热带气旋灾害脆弱性评估

——以孟加拉国沿海 19 个县为例

解晓茹[1,2,3]，吴姗姗[2]，滕欣[2,3]，王凯迪[4,5]，王新维[2]，张坤珵[6,7]

（1. 天津大学海洋科学与技术学院 天津 300072；2. 国家海洋技术中心 天津 300112；
3. 中国海洋发展基金会海洋空间规划技术重点实验室 北京 100032；4. 中国气象科学研究院青岛海洋气象研究院 青岛 266404；
5. 青岛市气象局青岛海洋气象研究中心 青岛 266404；6. 中国海洋大学国际事务与公共管理学院 青岛 266100；
7. 中国海洋大学海洋发展研究院 青岛 266100）

摘要：孟加拉国是全球受热带气旋灾害影响较为严重的国家之一，系统识别其脆弱性的空间分布规律及驱动机制，对提升其沿海地区防灾减灾能力具有重要意义。文章以孟加拉国沿海地区 19 个县为研究对象，从暴露性、敏感性和适应能力三个维度构建热带气旋灾害脆弱性评价指标体系，分析区域脆弱性空间分布特征，剖析主要影响因素。研究结果表明，沿海地区的脆弱性总体呈现“东部沿海高、西部沿海低”的空间分布格局，其中，吉大港县的脆弱性最高，是防灾减灾的重点区域。研究区热带气旋灾害脆弱性因子呈显著的空间异质性，暴露性总体呈现东高西低的特征，敏感性和适应能力则表现为西高东低的特征。西部沿海地区的脆弱性受敏感性与适应能力因子共同影响，中部沿海地区以适应能力因子占主导，东部沿海地区则以暴露性因子占主导，且部分区域呈现多因子共同影响的特征。研究结果可为孟加拉国沿海县制订针对性的防灾减灾方案提供科学依据。

关键词：热带气旋；脆弱性；空间特征；孟加拉国

中图分类号：P748 **文献标志码：**A **文章编号：**1005-9857（2026）04-0048-12

Vulnerability Assessment of Tropical Cyclone Disasters: A Case Study of 19 Coastal Districts in Bangladesh

XIE Xiaoru[1,2,3], WU Shanshan[2], TENG Xin[2,3], WANG Kaidi[4,5], WANG Xinwei[2], ZHANG Kuncheng[6,7]

（1. School of Marine Science and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China; 3. Key Laboratory of Marine Spatial Planning Technology, China Oceanic Development Foundation, Beijing 100032, China; 4. Qingdao Institute of Marine Meteorology, Chinese Academy of Meteorological

收稿日期：2026-02-11；**修订日期：**2026-03-26

基金项目：中国海洋发展基金会海洋空间规划技术重点实验室重点课题（C3250C001）；国家自然科学基金青年项目（42506232）；教育部人文社会科学重点研究基地重大项目（22JJD790031）；中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金（2025Y005）.

作者简介：解晓茹，助理研究员，博士，研究方向为海洋灾害风险评估

通信作者：吴姗姗，研究员，博士，研究方向为海洋空间规划

Sciences，Qingdao 266404，China；5. Qingdao Research Center of Marine Meteorology，Qingdao Meteorological Bureau，Qingdao 266404，China；6. School of International Affairs and Public Administration，Ocean University of China，Qingdao 266100，China；7. Institute of Marine Development，Ocean University of China，Qingdao 266100，China）

Abstract：Bangladesh is one of the countries most severely affected by tropical cyclone disasters worldwide. Systematically identifying the spatial distribution patterns and driving mechanisms of vulnerability is critical to enhancing disaster prevention and mitigation capacities in its coastal areas. This study assesses tropical cyclone disaster vulnerability across 19 coastal districts of Bangladesh by constructing a vulnerability assessment framework based on three dimensions：exposure，sensitivity，and adaptive capacity to characterize the spatial distributions of vulnerability and key driving factors. The results indicate that the spatial pattern of vulnerability across the districts is characterized by higher levels along the eastern coast and lower levels along the western coast，with Chattogram district exhibiting the highest vulnerability and representing a priority area for disaster prevention and mitigation；Vulnerability factors display spatial heterogeneity，with exposure generally decreasing from east to west，while sensitivity and adaptive capacity tend to decrease from west to east；The contribution analysis shows that vulnerability on the western coast areas is mainly driven by sensitivity and adaptive capacity factors，on the central coast by adaptive capacity，and on the eastern coast predominantly by exposure factors，and several regions are characterized by the combined influence of multiple vulnerability factors. This research provides a scientific basis for designing targeted disaster risk reduction strategies in the coastal regions of Bangladesh.

Keywords：Tropical cyclone；Vulnerability；Spatial characteristics；Bangladesh

0　引言

热带气旋是发生在热带洋面上的暖性气旋式涡旋，是对流层中最强大的风暴，也是威胁海岸带及沿海的主要灾害性天气系统之一[1-2]。热带气旋灾害是世界上破坏力最强、影响范围最广的灾害，给沿海国家造成了严重的人员伤亡和经济损失。孟加拉湾是全球热带气旋的活跃区，该区域气旋活动次数占全球气旋活动的 5％～ 6％，却造成了 80％～ 90％的因灾死亡人数[3]。历史记录显示，在近 300 年来的 23 次因灾死亡人数超过万人的全球最具破坏性的热带气旋灾害事件中，共有 20 次发生在该海域[4-5]。例如，1991 年在孟加拉国吉大港以北登陆的热带气旋引发的风暴潮，导致 13.8 万人死亡，直接经济损失超过 30 亿美元[6]。2007 年的热带气旋“锡德（Sidr）”共造成约 3 406 人丧生，经济损失高达 17 亿美元，约占孟加拉国国内生产总值的 2.6％[7]。Kabir 等[8] 和 Wu 等[9] 的研究表明，受大尺度大气环流变化的影响，北印度洋登陆的热带气旋路径呈现向孟加拉国沿岸偏移的趋势。Adsul 等[10] 的研究也揭示了孟加拉湾热带气旋路径在未来气候情景下呈现显著北移的趋势。同时，沿海地区社会经济发展，人口和产业活动逐渐聚集，使得孟加拉国沿海地区对热带气旋灾害的脆弱性不断加剧。在此背景下，系统开展孟加拉国热带气旋灾害的脆弱性研究，对提升其沿海地区的防灾减灾能力和气候变化适应性水平具有重要意义。

尽管孟加拉国是较易遭受热带气旋灾害影响的国家之一，但针对该区域的热带气旋灾害脆弱性研究相对有限[11]。目前，已有研究从不同承灾体类型展开分析：在社会层面，相关研究聚焦少数族裔[12-13]、渔民[14-15]、老人和女性[16-17]、童婚女性[18-19] 和低收入人群[20] 等脆弱群体，分析社会结构和不平等在脆弱性形成中的作用。在生态与生计方面，学者们则关注红树林[21-22]、渔业[23]、养殖业[24] 和农业[25] 的脆弱性问题。现有研究多聚焦于单一承灾体类型或单一维度，通过构建脆弱性指数开展评估研究，如社会脆弱性[26-27]、生计脆弱

性[15,28]、家庭脆弱性[29-30]、生计和气候脆弱性[31]等。在研究尺度上，研究多集中于沿海地区的微观或局部区域，如某一村庄[32]或沿海部分区域[33-36]，缺乏对跨沿海区域的综合分析[37]。同时，现有研究多局限于脆弱性指数计算和空间分区展示，对脆弱性空间差异及其驱动机制的分析仍不足。因此，有必要在更大的空间尺度上整合多类承灾体和脆弱性评价指标，构建综合性的热带气旋脆弱性评估模型，从而全面揭示沿海区域的脆弱性特征及其驱动机制。

本文以孟加拉国沿海地区 19 个县为研究对象，开展热带气旋灾害脆弱性评价的指标体系和方法研究，系统评估热带气旋灾害脆弱性并分析其主要影响因素，为该国沿海地区制定灾害风险管理和适应性策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

孟加拉国位于南亚次大陆的恒河—布拉马普特拉河三角洲，其东、西、北三面与印度毗邻，东南部与缅甸接壤，南临孟加拉湾。孟加拉国是全球受热带气旋灾害影响最严重的国家。据统计，自 1900 年以来，热带气旋已造成孟加拉国 0.75 万～1.23 万人丧生，61.6 万人受灾，造成经济损失 4.7 亿～9.0 亿美元[38]。本文以孟加拉国沿海区域为研究区域，包括库尔纳、达卡、巴里萨尔和吉大港四个专区的 19 个县。参考 Rahman 等[39]和 Matin 等[40]的研究，本文将沿海地区分为西部、中部和东部，研究区各专区和县的中英文名称如表 1 所示。

表 1 研究区 19 个县及其中英文名称

Table 1 Chinese and english names of the 19 districts in the study area

专区	县	分区
库尔纳（Khulna）	杰索尔县（Jessore）	西部
	纳赖尔县（Narail）	西部
	沙特基拉县（Satkhira）	西部
	库尔纳县（Khulna）	西部
	巴格埃哈特县（Bagerhat）	西部
达卡（Dhaka）	戈帕尔甘吉县（Gopalganj）	中部
	沙里亚特普尔县（Shariatpur）	中部
巴里萨尔（Barisal）	巴里萨尔县（Barishal）	中部
	皮罗杰布尔县（Pirojpur）	中部
	贾拉卡蒂县（Jhalokati）	中部
	巴尔古纳县（Barguna）	中部
	博拉县（Bhola）	中部
	帕图亚哈里县（Patuakhali）	中部
吉大港（Chittagong）	钱德布尔县（Chandpur）	中部
	拉克斯米普尔县（Lakshmipur）	中部
	诺阿哈利县（Noakhali）	中部
	费尼县（Feni）	东部
	吉大港县（Chattogram）	东部
	科克斯巴扎尔县（Cox’s Bazar）	东部

1.2 脆弱性评估模型

参考联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）的脆弱性框架及定义[41]，将脆弱性界定为承灾体系统在受到致灾因子影响时遭受破坏和损失的程度，与系统对致灾因子的暴露性、敏感性以及对灾害的适应能力有关。本文以脆弱性指数 V 表征孟加拉国沿海地区热带气旋灾害脆弱性，脆弱性指数值越大，表示脆弱性越大；反之则表示脆弱性越小。脆弱性指数的计算方法如下：

$$V=\frac{E\times S}{A} \quad (1)$$

式中：E 为暴露性指数，反映承灾体系统遭受灾害影响或干扰的程度，决定了潜在损失的大小；S 为敏感性指数，是指承灾体系统固有的抗扰动属性；A 为适应能力指数，是指承灾体系统应对灾害影响或扰动、减少潜在损失的能力。

1.3 脆弱性评价指标体系构建

为综合评估孟加拉国沿海地区的热带气旋灾害脆弱性，根据脆弱性评估模型［式（1）］，本文从暴露性、敏感性和适应能力三个维度开展脆弱性评估。在参考已有脆弱性研究[20,42-43]的基础上，结合孟加拉国沿海地区特点，本文选取 14 个指标

构建孟加拉国热带气旋灾害脆弱性评价指标体系（表 2），各指标释义如下。

表 2　热带气旋灾害脆弱性评价指标体系

Table 2　Assessment indicators system for tropical cyclone vulnerability

准则层	指标层	指标单位	指标属性	指标权重
暴露性 E	E_1：人口密度	人 /km^2	正向	0.13
	E_2：年累计降雨量	mm/a	正向	0.09
	E_3：年平均风速	m/s	正向	0.08
	E_4：热带气旋路径密度	个 /km^2	正向	0.06
敏感性 S	S_1：妇女和儿童比例	%	正向	0.06
	S_2：文盲率	%	正向	0.07
	S_3：贫困率	%	正向	0.10
	S_4：内陆渔业年捕获量	t	正向	0.09
	S_5：陆地平均高程	m	负向	0.05
适应能力 A	A_1：城镇化率	%	负向	0.05
	A_2：就业率	%	负向	0.06
	A_3：热带气旋避难所数	个	负向	0.06
	A_4：社区诊所数	个	负向	0.05
	A_5：铁路站点数	个	负向	0.05

暴露性指标用于表征研究区承灾体在特定时空范围内受到灾害影响的潜在程度。本文选取人口密度（E_1）、年累计降雨量（E_2）、年平均风速（E_3）和热带气旋路径密度（E_4）作为暴露性评价指标。其中，人口密度用于反映潜在受灾人口规模；暴风和强降雨是热带气旋灾害最显著且具有破坏性的特征[44]。年累计降雨量和年平均风速反映了区域暴露于灾害影响下的潜在强度；热带气旋路径密度通过统计单位面积内热带气旋路径出现的频数，表征区域对灾害的空间暴露程度。在指标属性方面，上述指标均为正向指标，即数值越大表示研究区域潜在暴露于灾害影响下的程度越高，对应的脆弱性水平越高。

敏感性指标用于衡量沿海地区社会经济系统在既定暴露条件下遭受灾害影响和损害的难易程度。本文选取妇女和儿童比例（S_1）、文盲率（S_2）、贫困率（S_3）、内陆渔业年捕获量（S_4）和陆地平均高程（S_5）作为敏感性评价指标。其中，妇女和儿童通常被视为易受灾害影响的弱势群体[45-46]，其比例越高，表示沿海地区人口结构的灾害敏感性越高；文盲率与贫困率分别用于表征社会整体对灾害的认知能力和恢复能力；内陆渔业年捕获量反映了区域对渔业资源的依赖程度，其值越大，表示渔业生产活动越活跃，生计系统越容易受到灾害的影响；陆地平均高程反映了区域的地形敏感性，低海拔区域地势平缓、排水能力较弱，极易引发积水或内涝[47-48]，从而表现出更高的敏感性。除陆地平均高程为负向指标外，其余指标均为正向指标。

适应能力指标用于衡量区域灾前防御、灾时应急及灾后恢复的能力。本文选取城镇化率（A_1）、就业率（A_2）、热带气旋避难所数（A_3）、社区诊所数（A_4）及铁路站点数（A_5）作为适应能力评价指标。其中，城镇化率与就业率反映了区域的经济活力与社会稳定水平；避难所数代表了当地工程减灾建设的水平；社区诊所数反映了基层医疗卫生系统的覆盖水平；铁路站点数代表了区域交通通达性和应急救援效率。上述指标均为负向指标，即指标数值越大，区域灾害适应能力越强，对应的脆弱性水平越低。

1.4　指标赋权及等级划分方法

本文采用主成分分析法（Principal Component Analysis，PCA）与熵权法（Entropy Weight Method，EWM）相结合的方法[49]进行指标赋权。主成分分析法通过对原指标进行降维处理，依据各主成分的方差贡献率来确定指标权重。熵权法基于信息熵原理，通过衡量各指标信息量的离散程度来确定其权重，指标所含信息量越多，相应权重越高[50]。基于上述方法，综合主成分分析法和熵权法所得权重，得到指标体系的综合权重，综合权重的计算方法如下：

$$w_i = \lambda w_i^{\mathrm{PCA}} + (1-\lambda) w_i^{\mathrm{EWM}} \qquad (2)$$

式中：w_i为第 i 个指标的综合权重；λ为偏好系数，本文取λ =0.5；w_i^{PCA}为第 i 个指标的主成分分析法权重；w_i^{EWM}为第 i 个指标的熵权法权重。

为分析脆弱性及其因子评估结果的分布特征，本文采用自然间断点分级法[51-52]将评估结果划分为 5 个等级，分别为低、较低、中、较高和高。相较于其他方法，该方法基于数据值自身的差异性确定分级阈值，通过缩小同级别内部的离散程度，放大不同级别之间的差异性，实现对评价等级的科学划分。

1.5 数据来源及数据处理

1.5.1 数据来源

本文中各指标数据主要源于再分析资料和社会经济统计数据。其中，年累计降雨量是基于气候灾害组红外降水与站点融合数据集（Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Stations，CHIRPS）2022 年降水数据计算所得，并在县域尺度进行空间均值处理。年平均风速采用欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，ECMWF）第五代全球大气再分析数据集（the fifth generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate，ERA5）中逐月的近地面 10 m 风速数据计算所得。热带气旋路径密度由热带气旋最佳路径数据集（International Best Track Archive for Climate Stewardship，IBTrACS）中 1842—2022 年影响孟加拉湾的热带气旋路径数据计算所得，统计网格设为 0.5°×0.5°，并在县域尺度上取平均值。人口密度、妇女和儿童比例等社会经济统计数据分别源于《孟加拉国人口与住房普查》《孟加拉国统计年鉴》《孟加拉国贫困地图》。各项指标数据来源及说明如表 3 所示。

1.5.2 数据处理方法

本文采用极差法[57]对指标数据进行标准化处理，以消除指标量纲和数量级造成的影响。针对不同属性的指标，其标准化的计算方法如下。

正向指标：

$$X_i = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{3}$$

负向指标：

$$X_i = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{4}$$

式中：X_i为第 i 个指标的标准值；x 为第 i 个指标的原始值；$x_{\max}$和$x_{\min}$分别为第 i 个指标原始值的最大值和最小值。

1.5.3 贡献度分析方法

为进一步揭示孟加拉国沿海地区热带气旋灾害脆弱性的驱动机制，本文对研究区各县脆弱性因子的贡献度[58]进行定量分析。在判定贡献度时，当某因子的贡献度大于 0.50，或与第二大贡献度因子差值大于 0.10 时，将其认定为主导因子。当存在 2 个及以上因子之间贡献度差值小于等于 0.10 时，将其划分为多因子共同影响型。

表 3 数据来源及说明

Table 3 Data sources and descriptions

指标名称	数据来源及说明
E_1：人口密度	2022 年孟加拉国人口与住房普查，数据年限为 2022 年
E_2：年累计降雨量	数据源于 CHIRPS v3.0 数据集（空间分辨率为 0.05°）[53]，使用数据年限为 2022 年
E_3：年平均风速	选取近地面 10 m 风速，数据源于 ECMWF ERA5 再分析资料（空间分辨率为 0.25°）[54]，对 2022 年逐月平均风速取平均值
E_4：热带气旋路径密度	热带气旋历史路径数据源于 IBTrACS 数据集[55]，使用数据年限为 1842—2022 年
S_1：妇女和儿童比例	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年
S_2：文盲率	2022 年《孟加拉国人口与住房普查》，数据年限为 2022 年
S_3：贫困率	2022 年《孟加拉国贫困地图》，数据年限为 2022 年
S_4：内陆渔业年捕获量	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年
S_5：陆地平均高程	高程数据源于 GEBCO[56]，数据年限为 2022 年
A_1：城镇化率	2022 年孟加拉国人口与住房普查，数据年限为 2022 年
A_2：就业率	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年
A_3：热带气旋避难所数	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年
A_4：社区诊所数	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年
A_5：铁路站点数	2024 年《孟加拉国统计年鉴》，数据年限为 2022 年

2　结果与讨论

2.1　脆弱性因子评估结果分析

脆弱性因子评估结果如图 1 所示。采用自然间断点法对暴露性、敏感性和适应能力指数进行统一分级，均划分为低、较低、中、较高和高 5 个等级，各等级对应的阈值如图 1 所示。暴露性评估结果如图 1（a）所示。研究区各县的暴露性指数取值范围为 0.080 ～ 0.270，在空间上呈现“东部高、西部低”的分布特征。其中，中部沿海东侧的拉克斯米普尔县（E=0.270）、东部沿海的科克斯巴扎尔县（E=0.243）和费尼县（E=0.235）处于高暴露性等级，钱德布尔县（E=0.218）和吉大港县（E=0.217）处于较高暴露性等级。与之相比，西部沿海各县整体暴露性水平相对较低。

敏感性评估结果如图 1（b）所示。研究区敏感性指数介于 0.077 ～ 0.221，在空间上表现为“西部高、东部低”的特征。其中，位于中部沿海东侧的诺阿哈利县（S=0.221）、西部沿海的库尔纳县（S=0.202）、杰索尔县（S=0.201）和沙特基拉县（S=0.191）处于高敏感性等级。位于西部沿海的巴格埃哈特县（S=0.183）和克斯米普尔县（S=0.178），中部沿海东侧的博拉县（S=0.165）处于较高敏感性等级。与之相比，中部沿海的大部分区域及东部沿海处于中等及以下敏感性等级。该结果表明，西部沿海及中部沿海东侧地区的社会生态系统更易受到灾害的影响，其敏感性与其所处的自然条件、社会经济结构、生计依赖特征等密切相关。

适应能力评估结果如图 1（c）所示。研究区适应能力指数取值范围为 0.015 ～ 0.258，在空间上呈“西部高、东部低”的特征。适应能力水平相对较高的区域主要集中在中部沿海和西部沿海东侧，包括处于高适应能力等级的沙里亚特普尔县（A=0.258）和纳赖尔县（A=0.258）。中部沿海地区约有 63.6% 的县处于较高适应能力等级，包括拉克斯米普尔县（A=0.235）、钱德布尔县（A=0.232）、帕图亚哈里县（A=0.228）、诺阿哈利县（A=0.226）、皮罗杰布尔县（A=0.224）、贾拉卡

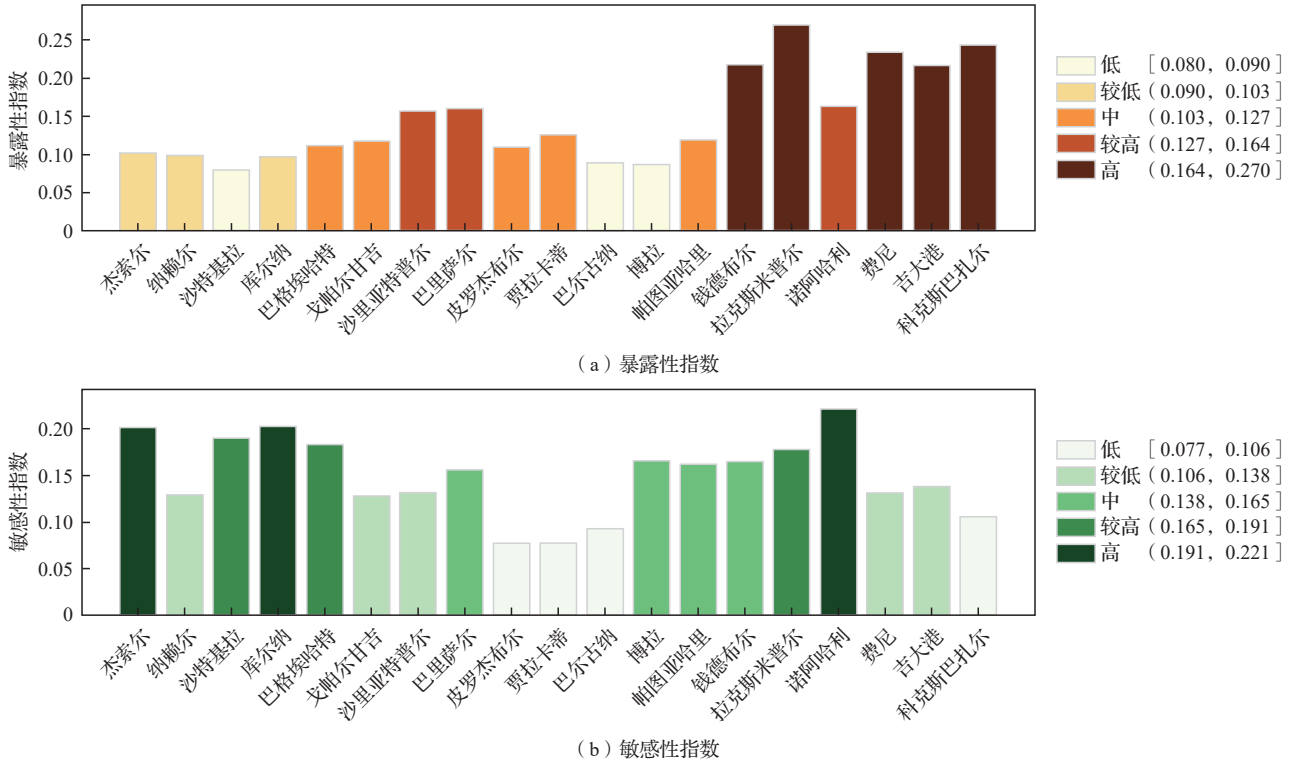
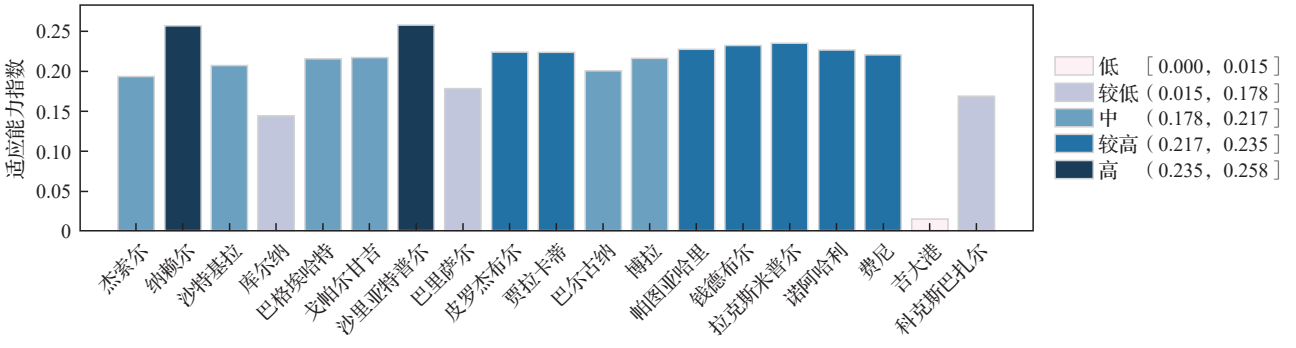


图 1　脆弱性因子评估结果

Fig.1　Result of vulnerability factors assessment



（c）适应能力指数

图 1 脆弱性因子评估结果（续图）

Fig.1 Result of vulnerability factors assessment

蒂县（A=0.224）、戈帕尔甘吉县（A=0.217）和东部沿海的费尼县（A=0.220）。东部沿海的适应能力相对较低，科克斯巴扎尔县（A=0.169）和吉大港县（A=0.015）分别处于较低及以下适应能力等级。分析其原因，尽管东部沿海地区的城市化进程较快，但其社会发展呈现明显的不均衡特征。同时，较高的人口密度削弱了人均对避难设施、医疗资源和交通服务等社会资源的获得能力，从而削弱了区域整体的适应能力。

综上，研究区沿海各县的脆弱性因子评估结果呈现出明显的空间异质性。西部沿海及中部沿海东侧区域同时具备较高的敏感性和适应能力。东部沿海地区在高暴露背景下，其适应能力却相对不足，二者综合影响加剧了该区域的脆弱性水平。

2.2 脆弱性评估结果分析

脆弱性评估结果如图 2 所示。研究区各县的脆弱性指数整体介于 0.036 ～ 1.182，呈现出显著的空间异质性。从空间分布上来看，研究区脆弱性整体呈现“东部高、西部低”的特征。东部沿海各县均处于较高及以上的脆弱性等级。其中，吉大港县处于高脆弱性等级，并且其脆弱性指数（V=1.182）显著高于其他沿海县。吉大港作为孟加拉国最重要的港口，人口密度高，产业活动和基础设施聚集，从而放大了该区域的脆弱性。该结果也与 Hoque 等[43]

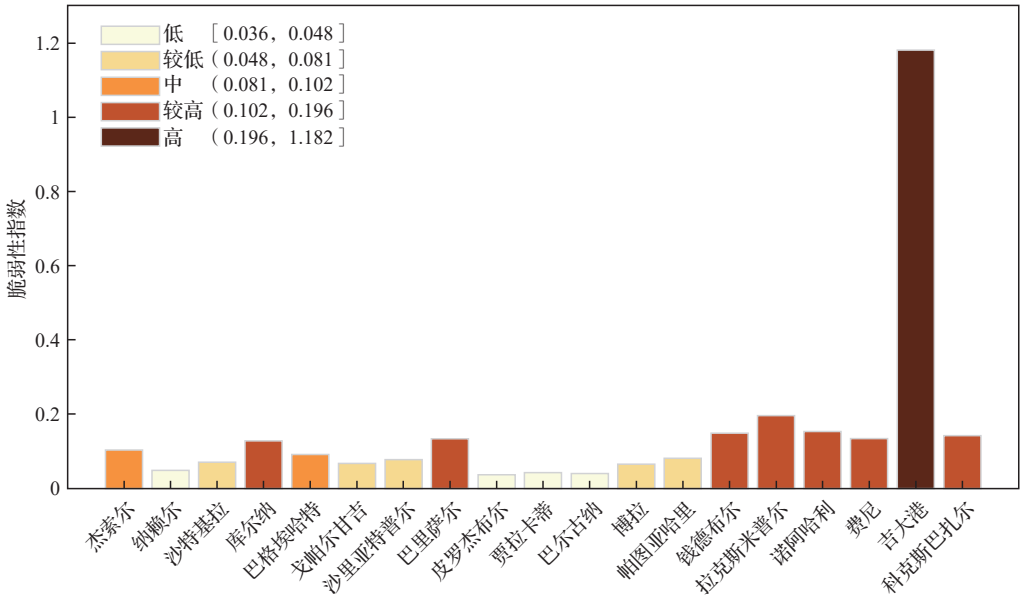


图 2 脆弱性评估结果

Fig.2 Result of vulnerability assessment

研究中对孟加拉国沿海热带气旋灾害风险评估识别的结果一致，进一步验证了结果的可靠性。中部沿海地区约有 45.5%的县处于较高脆弱性等级，且高脆弱性主要集中于恒河入海口两侧，包括拉克斯米普尔县（V=0.196）、诺阿哈利县（V=0.153）、钱德布尔县（V=0.148）和巴里萨尔县（V=0.133）。与之相比，西部沿海地区仅有库尔纳县处于较高脆弱性等级（V=0.127），其余县均处于中等及以下脆弱性等级。以上结果表明，孟加拉国沿海地区热带气旋灾害脆弱性在区域尺度上存在差异，高脆弱性区域主要集中于东部沿海及中部沿海东侧。在未来的防灾减灾工作中，应优先关注科克斯巴扎尔县至钱德布尔县一带区域。

2.3　脆弱性因子贡献度分析

脆弱性评估结果及其空间分布分别如表 4 和图 3 所示。依据研究区沿海分区方案，各区域脆弱性机制分析如下。

西部沿海地区各县主要以敏感性和适应能力为主导因子。其中，纳赖尔县的适应能力因子贡献度超过 0.50，表明适应能力对脆弱性的主导作用。库尔纳县的敏感性因子的贡献度为 0.455，适应能力因子次之（0.326），二者差值大于 0.10，因此，可认定其为主导因子。杰索尔县、沙特基拉县和巴格

表 4　脆弱性因子贡献度计算结果

Table 4　Contribution of vulnerability factors

县	贡献度		
	暴露性 E	敏感性 S	适应能力 A
杰索尔	0.207	0.404	0.389
纳赖尔	0.204	0.266	0.530
沙特基拉	0.167	0.398	0.434
库尔纳	0.219	0.455	0.326
巴格埃哈特	0.220	0.358	0.422
戈帕尔甘吉	0.255	0.277	0.468
沙里亚特普尔	0.287	0.240	0.472
巴里萨尔	0.325	0.315	0.360
皮罗杰布尔	0.268	0.188	0.544
贾拉卡蒂	0.296	0.181	0.523
巴尔古纳	0.234	0.243	0.523
博拉	0.188	0.352	0.460
帕图亚哈里	0.235	0.318	0.447
钱德布尔	0.355	0.267	0.378
拉克斯米普尔	0.395	0.261	0.345
诺阿哈利	0.268	0.362	0.371
费尼	0.400	0.224	0.376
吉大港	0.585	0.373	0.042
科克斯巴扎尔	0.470	0.204	0.326

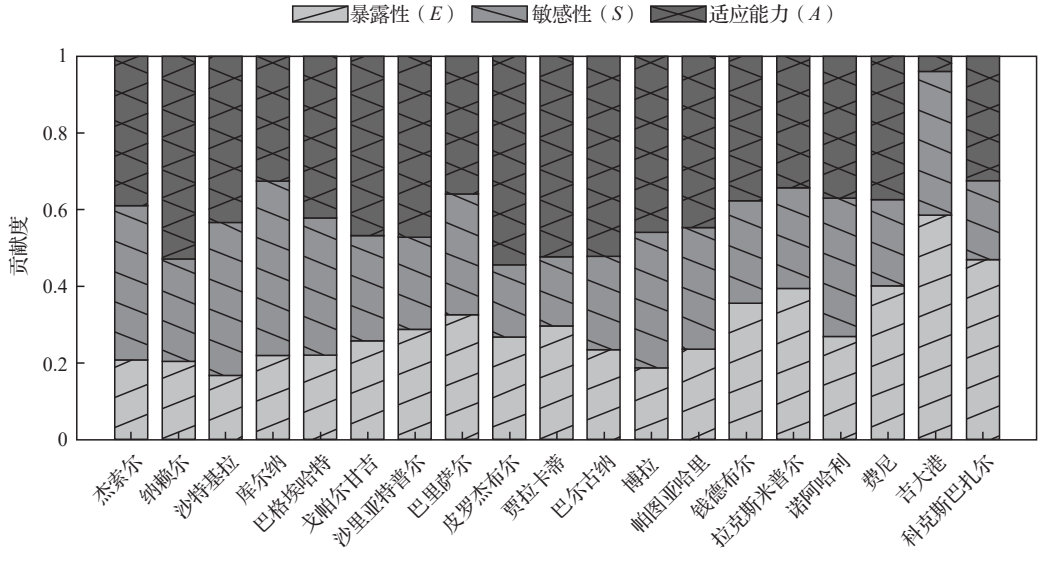


图 3　各县脆弱性因子贡献度

Fig.3　Contribution of vulnerability factors in each district

埃哈特县的敏感性和适应能力平均贡献度分别为0.387和0.415，且二者贡献度差距小于0.10，表明两种因子影响程度相当，因此，可以判定上述县为敏感性和适应能力共同影响型。

中部沿海地区约有63.6%（共7个）的县以适应能力为主导因子，平均贡献度为0.49。巴尔古纳县、贾拉卡蒂县和皮罗杰布尔县的适应能力因子平均贡献度为0.53，表明该因子对脆弱性的主导作用。沙里亚特普尔县、戈帕尔甘吉县、博拉县和帕图亚哈里县的适应能力因子的贡献度，尽管小于0.50，但与其他因子的差值大于0.10，因此，该因子仍占主导地位。此外，拉克斯米普尔县、钱德布尔县和巴里萨尔县为暴露性指数和适应能力共同影响型，其平均贡献度分别为0.358和0.361。诺阿哈利县的敏感性和适应能力因子贡献度分别为0.362和0.371，二者差值小于0.10，进一步表明该区域脆弱性受到多种因子共同影响。上述结果表明，中部沿海地区存在多种主导因子类型，既存在以适应能力为主的单因子主导型，也存在由“暴露性和适应能力”及“敏感性和适应能力”组成的多因子共同影响型。在中部沿海地区的各县中，适应能力是重要的因子，该结果在一定程度上解释了即使在暴露性和敏感性水平并不低的背景下，其综合脆弱性仍能保持在相对可控范围内，展现出适应能力在削减灾害脆弱性方面的调节作用。

在东部沿海地区各县中，吉大港县的暴露性指数的贡献度高达0.585，其敏感性指数和适应能力指数的贡献度分别为0.373和0.042，表明该区域脆弱性几乎完全由高暴露性驱动。科克斯巴扎尔县的暴露性的贡献度为0.470，该数值与第二大贡献度因子适应能力（0.326）的差值大于0.10，据此判定暴露性为主导因子。费尼县的暴露性和适应能力贡献度分别为0.400和0.376，且二者差值小于0.10，表明该县的脆弱性受到暴露性和适应能力的共同影响。

综上所述，孟加拉国沿海热带气旋灾害脆弱性的驱动机制在空间上存在区域差异，且存在多种主导因子类型。西部沿海地区多数县主要受敏感性和适应能力的共同影响，部分县也存在分别以敏感性或适应能力单因子主导型的情况。中部沿海地区整体以适应能力因子占主导，但部分县也存在“暴露性与适应能力”或“敏感性与适应能力”共同影响型。东部沿海地区以暴露性和适应能力为主要影响因子，其中，吉大港县的脆弱性主要由高暴露性驱动，其余县则表现为暴露性和适应能力共同影响的特征。上述结果表明，在降低脆弱性的管理实践中，有必要针对不同区域的脆弱性驱动特征，采取差异化的减灾和适应策略。针对以暴露性因子为主导的区域，应优先采用空间规划或功能分区等手段，降低承灾体与灾害影响范围的空间重叠程度。针对以敏感性因子为主导的区域，应重点关注对社会生态系统内部敏感性特征的调整。通过增强生计多样性[32]、生态系统修复和养护[59]等措施，降低社会生态系统对灾害冲击的敏感性。针对多因子影响型区域，其管理策略应强调对多因子的多途径干预。例如，在暴露性和适应能力共同影响的区域，应在降低承灾体暴露性程度的同时，持续强化灾害早期预警、加强防灾基础设施建设[60]和提高金融保障水平[61]等，以持续发挥其对脆弱性的抑制作用。

3 结论与展望

本文以孟加拉国沿海地区为研究区，开展了热带气旋灾害脆弱性评价指标体系构建和脆弱性指数构建方法研究，综合评估了研究区的脆弱性及其分布特征，主要得到以下结论。

（1）研究区域脆弱性指数取值范围为0.036～1.182，在空间上呈现“东部沿海高、西部沿海低”的分布特征。其中，吉大港县的脆弱性最高（V=1.182），并且显著高于其他沿海县。科克斯巴扎尔县至钱德布尔县一带是灾害管理重点关注的区域。

（2）研究区热带气旋脆弱性因子表现出明显的空间异质性。其中，暴露性整体呈现东部沿海高于西部沿海的格局，敏感性和适应能力则总体表现为西部沿海高于东部沿海。西部沿海及中部沿海东侧地区呈现高敏感性与高适应能力并存的特征。东部沿海的暴露性较高，同时适应能力相对不足，多要素叠加进一步加剧了其综合脆弱性水平。

（3）不同沿海区域的脆弱性主导因子存在明显差异。西部沿海地区主要受敏感性与适应能力因子

共同影响，中部沿海地区以适应能力因子占主导，东部沿海地区则以暴露性因子占优势，且部分区域呈现多因子共同影响的特征。该结果表明，在降低脆弱性的管理过程中，应根据区域主导因子制定差异化的防灾减灾与适应策略，以提升政策实施的针对性和有效性。

本文可为揭示孟加拉国沿海地区热带气旋灾害脆弱性的空间分异特征及其驱动机制提供科学参考，为区域制定差异化防灾减灾策略提供决策依据。在未来的研究中，可进一步引入长期的气候数据或社会经济数据，分析区域脆弱性的动态演变过程。同时，通过丰富指标数据类型和提高数据空间精度，以提高脆弱性评估结果的精度，为区域精细化的防灾减灾和适应性管理提供支撑。

参考文献（References）：

[1] SHI Jian，FENG Xiangbo，TOUMI R，et al. Global increase in tropical cyclone ocean surface waves[J]. Nature Communications，2024，15：174.

[2] KROPF C M，VATERLAUS L，BRESCH D N，et al. Tropical cyclone risk for global ecosystems in a changing climate[J]. Nature Climate Change，2025，15：92-100.

[3] PAUL B K. Why relatively fewer people died? The case of Bangladesh's cyclone sidr[J]. Natural Hazards，2009，50(2)：289-304.

[4] MOHANTY U C，OSURI K K，TALLAPRAGADA V，et al. A great escape from the bay of Bengal "super sapphire–phailin" tropical cyclone：a case of improved weather forecast and societal response for disaster mitigation[J]. Earth Interactions，2015，19(17)：1-11.

[5] World Meteorological Organization. Tropical cyclone operational plan for the bay of Bengal and Arabian sea. World Meteorological Organization Tropical Cyclone Programme Report[R]. Geneva：World Meteorological Organization，2022.

[6] 施国强. 1991 年孟加拉湾特大台风灾害[J]. 自然灾害学报，1995，4(1)：98-108.
SHI Guoqiang. The extremely severe typhoon disaster in the Bangladesh in 1991[J]. Journal of Natural Disasters，1995，4(1)：98-108.

[7] ZAMAN T，TAHSIN K T，ROUSSEAU ROZARIO S，et al. An overview of disaster risk reduction and anticipatory action in Bangladesh[J]. Frontiers in Climate，2022，4：944736.

[8] KABIR R，RITCHIE E A，STARK C. Tropical cyclone exposure in the north Indian Ocean[J]. Atmosphere，2022，13(9)：1421.

[9] WU Dijia，JU Xia，SUN Jia，et al. Escalation of tropical cyclone impacts on the northwestern Bay of Bengal over the past decade[J]. Climate Dynamics，2024，62(6)：5645-5662.

[10] ADSUL R，SINGH V K，PAREKH A，et al. Near future projections of tropical cyclone tracks over the Bay of Bengal using high resolution CMIP6 models[J]. Scientific Reports，2026，16：5567.

[11] HOQUE M A，PRADHAN B，AHMED N，et al. Cyclone vulnerability assessment of the western coast of Bangladesh[J]. Geomatics，Natural Hazards and Risk，2021，12(1)：198-221.

[12] RAHMAN M M，ISLAM ARIF M S，MAHDI I，et al. Cyclone vulnerability in ethnic minority：a case study among rakhain community of Bangladesh[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction，2022，83：103449.

[13] UDDIN M S，HAQUE C E，WALKER D，et al. Community resilience to cyclone and storm surge disasters：evidence from coastal communities of Bangladesh[J]. Journal of Environmental Management，2020，264：110457.

[14] JAKARIYA M，RAHMAN A，SAYEM S M，et al. Development of livelihood vulnerability index for the coastal fishermen communities of Bangladesh using spatial information technique[J]. Groundwater for Sustainable Development，2020，11：100475.

[15] SULTANA R，IRFANULLAH H M，SELIM S A，et al. Social-ecological vulnerability to climate change and risk governance in coastal fishing communities of Bangladesh[J]. Frontiers in Marine Science，2023，10：1174659.

[16] CARRICO A R，DONATO K M，BEST K B，et al. Extreme weather and marriage among girls and women in Bangladesh[J]. Global Environmental Change，2020，65：102160.

[17] JERIN T，AZAD M A K，KHAN M N. Climate change-triggered vulnerability assessment of the flood-prone communities in Bangladesh：a gender perspective[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction，2023，95：103851.

[18] ASADULLAH M N，ISLAM K M M，WAHHAJ Z. Child marriage，climate vulnerability and natural disasters in coastal

Bangladesh[J]. Journal of Biosocial Science, 2021, 53(6): 948-967.

[19] AHMED K J, HAQ S M A, BARTIAUX F. The nexus between extreme weather events, sexual violence, and early marriage: a study of vulnerable populations in Bangladesh[J]. Population and Environment, 2019, 40(3): 303-324.

[20] SULTANA N. Understanding the economic dimensions of women's vulnerability during cyclones: the Bangladesh perspective[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 70: 102730.

[21] HALDER N K, MERCHANT A, MISBAHUZZAMAN K, et al. Why some trees are more vulnerable during catastrophic cyclone events in the Sundarbans mangrove forest of Bangladesh?[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 490: 119117.

[22] MOHAMMED, SULTANA F, KHAN A, et al. Assessing vulnerability to cyclone hazards in the world's largest mangrove forest, the Sundarbans: a geospatial analysis[J]. Forests, 2024, 15(10): 1722.

[23] ISLAM M M, SALLU S, HUBACEK K, et al. Vulnerability of fishery-based livelihoods to the impacts of climate variability and change: insights from coastal Bangladesh[J]. Regional Environmental Change, 2014, 14: 281-294.

[24] UDDIN M S, HASAN N A, SANTI M, et al. Impacts of tropical cyclone sitrang on the shrimp industry: a case study from the coastal region of Bangladesh[J]. Thalassas: An International Journal of Marine Sciences, 2025, 41(3): 182.

[25] YUEN K W, SWITZER A D, TENG P P S, et al. Assessing the impacts of tropical cyclones on rice production in Bangladesh, Myanmar, Philippines, and Vietnam[PP/OL]. (2022-03-22)[2026-04-10]. https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2022-4/.

[26] RABBY Y W, HOSSAIN M B, HASAN M U. Social vulnerability in the coastal region of Bangladesh: an investigation of social vulnerability index and scalar change effects[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2019, 41: 101329.

[27] KABIR M H, HOSSAIN T. Assessment on social vulnerability and response towards natural disaster in a disaster-prone coastal village: an example from Bangladesh[J]. International Journal of Disaster Management, 2021, 4(1): 39-60.

[28] HOSSAIN M N, HASSAN M R, ALAM M D, et al. Livelihood vulnerability and adaptation strategies of coastal areas in the face of climate change in Bangladesh: a literature review[J]. Journal of Materials and Environmental Science, 2021, 12(12): 1601-1613.

[29] AL-MARUF A, JENKINS J C, BERNZEN A, et al. Measuring household resilience to cyclone disasters in coastal Bangladesh[J]. Climate, 2021, 9(6): 97.

[30] RAHMAN M M, ARIF M S I, HOSSAIN M T, et al. Households' vulnerability assessment: empirical evidence from cyclone-prone area of Bangladesh[J]. Geoscience Letters, 2023, 10: 26.

[31] TASNUVA A, BARI Q H, ISLAM A R M T, et al. Livelihood and climate vulnerability of coastal communities to natural disaster in south-western Bangladesh[J]. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2023, 30(3): 295-318.

[32] RAHMAN M M, HOSSAIN M A, ALI M R, et al. Assessing vulnerability and adaptation strategy of the cyclone affected coastal area of Bangladesh[J]. Geoenvironmental Disasters, 2022, 9: 6.

[33] SALMAN M A. Assessment of vulnerability and capacity to the cyclone 'Amphan' impacts of the southwestern coastal part of Bangladesh: an empirical contextual investigation[J]. Natural Hazards, 2023, 115(2): 1715-1742.

[34] AKTER S, HOSSAIN M T, SHEIKH N, et al. Risk perceptions and vulnerability assessment: induced from tropical cyclone in the southern part of coastal Bangladesh[J]. Journal of Agroforestry and Environment, 2023, 17(1): 36-49.

[35] SALMAN M A, RAKIB M H, SAHA S C, et al. Cyclone vulnerability assessment of the central coast of Bangladesh: a comprehensive study utilizing FAHP and geospatial techniques[J]. PLoS One, 2025, 20(7): e0326965.

[36] HOQUE M A, PRADHAN B, AHMED N, et al. Tropical cyclone risk assessment using geospatial techniques for the eastern coastal region of Bangladesh[J]. Science of The Total Environment, 2019, 692: 10-22.

[37] SARKAR S K, RUDRA R R, SANTO M M H. Cyclone vulnerability assessment in the coastal districts of Bangladesh[J]. Heliyon, 2024, 10(1): e23555.

[38] ISLAM M R. Tropical cyclones in Bangladesh: retrospective analysis of storm information, disaster statistics, and preparedness[J]. Environmental Research Communications, 2025, 7: 015003.

[39] RAHMAN T, HOQUE M A, ROY S, et al. Spatiotemporal distribution of cyclone-induced casualties in coastal Bangladesh (1970—2021): a comprehensive assessment[J]. Spatial Information Research, 2025, 33(6): 49.

[40] MATIN N, SAKIB M E H, JAHID HASAN G M. Vulnerability assessment of tropical cyclones and deep depressions: an index-based spatio-temporal assessment along the coastal zones of Bangladesh[J]. Natural Hazards, 2024, 120(5): 4367-4388.

[41] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability[M]//Contribution of

Working Group Ⅱ to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 21.

[42] SWEET S A, REJAUR RAHMAN M. Coastal area vulnerability to tropical cyclonic hazard: a geoinformation and IPCC approach based study[M]//Advanced GIScience in hydro-geological hazards: applications, modelling and management. Cham: Springer, 2025: 109-128.

[43] HOQUE M A, SARDAR M L, SAMI M S, et al. Mapping tropical cyclone risks in coastal Bangladesh: an integrated geospatial approach[J]. Earth Systems and Environment, 2025, 9(2): 1353-1370.

[44] RANJAN R, KARMAKAR S. Compound hazard mapping for tropical cyclone-induced concurrent wind and rainfall extremes over India[J]. npj Natural Hazards, 2024, 1: 15.

[45] CHOWDHURY T J, ARBON P, GEBBIE K, et al. Lived-experience of women's well-being in the cyclone shelters of coastal Bangladesh[J]. Prehospital and Disaster Medicine, 2022, 37(4): 437-443.

[46] AHMED K J, ATIQUL HAQ S M. Perceived risk of child mortality and fertility choices in climate-vulnerable regions of Bangladesh[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2024, 11: 147.

[47] KASPI M, KULESHOV Y. Flood hazard assessment in Australian tropical cyclone-prone regions[J]. Climate, 2023, 11(11): 229.

[48] AMER R. Machine learning-driven rapid flood mapping for tropical storm imelda using sentinel-1 SAR imagery[J]. Remote Sensing, 2025, 17(11): 1869.

[49] WU R M X, ZHANG Zhongwu, YAN Wanjun, et al. A comparative analysis of the principal component analysis and entropy weight methods to establish the indexing measurement[J]. PLoS One, 2022, 19(11): e0314513.

[50] ZOU Zhihong, YUN Yi, SUN Jingnan. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1020-1023.

[51] 李乃强，徐贵阳. 基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析[J]. 测绘通报，2020(4): 106-110.
LI Naiqiang, XU Guiyang. Grid analysis of land use based on natural breaks (jenks) classification[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(4): 106-110.

[52] 包文轩，宫阿都，徐滢，等. 基于区域灾害系统论的广东省台风灾害风险评估：以“山竹”台风为例[J]. 北京师范大学学报（自然科学版），2023，59(1): 94-103.
BAO Wenxuan, GONG Adu, XU Can, et al. Typhoon disaster risk assessment in Guangdong Province by regional disaster system theory: case of “Mangkhut”[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2023, 59(1): 94-103.

[53] FUNK C, PETERSON P, LANDSFELD M, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes[J]. Scientific Data, 2015, 2: 150066.

[54] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.

[55] KNAPP K R, KRUK M C, LEVINSON D H, et al. The international best track archive for climate stewardship (IBTrACS): unifying tropical cyclone data[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2010, 91(3): 363-376.

[56] WEATHERALL P, MARKS K M, JAKOBSSON M, et al. A new digital bathymetric model of the world's oceans[J]. Earth and Space Science, 2015, 2(8): 331-345.

[57] 丁依婷，董帝渤. 基于韧性视角的福建沿海风暴潮风险综合评估研究[J]. 热带海洋学报，2024，43(1): 126-136.
DING Yiting, DONG Dibo. Study on comprehensive risk assessment of storm surges for Fujian Province from the perspective of resilience[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2024, 43(1): 126-136.

[58] LYNGDOH V, LYNRAH M M, WAHLANG E, et al. District-level climate vulnerability assessment in Meghalaya using an IPCC AR5 framework[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 42486.

[59] ANFUSO G, POSTACCHINI M, DI LUCCIO D, et al. Coastal sensitivity/vulnerability characterization and adaptation strategies: a review[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(1): 72.

[60] FOTI E, MUSUMECI R E, STAGNITTI M. Coastal defence techniques and climate change: a review[J]. Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali, 2020, 31: 123-138.

[61] MALAK M A, SAJIB A M, QUADER M A, et al. “We are feeling older than our age”: vulnerability and adaptive strategies of aging people to cyclones in coastal Bangladesh[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2020, 48: 101595.