

台风“摩羯”影响海南岛植被变化的关键因子及阈值研究

李伟光^{1,2}, 吕润^{1,2}, 李海亮^{3,4*}, 陈小敏^{1,2}, 侯伟^{1,2}, 邹海平^{1,2}

1. 海南省气候中心, 海南海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203; 3. 中国热带农业科学院科技信息研究所/海南省热带作物信息技术应用研究重点实验室, 海南海口 571101; 4. 海南省唐华俊院士工作站, 海南海口 571101

摘要: 本研究旨在识别台风“摩羯”影响海南岛植被变化的关键因子, 确定其致灾阈值, 并为台风灾害预测、评估及防灾减灾提供科学依据。基于 GEE 平台获取台风“摩羯”登陆前后(2024年8月19日至9月18日) Sentinel-2 NDVI 数据, 结合地形与气象要素(台风路径、最大风速、最低气压和降水量等), 运用 XGBoost 模型预测台风后归一化植被指数(NDVI)变化, 并采用 SHAP 方法解析气象因子的非线性效应。XGBoost 模型拟合结果显示, 决定系数(R^2)为 0.75, 均方根误差(RMSE)为 0.12, 表明该模型在预测台风后 NDVI 变化方面具有较高精度。XGBoost 特征重要性分析表明, 台风前 NDVI、台风距离和最大风速为主要影响因子, 而坡度与坡向的影响较弱。进一步 SHAP 分析表明, 台风距离和最大风速为影响 NDVI 变化的关键气象因子。当台风距离 <76.4 km 时, NDVI 显著下降; 而当最大风速超过 29.3 m/s 时, NDVI 变化明显加剧, 表明强风对植被破坏具有关键作用。台风距离 <76.4 km (约 11 级风圈内) 及最大风速超过 29.3 m/s 的区域内, 植被受损尤为严重。建议在台风预警及灾前防御措施中重点关注上述高风险区域。

关键词: 台风“摩羯”; 致灾因子; 植被变化; 致灾阈值; XGBoost 模型; SHAP 分析

中图分类号: Q948.1 文献标志码: A

Identifying Key Meteorological Factors and Thresholds for Vegetation Damage in Hainan Island under Typhoon Yagi

LI Weiguang^{1,2}, LYU Run^{1,2}, LI Hailiang^{3,4*}, CHEN Xiaomin^{1,2}, HOU Wei^{1,2}, ZOU Haiping^{1,2}

1. Hainan Climate Center, Haikou, Hainan 570203, China; 2. Hainan Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Mitigation in South China Sea, Haikou, Hainan 570203, China; 3. Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Applied Research on Tropical Crop Information Technology of Hainan Province, Haikou, Hainan 571101, China; 4. Hainan Tang Huajun Academician Workstation, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: This study aimed to identify the key factors influencing vegetation changes on Hainan Island under Typhoon Yagi, determine the disaster thresholds, and provide scientific support for typhoon disaster prediction, assessment, and mitigation. Using the GEE platform, Sentinel-2 NDVI data from August 19 to September 18, 2024, covering the period before and after Typhoon Yagi landfall, were analyzed in conjunction with topographic and meteorological variables (such as typhoon path, maximum wind speed, minimum pressure, and precipitation). An XGBoost model was applied to predict post-typhoon NDVI changes, and SHAP analysis was used to explore the nonlinear effects of meteorological factors. The XGBoost model yielded a coefficient of determination (R^2) of 0.75 and a root mean square error (RMSE) of 0.12, indicating a high prediction accuracy for post-typhoon NDVI changes. Feature importance analysis within the XGBoost model revealed that pre-typhoon NDVI, typhoon distance, and maximum wind speed were the primary influencing factors, while slope and aspect had a weaker effect. Further SHAP analysis confirmed that typhoon distance and maximum wind speed were the key meteorological factors driving NDVI changes. When the typhoon distance was less

收稿日期 2025-02-28; 接受日期 2025-04-16

基金项目 国家重点研发计划项目(No. 2022YFD2301201); 海南省南海气象防灾减灾重点实验室开放基金项目(No. SCSF202407); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(No. 1630072024018)。

作者简介 李伟光(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向: 遥感与气象灾害。*通信作者(Corresponding author): 李海亮(LI Hailiang), E-mail: fondgis@catas.cn。

than 76.4 km, NDVI showed a significant decline, while NDVI changes intensified when the maximum wind speed exceeded 29.3 m/s, highlighting the crucial role of strong winds in vegetation damage. Regions within 76.4 km (approximately within the 11th wind radius) of the typhoon's path and with maximum wind speeds greater than 29.3 m/s experienced severe vegetation damage. It is recommended that the high-risk areas be prioritized in typhoon warnings and pre-disaster defense measures.

Keywords: Typhoon Yagi; disaster-causing factor; vegetation change; disaster thresholds; XGBoost model; SHAP analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.09.022

全球气候变化导致超强台风频率和强度显著增加,对沿海陆地生态系统造成严重影响^[1-2]。海南岛作为全球生物多样性热点区域,其陆地生态系统对区域碳汇和生态安全至关重要^[3]。然而,台风对陆地生态系统的破坏机制及其关键阈值仍缺乏系统研究,制约了科学防灾减灾策略的制定^[4]。准确识别并量化台风致灾因子及其阈值,对灾害风险评估和抗灾能力提升具有重要的理论与实践意义^[5]。

近年来,遥感技术在台风灾害监测与评估领域取得了显著进展。普遍采用归一化植被指数(NDVI)等遥感指标评估台风对森林和植被的影响^[6]。台风主要导致植被覆盖度下降和 NDVI 值减小,反映了树木倒伏、枝条断裂等物理破坏^[7-9]。沈一凡等^[10]基于 MODIS 增强型植被指数(EVI)和叶面积指数(LAI),分析了 2001—2019 年台风对我国东南沿海植被的影响,揭示了不同等级台风的影响差异。田韞钰等^[11]调查发现,强台风“山竹”对深圳的树木受损比例高达 21.4%。钱丽沙^[12]结合 Sentinel-1 和 Sentinel-2 遥感影像,开发了台风灾害监测方法,评估了岭南地区甘蔗作物损害情况。张旭^[13]基于 Google Earth Engine(GEE)平台,利用随机森林算法和 Landsat 8 影像,精确评估了超强台风“利奇马”和“威马逊”对中国东南部森林的损害情况。然而,台风对不同植被类型的影响存在显著差异。例如,香港外来单一种植园受台风影响更严重,而本地次生林的 NDVI 变化较小^[14]。尽管现有研究已评估了台风对植被的影响,但缺乏针对气象和地形因子的阈值研究,特别是在遥感技术与机器学习模型结合的背景下的研究。与现有研究相比,本研究结合 XGBoost 模型和 SHAP 方法,系统分析台风“摩羯”对海南岛植被变化的影响,并确定关键气象因子的致灾阈值,为台风灾害的风险评估和防灾减灾提供新的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

海南岛位于中国南海,属热带季风气候区,森林覆盖率高,热带农业发达。其独特的地理与生态环境使其成为台风灾害的高风险区域。海南岛的地形以中部高耸、四周低平的地貌,中部的五指山、鹦哥岭等山脉向外围逐级下降,形成山地、丘陵、台地、平原的梯级结构。中部山区以热带雨林为主,外围丘陵和台地以季雨林和经济林为主,沿海平原则分布农业种植区、果园和防风林等。海南岛年均遭受热带气旋超过 6 次,其中约 2 次登陆^[15]。尽管强台风登陆频率较低,但其造成的灾害性影响极为严重。1973 年 7314 号强台风几乎摧毁琼海市,2005 年“达维”和 2014 年超强台风“威马逊”分别造成直接经济损失超百亿元。2024 年第 11 号台风“摩羯”导致海南省直接经济损失超 600 亿元,进一步凸显了台风的破坏力。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 遥感数据 本研究基于 Google Earth Engine(GEE)平台的 COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED 数据集获取遥感影像数据。该数据集包含经传感器校准和大气校正的 Sentinel-2 卫星表面反射率(SR)影像,已去除云和云阴影,具有高时空分辨率,广泛应用于农业、气候变化和灾害管理等领域^[16]。鉴于海南岛植被的季节性变化及台风季节云层覆盖的影响,本研究选取 2024 年 8 月 19 日至 9 月 18 日的影像数据。其中,8 月 19 日、8 月 24 日、8 月 29 日和 9 月 3 日的影像覆盖台风登陆前,9 月 8 日、9 月 13 日和 9 月 18 日的影像则用于台风登陆后数据合成。合成台风前后 NDVI 时,提取云概率波段(MSK_CLDPRB)值为 0 的影像,以确保数据质量。对于台风前后存在多幅云概率值为 0 影像的区域,取其 NDVI 平均值进行处理。

地形数据来源于 GEE 平台的 USGS/SRTM-GL1_003 数据集, 基于 SRTM 雷达系统测量, 空间分辨率为 1 弧秒 (约 30 m)。在 GEE 平台上随机生成 50 000 个数据点, 其中 28 083 个位于海南陆地, 提取这些点在台风前后各时间点的 NDVI、土地覆盖类型、高程 (DEM)、坡度和坡向等数据。

1.2.2 气象数据 本研究采用海南省气象信息中心 2024 年 9 月 4 日 20 时至 9 月 7 日 16 时的逐小时极大风速、最低气压和降水量数据。基于该数据, 计算累积降水量和极大风速超过 10 级的持续时间。数据来自 499 个经质量控制的气象站点, 采用反距离加权插值 (IDW) 方法转换为 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 网格数据。基于 GEE 平台生成的随机点经纬度, 提取相应气象要素值, 并计算各点到台风路径的最短距离。

1.3 XGBoost 建模

本研究采用 XGBoost 模型构建多源环境变量 (气象和地形) 与台风前后 NDVI 变化间的非线性关系, 预测台风后 NDVI 值。同时, 利用 SHAP 归因分析解释模型结果, 揭示变量与预测目标间的关系。XGBoost 是一种高精度机器学习模型, 可通过特征重要性揭示环境变量的影响, 但无法直接解释变量与目标间的关系。通过 Shapley 值量化单一变量与因变量间的非线性关系进行 SHAP 归因分析^[17]。本研究使用 Python 中的 XGBoost 2.1.3 包构建模型, 并通过 SHAP 0.46.0 包分析致灾因子与 NDVI 损失间的部分依赖关系。

模型使用的环境变量包括地形 (DEM、坡度、坡向) 和气象因子 (台风路径距离、最低气压、最大风速、小时降水强度、累积降水量、大风持续时间)。预测目标为台风后的 NDVI 值。有效样本为海南岛上台风前后均有高质量 NDVI 数据的点, 随机划分为训练集和验证集。采用决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE) 评估模型效果^[18], 计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

式中, y_i 为 Sentinel-2 观测到的台风影响后 NDVI 值, y' 为 XGBoost 模型预测的 NDVI 值。

决定系数 (R^2) 反映 XGBoost 模型解释的 NDVI 变异量占总变异量的比例。 R^2 越接近 1, 表明模型的拟合效果越好, 预测结果与真实值越接近。均方根误差 (RMSE) 衡量预测值与真实值的差异, 值越小表明模型预测精度越高。

1.4 关键因子及致灾阈值

参考干旱致灾阈值确定方法^[19], 本研究采用分段回归模型描述致灾因子 (如最大风速、台风路径距离) 与植被指数变化量间的关系。当致灾因子超过阈值时, 其对植被的影响由轻微转变为显著。回归模型公式如下:

$$r = \begin{cases} \beta_0 + \beta_1 \theta_{\text{ty}} + \epsilon & (\theta_{\text{ty}} \geq \theta_{\text{ty_th}}) \\ \beta_0 + \beta_1 \theta_{\text{ty}} + \beta_2 (\theta_{\text{ty}} - \theta_{\text{ty_th}}) + \epsilon & (\theta_{\text{ty}} < \theta_{\text{ty_th}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\theta_{\text{ty_th}}$ 是致灾因子对植被造成显著影响的阈值, θ_{ty} 是台风致灾因子数值, β_0 、 β_1 、 β_2 为线性拟合参数, ϵ 为拟合残差。

2 结果与分析

2.1 台风“摩羯”路径与气象因子状况

台风“摩羯”是有气象记录以来秋季登陆我国的最强台风, 其强度和影响范围均创历史纪录。2024 年 9 月 6 日 16: 20, 以超强台风级别在海南省文昌市沿海登陆, 登陆后穿过文昌、海口市移入琼州海峡, 于 6 日 22 时 20 分前后在广东省徐闻县角尾乡再次登陆, 随后移入北部湾海面, 其影响于 9 月 7 日逐渐结束文昌市冯坡镇最低气压降至 918.4 hPa, 龙楼镇最大阵风达 66.7 m/s (17 级以上), 分别创下我国陆地台风影响下的最低气压和最强风速纪录。台风“摩羯”自进入海南岛防区至离开北部湾, 对海南岛持续影响 45 h。登陆文昌市后, 台风路径经过海口市, 海南岛东北部普遍遭遇 12 级以上大风, 海口、文昌、澄迈、定安、临高等市 (县) 阵风达 15~17 级。内陆多个乡 (镇) 监测到 12 级及以上风力, 持续时间超过 3 h。监测数据显示, 16 个乡 (镇) 的 15 级及以上风力持续超过 3 h。9 月 4 日 20: 00 至 9 月 7 日 14: 00, 全省大部分地区经历暴雨至大暴雨, 局部地区出现特大暴雨。

图 1 为台风“摩羯”影响期间海南岛气象要

素的空间分布特征。最大风速分布（图 1A）显示，海南岛北部风速显著高于其他区域，部分地区超过 50 m/s；南部和东南部风速较低，其分布与台风路径基本一致。大风持续时间分布（图 1B）显示，北部沿海持续时间较长，部分地区超过 15 h；东部和西部沿海也受短暂大风影响。最大小时降水量分布（图 1C）呈现从小到大的渐

变趋势，降水量空间分布不明显，反映出台风降水的复杂性。累计降水量分布（图 1D）显示，大部分区域降水量为 200~500 mm，北部和山区较高，空间分布不明显。最低气压分布（图 1E）显示，低气压值主要出现在北部和中部，北部低气压分布与台风路径相关，中部低气压则与山区地形有关。

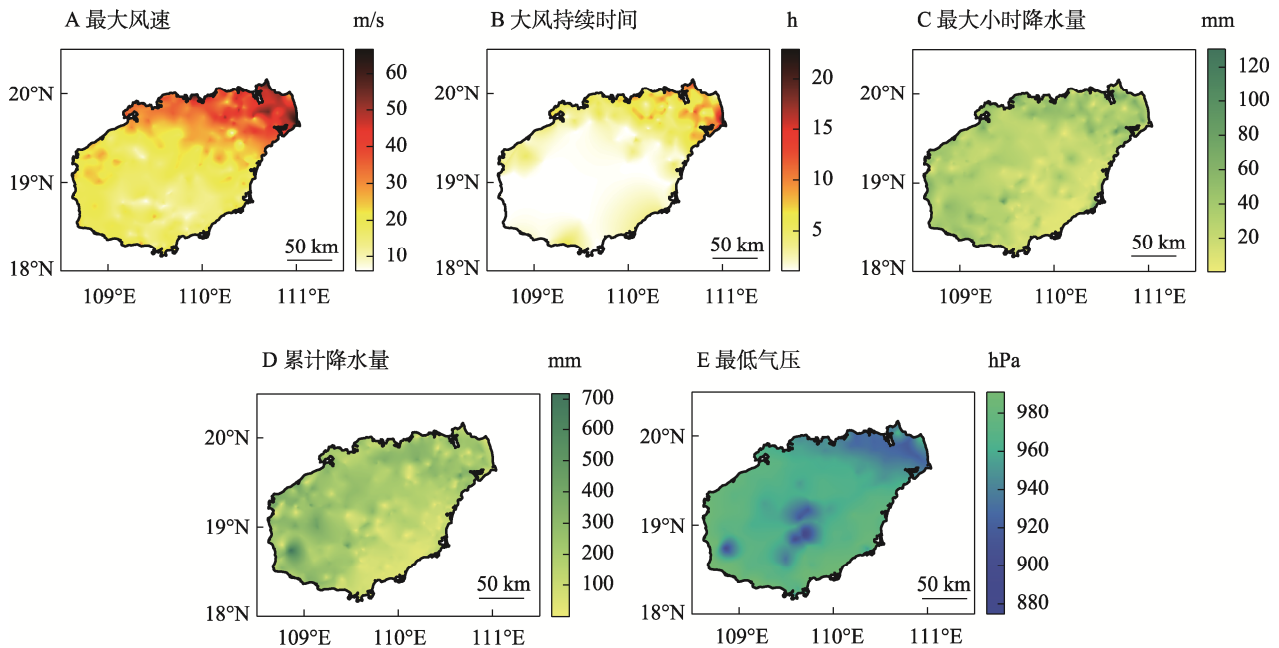


图 1 台风“摩羯”影响期间海南岛气象要素的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of meteorological elements in Hainan Island during Typhoon Yagi

2.2 台风前后海南岛 NDVI 变化

图 2 体现了台风前后归一化植被指数 (NDVI) 及其变化的空间分布，反映台风对地表植被的影响。台风前 NDVI 分布显示，海南岛大部分区域 NDVI 值较高，植被覆盖丰富；较低 NDVI 值主要出现在裸露地带或人类活动密集区域，植被覆盖较少（图 2A）。台风后 NDVI 分布显示，北部地区 NDVI 值下降，反映台风导致的植被损失或破坏（图 2B）。台风前后 NDVI 变化分布显示，蓝色区域（NDVI 值下降）主要分布在海南岛北部。红色区域（NDVI 值回升）分布在中部和南部，可能与大气校正误差、雨后植被生长等因素有关（图 2C）。XGBoost 建模的采样点分布如图 2D 所示，海南岛共有 28 083 个样本，其中 14 148 个样本在台风前后云覆盖率为 0，具有高质量 NDVI 值（绿色点）。采样点分布均匀，覆盖主要地理特征，可有效反映台风对不同土地覆盖类型

的影响。

2.3 XGBoost 模型结果与评价

图 3 为 XGBoost 模型的特征重要性得分及其排序，得分反映了各变量对预测目标的贡献程度。台风距离是最重要特征，得分为 0.27，明显高于其他特征，表明其预测能力最高；台风前 NDVI 值次之，得分为 0.23，表明其对模型预测影响较大；最大风速得分为 0.12，位居第三，表明其对预测结果影响大；高程和大风持续时间的得分分别为 0.07 和 0.06，表明地形和风持续性对预测结果有一定影响；累计降雨量、最低气压、坡度、最大小时降雨量和坡向的得分均较低，表明这些变量对模型贡献较小。

图 4 为 XGBoost 模型预测的台风后 NDVI 值与实际 NDVI 值的散点图。散点分布接近参考线，表明预测值与实际值相关性较强。模型决定系数 (R^2) 为 0.45，表明预测值与实际值拟合度高，

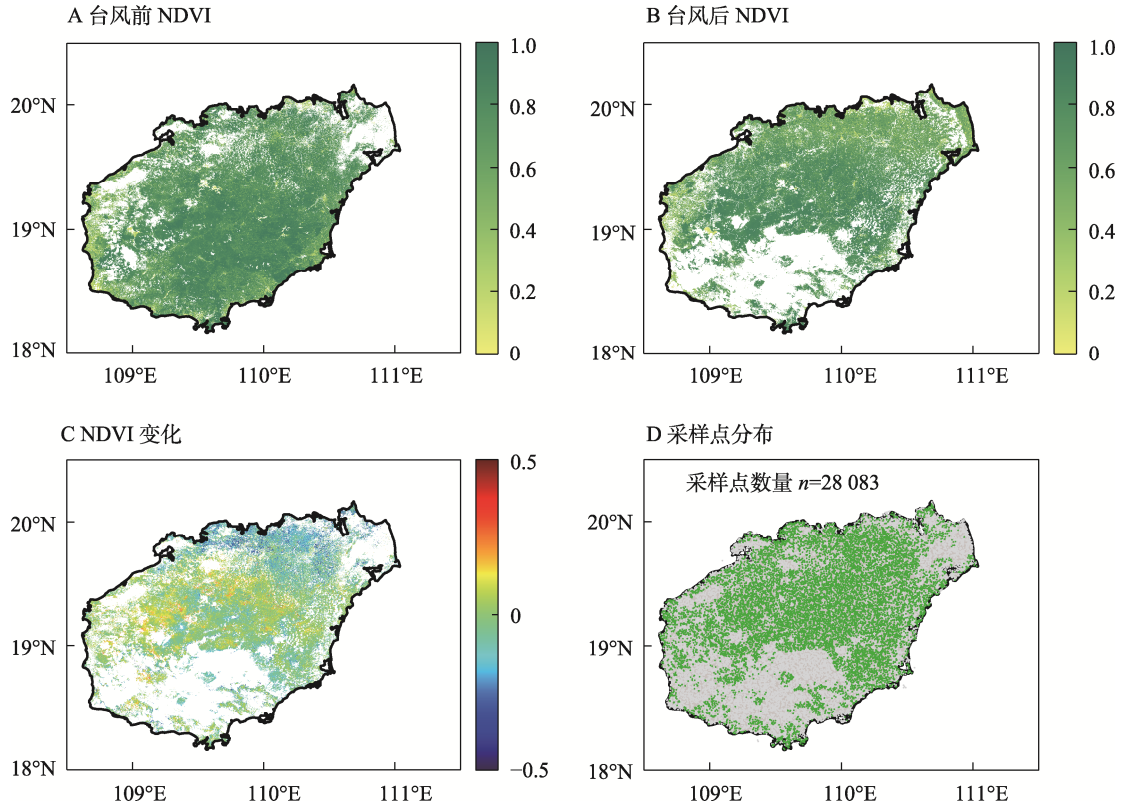


图 2 海南岛台风灾后林木损毁指数分布

Fig. 2 Distribution map of typhoon-induced tree damage index in Hainan Island

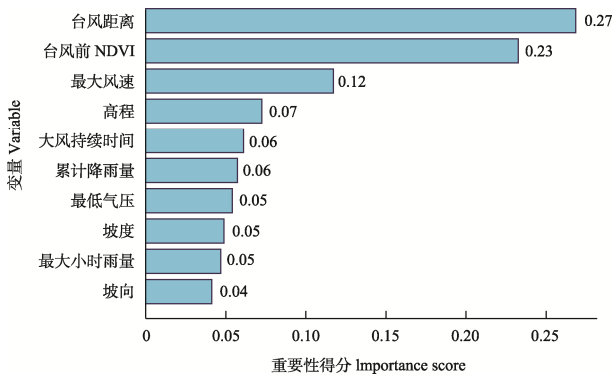


图 3 XGBoost 模型预测因子重要性排序与得分

Fig. 3 Ranking and scores of feature importance in XGBoost model

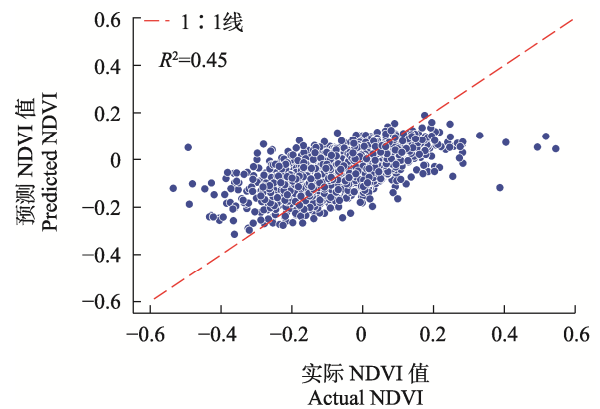


图 4 XGBoost 模型预测 NDVI 值与实际 NDVI 值对比

Fig. 4 Comparison of XGBoost predicted and actual NDVI values

约 75% 的变异可由模型解释。均方根误差 (RMSE) 为 0.12, 表明预测误差较小且在可接受范围内。总体而言, XGBoost 模型性能良好, 适用于 NDVI 值预测。

2.4 致灾因子及阈值

SHAP 分析的致灾因子重要性结果如图 5 所示, 图 5 反映了各特征对模型预测的影响方向和程度。SHAP 分析表明, 台风前 NDVI 值是最重要特征, 高 NDVI 值区域在台风后下降幅度较大,

低 NDVI 值区域受影响较小; 台风距离是第二重要因子, 较短距离 (蓝色) 对 NDVI 下降影响更显著; 最大风速是第三重要因子, 风速越大 (红色), NDVI 下降越显著。高程等地形因素表明, 低海拔地区 NDVI 下降更显著。大风持续时间和最低气压等特征的 SHAP 值分布集中, 表明其对模型预测影响较小。总体而言, 台风前 NDVI、台风距离和最大风速等气象特征重要性较高, 地理特征 (如坡度和坡向) 影响较小。

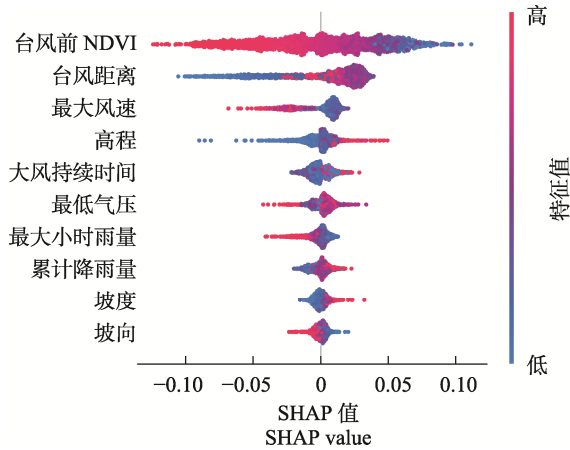
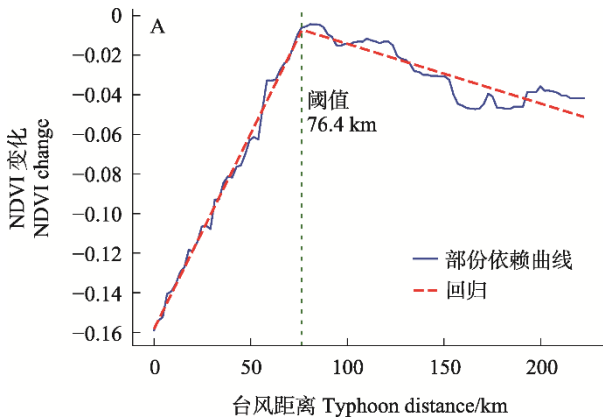


图 5 SHAP 值分析各特征对模型输出的影响
Fig. 5 SHAP value analysis of feature impacts on model output

SHAP 分析的部分依赖图揭示了预测因子与



NDVI 变化间的定量关系。图 6A 显示，台风距离与 NDVI 变化幅度呈负相关。台风距离较小时，NDVI 下降幅度较大，台风经过区域 NDVI 平均下降 0.16。分段回归分析（红色虚线）显示，NDVI 变化随台风距离增大而逐渐减小。台风距离超过 76.4 km 时，NDVI 变化趋于平稳，表明在 76.4 km 范围内台风对植被影响显著，超过该距离后影响减弱。由图 6B 可知，最大风速与 NDVI 下降幅度呈正相关。分段回归分析显示，风速超过 29.3 m/s (约 11 级风) 时，NDVI 变化明显加剧，且随风速增大，下降趋势持续加深。通过部分依赖图可直观观察台风距离和最大风速在不同阈值下对 NDVI 变化的影响，超出阈值后，NDVI 变化出现明显转折。因此，防灾减灾措施应重点关注这些临界值，以提升灾害预警和应对能力。

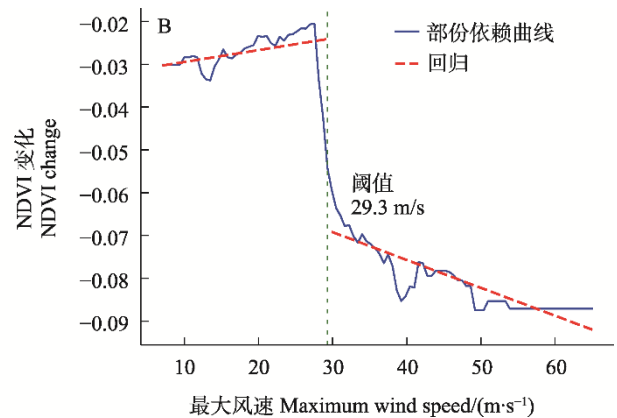


图 6 台风距离 (A) 和最大风速 (B) 部分依赖与致灾阈值

Fig. 6 Partial dependence of typhoon distance (A) and maximum wind speed (B) on disaster threshold

3 讨论

3.1 NDVI 在植被变化监测中的不确定性分析

尽管 NDVI 在植被健康和生态变化监测中应用广泛^[20]，但在灾害监测中仍存在显著不确定性。高分辨率影像可提供更细致的植被变化信息，但其时间分辨率不足是影响 NDVI 精度的关键因素^[21]。特别是台风等极端天气事件发生时，植被可能在短时间内剧烈变化，而高分辨率遥感影像的时间间隔难以有效捕捉这些变化^[22]。低分辨率影像在时间重访周期上具有优势，但其空间分辨率不足导致细节丧失，降低变化监测精度^[16, 23]。此外，云层、大气环境变化及传感器观测角度差异可能显著影响 NDVI 值的准确性^[24]。尤其是台风过后，云层覆盖和大气条件不稳定可能对 NDVI 的准确性产生负面影响。本研究采用多时相影像

合成部分缓解了这一问题，但台风前后云系较多、大气水汽变化大，仍对 NDVI 变化的监测造成干扰。EVI 指数在反映高生物量区时具有一定优势^[25]，PSRI 指数反映了植被胁迫程度^[26]，可以结合后续植被恢复情况，进一步评估灾害的长期损失与恢复能力。本研究通过空间上大量随机点采样，结合大数据、机器学习模型及 SHAP 分析，有效克服了这些不确定性。

3.2 台风致灾阈值的普适性

台风是中国东部及华南沿海地区的重要自然灾害，其风速、降水量和路径直接影响植被破坏程度。分析表明，台风“摩羯”对海南岛植被的影响中，风速和距离是关键因子，与前人研究一致^[27-29]。研究表明，距离台风“摩羯”路径小于 76.4 km 时，植被变化显著；超过该距离后，植被

变化趋于稳定。其次,最大风速是植被变化的重要因子。分析表明,台风最大风速超过 29.3 m/s (11 级风)时,植被变化显著加剧,风速较强区域植被破坏更严重。台风“摩羯”登陆海南岛时,10 级风半径为 120 km,12 级风半径为 60 km。台风距离和最大风速 2 个致灾因子的覆盖范围基本一致。对浙江苍南地区的研究也表明,12 级以上大风范围受灾严重^[26]。因此,台风预警和防灾减灾工作中,风速阈值可作为重要参考因素,大风范围内需提前采取高等级防护措施。此外,尽管降水量在本研究中未作为主要影响因子,但其灾害影响不可忽视。大量降水可能引发洪涝和山洪等次生灾害,对山区和低洼地区尤为重要^[30]。本研究认为地形重要性较小,因台风“摩羯”主要经过地形变化较小的琼北平原。在特定地形区域(如山地或丘陵地带),地形影响可能增强。特别是在台风强降水和强风影响下,地形因素可能加剧植被破坏或地质灾害风险^[31]。因此,未来研究应综合考虑气象因子与地形特征的交互作用,为台风灾害预防和应对提供更精确的预测模型。

4 结论

本研究利用台风“摩羯”影响海南岛前后的 Sentinel-2 NDVI 影像和气象数据,结合 XGBoost 模型与 SHAP 分析,研究气象因子对植被变化的影响。研究表明,台风距离和最大风速是影响 NDVI 变化的关键因子,并确定了其致灾阈值。台风“摩羯”路径经过的区域 NDVI 值显著下降,表明台风对植被造成了显著破坏。XGBoost 模型预测结果表明,台风距离、台风前 NDVI 值和最大风速是影响 NDVI 变化的主要因子,风速持续时间和气压也有一定影响。模型 R^2 值为 0.75,表明约 75% 的植被变化可通过环境变量解释,预测效果较为理想。SHAP 分析进一步表明,台风前 NDVI 值、台风距离和最大风速对预测结果影响最为显著,NDVI 较高区域下降程度较大。部分依赖图分析确定了台风距离和最大风速对 NDVI 变化的关键阈值:台风距离的阈值为 76.4 km (约 11 级风圈范围内),低于此值时,台风对植被的影响显著;超过该距离后,影响减弱。最大风速的阈值为 29.3 m/s (11 级风),风速超过此值时,NDVI 下降显著加剧。

本研究结合遥感、气象数据和机器学习模型,

分析了台风“摩羯”对海南岛植被的影响,识别出关键致灾因子及其阈值。关键致灾因子及其阈值的识别对台风灾害评估与防御策略的制定具有重要意义,在此基础上可根据阈值构建台风植被损害早期预警指标体系,绘制台风生态危险性区划图。

参考文献

- [1] 陈雨菲,林孝松,犹伊然,李宏伟. 海南岛台风灾害综合危险评价[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7467-7475. CHEN Y F, LIN X S, YOU Y R, LI H W. Comprehensive risk assessment of typhoon disaster in Hainan Island[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7467-7475. (in Chinese)
- [2] 姜露露,马仁锋,袁海红. 台风灾害经济损失评估研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(3): 252-263. JIANG L L, MA R F, YUAN H H. Research progress on the assessment of economic losses from typhoon disasters[J]. Ecological Science, 2022, 41(3): 252-263. (in Chinese)
- [3] 杨思琪. 海南儋州橡胶园生态系统碳氮循环及其耦合特征[D]. 海口: 海南大学, 2024. YANG S Q. Carbon and nitrogen cycling and its coupling characteristics in the ecosystem of rubber plantations in Danzhou, Hainan[D]. Haikou: Hainan University, 2024. (in Chinese)
- [4] 钟雯. 台风灾害风险下深圳西海岸带脆弱性评价研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023. ZHONG W. Vulnerability assessment of the west coast zone of Shenzhen under typhoon disaster risk[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [5] TANG J S, FU D J, SU F Z, YU H, WANG X H. Drivers, trends, and patterns of changing vegetation-greenness in Nansha Islands, China from 2016 to 2022[J]. Chinese Geographical Science, 2024, 34(4): 662-673.
- [6] NANDI G, NEOGY S, ROY A K, DATTA D. Immediate disturbances induced by tropical cyclone Fani on the coastal forest landscape of eastern India: a geospatial analysis[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 20: 100407.
- [7] PEEREMAN J, HOGAN J A, LIN T C. Assessing typhoon-induced canopy damage using vegetation indices in the Fushan Experimental Forest, Taiwan[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1654.
- [8] MANDAL M S H, HOSAKA T. Assessing cyclone disturbances (1988—2016) in the Sundarbans mangrove forests using Landsat and Google Earth Engine[J]. Natural Hazards, 2020, 102: 133-150.
- [9] CHU H J. Spatiotemporal analysis of vegetation index after

- typhoons in the mountainous watershed[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28: 20-27.
- [10] 沈一凡, 舒浩然, 李安洁, 王佩尧, 代欣哲, 耿一琳, 张琦悦, 刚成诚. 2001—2019年台风干扰下我国东南沿海地区植被抵抗力和恢复力评估[J]. *生态学报*, 2024, 44(9): 3802-3813.
- SHEN Y F, SHU H R, LI A J, WANG P Y, DAI X Z, GENG Y L, ZHANG Q Y, GANG C C. Assessment of typhoon disturbance on the resistance and resilience of coastal vegetation in southeastern China during 2001—2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(9): 3802-3813. (in Chinese)
- [11] 田韞钰, 周伟奇, 钱雨果, 郑重, 潘雪莲. 台风“山竹”对深圳城市绿地及生物量的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(8): 2589-2598.
- TIAN Y Y, ZHOU W Q, QIAN Y G, ZHENG Z, PAN X L. The influence of typhoon Mangkhut on urban green space and biomass in Shenzhen, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8): 2589-2598. (in Chinese)
- [12] 钱丽沙. 岭南地区甘蔗作物种植面积监测和台风灾害遥感评估方法[D]. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所), 2022.
- QIAN L S. Monitoring of sugarcane cultivation area and remote sensing assessment methods for typhoon disasters in the Lingnan region[D]. Guangzhou: University of Chinese Academy of Sciences (Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences), 2022. (in Chinese)
- [13] 张旭. 基于机器学习的超强台风对中国东南部森林影响的遥感监测[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2021.
- ZHANG X. Remote sensing monitoring of the impact of super typhoons on forests in southeastern China based on machine learning[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2021. (in Chinese)
- [14] ABBAS S, NICHOL J E, FISCHER G A, WONG M S, TRTEZA S M. Impact assessment of a super-typhoon on Hong Kong's secondary vegetation and recommendations for restoration of resilience in the forest succession[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 280: 107784.
- [15] 吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 海南岛强台风事件的气候特征[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(6): 244-252.
- WU S A, XING C Y, ZHU J J. Climate characteristics of violent typhoon events on Hainan Island[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(6): 244-252. (in Chinese)
- [16] LIU Z, CHEN G K, TANG B, WEN Q K, TAN R, YAN H. Regional scale terrace mapping in fragmented mountainous areas using multi-source remote sensing data and sample purification strategy[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 925: 171366.
- [17] 刘瑞雪, 李佳轩, 李云. 水库消落带植物多样性空间格局预测模型及环境解释—基于 XGBoost-SHAP 模型框架[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9652-9669.
- LIU R X, LI J X, LI Y. Prediction model and environmental interpretation for the spatial pattern of plant diversity in the water-level fluctuation zone of reservoir based on XGBoost and SHAP[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9652-9669. (in Chinese)
- [18] RODRÍGUEZ-VEIGA P, QUEGAN S, CARREIRAS J, PERSSON H J, FRANSSON J E S, HOSCILO A, ZIÓLKOWSKI D, STEREŃCZAK K, LOHBERGER S, STÄNGEL M, BERNINGER A, SIEGERT F, AVITABILE V, HEROLD M, MERMOZ S, BOUVET A, LE TOAN T, CARVALHAIS N, SANTORO M, CARTUS O, RAUSTE Y, MATHIEU R, ASNER G P, THIEL C, PATHE C, SCHMULLIUS C, SEIFERT F M, TANSEY K, BALZTER H. Forest biomass retrieval approaches from earth observation in different biomes[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 77: 53-68.
- [19] LI X, PIAO S L, HUNTINGFORD C, PEÑUELAS J, YANG H, XU H, CHEN A P, FRIEDLINGSTEIN P, KEENAN T K, SITCH S, WANG X H, ZSCHEISCHLER J, MAHECHA M D. Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation[J]. *National Science Review*, 2023, 10(5): nwad049.
- [20] 琚旺龙, 詹正豪, 秦震宇, 张军. 基于 LandTrendr 的老挝橡胶林遥感识别及扩张监测[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(8): 1742-1750.
- JU W L, ZHAN Z H, QIN Z Y, ZHANG J. Remote sensing identification and expansion monitoring of rubber forests in Laos based on LandTrendr[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(8): 1742-1750. (in Chinese)
- [21] 刘轩, 周杰, 卢静, 贾立, 熊旭倩, 崔祎霖. 多源植被遥感产品应用于干旱监测的不确定性分析[J]. *遥感学报*, 2024, 28(9): 2383-2404.
- LIU X, ZHOU J, LU J, JIA L, XIONG X Q, CUI Y L. Analyzing the uncertainty of the multisource remote sensing-based vegetation products for drought monitoring[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(9): 2383-2404. (in Chinese)
- [22] 梁爽, 宫兆宁, 赵文吉, 关鸿亮, 梁亚囡, 陆丽, 赵雪. 基于多季相 Sentinel-2 影像的白洋淀湿地信息提取[J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(4): 777-790.
- LIANG S, GONG Z N, ZHAO W J, GUAN H L, LIANG Y N, LU L, ZHAO X. Information extraction of Baiyangdian wetland based on multi-season Sentinel-2 images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(4): 777-790. (in Chinese)

- [23] 罗红霞, 戴声佩, 李茂芬, 李海亮, 胡盈盈, 郑倩, 禹萱. 基于 Gaofen-2 影像和面向对象的椰子林分类研究[J]. 热带作物学报, 2024, 45(5): 1021-1030.
- LUO H X, DAI S P, LI M F, LI H L, HU Y Y, ZHENG Q, YU X. Object-oriented classification of coconut palms based on Gaofen-2 imagery[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(5): 1021-1030. (in Chinese)
- [24] DE PETRIS S, SARVIA F, BORGOGNO-MONDINO E. Uncertainty assessment of Sentinel-2-retrieved vegetation spectral indices over Europe[J]. European Journal of Remote Sensing, 2023, 57(1): 1-14.
- [25] JIANG Z, HUETE A R, DIDAN K, MIURA T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3833-3845.
- [26] HOLTGRAVE A K, RÖDER N, ACKERMANN A, ERASMI S, KLEINSCHMIT B. Comparing Sentinel-1 and -2 data and indices for agricultural land use monitoring[J]. Remote Sensing, 2020, 12(18): 2919.
- [27] WANG T, YANG L, WU S, GAO J B, WEI B G. Quantitative assessment of natural disaster coping capacity: an application for typhoons[J]. Sustainability, 2020, 12(15): 5949.
- [28] XU S, ZHU X, HELMER E H, TAN X P, TIAN J Q, CHEN X H. The damage of urban vegetation from super typhoon is associated with landscape factors: evidence from Sentinel-2 imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 104: 102536.
- [29] REZAEI R, GHAFFARIAN S. Monitoring forest resilience dynamics from very high-resolution satellite images in case of multi-hazard disaster[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 4176.
- [30] WANG Y, XU D, YANG Y, ZHOU M L, CHEN W Q, LIN W. A typhoon-induced debris flow warning model integrating rainfall thresholds with geological factors[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1-15.
- [31] QIN X C, WU Y L, LIN T S, GAO L. Urban flood dynamic risk assessment based on typhoon rainfall process: a case study of typhoon "Lupit" (2019) in Fuzhou, China[J]. Remote Sens, 2023, 15: 3116.