。低楼层(1 ~ 3 层和 4 ~ 6 层)受访者受风

致振动影响小,舒适度较好、不适感轻;7~10层受访者不适感有所增强;11~ 30层负面影响急剧加剧;30层以上超高层不适感极为突出。总体而言,随着建筑物总楼层不断升高,受访者基于Borg CR-10量表的舒适度评分均值呈现出明显的上升趋势。

从表30可知,低楼层(1~4层)由于高度较低,所受风力作用较小,结构振动较弱,受访者不适感较轻,舒适度评分均值介于2.35~3.56之间,整体舒适度较好。中楼层(5~10层)评分波动较为明显,其中5层均值为4.65,表明该区域受风致振动影响增强。中高楼层(11~20层)的评分普遍高于4.00,说明随着高度增加,风致振动影响逐步增强,不适感趋于强烈,但20层评分相对较低。高楼层(21层及以上)评分呈现极端化特征,如21层均值为1.00,为所有楼层中最低,而部分楼层评分达到8.00及以上,反映出风致振动对舒适度的严重影响,受访者普遍感到强烈不适。20层与21层的评分偏离整体趋势,其原因可能包括样本数量有限、该楼层在结构设计中采取了特殊减振措施、周边环境存在削弱风致振动的有利条件,或受访者个体对振动的敏感度较低,在一定程度上缓解了风致振动对舒适度的负面影响。因此,随着楼层升高和所处高度增加,风致振动振幅相应增大,受访者对振动的感知更为敏感,不适感更加明显。

8.2.5 建筑物朝向及场地因素与舒适度评分分析 建筑物朝向对居住者舒适度的影响(如表31所示),即不同朝向的建筑物在超强台风"摩羯"期间所展现出的Borg CR-10舒适度评分均值存在明显差异,反映了各朝向在应对超强台风"摩羯"时的不同特性。在设计调查问卷时,为了反映调研对象的真实情况,本问题包含朝东、朝西、朝南、朝北和朝向不明确等5个选项,故从总受访者(188人)剔除了朝向不明确的53人后对135人开展建筑物朝向对舒适度影响的分析。其中,南朝向和北朝向在应对超强台风"摩羯"时由于更容易受到强风和风雨的影响,评分较高,舒适度相对较低。而东朝向和西朝向北朝向则凭借相对稳定的特性,为居住者提供了一定的舒适度,评分较低,表现出较好的舒适度。

表31 建筑物朝向与舒适度评分差异性分析结果

	建筑物朝向	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	南朝向	115	4.25
	东朝向	10	3.30
	西朝向	7	3.14
	北朝向	3	4.00

场地因素对Borg CR-10舒适度评分的影响如表32所示。在设计调查问卷时,由于受访者所在建筑可能同时具备多种周边环境特征,设置了包括中高层建筑群、空旷区域、靠近水体、风口或常有强风经过以及其他情况等5个选项,对受访者188人,收集了255条数据。中高层建筑群样本量最大,但均值4.13,表明其舒适度较差,可能因建筑密集导致通风不良、热岛效应或视觉压迫感;空旷区域样本量较少均值4.03略优于中高层建筑群,但可能因缺乏遮阳或防风设施而影响体感舒适度;靠近水体的样本以均值4.50成为舒适度最差的区域,可能因水体反射阳光或潮湿环境加剧体感不适;风口或强风区域均值为4.48,同样因强风干扰导致舒适度偏低;而其他类场地均值为3.06,虽样本量最少,但舒适度相对最佳,可能因缺乏明确负面环境特征。

表32 场地因素与Borg CR-10舒适度评分差异性分析结果

	周围场地特征因素	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	中高层建筑群	112	4.13
	空旷区域	29	4.03
	靠近水体	38	4.50
	风口或常有强风经过	60	4.48
	其他	16	3.06

8.2.6 主观感受认知与舒适度评分分析 风致振动对建筑物内人员舒适度的影响评价结果如表33所

示。在设计调查问卷时，由于风致振动影响因素可能同时存在，故设置了包括楼层较高、建筑物设计或结构问题、台风风速极大、周围建筑物或环境影响以及其他情况等 5 个选项，对 188 个调研对象，收集了 304 条数据。在各类影响因素中，较高楼层（65 人）对应的 Borg CR-10 评分均值为 5.48，为所有因素中最高，表明该条件下人员舒适度最差。随着楼层升高，风力强度增大、作用频率提高，建筑易产生明显整体晃动，振动通过结构传递至室内，引起持续的振动感知。“台风风速极大”是样本量最多的影响因素（147 人），其舒适度评分均值为 4.93，处于中等偏下水平。超强台风“摩羯”所携带的强风能量巨大，对建筑结构产生强烈冲击。尽管现代建筑具备一定的抗风设计能力，但在极端条件下仍难以避免发生晃动。实地调查发现，沿海住宅在超强台风“摩羯”期间常出现窗户振动和门窗异响等现象，引起居民对建筑安全性的担忧；然而，由于一般不会造成严重结构损坏或倒塌，舒适度虽明显下降，但并未恶化至极端程度。建筑物设计或结构问题相关的受访者 32 人，评分均值为 4.81，舒适度也处于较低水平。若建筑在设计与施工中存在缺陷，如结构布局不合理、材料选用不当或节点连接薄弱等，均会削弱其抗风性能。在风致振动作用下，上述问题将被放大，导致建筑出现异常振动或变形。周围建筑物或环境影响的受访者 41 人，评分均值为 4.20，舒适度处于中等水平。周边建筑的布局、高度、形态以及场地地形等地貌条件，均会对目标建筑的风致振动响应产生调制作用。因此，在各类风致振动影响因素中，楼层较高对舒适度的负面影响最为显著，其次为台风风速极大和建筑物自身的设计或结构问题，而周围建筑物或环境因素的影响相对较弱。

表 33　风致振动影响因素与舒适度评分差异分析

	影响因素	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	楼层较高	65	5.48
	建筑物设计或结构问题	32	4.81
	台风风速极大	147	4.93
	周围建筑物或环境影响	41	4.20
	其他（请说明）	19	1.84

安全担忧与 Borg CR-10 舒适度评分结果如表 34 所示。由表 34 可知，不同安全担忧程度人群的 Borg CR-10 舒适度评分均值存在明显差异。其中，极度担心（43 人）的评分均值为 5.40，为 3 组中最高，表明当人们对安全状况极度担忧时，其舒适度会受到显著影响，反映出安全担忧程度与舒适度之间呈负相关关系，即担忧程度越高，舒适度越差。有一些担心（104 人）的评分均值为 3.97，处于中间水平，说明该群体虽存在一定安全顾虑，但相较于极度担心组，其舒适度相对较高。无担心（41 人）的评分均值为 2.39，为最低值，清晰表明当受访者对建筑结构安全具有较高信心时，其舒适度评分相应较高，进一步支持了安全担忧与舒适度之间的负相关关系。综上所述，表中数据明确显示，安全担忧程度对 Borg CR-10 舒适度评分具有显著影响，随着安全担忧程度的减轻，舒适度评分逐渐提高。

表 34　安全担忧与 Borg CR-10 舒适度评分结果

	安全担忧	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	是，极度担心	43	5.40
	有一些担心，但仍感到相对安全	104	3.97
	没有担心，感到建筑物结构安全可靠	41	2.39

超强台风“摩羯”对建筑物的影响程度与 Borg CR-10 舒适度评分分析结果如表 35 所示。其中，66 人认为“台风风速明显作用且振动明显”的受访者中，舒适度评分均值为 6.33，居 4 组之首，表明当超强台风“摩羯”引发建筑明显振动时，舒适度显著下降。强烈振动易诱发恐惧与不安，并伴随头晕、心慌及身体失衡等生理反应，从而导致舒适度评分升高，反映出明显的身体不适状态。选择“台风强度大，但建筑物振动不明显”的受访者数量最多，显示多数人在遭遇强风时所在建筑并未出现显著振动。而认为“建筑物结

构坚固,振动不易察觉”的受访者评分均值最低(1.98),说明结构稳定性有助于维持较高的舒适度,主要源于环境安全稳定、无振动干扰。“其他”情况样本数仅3例,为4组中最少,属于特殊情形。

表35 超强台风“摩羯”对建筑物的影响程度与Borg CR-10舒适度评分结果

	台风对建筑物的影响程度	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	台风风速明显作用于建筑物,振动明显	66	6.33
	台风强度大,但建筑物振动不明显	70	3.20
	建筑物结构坚固,振动不易察觉	49	1.98
	其他	3	1.33

因此,超强台风“摩羯”对建筑物的作用程度与Borg CR-10舒适度评分呈正相关:建筑物受超强台风“摩羯”影响越大、振动越强,则舒适度评分越高,即舒适感越差;建筑结构越坚固、振动越微弱,则评分越低,舒适感越好。因此,在建筑设计与防风策略中,应重视提升结构强度与稳定性,以减轻台风引起的建筑振动,从而提高人员在台风天气中的舒适度与安全感。

风致振动感知与Borg CR-10舒适度评分分析结果如表36所示。总体来看,风致振动的感知程度与Borg CR-10舒适度评分密切相关。风致振动越频繁、越显著,受访者的舒适度评分越高,舒适感越差;反之,风致振动越轻微、越不易察觉,评分越低,舒适感越好。

表36 风致振动感知与Borg CR-10舒适度评分结果

	风致振动感知	受访者/人	均值
Borg CR-10评分	经常感受到振动	50	6.98
	偶尔轻微感受到振动	65	3.85
	几乎没有感受到振动	44	2.52
	从未感受到振动	29	1.14

其中,在“经常感知建筑风致振动”的受访者50人中,有37人选择了7~10分,显示出极为显著的不适感,如焦虑不安、头晕恶心等。65人偶尔感知轻微风致振动,样本数量最多,说明多数人处于轻度振动环境中。该组Borg CR-10均值为3.85,处于中间水平,且显著低于高频感知组,表明偶发微弱振动对舒适度影响有限。因振动频率低、强度小,身心反应较弱,评分相对较低,人员基本可维持正常生活与工作状态;44人几乎无风致振动感知,占比最小,反映调查对象中处于极稳固建筑中者较少,可能得益于优良的防风设计。该组Borg CR-10均值仅为2.52,显著低于其他组,说明无振动环境有助于提升舒适度。稳定环境带来心理安定感,身体亦未受干扰,故评分偏低,舒适性较高;从未感知建筑振动的受访者为29人,样本数量最少,可能源于此类建筑数量有限或调查覆盖不足。该组Borg CR-10均值最低(1.14),表明无振动状态下舒适度最高,稳定环境使身心处于较佳状态,安全感和舒适感显著增强。因此,当受访者对安全性表现出较高担忧、对建筑物影响持负面评价,或对风致振动感知较明显时,其Borg CR-10评分往往偏高,反映出更强的不适感。

9 防灾减灾对策

人类活动特别是燃烧化石燃料(如煤、天然气、煤气等)、砍伐森林和畜牧产业等令大气中的二氧化碳浓度增加,导致全球气温上升,带来强降雨、超强台风等更多极端天气事件。这些极端天气对陆地建筑和设施施加的荷载往往超过规范的限定,造成其局部破坏、损毁或带来其他次生灾害。海南岛作为中国唯一的热带岛屿,位于西北太平洋台风向西移动路径的关键区域,登陆海南岛的台风数量占全国登陆台风总数的四分之一。海南岛周围广阔的暖水海域为台风的维持和增强提供了持续的能量,使得台风在靠近海南岛时仍能够保持较高强度,加之海南岛北部海拔较低,文昌市和琼海市素有“台风走廊”之称。仅10年间隔,“威马逊”和“摩羯”2个超强台风先后登陆文昌市翁田镇,其过境路线均属在海南岛引起最强破

坏性波浪的台风路线，对海南岛的社会经济造成了严重冲击。

从世界范围可持续发展角度，全面落实《巴黎气候变化协定》，快速、大幅和持续地减少全球温室气体排放，增强对气候变化的应对能力，保护地球生态环境，已成为国际社会的共同责任。中国政府也在2021年发布《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，启动“双碳”工作顶层设计。然而，减碳行动需全球长期共同努力，在此过程中，各国应正视气候变化、极端天气频发的现实，积极采取适应性与应对性措施，如加强建筑物与基础设施的抗灾设计、提升海岸防护能力、增强城乡防洪排涝能力等，以保障人民的生命健康和财产安全。

2014年超强台风“威马逊”为有气象记录以来登陆中国的最强台风，登陆文昌市时强度达到70 m·s^{-1}；时隔10年，2024年超强台风“摩羯”仅次于超强台风“威马逊”，以强度62 m·s^{-1}登陆文昌市，成为有气象记录以来秋季登陆的最强台风，且超强台风“摩羯”12级及以上大风的影响范围更广、持续时间更长，给海南岛造成的经济损失也更为严重。

超强台风属于偶发灾害，其发生、发展有很强的不确定性，可获得的针对不同对象的破坏力信息有限，其引发的环境荷载也远超各类人工建筑、设施规范设防范围。单纯地提高规范设计标准既不符合经济性原则，也难以推广实施。因此，有必要基于灾害调研数据开展科研攻关，及时引入先进技术，有针对性地提出人工建筑与设施的韧性提升方案，以及灾前预防与灾后应急响应策略，以应对未来可能更频繁发生的极端天气事件。基于研究与分析，本研究将从适应气候变化导致的超强台风频发趋势，以及台风过境前后的应急处置两方面，探讨防灾减灾对策。

9.1 超强台风灾害适应 近10年间，海口市和文昌市等地经历了2次超强台风过境，这与海南岛周围暖水海域为台风提供持续能量以及北部地势低平等因素密切相关。随着全球气候变化的加剧，超强台风侵袭的频率仍可能进一步上升。充分借鉴过往灾害经验，在海口市、文昌市及周边影响区域系统推行灾害适应措施，对于降低灾害损失，提高社会灾后恢复能力具有重要意义。

9.1.1 *更新设计标准* 本研究调研的房屋建筑、市政基础设施、海岸以及树木等在超强台风“摩羯”影响下都出现了不同程度的破坏，除因材料与结构本身的承载能力低于极端环境荷载外，破坏程度还与局部地理环境密切有关。鉴于不同结构类型和设施的破坏机理存在差异，建议在制定强化改进方案前，组织开展系统性的专项调研与评估工作，为修订设计标准、引入新技术和新方法提供科学依据。

根据超强台风作用参数，更新各类房屋建筑、市政基础设施设计标准，是快速、有效地提高区域防灾能力的重要手段。政府与相关机构可结合前述专项调研评估结果、国内外科学技术最新进展以及相关标准，积极推进标准修订工作。针对风灾的区域化特征，可借鉴工程结构“三水准”抗震设防理念，建立多级、多目标抗台风设计准则，确保关键结构、设施在不超过设防风级的台风中维持功能正常，在超设防风级台风中建立“破坏程度–使用功能–维修成本”之间的对应关系，实现功能需求与成本控制的统筹优化。结合本研究的调研工作，针对海南岛，特别是海口市、文昌市等风灾高发区域，提出以下具体的改进建议：

(1)加强建筑围护结构的选材及与主体结构的连接

轻钢结构工业厂房的屋面板、侧墙板和卷帘门所选用彩钢板的厚度不宜过薄，建议不小于0.5 mm，以避免在表面风压下发生面外剪切破坏；表面应进行镀锌、金属覆层或防腐涂层处理，提升耐腐蚀性。轻钢结构柱和钢檩条的截面合理设计，门、窗的边框采用优质铝合金或不锈钢材料，以提高边框的强度和刚度。

围护结构与主体结构的连接部件是决定围护结构风振稳定性的关键构造。应重点关注围护结构与主体结构的连接性能，包括屋面彩钢板与檩条的连接、彩钢板咬合边、屋脊、檐口及转角包边处理，以及门窗框固定、吊顶龙骨连接和外墙干挂节点等关键部位。

(2)优化沿海高层建筑的布局以降低风致破坏

在设计与建设阶段，应合理规划楼栋布局，通过建筑群体布置和形态设计降低台风风场对单体的影响。

(3)提升钢结构厂房、膜结构及高层建筑顶部突出结构的抗风标准

应加强柱脚节点设计,采用高强度连接件(如抗风螺栓)替代普通自攻螺钉,合理布置连接点以避免应力集中。针对屋顶掀飞问题,建议采用高强度屋顶钉、金属夹具和螺栓增强屋面与主体结构的连接。

(4)增强滨海风口区临时建筑的抗台风及次生灾害能力

优先采用一体化定制设计的临时建筑,加强围护与主体结构连接,控制建筑高度,慎用大跨度轻钢结构,必要时应实施加固。

改进连接方式,如采用焊接、加深卡槽、增加中部连接筋等,提升节点设计与施工质量。选用高强度、耐腐蚀、高密闭性和高韧性的材料,以提升日常耐用性和极端灾害下的抗倒塌能力。

选用高强度、高耐腐蚀性、高密闭性、高韧性的建筑材料,提升临时建筑在热带海岛日常使用过程中的防水防潮、抗老化性能,有效降低台风等极端灾害发生时主体结构、围护结构发生弯折、垮塌、撕裂或剥脱的风险。

滨海临建项目应进行专项结构设计和抗风论证,与海岸线保持合理距离,设置防风墙等遮蔽设施。灾前可在迎风面采用加固压条、沙袋等措施增强抗风能力。

(5)应从材料、结构体系和锚固措施等多方面系统提升抗风性能

在工程材料方面,结合海南高盐雾、强紫外与湿热环境叠加超强台风的区域特征,建筑材料应以高耐蚀、高韧性与高耐久性为核心要求。围护与屋面系统宜采用厚镀层钢材、铝镁锰合金板、不锈钢构件以及耐紫外复合材料,高层与沿海基础设施可采用高性能混凝土及抗氯离子侵蚀外加剂体系,以提升在循环风雨作用下的耐久性与抗疲劳性能。

在结构体系方面,应以提升整体抗侧刚度与优化风荷载传递路径为重点。高层建筑可通过加强核心筒与框架协同、外形气动优化及配置阻尼减振装置等方式降低涡流脱落效应;轻钢厂房、大跨屋盖等结构宜增设支撑体系、提高节点刚度并优化构件布置,减少阵风引起的抖振累积损伤;装配式建筑应强化湿接与干接节点的抗剪、抗拔设计,确保整体性。

在锚固措施方面,应重点提升关键节点的抗拔、抗剪与抗疲劳性能。围护板、屋面板与主体结构宜采用多道锚固及高强螺栓,完善防松体系并加强檐口、山墙及开口部位的局部构造;沿海临时建筑应采用焊接卡槽、贯通螺栓、地锚体系等高等级连接方式,避免受风吸力导致整体掀飞。此外,可采用连续固定带、负风压夹具等冗余固定手段,提高围护构件在极端风压下的残余承载能力。

(6)统筹提升道路基础设施的雨水排放与边坡防护能力

加强海口市、文昌市等城市的防洪排水系统,巩固人造和天然边坡,降低滑坡与路基失稳风险。选用抗水损材料(如水性环氧树脂、纳米改性材料)延长路面寿命。

针对风致附属设施破坏,应研究海南岛近地风场特性,修订不同重现期下降雨和风压荷载值,优化电线杆、路灯、广告牌等设施的抗风设计标准。

(7)系统改进电力通信设施的设计与安装

杆塔类设施的破坏程度与其所处的受灾位置有较强的相关性,应实施差异化加固。对于海口市、文昌市等直接承受风眼壁附近最大风速的核心影响区,应推行高于国家通用规范的抗风设计等级,并优先采用圆形或多边形截面等气动性能更优的杆塔形式,以直接削弱极端风荷载的冲击。同时,结合沿海高盐雾环境会加速金属构件腐蚀和台风暴雨会软化地基这2大致灾原因,必须对核心影响区域内的杆塔设施进行专项升级:如使用更高等级的防腐蚀材料与工艺,对杆塔基础进行加深处理等,精准提升其在"风–雨–潮"联合作用下的结构稳定性。

线缆类设施破坏不具有较强的区域相关性,不管是在核心影响区域还是外围影响区域线缆类设施的破坏都较为严重。因此,防护策略必须超越线缆本体,推行全局性加强。具体可以包含以下3个层面:加固附着结构(电杆、铁塔等);净化廊道环境,规避风口、清理危险物;提升线缆自身强度,采用高抗拉缆线、增加紧固点与减震装置。

(8)光伏发电站板的光伏板、支撑结构要重点加强抗风设计

超强台风"摩羯"导致海口市、文昌市的光伏板大面积损坏,应在光伏板设计安装中综合考虑更换构

件和施工的经济性。在现行 NB/T10115—2018《光伏支架结构设计规程》[41] 要求的 25 年重现期基础上，设计抗风风速 36.9 m·s^{-1}，远小于超强台风“摩羯”的最大风速。应通过采用合理的柱截面尺寸，将抗风等级提高到能够抵御极端台风风速的水平。在结构体系选型方面，可合理采用单独立柱、单列柱和双列柱布局，以降低支架柱构件在台风作用时能够减小偏心受压(拉)效应。需加强柱与其他部件之间的连接节点的设计与验算，特别是梁柱节点应进行承载力复核。支架柱与基础之间的连接宜采用埋入式柱脚，并采取有效加固措施，确保节点强度和刚度满足抗风要求。连接件宜采用压块与螺栓复合紧固工艺，兼顾螺栓防松脱和压块抗剪切的优点对于高风险区域，可设置“保险丝”型连接件，即控制连接件强度不过高，使上部结构在极端风载下先于下部支架发生破坏，从而保护主体支撑结构。

(9)从区域发展规划层面制定海岸防护长远策略

超强台风“摩羯”已造成文昌市附近砂质海岸线严重侵蚀，海口市附近人工海堤也出现明显局部结构损伤，同时伴随着海岸附近道路路基掏空和景观建筑破坏等问题。应结合沿岸区域发展规划，制定系统性、长期性的应对策略和防御措施，例如采用就地取材的海岸线防护沙包和兴建人工防波堤等，增强海岸抗侵蚀与抗风浪能力。

(10)科学规划防风林、园林绿化与行道树布局

在植被规划方面，应优先选用抗风性能良好的树种，并配合人工干预管护措施。同时可结合区域建筑布局与环境特征，开展针对性景观设计，通过合理的空间配置降低风害风险，提升整体防灾韧性。

9.1.2 科学研究

(1)建设区域台风防灾减灾研究中心

超强台风的作用区域及破坏程度受其所处的地理位置、地形和土地利用等因素影响，具有显著地域性。鉴于有记录以来登陆中国的 2 次最强台风均在文昌市登陆，并给海南岛造成了巨大的经济损失，建议成立台风防灾减灾研究中心，系统研究海南岛台风灾害发生规律、防灾避灾减灾与灾后恢复重建等方面的创新技术、法律法规及政策措施，开展国际交流与合作，服务政府科学决策。目前，海南岛尚未建设适用于工程结构的边界层风洞实验室，亟需建设多尺度风场实验室以及风−浪−流−雨等多相环境联合作用实验平台，以服务本省建构筑物抗风设计、性能检验和在台风作用下的安全评估。

(2)在超强台风路径上建设近地面梯度风场特征观测塔

有效的台风防御方案需要系统地掌握台风风场特征以及对地表对象的风致响应。目前，海南省气象局通过卫星云图和高空探测气球获取台风位置、强度、移动路径及垂直结构信息，台风登陆后，地表的粗糙度阻碍大气运动，在大气边界层内，摩擦力随高度上升逐渐减弱，导致风速垂直变化显著，这对地表建筑物的影响存在明显差异。现有近地风速仪和探空气球难以实现某一高度层的持续风场观测。建议在超强台风“摩羯”经过的文昌市和海口市一带建设专业测风塔，以准确获取大气边界层内的风切变和垂直风场结构特征，增强对该类天气过程的监测与评估能力。

(3)开展城市建筑与基础设施的灾害安全隐患排查

根据不同区域的台风灾害风险等级，对既有城市建筑、公共建筑和生命线工程开展系统性的安全隐患排查，进行抗多灾性能评估，并对存在安全隐患和抗灾性能不足的结构进行加固维修，保障既有城市建筑及基础设施的基本抗灾性能。

(4)完善台风灾害综合信息平台

近年来，人工智能、大数据、物联网、云计算、遥感、无人机、机器人和可穿戴设备等技术的发展，为灾害信息的获取、灾害机理的研究、灾害高效精准管控提供了全新途径，有助于突破传统基础设施灾害风险预警和管理的瓶颈。实现城市重大基础设施灾害风险主动感知和精准管控。

海南省应加强部署智能防灾减灾的原创基础研究和集成技术开发、推进防灾减灾管理系统建设示范，全面提升工程防灾减灾能力。通过建设建构筑物 GIS 信息系统、监测互联网与大数据云平台中心、灾害估计预测与预警预报、灾后快速监测与评估报告等数据存储、信息发布、救灾服务等灾害管理与服务多媒体系统，包括建设工程信息数据库、多灾害模拟预测系统、多灾害多元信息监测与快速评估系统

等,提升台风灾情处置效率和灾害救援能力。

9.2 应急处置 受全球气候变化的影响,未来极端天气可能会更加频繁。灾前准备与灾后应急处置对降低灾害损失、减少人员伤亡具有关键作用。自然灾害的应急处置涉及政府多部门的协同,中国已出台《中华人民共和国突发事件应对法》《国家突发事件总体应急预案》(国发〔2025〕8号)及《国家自然灾害救助应急预案》(国发〔2016〕25号)等文件,建立健全应对突发重大自然灾害体系和运行机制,规范应急处置行为,提升应急处置能力。

台风灾害应急处置通常包括前期的风险评估和控制、气象监测和预警、处置和救援以及灾后恢复重建等部分。由于超强台风等属于偶发灾害,相关信息、经验的积累不足,使得在灾害应急处置方面还存在较大改进空间。基于本研究,提出以下非系统性超强台风应急处置建议:

(1)利用高精度监测技术、数据建模及处理技术,提高对台风灾害预测预警的准确度,可以大幅度减少人员伤亡和财产损失。

(2)开展建筑、基础设施等的分级分类灾害风险分析。综合考虑:不同级别台风的重现期、最大风速及破坏性程度;对象的重要性程度、灾后功能恢复需求和经济成本。在此基础上,针对不同的抗台风目标,制定应急处置方案。

(3)充分利用空-天-地结构健康监测与检测技术,收集结构及设施的风致响应与灾害数据。在关键结构上布设健康监测系统,通过多源感知、多维度灾害因子分析、异常事件管控与预警及应急指挥调度等策略,提高应急处置效率。

(4)重视对建筑、基础设施等灾前加固和检修。对于超强台风易损对象,应在灾前及时采取加固措施,如斜撑加固和加强节点连接等,同时注意对建筑和设施等排水功能的检查。对于风力发电机等易受台风影响大型设备,应避免在台风多发季节进行风力发电机的建设和安装,确保风机在投入使用前能够有足够的准备时间进行抗台风措施的部署。

(5)制定易操作的超强台风防御手册。介绍超强台风期间民众出行注意事项,居家应急物资准备,提供科学有效的结构、设施、设备临时防灾准备方案(如确保建筑室内环境的密闭性等)以及恐慌疏导信息等。

(6)在灾后重建方面,做好灾情数据的及时、准确收集和处理,为超强台风的防灾减灾工作的提升提供重要支撑。

10 结 论

本研究基于海南大学土木建筑工程学院灾害调研小组对超强台风"摩羯"过境12级风圈范围内海南岛上的房屋建筑、典型市政基础设施以及海岸线等灾后状况的调研数据,总结灾害特征规律,分析致灾机理,并给出了防灾减灾建议,涉及调研单体(场地)超过1 000个(处)。结果显示,调研区域的建筑围护结构、高层建筑、高耸结构/钢结构、临时建筑、农业温室建筑、道路基础设施、光伏结构、电力通信设施和风力发电系统)以及海岸侵蚀、树木倒伏等在超强台风"摩羯"影响下都出现了显著的破坏,通过对灾损情况统计分析,并采用数值模拟、卫星图像对比和主观问卷调研等方法揭示了不同承载体的破坏机理,主要灾害调研结论如下:

(1)房屋建筑灾害情况

围护结构 在超强台风等极端天气条件下,围护结构的抗风性能和稳定性直接关系到建筑物的安全性和耐久性。除部分轻钢框架临建结构在灾后出现由于框架柱屈曲弯折和柱脚与基础脱离引发的整体坍塌以外,其他调研建筑的主体结构均未见明显损伤,门式钢架结构和网架结构完全损坏分别占比58.4%和100%。

高层建筑 受灾高层建筑物主要集中在海口市北部地区(海甸岛和新埠岛)、文昌市及澄迈县等北部、东北部沿海地区,而内陆及南部地区的破坏程度远远低于北部地区。部分高层建筑存在幕墙固定不合理、窗体和广告设施抗风性能不足等问题。住宅楼的破坏主要集中在门窗部位,而酒店和商业综合体

则以幕墙和广告牌损坏为主。飞掷物次生灾害加剧了整体损毁程度。建筑角隅区域受损程度较大。流线型设计的建筑通常受损程度较轻。

钢结构/高耸结构　钢结构工业厂房与厂房式大棚的屋顶和外墙破坏问题突出，近 79% 的轻钢结构出现了局部损坏和严重损坏，约 16% 的轻钢结构失效，仅有 5% 左右的轻钢结构未见损坏。膜结构在沿海区域受损尤为严重，损坏数量占比 83%。越临近超强台风“摩羯”登陆点的高耸结构更容易出现折断和倒塌的破损情形；振动强度的主观感知及舒适度评分与居住楼层高度、建筑物总高度及实时风荷载强度存在一定相关性，53% 受访者报告存在“结构轻微晃动”或“不明显但可察觉的振动”。女性及 31 岁以上受访者总体上对风致振动更为敏感，不适感显著高于男性及年轻群体；居住楼层越高，受访者对振动的敏感性和不适感亦越强。

临时建筑　临时建筑造成破坏的主要原因是超设计限值的强风作用。建筑结构破坏主要表现为超限风力造成的结构构件拉裂、移位，完全失效占比 11.7%；围护结构失效是导致临时建筑大范围破坏的主要形式，完全失效占比 35.4%；围护结构失效后室内设备设施在强风和强降水的耦合作用下发生大面积破坏，造成较大的经济损失。

农业温室建筑　风致破坏多发生于围护材料和骨架结构，严重时可导致部分或整体倒塌。

（2）典型市政基础设施受灾情况

道路基础设施　行道树倒伏是造成道路基础设施复杂灾害链的重要原因之一，文昌市沿海防风林带中超过 90% 的林木在强风作用下发生“拦腰折断”。道路上倒伏的树木造成交通和电力通信中断，海南大学海甸校区校园内严重受损树木 333 棵，占校内树木总量的 3.03%。配电杆塔受损数量达到 61 487 座，受损线路长达 14 203 km，772 个路口信号灯停用，1 346 台高速公路监控设备失效，以及约 174 km 道路护栏与 3 985 个交通标志牌损毁。海南岛琼中黎族苗族自治县的公路多处出现严重边坡失稳、路基塌陷。海口市和文昌市的防洪排水系统仍需全面提升。

电力通信设施　杆塔类设施的破坏形式以中度破坏为主（50.1%），严重破坏（30.2%）第二。线缆类设施的受损程度以严重破坏为主（60.2%），而中度至严重破坏的比例合计接近 90.0%。相比之下，箱体类设施的受损情况则相对轻微，其破坏等级主要集中于轻度（39.2%）至中度破坏（50.1%），两者占比合计超过了该类别总数的 90%。设计标准不足、材料因环境腐蚀老化以及暴雨导致的基座土壤软化等间接因素，极大地削弱了杆塔结构稳定性；箱体设施的破坏则以轻中度为主，主要威胁来自风雨侵入和漂浮物撞击，密封失效、连接锈蚀及易涝区位等因素加剧外壳破损与内部浸水，从而导致功能损坏而非结构倒塌。

风电机组　极端风速是导致风电机组破坏的直接原因。然而，更为关键的致灾因素是受损机组均为新建未投运机组，在超强台风“摩羯”来临时未能启动偏航和顺桨等主动抗台策略来卸除风载，导致其承受了远超设计极限的荷载。风电机组在台风季来临前应完成调试并网并具备完整主动抗台能力。合理规划施工周期、加强灾前检查、确保备用电源可靠，是提升风电场抗台韧性的关键措施。

光伏阵列　光伏阵列呈现距离超强台风“摩羯”中心越近、破坏等级越高的总体规律，超强台风“摩羯”登陆区域严重破坏占比 66.6%。超强台风“摩羯”中心路径上的光伏阵列破坏情况较为严重，占比 31.2%。强风下连接节点易发生破坏，若节点未失效，则可能导致整体结构倾覆。立柱破坏是造成经济损失最严重的破坏形式，应重点予以防控。

（3）风暴潮引发的海岸侵蚀情况

超强台风“摩羯”可造成砂质海岸线严重侵蚀，海口市拾贝公园附近的海堤防护栏总长约 1 km，约 50% 防护栏全部冲毁。海口市白沙门海滩海堤长度约 2 km，约 30% 防护栏冲毁。海口湾休闲区附近海堤防护栏全长约 4 km，约 60% 护栏损坏。人工海堤的局部结构损伤等破坏，同时可引起海岸附近道路路基掏空和景观建筑破坏等问题。在文昌等台风频发区域，砂质海岸线出现米级后退，需高度重视。开放的低分辨率遥感数据如 Landsat 系列可用于监测显著的海岸线变位。

此外，本研究还从更新设计标准和科学研究等角度，讨论了台风灾害适应措施的改进方向，并从提高台风灾害预测预警准确度，开展建筑和基础设施等的分级分类灾害风险分析，多源感知数据收集，灾前加

固和检修、台风防御科普以及灾后重建等角度,提出了优化台风灾害应急处置的建设性意见。

参考文献:

[1] Shan K Y, Lin Y L, Chu P S, et al. Seasonal advance of intense tropical cyclones in a warming climate[J]. Nature, 2023, 623(7985): 83−89.

[2] Yang Q S, Yin J Q, Liu M, et al. Post-disaster investigations of damage feature of buildings and structures due to several local strong winds in China during 2021—2024[J]. Advances in Wind Engineering, 2024, 1(2): 100011.

[3] Tang P, Zhong W, Wen J, et al. Developing and understanding cascading effects scenario of typhoons in coastal mega-cities from system perspectives for disaster risk reduction: a case study of Shenzhen, China[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2023, 92: 103691.

[4] Lakshani W A E, Zhou W. Observed decadal shifts and trends in global tropical cyclone activities from 1980 to 2021[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2023, 16(2): 100321.

[5] Sun Q, Aanault J, Holst C, et al. Response of tropical cyclones to global warming: super typhoon Usagi in the western pacific ocean[J]. Atmospheric Research, 2026, 329: 108495.

[6] Radfar S, Moftakhari H, Moradkhani H. Rapid intensification of tropical cyclones in the Gulf of Mexico is more likely during marine heatwaves[J]. Communications Earth & Environment, 2024, 5(1): 421.

[7] Patricola C M. Tropical cyclones are becoming sluggish[J]. Nature, 2018, 558(7708): 36−37.

[8] Mühlhofer E, Bresch D N, Koks E E. Infrastructure failure cascades quintuple risk of storm and flood-induced service disruptions across the globe[J]. One Earth, 2024, 7(4): 714−729.

[9] 李铮, 贺山峰, 陈超冰, 等. 1949—2022 年海南岛登陆台风特征数据集 [J]. 中国科学数据(中英文网络版), 2024, 9(2): 318−330.
Li Z, He S F, Chen C B, et al. A dataset of landing typhoon characteristics in Hainan Island (1949—2022)[J]. China Scientific Data, 2024, 9(2): 318−330.

[10] Xi D Z, Lin N, Gori A. Increasing sequential tropical cyclone hazards along the US east and gulf coasts[J]. Nature Climate Change, 2023, 13(3): 258−265.

[11] Lin C, Li Y D, Liu Y, et al. Building damage assessment from post-hurricane imageries using unsupervised domain adaptation with enhanced feature discrimination[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1−10.

[12] Aghababaei M, Koliou M, Paal S G. Performance assessment of building infrastructure impacted by the 2017 hurricane harvey in the port aransas region[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2018, 32(5): 04018069.

[13] 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.

[14] 林立, 陈锴, 陈昌萍, 等. 超强台风“莫兰蒂”作用下玻璃幕墙灾损普查及实验分析 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 881−887.
Lin L, Chen K, Chen C P, et al. Survey and experimental analysis of glass curtain wall under super typhoon“Meranti”[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(6): 881−887.

[15] 吴耀华, 郑春林, 蔡昭昀. 强台风对建筑金属屋面围护系统破坏的调查分析 [J]. 工业建筑, 2018, 48(8): 208−212.
Wu Y H, Zheng C L, Cai Z Y. Investigation and analysis of building metal envelope damages caused by strong typhoon[J]. Industrial Construction, 2018, 48(8): 208−212.

[16] 于晓野, 余远林, 吴杭姿. 台风山竹期间玻璃围护结构破坏研究及对规范相关风荷载计算规定的建议 [J]. 建筑结构, 2019, 49(22): 39−45.
Yu X Y, Yu Y L, Wu H Z. Glass enclosure structure damage study during period of typhoon mangkhut and suggestions on

specifications for calculating relevant wind loads[J]. Building Structure, 2019, 49(22): 39−45.

[17] 黄鹏, 周华亮, 蓝鑫玥. 基于台风过程的低矮建筑围护结构易损性分析 [J]. 振动与冲击, 2024, 43(22): 1−9.
Huang P, Zhou H L, Lan X Y. Vulnerability analysis of low-rise building envelopes based on typhoon process[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(22): 1−9.

[18] Periyasamy D K, Shimpi V, Sivasubramanian M V. Comfort assessment of wind induced vibrations for slender structures by field monitoring and numerical analysis[J]. Journal of Safety Science and Resilience, 2024, 5(4): 383−399.

[19] Wang Y W, Zhang C, Ni Y Q, et al. Bayesian probabilistic assessment of occupant comfort of high-rise structures based on structural health monitoring data[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 163: 108147.

[20] 胡佳星, 李正农, 王澈泉, 等. 台风激励下海口市某高层建筑模态参数识别 [J]. 建筑结构学报, 2020, 41(2): 71−82.
Hu J X, Li Z N, Wang C Q, et al. Modal parameter identification of a high-rise building in Haikou city during typhoons[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(2): 71−82

[21] 崔利慧. 沿海地区风剖面特性及风致高层建筑响应研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
Cui L H. Research on wind profile characteristics and wind-induced response of high-risebuildings in coastal areas[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.

[22] Kwok K C S, Hitchcock P A, Burton M D. Perception of vibration and occupant comfort in wind-excited tall buildings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2009, 97(7/8): 368−380.

[23] Johann F A, Carlos M E N, Ricardo F L S. Wind-induced motion on tall buildings: a comfort criteria overview[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 142: 26−42.

[24] 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.

[25] Min Q L, Luo Y, Yang K, et al. Wind resistance performance analysis of metal roof system of the long-span integrated photovoltaic building[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86: 108986.

[26] 林惠庭, 吕文龙, 冯国杰, 等. 2017 年“天鸽”强台风钢结构厂房风灾特征 [J]. 建筑科学, 2020, 36(11): 150−158.
Lin H T, Lv W L, Feng G J, et al. Characteristics of wind disaster in steel structure workshop of “hato” strong typhoon in 2017[J]. Building Science, 2020, 36(11): 150−158.

[27] 宋芳芳. 几类风灾易损建筑台风损伤估计与预测 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Song F F. Typhoon damage estimation and prediction of wind vulnerable structures[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[28] Qin H, Stewart M G. Wind and rain losses for metal-roofed contemporary houses subjected to non-cyclonic windstorms[J]. Structural Safety, 2020, 86: 101979.

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

[30] Brunner L G, Peer R A M, Zorn C, et al. Understanding cascading risks through real-world interdependent urban infrastructure[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 241: 109653.

[31] 王志, 李蔼恂, 李军, 等. 超强台风“威马逊”对道路交通的影响分析 [J]. 公路, 2016, 61(1): 149−154.
Wang Z, Li A X, Li J, et al. Impact analysis on road traffic of landing Super-typhoon Rammasun[J]. Highway, 2016, 61(1): 149−154.

[32] 林双毅, 周锦业, 秦一芳, 等. 莫兰蒂台风对厦门市主要道路绿化树种的影响 [J]. 中国园林, 2018, 34(5): 83−87.
Lin S Y, Zhou J Y, Qin Y F, et al. The influence of typhoon Meranti on the greening tree species for urban road in Xiamen[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(5): 83−87.

[33] Dong S J, Yu T B, Farahmand H, et al. Probabilistic modeling of cascading failure risk in interdependent channel and road

networks in urban flooding[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, 62: 102398.

[34] 乔沛阳, 顾肖璇, 刘昌鑫, 等. 超强台风“摩羯”登陆点海南东寨港红树林受损状况研究 [J]. 植物生态学报, 2025, 49(4): 540−551.
Qiao P Y, Gu X X, Liu C X, et al. Damage to the mangrove forests in Dongzhaigang of Hainan caused by super typhoon "Yagi"[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2025, 49(4): 540−551.

[35] Gu Y, Liu Y, Chen Y Q, et al. Near real-time warning for urban tree destruction under coupled wind and rain loads: prediction framework and case study[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, 127: 105663.

[36] Zhou Z J, Fu J H, Xiao Y Q. Risk of wind destruction to urban trees: prediction workflow and relative importance of influencing factors[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 112: 105600.

[37] Huang Q, Wang Y, Leung A K, et al. Large-deformation simulations of root pull-out and breakage using material point method with a multi-level grid[J]. Ecological Engineering, 2024, 201: 107216.

[38] Gazzea M, Karaer A, Ghorbanzadeh M, et al. Automated satellite-based assessment of hurricane impacts on roadways[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 2110−2119.

[39] Xue J Y, Mohammdi F, Li X, et al. Impact of transmission tower-line interaction to the bulk power system during hurricane[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 203: 107079.

[40] Ali G G, El-Adaway I H, Sims C, et al. Reducing the vulnerability of electric power infrastructure against natural disasters by promoting distributed generation[J]. Natural Hazards Review, 2023, 24(2): 04022052.

[41] NB/T 10115—2018 光伏支架结构设计规程 [S].
NB/T 10115—2018 Code for design of photovoltaic modules support structures[S].

[42] Khelifa A, Kabeel A E, Attia M E H, et al. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow of a novel water-based hybrid photovoltaic-thermal solar collector integrated with flax fibers as natural porous materials[J]. Renewable Energy, 2023, 217: 119245.

[43] Chen Y S, Wu D, Dai K S, et al. A numerically efficient framework in failure mode evaluation of a wind turbine tower under cyclones[J]. Marine Structures, 2022, 86: 103303.

[44] Wang S Y, Foley A M, Chen N, et al. Risk-based dispatch strategy for a power system with high wind power integration considering damage due to typhoons[J]. Electric Power Components and Systems, 2023, 51(18): 2098−2115.

[45] Hou H, Wu W J, Zhang Z W, et al. A tri-level typhoon-DAD robust optimization framework to enhance distribution network resilience[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2024, 245: 110004.

[46] Liu X, Kuang C P, Huang S C, et al. Modelling and evaluation of beach morphodynamic behavior: a case study of Dongsha beach in eastern China[J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 240: 106661.

[47] Ma X F, Wang C, Zhao C Y, et al. Identification and simulation the response of storm-induced coastal erosion in the China yellow sea[J]. Ocean Engineering, 2024, 300: 117394.

[48] Wang C, Yang G, Li C H, et al. The response of sediment transport and morphological evolution to storms with different characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2024, 946: 173987.

[49] 张丽, 廖静娟, 袁鑫, 等. 1987—2017年海南岛海岸线变化特征遥感分析 [J]. 热带地理, 2020, 40(4): 659−674.
Zhang L, Liao J J, Yuan X, et al. Remote sensing analysis of coastline changes in Hainan Island during 1987—2017[J]. Tropical Geography, 2020, 40(4): 659−674.

[50] Zhuang Y, Xing A G, Jiang Y H, et al. Typhoon, rainfall and trees jointly cause landslides in coastal regions[J]. Engineering Geology, 2022, 298: 106561.

[51] Lagomasino D, Fatoyinbo T, Castañeda-Moya E, et al. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in southwest florida following hurricane irma[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 4003.

[52] Xiao F J, Liu Q F. An evaluation of vegetation loss due to the super typhoon sarika in Hainan island of China[J]. Natural Hazards, 2023, 115(2): 1677−1695.

[53] Yang S S, Li Y H, Lin Y P, et al. Evolution of sedimentary dynamic process/pattern in the Quanzhou bay under impact of typhoon matmo (2014)[J]. Regional Studies in Marine Science, 2023, 62: 102974.

[54] San Antonio K M, Burow D, Cho H J, et al. Data-driven assessment of the impact of hurricanes ian and nicole: natural and armored dunes in the aftermath of hurricanes on Florida's central east coast[J]. Remote Sensing, 2024, 16(9): 1557.

[55] 从辰宇, 韩剑桥, 焦菊英, 等. 台风"利奇马"暴雨引发的土壤侵蚀调查研究—以山东省临朐县为例 [J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 337−344.
Cong C Y, Han J Q, Jiao J Y, et al. Investigation on soil erosion from typhoon lekima rainstorm: a case study in Linqu County, Shandong Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 337−344.

[56] Chavez S, Wdowinski S, Lagomasino D, et al. Estimating structural damage to mangrove forests using airborne lidar imagery: case study of damage induced by the 2017 hurricane irma to mangroves in the Florida everglades, USA[J]. Sensors, 2023, 23(15): 6669.

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

[58] Esmaeili M, Barbato M. Performance-based hurricane engineering under changing climate conditions: general framework and performance of single-family houses in the US[J]. Journal of Structural Engineering, 2022, 148(10): 04022163.

[59] Wang Y B, Liu W H, Chen C T, et al. GIS-based risk assessment of typhoon disasters in coastal provinces of China[J]. Frontiers in Marine Science, 2025, 12: 1548763.

[60] Trott C B, Subrahmanyam B. Satellite data analysis of the upper ocean response to hurricane dorian (2019) in the north atlantic ocean[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1501105.

[61] Chen C Q, Lao Q B, Zhou X, et al. Tracks of typhoon movement (left and right sides) control marine dynamics and eco-environment in the coastal bays after typhoons: a case study in Zhanjiang bay[J]. Science of the Total Environment, 2024, 912: 168944.

[62] Yang X L, Qin X C, Zhou X, et al. Assessment of disaster mitigation capability oriented to typhoon disaster chains: a case study of Fujian province, China[J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112621.

[63] Roueche D B, Chen G Z, Soto M G, et al. Performance of hurricane-resistant housing during the 2022 Arabi, Louisiana, tornado[J]. Journal of Structural Engineering, 2024, 150(5): 04024029.

[64] Snaiki R, Parida S S. Climate change effects on loss assessment and mitigation of residential buildings due to hurricane wind[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 69: 106256.

[65] Ceferino L, Lin N. Hurricane risk of solar generation in the united states[J]. Natural Hazards Review, 2023, 24(4): 04023029.

[66] Xu L, Lin N, Xi D Z, et al. Hazard resistance-based spatiotemporal risk analysis for distribution network outages during hurricanes[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(3): 2143−2152 .

[67] Du X L, Hajjar J F. Methodology for collapse fragility development for hurricane events: electrical transmission towers[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 223: 109005.

[68] Guo G Z, Yin J, Liu L L, et al. Quantitative assessment of typhoon disaster risk at county level[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(9): 1544.

[69] Jiang F, Tian Z S Y, Zhang Y, et al. Risk map of typhoon induced wave fields around Hainan island[J]. Applied Ocean Research, 2023, 137: 103603.

[70] Park K, Federico I, Di Lorenzo E, et al. The contribution of hurricane remote ocean forcing to storm surge along the southeastern U. S. coast[J]. Coastal Engineering, 2022, 173: 104098.

[71] Wang T, Tan X R, Tian Y, et al. Risk assessment based on bayesian network for the typhoon-storm surge-flood-dike burst disaster chain: a case study of Guangdong, China[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2025, 58: 102251.

[72] Abdelhady A U, Xu D H, Ouyang Z C, et al. A framework for estimating water ingress due to hurricane rainfall[J]. Journal of

Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, 221: 104891.

[73] Liu F T, Xu E Q, Zhang H Q. An improved typhoon risk model coupled with mitigation capacity and its relationship to disaster losses[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 357: 131913.

[74] Hughes W, Zhang W, Ding Z X, et al. Integrated structural and socioeconomic hurricane resilience assessment of residential buildings in coastal communities[J]. Natural Hazards Review, 2022, 23(3): 04022017.

[75] Hu F, He J Y, Liu Z F, et al. Characterizing surface pressure and wind fields of typhoons approaching Hong Kong[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2024, 254: 105934.

[76] Yang Q Y, Liu Y W, Wu S J, et al. Super typhoon impact on the dynamic behavior of floating offshore wind turbine drivetrains: a comprehensive study[J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119084.

[77] Cui C, Huang B, Chen M L, et al. Structural response analysis of different submerged floating tunnel route selection conditions in the complex strait under the action of typhoon Sepat[J]. Ocean Engineering, 2025, 328: 121072.

[78] Wang H, Wang T G, Ke S T, et al. Assessing code-based design wind loads for offshore wind turbines in China against typhoons[J]. Renewable Energy, 2023, 212: 669−682.

[79] Zhou D Y, Pan X P, Guo J P, et al. Resilience quantification of offshore wind farm cluster under the joint influence of typhoon and its secondary disasters[J]. Applied Energy, 2025, 383: 125323.

[80] Duan Z X, Zhang Y C, Fan S H, et al. The impact of super typhoon on varying vegetation types in eastern coastal China: implications for coastal ecosystem and disaster risk management[J]. International Journal of Digital Earth, 2025, 18(1): 2523482.

[81] Sit K Y, Ng K Y, Zhang H S. Understanding typhoon-induced vegetation loss and potential ecosystem disservices from land use zonings perspective in high-density Hong Kong[J]. Applied Geography, 2024, 170: 103345.

[82] 张博雨, 冀骁文, 赵衍刚, 等. 考虑台风持时效应的低矮房屋围护结构风灾损失分析 [J]. 土木工程学报, 2021, 54(6): 53−61.
Zhang B Y, Ji X W, Zhao Y G, et al. Wind hazard analysis of low-rise building envelopes considering typhoon duration effect[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(6): 53−61.

[83] 唐意, 郑德乾, 曹志程, 等. 建筑群玻璃幕墙受碎粒飞掷物冲击易损性研究 [J]. 土木工程学报, 2025, 58(1): 58−64, 76.
Tang Y, Zheng D Q, Cao Z C, et al. Study on fragility of curtain wall under impact damage of the wind-borne debris around buildings[J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(1): 58−64, 76.

[84] 田利, 张来仪, 王彦明, 等. 台风作用下建筑结构的研究进展 [J]. 山东大学学报(工学版), 2022, 52(1): 28−38.
Tian L, Zhang L Y, Wang Y M, et al. Research progress of building structure under typhoon[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2022, 52(1): 28−38.

[85] 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.

[86] 张德顺, 刘鸣, 姚驰远, 等. 气候变化背景下滨海地区园林树种抗风性研究进展 [J]. 风景园林, 2021, 28(11): 68−73.
Zhang D S, Liu M, Yao C Y, et al. Research advances of wind resistance of landscape tree species in coastal areas under climate change[J]. Landscape Architecture, 2021, 28(11): 68−73.

[87] 陶嗣巍, 赵东. 根土相互作用关系对树干振动特性的影响 [J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(6): 77−81.
Tao S W, Zhao D. Effects of root-soil interaction on trunk vibration characteristics[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2013, 37(6): 77−81.

[88] 植芝豹. 威马逊台风下大量配电线路电杆倾倒和断裂的原因分析 [J]. 广西电力, 2015, 38(3): 30−32, 44.
Zhi Z B. Analysis of dumping and fracture of large number of distribution line poles during Rammasun typhoon[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(3): 30−32, 44.

[89] 唐亚男. 台风荷载随机模型与电力杆塔结构抗风可靠度评估 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

Tang Y N. Random modeling of typhoon wind loads and wind-resistant reliability assessment of electric towers and poles[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[90] GB/T 24335—2009 建(构)筑物地震破坏等级划分 [S].
GB/T 24335—2009 Classification of earthquake damage to buildings and special structures[S].

[91] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Lan Y. Distribution system reliability evaluation and design considering influence of typhoon[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[92] 田会波, 印萍, 贾永刚. 万宁东部海岸侵蚀现状及原因分析 [J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 718−724.
Tian H B, Yin P, Jia Y G. Status and causes of beach erosion in east coast of Wanning[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(5): 718−724.

[93] 黄少敏, 罗章仁. 海南岛沙质海岸侵蚀的初步研究 [J]. 广州大学学报(自然科学版), 2003, 2(5): 449−454.
Huang S M, Luo Z R. Research on sandcoast erosion in Hainan Island[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2003, 2(5): 449−454.

[94] 叶飞. 斜坡式海堤工后沉降和越浪量研究 [J]. 水运工程, 2022(5): 9−13, 43.
Ye F. Research on post-construction settlement and wave overtopping of sloping seawalls[J]. Port & Waterway Engineering, 2022(5): 9−13, 43.

[95] Wen S Y, Zhang F S, Wang X, et al. Hazard degree assessment of coastal erosion at Tianlongsi adjacent sandy coast[C]//Proceedings of 2016 4th international workshop on earth observation and remote sensing applications (EORSA). Guangzhou: IEEE, 2016: 424−427.

[96] Kurt S, Karaburun A, Demirci A. Coastline changes in Istanbul between 1987 and 2007[J]. Scientific Research and Essays, 2010, 5(19): 3009−3017.

[97] Moussaid J, Fora A A, Zourarah B, et al. Using automatic computation to analyze the rate of shoreline change on the Kenitra coast, Morocco[J]. Ocean Engineering, 2015, 102: 71−77.

[98] 郑云有, 周国华. 容积率与建筑密度对地价的综合影响研究—以株洲市商业用地为例 [J]. 经济地理, 2002, 22(1): 56−58.
Zheng Y Y, Zhou G H. The joint influence on land price produced by floor area ratio and construction density[J]. Economic Geography, 2002, 22(1): 56−58.

[99] Tian W S, Yang Y J, Wang L L, et al. Role of local climate zones and urban ventilation in canopy urban heat island–heatwave interaction in Nanjing megacity, China[J]. Urban Climate, 2023, 49: 101474.

[100] Stewart I D, Oke T R, Krayenhoff E S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(4): 1062−1080.

[101] Borg G. Borg's Perceived Exertion and Pain Scales[M]. Champaign, IL: Human Kinetics, 1998.

作者贡献说明

刘婉秋负责海南岛超强台风"摩羯"建构筑物灾害调研与防灾减灾项目立项, 负责引言、道路基础设施、海岸侵蚀部分稿件成稿, 论文框架搭建, 论文整体撰写和修订等工作。

王奇为共同第一作者, 负责综述、风力发电、振动舒适度部分数据调研, 负责风力发电、振动舒适度部分内容的撰写和修订。

霍旭杰负责论文文字编排、初稿修订等工作。

蒋伊琳负责组织围护结构、临时建筑部分数据调研, 汇总数据并分析, 临时建筑部分内容撰写, 论文图片美化。

孙天舒负责围护结构部分数据调研, 负责围护结构部分内容的初稿撰写和修订。

钟有亮负责超强台风“摩羯”基本气象数据整理、成稿。

姜柳负责高耸结构-钢结构、电力通信设施与振动舒适度等部分的数据调研,负责高耸结构-钢结构、振动舒适度内容的初稿撰写和修订。

尚喆雄负责高耸结构-钢结构、高层建筑、电力通信设施等部分数据调研,负责电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

张海滨负责光伏发电站部分数据调研,负责光伏发电站部分内容的初稿撰写和修订。

段书苏负责道路基础设施、树木倒伏部分数据调研,负责道路基础设施、树木倒伏部分内容的初稿撰写和修订。

张友良负责建筑围护结构、高层建筑、高耸结构/钢结构、临时建筑、农业温室建筑、道路基础设施、光伏结构、电力通信设施和风力发电系统等数据调研及论文内容指导工作。

王珍珍负责树木倒伏、海岸侵蚀部分数据调研,负责树木倒伏、海岸侵蚀部分内容的初稿撰写和修订。

上官贝琪参与海岸侵蚀部分数据调研,参与海岸侵蚀部分内容的初稿撰写和修订。

郜嘉浩参与高层建筑部分数据调研,负责高层建筑部分内容的初稿撰写和修订。

陆晓婉参与电力通信设施部分数据调研,参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

付建存参与海岸侵蚀部分数据调研,参与海岸侵蚀部分内容的初稿撰写和修订。

杨虓参与风力发电部分数据调研,参与风力发电部分内容的初稿撰写和修订。

冯业宝参与道路基础设施部分数据调研,参与道路基础设施部分内容的初稿撰写和修订。

李雨龙负责引言部分参考文献收集和整理。

杜小月参与高层建筑、振动舒适度部分数据调研,参与振动舒适度部分内容的初稿撰写和修订。

王子龙参与高耸结构-钢结构、电力通信设施部分的数据调研,参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

罗崇航参与高耸结构-钢结构部分的数据调研,参与高耸结构-钢结构内容的初稿撰写和修订。

黄斌负责农业温室建筑部分数据调研,负责农业温室建筑部分内容的初稿撰写和修订。

刘豫安参与围护结构部分、临时建筑部分的数据调研,参与围护结构内容初稿撰写和修订。

姜霖参与临时建筑部分数据调研,负责临时建筑部分内容的初稿撰写和修订。

朱丽玮参与临时建筑部分数据调研,负责临时建筑部分内容的初稿撰写和修订。

赵雁参与围护结构、临时建筑部分数据调研,负责临时建筑部分内容的初稿撰写和修订。

张亿先参与围护结构、临时建筑部分数据调研,负责临时建筑部分内容的初稿撰写和修订。

钟昌廷参与电力通信设施等部分数据调研,负责电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

张素馨参与高耸结构/钢结构部分、电力通信设施的数据调研。

魏斐斐参与海岸侵蚀部分数据调研,参与海岸侵蚀内容的初稿撰写和修订。

李玉梅参与超强台风“摩羯”的气象数据整理。

班启昌参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

黄均溢参与电力通信设施部分数据调研,参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

陈世赢参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

李勋煜参与农业温室建筑部分数据调研,参与农业温室建筑部分内容的初稿撰写和修订。

李昆锦参与树木倒伏、海岸侵蚀部分数据调研,参与树木倒伏、海岸侵蚀部分数据调研部分内容的初稿撰写和修订。

苏永辉参与海岸侵蚀部分数据调研,参与海岸侵蚀部分内容的初稿撰写和修订。

陈焰参与高层建筑部分数据调研。

何光元参与围护结构部分、临时建筑部分的数据调研,参与围护结构内容初稿撰写和修订。

陈宇参与高耸结构/钢结构部分的数据调研,参与高耸结构/钢结构内容的初稿撰写和修订。

杨忻峰参与电力通信设施等部分数据调研,参与电力通信设施内容的初稿撰写和修订。

董立业参与风力发电部分数据调研。

韩飞宇参与调研和材料整理。

李少康参与引言部分参考文献整理。

刘大聪参与道路基础设施部分数据调研。

薛发榜负责道路基础设施、树木倒伏部分数据调研。

王少斐参与风力发电部分数据调研。

张冲参与高层建筑部分数据调研。

赵涛参与风力发电部分数据调研。

胡波负责收集海南省公路基础信息数据，并参与部分调研工作。

马未负责对接临时建筑部分工程项目，组织调研和后续图片整理工作。

余宇秉参与农业温室建筑部分数据调研。

王予红参与道路基础设施调研工作，对调研方向、文章的整理提供指导。

曾加东参与部分数据调研工作。

李良勇参与海岸侵蚀部分数据调研，负责海岸侵蚀部分内容的初稿撰写和修订。

单波参与前期调研工作。

肖天鉴参与围护结构部分数据调研。

曾晓辉参与围护结构部分数据调研并协助组织数据调研及整理工作。

任学斌参与调研、论文规划及内容指导工作。

贾俊峰参与调研数据分析及论文修订工作。

乔冠东负责高层建筑、道路基础设施与振动舒适度等部分数据调研，负责高层建筑、振动舒适度部分内容的初稿撰写和修订；负责调研项目整体资料收集汇总。

周智负责组织调研队伍，调研过程管理，数据收集，论文框架搭建，论文质量把关。

欧进萍负责论文整体把关，提供修改建议。

利益冲突说明

作者声明，其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 使用说明

本文未使用人工智能（AI）协助撰写。

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

补充材料可在本文的在线版本中获取 https://doi.org/10.65658/j.hndk.2025112802。

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。超强台风摩羯的相关数据，由海南省气象台提供。

致谢/Acknowledgements

本文得到以下基金项目支持：热带海洋工程材料及评价全国重点实验室自主研究课题（STOEM99403917, STOEM99407718）；中国工程院咨询重点项目（20-HN-XZ-03）；国家自然科学基金项目（52178282, 52361043）；海南省科技专项资助（ZDYF2022SHFZ353, ZDYF2025SHFZ032）；海南大学协同创新中心科研项目（XTCX2022HYB10）；海南大学科研启动经费（KYQD（2R）1976-2）；迈湾枢纽建设工程艰险条件下“天–空–地–体”数字孪生多灾害智能监测及预警系统研究（MWKYHT-2024002）。

This article is supported by the following fund projects: Self-directed Research Fund of the State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation (STOEM99403917, STOEM99407718);Consulting Research Key Project of the Chinese Academy of Engineering (20-HN-XZ-03); National Natural Science Foundation of China (52178282, 52361043);

Hainan Provincial Science and Technology Special Fund (ZDYF2022SHFZ353, ZDYF2025SHFZ032); Collaborative Innovation Center Research Project of Hainan University (XTCX2022HYB10); Research Start-up Fund of Hainan University (KYQD(2R)1976-2); Research on the "Space-Air-Ground-Integrated" Digital Twin Multi-Hazard Intelligent Monitoring and Early Warning System under Difficult Conditions of the Maiwan Hub Construction Project (MWKYHT-2024002).

作者简介

刘婉秋(1981—),女,蒙古族,内蒙古通辽人,博士,教授,研究方向:交热带海岛工程交通基础设施材料与安全保障。E-mail: wanqiu_liu@hotmail.com。

王　奇(1988—),男,四川青神人,博士,副教授,研究方向:结构振动控制,健康监测。E-mail: wangqi67315@126.com。

霍旭杰(1986—),男,甘肃陇南人,博士,研究方向:热带海岛工程低碳运维。E-mail: xujiehuo@hainanu.edu.cn。

蒋伊琳(1986—),女,湖南常德人,博士,讲师,研究方向:健康建筑(防灾、模块化、装配式建筑)和文化遗产保护。E-mail: 995044@hainanu.edu.cn。

孙天舒(1988—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,研究方向:海岛工程结构抗震减灾。E-mail: tssun@hainanu.edu.cn。

钟有亮(1990—),男,海南儋州人,海南省气象局海南省气象台,硕士,工程师,研究方向:数值模拟和检验。E-mail: zhongyl@hainan.gov.cn。

姜　柳(1995—),女,海南澄迈人,博士,副教授,研究方向:基于领域知识的土木工程智能化。E-mail: oxazajl@hainanu.edu.cn。

尚喆雄(1988—),男,湖南长沙人,博士,副研究员,研究方向:土木工程巡检、智能感知与结构安全检测。E-mail: szx0112@hainanu.edu.cn。

张海滨(1988—),男,黑龙江哈尔滨人,博士,副教授,研究方向:结构健康监测、热带海岛工程防灾减灾研究。E-mail: zhanghb01@hainanu.edu.cn。

段书苏(1988—),女,山东聊城人,博士,讲师,研究方向:遥感防灾减灾。E-mail: 993040@hainanu.edu.cn。

张友良(1972—),男,湖北武穴人,博士,教授,研究方向:岩土工程高性能数值计算。E-mail: zhangyouliang@hainanu.edu.cn。

王珍珍(1986—),女,山东德州人,博士,讲师,研究方向:热带海洋高性能、功能化工程材料。E-mail: 995326@hainanu.edu.cn。

上官贝琪(2002—),女,河南鹤壁人,海南大学土木水利专业2024级硕士研究生。E-mail: 1205097487@qq.com。

邰嘉浩(2001—),男,河北邢台人,海南大学土木工程专业2024级硕士研究生。E-mail: 24220859010047@hainanu.edu.cn。

陆晓婉(2001—),女,辽宁葫芦岛人,海南大学土木工程专业2023级硕士研究生。E-mail: Lxw528284122@163.com。

付建存(1997—),男,河南周口人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail: 23220859000039@hainanu.edu.cn。

杨　旎(1998—),男,贵州余庆人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生。E-mail: 1614825633@qq.com。

冯业宝(1998—),男,海南琼海人,海南大学2024级土木工程专业博士研究生。E-mail: 24110814000001@hainanu.edu.cn。

李雨龙(2000—),男,湖南宁远人,海南大学土木工程专业2025级博士研究生。E-mail: 1213205654@qq.com。

杜小月(2000—),女,海南海口人,海南大学土木水利工程专业2023级硕士研究生。E-mail: 23220859000025@hainanu.edu.cn。

王子龙(2000—),男,河南商丘人,海南大学土木工程专业2023级硕士研究生。E-mail: 23220859000032@

hainanu.edu.cn。

罗崇航(2002—),男,海南乐东人,海南大学土木水利专业2024级硕士研究生。E-mail: 2602988544@qq.com。

黄　斌(1989—),男,湖南益阳人,博士,副教授,研究方向:结构抗风与抗震。E-mail: huangbin@hainanu.edu.cn。

刘豫安(1999—),男,安徽合肥人,海南大学土木工程专业2023级硕士研究生。E-mail: 1471217580@qq.com。

姜　霖(1991—),女,吉林长春人,博士,讲师,研究方向:公共建筑设计。E-mail: 996146@hainanu.edu.cn。

朱丽玮(1989—),女,黑龙江哈尔滨人,博士,讲师,研究方向:健康环境与行为。E-mail: zhuliwei0721@163.com。

赵　雁(1990—),女,河南濮阳人,博士,讲师,研究方向:节能建筑技术。E-mail: zhaoyan1990127@163.com。

张亿先(1990—),女,满族,辽宁丹东人,博士,讲师,研究方向:热带滨海建筑节能技术。E-mail: zhangyixian902@163.com。

钟昌廷(1991—),男,湖南株洲人,博士,副研究员,研究方向:智能算法开发与应用。Email: zhongct@hainanu.edu.cn。

张素馨(1988—),女,湖南株洲人,博士,讲师,研究方向:灾害预防,城市更新,遗产保护和管理。E-mail: sx.zhang@hainanu.edu.cn。

魏斐斐(1995—),女,河南巩义人,海南大学土木工程专业2022级博士研究生。E-mail: 978154354@qq.com。

李玉梅(1986—),女,广东湛江人,硕士,海南省气象局海南省气象台高级工程师,研究方向:天气预报。E-mail: 0526lym@163.com。

班启昌(2000—),男,河南新乡人,海南大学土木工程专业2024级硕士研究生。E-mail: 751218284@qq.com。

黄均溢(1999—),男,四川南充人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail: huangjy2170@163.com。

陈世赢(2002—),男,河南许昌人,海南大学土木水利专业2024级硕士研究生。E-mail: 2747388358@qq.com。

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

李昆锦(2000—),男,海南海口人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail: likunjin@hainanu.edu.cn。

苏永辉(1999—),男,河南周口人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail: 23220859000041@hainanu.edu.cn。

陈　焰(1999—),男,安徽安庆人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生。E-mail: 18325669257@163.com。

何光元(2001—),男,贵州毕节人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生,助理工程师。E-mail: guangyuanhe@Outlook.com。

陈　宇(2002—),男,海南临高人,海南大学土木工程专业2024级研究生。E-mail: 19989716938@163.com。

杨忻峰(2001—),男,黎族,海南昌江人,海南大学通信工程专业2023级硕士研究生。E-mail: 954802693@qq.com。

董立业(2000—),男,黑龙江呼玛人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail: 18845053921@163.com。

韩飞宇(1997—),男,山西沁水人,海南大学土木工程专业2022级研究生。E-mail: 2452879081@qq.com。

李少康(2001—),男,海南东方人,海南大学土木水利专业2024级硕士研究生。E-mail: 389668204@qq.com。

刘大聪(1987—),男,海南海口人,硕士,高级工程师,研究方向:道路监测,模袋海砂。E-mail: liudacong@163.com。

薛发榜(2002—),男,海南儋州人,海南大学土木工程专业2024级硕士研究生。E-mail: 24220859010053@hainanu.edu.cn。

王少斐(2001—),男,安徽旌德人,海南大学土木工程专业2023级硕士研究生。E-mail: 1093719568@qq.com。

张　冲(2000—),男,河南周口人,海南大学材料与化工专业2022级硕士研究生。E-mail: 1570748947@qq.com。

赵　涛(2000—),男,四川平昌人,海南大学土木工程专业2024级硕士生。E-mail: 604595285@qq.com。

胡　波(1984—),男,广西平南人,高级工程师,海南大学土木工程专业2025级博士研究生。E-mail: 99975161@qq.com。

马　未(1992—),男,江苏淮安人,硕士,工程师,研究方向:智能建造、工程装备与施工技术。E-mail:36123254@qq.com。

余宇秉(2000—),男,布依族,贵州黔西南人,海南大学土木水利专业2023级硕士研究生。E-mail:3421717193@qq.com。

王予红(1974—),男,河南辉县人,博士,香港理工大学教授,研究方向:智慧城市的道路基础设施。E-mail:yuhong.wang@polyu.edu.hk。

曾加东(1987—),男,四川万源人,博士,副教授,研究方向:结构风工程。E-mail:zjd_rcwe@hainanu.edu.cn。

李良勇(1989—),男,湖北荆州人,博士,副教授,研究方向:加筋土结构、天然纤维利用。E-mail:liliangyong200@163.com。

单　波(1976—),男,湖南益阳人,博士,教授,研究方向:海水海砂混凝土结构。E-mail:bshan@hainanu.edu.cn。

肖天崟(1978—),男,湖北浠水人,硕士,副教授,研究方向:结构工程与风工程。E-mail:xiaotianyin1978@hainanu.edu.cn。

曾晓辉(1982—),男,湖南邵阳人,博士,教授,研究方向:轨道交通先进水泥基材料。E-mail:994494@hainanu.edu.cn。

任学斌(1968—),男,湖北襄阳人,硕士,正高级工程师,研究方向:复杂建筑结构设计与分析。E-mail:923206331@qq.com。

贾俊峰(1982—),男,汉族,河南周口人,博士,教授,研究方向:桥梁工程防灾。E-mail:jiajunfeng@bjut.edu.cn。

乔冠东(1986—),男,山西灵丘人,博士,海南大学副教授,研究方向:结构健康监测。E-mail:guandong-qiao@hainanu.edu.cn。

周　智(1973—),男,湖南永州人,博士,海南大学二级教授,博士生导师,研究方向:工程多灾害安全监测与智能防护、热带海岛工程智能建造与运维、FRP材料及海岛工程应用等。E-mail:zhizhou@hainanu.edu.cn。

欧进萍(1959—),男,湖南永州人,教授,博士,中国工程院院士,研究方向:结构监测、控制与防灾减灾工程。E-mail:oujinping@hit.edu.cn。

(责任编辑:高　喆,英文校对:张海滨)

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.