

DOI: 10.20103/j.stxb.202303240571

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. 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. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(9): 3802-3813.

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

沈一凡¹, 舒浩然¹, 李安洁¹, 王佩尧¹, 代欣哲¹, 耿一琳¹, 张琦悦², 刚成诚^{3,4,*}

1 西北农林科技大学草业与草原学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学林学院, 杨凌 712100

3 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

4 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要: 台风是影响我国陆地生态系统结构和功能的主要自然灾害之一, 尤其对东南沿海地区植被具有明显的干扰效应。为深入了解台风对我国沿海地区植被的影响及其响应, 基于 MODIS 增强型植被指数 (Enhanced Vegetation Index, EVI) 和叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 分析了 2001—2019 年间不同等级的台风对植被 EVI 和 LAI 的影响, 评估台风登陆时植被的抵抗力及台风过后植被的恢复力。结果表明: (1) 2001—2019 年间, 共有 70 个台风登陆我国东南沿海地区, 其中, 台风 (TY)、强台风 (STY) 与超强台风 (SuperTY) 的数量分别为 35、26 和 9 个。我国台湾省的台风登陆次数最多, 为 26 个, 其次为广东省 (20 个); (2) 在整个研究区范围内, 台风 (TY)、强台风 (STY) 与超强台风 (SuperTY) 登陆后的 EVI 净变化率分别为 4.88%、-7.48%、-1.85%, LAI 净变化率分别为 22.28%、-65.70%、-17.60%; (3) 在经历台风干扰后, 沿海地区大部分植被可在 3 个月之内得到恢复, 其中浙江省与广东省植被的恢复时间较长, 海南省与台湾省植被的恢复时间较短。研究结果对我国沿海地区森林经营管理和生态环境保护具有重要意义。

关键词: 台风; 增强型植被指数 (EVI); 叶面积指数 (LAI); 植被抵抗力; 植被恢复力

Assessment of typhoon disturbance on the resistance and resilience of coastal vegetation in Southeastern China during 2001—2019

SHEN Yifan¹, SHU Haoran¹, LI Anjie¹, WANG Peiyao¹, DAI Xinzhe¹, GENG Yilin¹, ZHANG Qiyue², GANG Chengcheng^{3,4,*}

1 College of Grassland Agriculture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 College of Forestry, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

Abstract: Typhoons have a profound influence on reshaping the fabric and functionality of terrestrial ecosystems within the expansive landscapes of China, especially the southeastern coast, where their disruption to coastal vegetation is notably pronounced. This study aims to unravel the intricate effects of typhoons on vegetation and delve into the responses within China's coastal zones. Employing MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) and Leaf Area Index (LAI), we aim to explore vegetation resilience when facing varying typhoon categories and to elucidate the intricate dynamics of post-typhoon

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31602004); 陕西省自然科学基金 (2021JQ-171)

收稿日期: 2023-03-24; **网络出版日期:** 2024-02-01

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gangcc@ms.iswc.ac.cn

recovery spanning nearly two decades from 2001 to 2019. Over these 19 years, a total of 70 typhoons made landfall in the southeast coastal area of China. This formidable meteorological phenomenon, categorized as typhoons (TY), strong typhoons (STY), and super typhoons (SuperTY), numbered 35, 26, and 9, respectively. Taiwan was found to be the region most frequently impacted, weathering an impressive 26 typhoon landings, closely followed by Guangdong with 20. The net change rates in EVI and LAI follow the landfall of these various typhoon categories. Intriguingly, after Typhoon landfalls, the Enhanced Vegetation Index exhibited a net change rate of 4.88%. However, the story took a different turn with strong and super typhoons, resulting in net change rates of -7.48% and -1.85%, respectively. The patterns were even more pronounced in the leaf area index, where typhoons demonstrated a net change rate of 22.28%, while strong typhoons and super typhoons showed -65.70% and -17.60%, respectively. The aftermath of these typhoons unfolded a narrative of post-typhoon recovery dynamics. Across the entire study area, the majority of vegetation along the southeastern coast exhibited a remarkable capacity for restoration within a mere three months of the typhoon disturbance. However, within this broader trend, regional disparities were evident. Zhejiang and Guangdong provinces displayed lengthier recovery periods compared to their counterparts. On the other hand, the provinces of Hainan and Taiwan experienced relatively swift vegetation restoration. The implications of this study stretch far beyond the realms of scientific inquiry, shedding light on forest management and ecosystem conservation in China's coastal regions. By providing a detailed understanding of the intricate patterns of vegetation response to typhoons, these findings form a solid foundation for informed decision-making in the face of natural disturbances. They contribute significantly to the overarching goal of enhancing the resilience and sustainability of China's coastal ecosystems, underscoring the imperative of a proactive and adaptive approach to the challenges posed by these powerful meteorological events.

Key Words: typhoon; Enhanced Vegetation Index; Leaf Area Index; vegetation resistance; vegetation resilience

台风是一种极具破坏力的气象灾害。随着全球气候变暖与厄尔尼诺、拉尼娜事件的频发,台风登陆对陆地的干扰也愈发严重^[1-2]。中国是受西太平洋台风影响最严重的国家之一^[1],台风会破坏我国沿海地区植被,其强劲的风力使得植被冠层受损、枝条折断,甚至将树木连根拔起^[3]。台风携带的水汽形成的强降水极易引发洪涝、滑坡、泥石流等次生灾害^[4-5],对自然环境与社会经济造成巨大损失^[6-7]。此外,台风对自然生态系统的结构、功能和生物多样性具有强烈的干扰效应^[8]。植被类型、冠层形状和大小,以及根系性状等生物因素决定了树木的抗风能力和恢复能力^[9-11]。非生物因素,如气候、地形和人为干预等,同样影响强风干扰后植被的恢复过程^[12-13]。

植被指数是反映地表植被特征与动态变化的重要参数^[14-15],如归一化差异植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)能较好地反映植被的绿度变化^[16];增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)在减少背景和大气作用以及饱和问题上要优于NDVI^[17-18];叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)是反映植物群体生长状况的一个重要指标,既能表征生物圈与大气圈之间的碳和水的交换,又能捕获植被冠层的光谱反射率特征^[19]。NDVI、EVI与LAI等植被指数不仅可以监测长期植被生长情况^[20-24],而且可以反映植被在经历地震^[25]、火灾^[26-27]和风灾^[28]等自然灾害后的恢复情况。目前,利用植被指数分析强风对植被的影响及其响应已开展了一定的研究,如Gang等^[29]利用归一化差异近红外指数(Normalized Difference Infrared Index, NDII)、EVI、LAI和日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced Chlorophyll Fluorescence, SIF)研究了2000—2015年飓风干扰下美国墨西哥湾森林的抵抗力和恢复力,发现NDII在监测区域尺度强风干扰对森林的影响及其恢复力方面具有优势,且登陆风速是影响森林冠层损失和飓风后恢复的主要因素;Wang等^[30]利用MODIS遥感数据评估飓风Katrina对森林植被造成的损害,发现NDII对飓风的干扰最为敏感;Wang等^[31]根据飓风登陆前后墨西哥湾北部沿岸EVI的变化评估飓风对植被的干扰,发现EVI可有效反映飓风对植被破坏的严重程度及其灾后恢复动态。

在我国,刘少军等^[32]利用 MODIS NDVI 数据分析了台风达维登陆前后海南岛 NDVI 变化情况,发现台风路径周围的植被受损严重,而由于降水的作用,整个海南岛的平均 NDVI 呈现上升趋势;邓睿^[4]通过 EVI 的变化评估台风对植被生长的影响,发现台风莫拉克登陆地点周围 EVI 明显下降,在台风过后一个月,植被逐渐恢复;张旭^[11]基于 Landsat8 OLI 遥感影像,使用随机森林算法和单变量图像差分方法分别监测了受超强台风 Rammasun 与 Lekima 影响的森林,并计算其受损程度。综上所述,目前我国关于台风对植被影响已开展了一定的研究,但大多只关注某个台风对植被的影响,不同等级台风对植被的影响程度及灾后恢复规律尚缺乏系统全面的认识。鉴于此,本研究首先统计了 2001—2019 年间登陆我国东南沿海地区不同等级的台风,然后通过分析台风登陆前后 MODIS EVI 与 LAI 的变化,评估台风对植被的影响以及灾后植被的恢复情况。研究结果不仅有助于深入了解我国沿海地区植被对极端气候事件的响应及适应机制,而且对森林经营管理及生态环境保护具有重要意义。

1 研究方法 & 数据来源

1.1 研究区概况

研究区包括我国浙江省、福建省、广东省、香港地区、澳门地区、海南省、台湾省,地理位置为 108°37′—123°10′ E 和 18°10′—31°11′ N,海拔在 3900 m 以下,地形以山地、丘陵为主,沿海地区有小面积的平原。大部分区域为亚热带季风气候,海南省、广东省和台湾省的南部地区属于热带季风气候。降水多集中在夏季,年降水量为 1500—2520 mm,年均温 17—25℃,夏秋季节是台风登陆的高发季节^[33]。植被类型以林地和耕地为主,耕地主要分布在浙江省、广东省和台湾省西部(图 1)。

1.2 数据来源

台风最佳路径数据来自中国气象局热带气旋资料中心(<https://tcdata.typhoon.org.cn>)。根据《热带气旋等级》国家标准 GB/T 19201—2006,将台风划分成台风 TY (Typhoon, 32.7—41.4m/s)、强台风 STY (Strong Typhoon, 41.5—50.9m/s) 和超强台风 SuperTY (Super Typhoon, ≥51.0m/s) 三个等级^[34]。

2000—2020 年 EVI 和 LAI 数据分别来源于 MOD13A2 version 061 和 MOD15A2H version 061,空间分辨率均为 500 m,时间分辨率均为 8 d,并利用 S-G 滤波对原始数据进行了处理。

土地利用/覆盖数据来源于 CLCD (China Land Cover Dataset),空间分辨率为 30 m。该数据集由武汉大学基于 Google Earth Engine 获取的 Landsat 影像,采用随机森林方法制作而成,共包含 9 种土地利用类型。本研究针对沿海地区分布最广的森林和耕地进行分析。

1.3 研究方法

1.3.1 抵抗力评估

首先,使用 $\Delta VI_{\text{台风年}}$ 来表征台风登陆前后植被指数的变化率,其计算公式为:

$$\Delta VI_{\text{台风年}} = \frac{VI_{\text{台风后}} - VI_{\text{台风前}}}{VI_{\text{台风前}}} \quad (1)$$

式中, $VI_{\text{台风前}}$ 与 $VI_{\text{台风后}}$ 分别代表台风登陆前第 8 天与登陆后第 8 天的植被指数。

其次,对于未发生台风的年份,同时期的植被指数变化率为 $\Delta VI_{\text{正常年}}$,计算公式为:

$$\Delta VI_{\text{正常年}} = \frac{VI_{\text{台风后},i} - VI_{\text{台风前},i}}{VI_{\text{台风前},i}}, n \quad (2)$$

式中, $VI_{\text{台风前},i}$ 与 $VI_{\text{台风后},i}$ 分别代表在台风登陆之前未发生台风的第 i 年、与发生台风年份相同日期的植被指数, $\Delta VI_{\text{正常年}}$ 为台风登陆前未发生台风年同期植被指数变化的平均值, n 表示台风未发生年的年份数。

植被指数的净变化率表示为研究区内台风发生年与正常年同期植被指数变化率之差,计算公式为:

$$VI_{\text{净变化率}} = \Delta VI_{\text{台风年}} - \Delta VI_{\text{正常年}} \quad (3)$$

考虑到每年登陆我国台风数量多,且在某些区域有多次登陆的情况,因此,以每五年划定影响区域

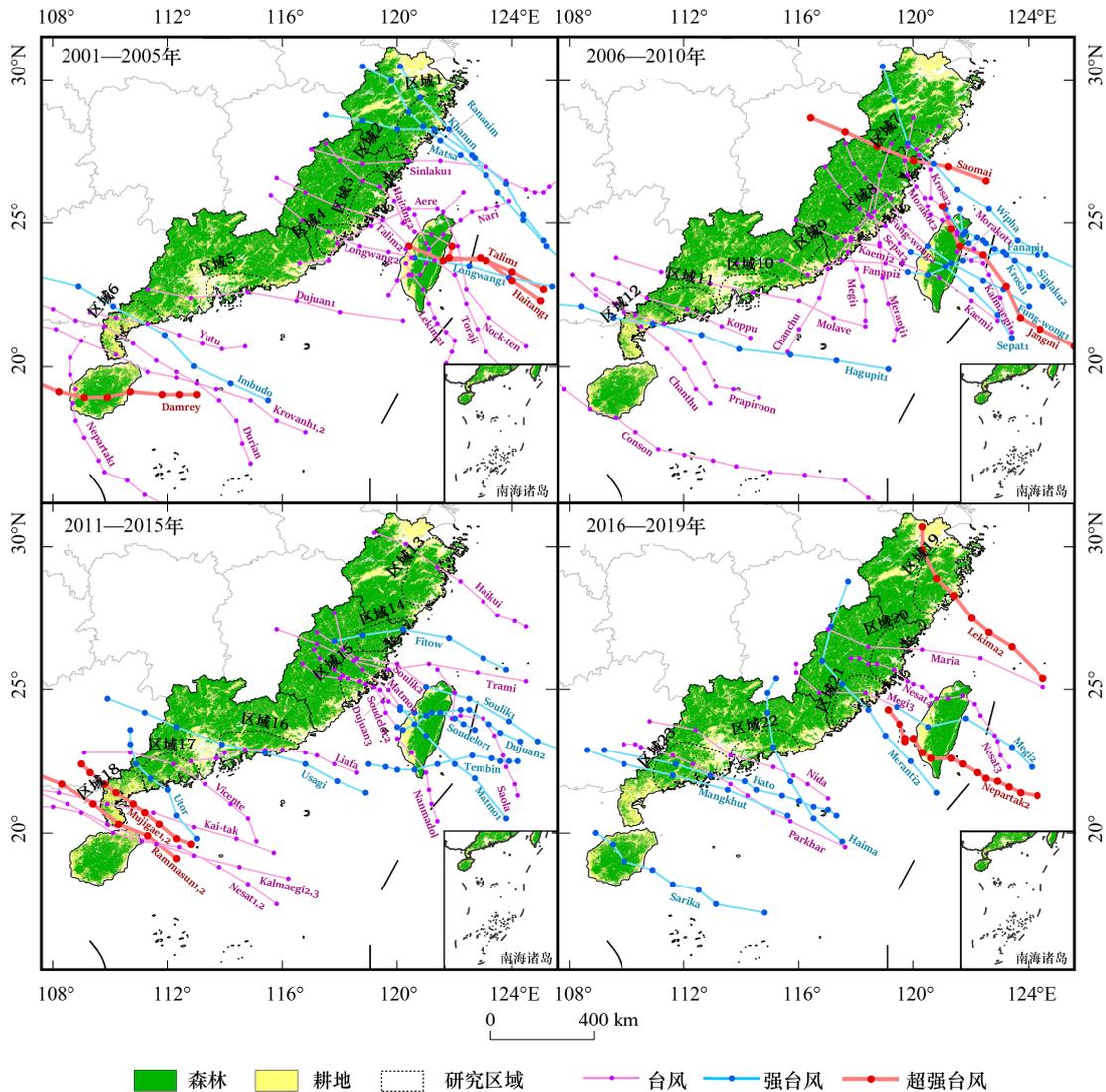


图 1 2001—2019 年中国东南沿海地区台风路径汇总图

Fig.1 Typhoon tracks in the southeastern coastal area of China during 2001—2019

台风名称后的数字用于区分重名的台风

(2016—2019 年划定影响区域)。每次登陆浙江省、福建省和广东省的台风单独划定影响区域,若两次台风登陆地较为接近则划定为同一区域。最终在浙江省、福建省和广东省共划定 23 个影响区域。海南省与台湾省由于其地理位置的特殊性,将其划为两个独立的研究区域。对于所有二次登陆的台风,如 Soulik1, 2, 其对台湾省和福建省植被的影响进行分别计算。

1.3.2 恢复力评估

首先,统计不同研究区植被指数的平均值,然后计算不同植被指数的距平值。距平值 (Anomaly) 指某一日期 VI 与 2001—2020 年间同日期 VI 平均值之差,计算公式为

$$VI_{Anomaly} = VI_{i,j} - \frac{\sum_{n=2001}^{2020} VI_{i,n}}{20} \tag{4}$$

式中, $VI_{i,j}$ 代表第 j 年 ($j = 2001, 2002, \dots, 2020$) i 时刻 ($i = 1, 2, \dots, 46$) 的 VI 值, $VI_{i,n}$ 代表 2001—2020 年间第 n 年的 i 时刻的 VI 值。同时,计算了移动窗口为 8 的移动平均值以表征各植被指数距平值的动态变化。台

风干扰后植被指数恢复至与台风登陆前相同,即认为植被已恢复。

2 结果分析

2.1 2001—2019 年台风登陆情况分析

2001—2019 年间,登陆浙江省、福建省、广东省、海南省及台湾省的台风共计 70 个,其中 TY、STY 和 SuperTY 的数量分别为 35 个、26 个和 9 个。在 5 个省份中,台风登陆最多的是台湾省(26 个),其次为广东省(20 个),登陆海南省、福建省和浙江省的台风较少,分别为 9、8 和 7 个(图 1)。

从时间分布上来看,2001—2010 年间登陆的台风共 39 个,主要登陆于我国台湾省与福建省沿海,尤其是 2006—2010 年间有 9 个台风在台湾省登陆。在福建省二次登陆的台风数量最多。同时,浙江省东南部有 4 个 STY 和 1 个 SuperTY 登陆。2011—2019 年间,登陆的台风总数下降为 31 个,其中浙江省仅有 3 个台风登陆,数量明显减少;在此期间,在广东省雷州半岛和珠江三角洲西部地区登陆的台风数量明显增加;2016—2019 年间,在台湾省和福建省各只有 3 个台风登陆。

2.2 台风对植被 EVI 和 LAI 的影响

台风登陆时通常会导致落叶、树枝折断,甚至树木连根拔起,以及作物倒伏,进而导致植被冠层的变化。在整个研究区范围内, TY、STY 与 SuperTY 登陆后,EVI 净变化率分别为 4.88%、-7.48%和-1.85%,LAI 净变化率分别为 22.28%、-65.70%和-17.60%,表明风速最低的 TY 登陆后植被 EVI 和 LAI 略有增加,而 STY 与 SuperTY 的登陆后植被 EVI 和 LAI 均减少,但 SuperTY 造成的植被 EVI 和 LAI 的下降幅度小于 STY。与 STY 和 SuperTY 相比,TY 引起植被 EVI 变化的散点分布较为分散,密度曲线也更为平缓,表明不同 TY 造成的 EVI 变化差异较大(图 2)。与 TY 和 SuperTY 相比,STY 引起植被 EVI 净变化率的密度曲线峰值整体偏左,说明其对植被造成的损失要略高于 TY 和 SuperTY。在 LAI 变化散点图中,LAI 在台风年的变化率大于 0 的散点明显多于小于 0 的散点,各个台风密度曲线的峰值均大于 0,表明大多数台风的登陆并未导致植被 LAI 的显著下降,甚至会导致 LAI 增加。

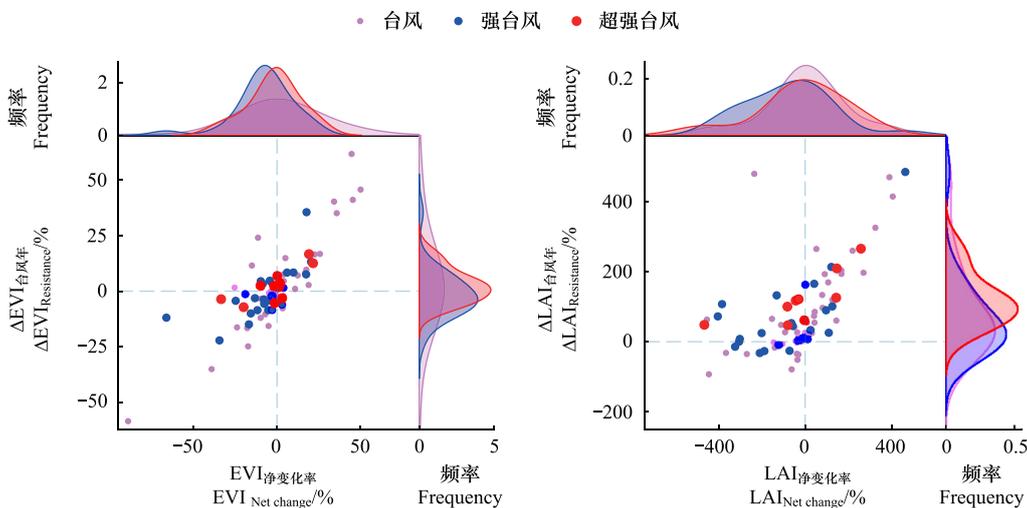


图 2 2001—2019 年台风导致植被 EVI 与 LAI 的变化

Fig.2 Changes in vegetation EVI and LAI induced by typhoons during 2001—2019

EVI: 增强型植被指数 Enhanced vegetation index; LAI: 叶面积指数 Leaf area index

不同省份在台风干扰前后的植被指数净变化率呈现出一定的差异(图 3)。台风对浙江省植被的损害最为严重,STY 与 SuperTY 均造成了浙江省植被指数的显著下降,尤其是 STY 引起 EVI 和 LAI 分别净下降 20.27%和 171.90%。在福建省登陆的台风主要以 TY 等级为主,TY 造成的两种植被指数的净变化率散点左

右分布较为对称。总体上看,STY 登陆后福建省植被的 EVI 与 LAI 的净变化率分别增加 6.52%与 69.56%,TY 使得当地植被 EVI 净变化率上升了 2.45%,而 LAI 下降了 20.15%。TY、STY 与 SuperTY 登陆后,广东省植被 EVI 分别净下降了 17.53%、6.72%、5.71%;TY 与 STY 登陆后广东省植被 LAI 分别下降了 24.25%和 95.58%,而 SuperTY 登陆后 LAI 净增加了 49.92%。台湾省和海南省的植被对台风的抵抗力较高,海南省 LAI 在台风年的变化率均大于 0,表明台风过后海南省的 LAI 并没有下降,TY 登陆后海南省 EVI 净增加 40.80%,LAI 净增加 200.58%;STY 登陆后海南省植被 EVI 和 LAI 分别增加 2.95%和 96.60%;而风速最大的 SuperTY 登陆后海南省的 EVI 净增加 0.55%,而 LAI 净下降 273.75%。台湾省各等级台风数量多,不同台风之间植被指数抵抗力的差异较大。STY 登陆台湾省后,两种植被指数的净变化率的大部分散点分布于 SuperTY 和 TY 的左侧,集中分布于净变化率小 0 的区域,说明 STY 等级的台风登陆后植被指数下降较多(EVI 净减少 5.77%,LAI 净减少 70.41%),而 TY 登陆后植被 EVI 和 LAI 分别增加 27.49%和 82.12%,SuperTY 登陆后台湾省植被 EVI 和 LAI 分别增加 5.52%和 92.34%。

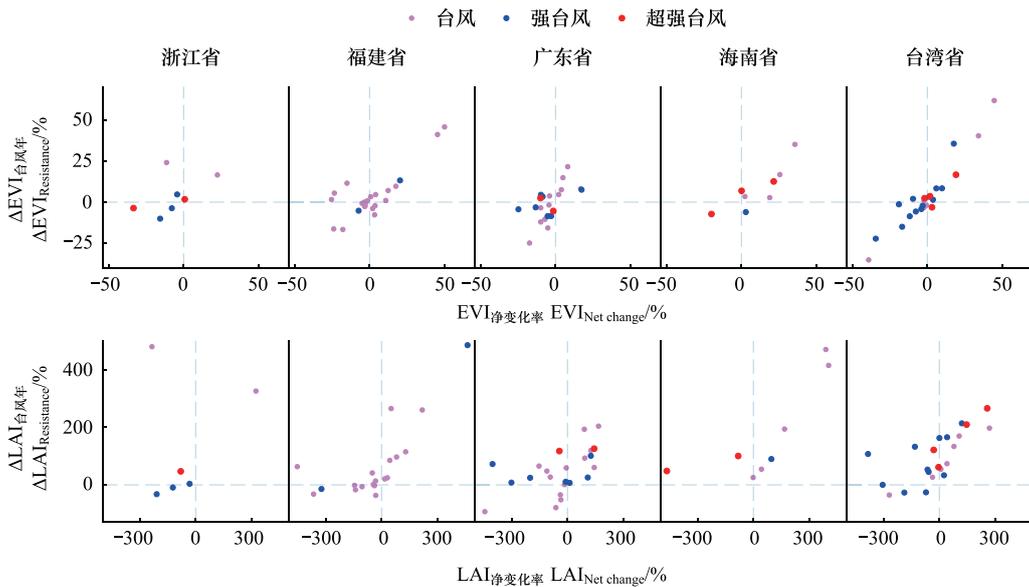


图 3 不同省份台风登陆后植被 EVI 与 LAI 的变化

Fig.3 Changes in vegetation EVI and LAI after typhoon made landfall in different provinces

2.3 台风登陆后植被 EVI 和 LAI 的时间动态

从图 4—7 中可以看出,大多数台风登陆后,植被指数呈现略微下降趋势,但很快恢复至台风干扰前的水平。除了极少数对植被影响较大的台风外(如 Rananim、Rammasun2 和 Nida),台风登陆后研究区内植被大多在 3 个月内恢复。部分台风登陆前后研究区域内的植被指数无明显变化,如 Dujuan1(图 4,区域 5),甚至部分研究区的植被指数呈现出上升趋势,如 Sarika(图 6,海南省)、Matmo1(图 7,台湾省)等。台风对浙江省的植被影响最大,台风过后植被需要较长的恢复时间(图 4—5),如 2004 年的 Rananim (STY) 登陆于区域 1 后,研究区内的 EVI 与 LAI 出现明显下降,EVI 在近 1 年后恢复,LAI 在约 11 个月后恢复。2005 年 Matsa (TY) 与 Khanun (TY) 又相继在该区域登陆,使得植被约 3 个月后恢复(图 4)。2006 年 Saomai (SuperTY) 登陆后,区域 7 的植被 EVI 和 LAI 同样在台风登陆后 3 个月左右恢复(图 4)。台风对广东省植被的损害也较大,如 2006 年 Chanchu (TY) 登陆于广东与福建省的交界地区(区域 9),植被 EVI 和 LAI 均在 3 个月后恢复(图 4)。2014 年 Rammasun2 (SuperTY) 登陆于区域 18 后,植被 EVI 在约 6 个月后恢复,而 LAI 并未出现明显下降趋势(图 5)。2016 年 Nida (TY) 和 Haima (STY) 相继登陆于区域 22,使得 EVI 与 LAI 均在约 5 个月后恢复(图 5)。其他台风对广东省植被的影响均较小,且植被恢复时间较短,如 2001 年 Durian 和 Yutu 两个 TY 相继

登陆于区域 6, 植被 EVI 与 LAI 的恢复时间约为 1 个月。相比之下, 福建省植被在台风干扰后的恢复时间较短。对福建省植被影响最大的台风是 2010 年登陆于区域 8 的 Meranti (TY), 其 EVI 与 LAI 均在约 3 个月后恢复(图 4)。Maria (TY) 登陆于区域 20 后植被 EVI 和 LAI 均在约 1 个月后恢复(图 5)。

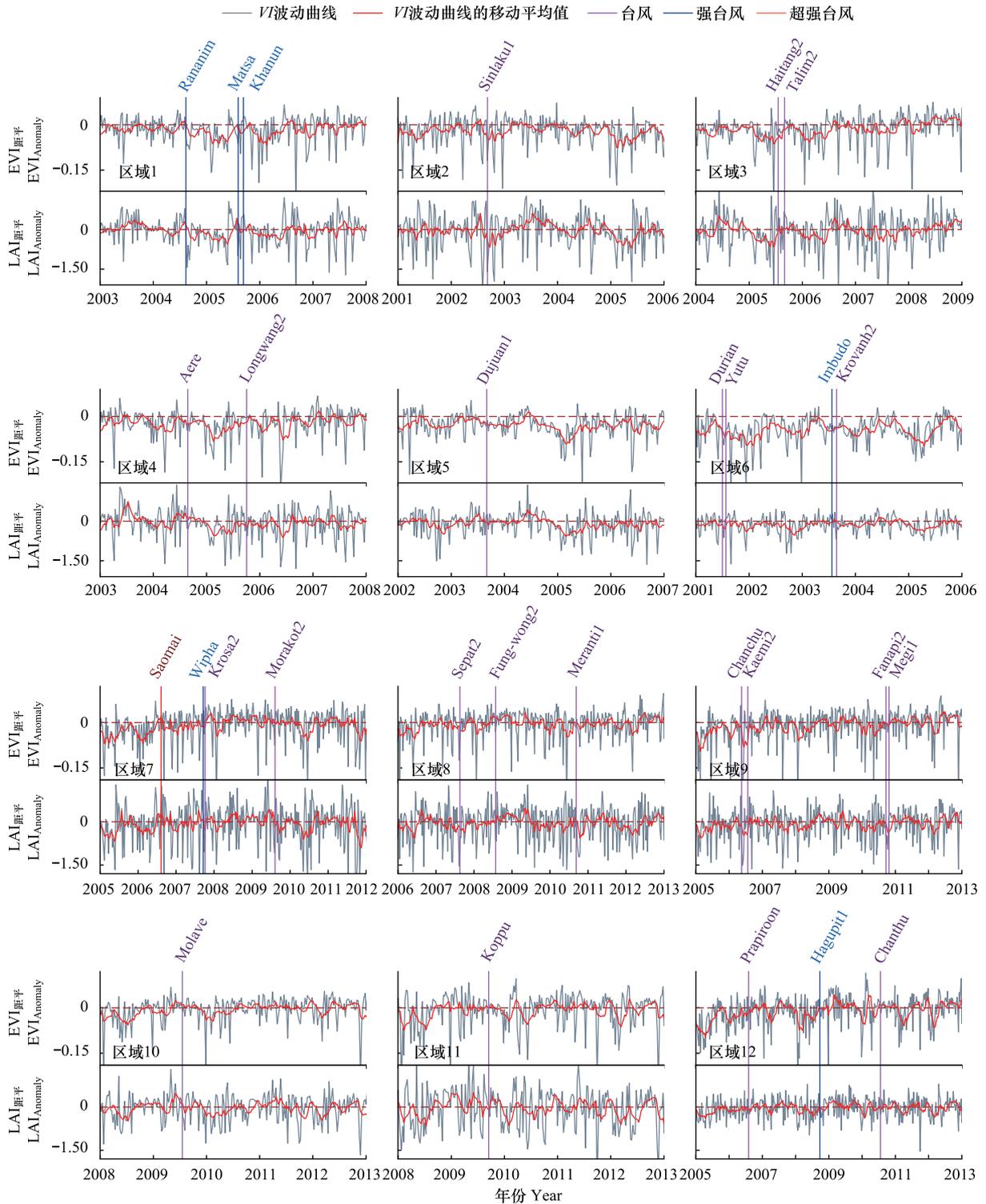


图 4 区域 1—12 植被 EVI 和 LAI 的动态变化

Fig.4 Temporal trends of vegetation EVI and LAI in the regions 1—12

VI: 植被指数 Vegetation index

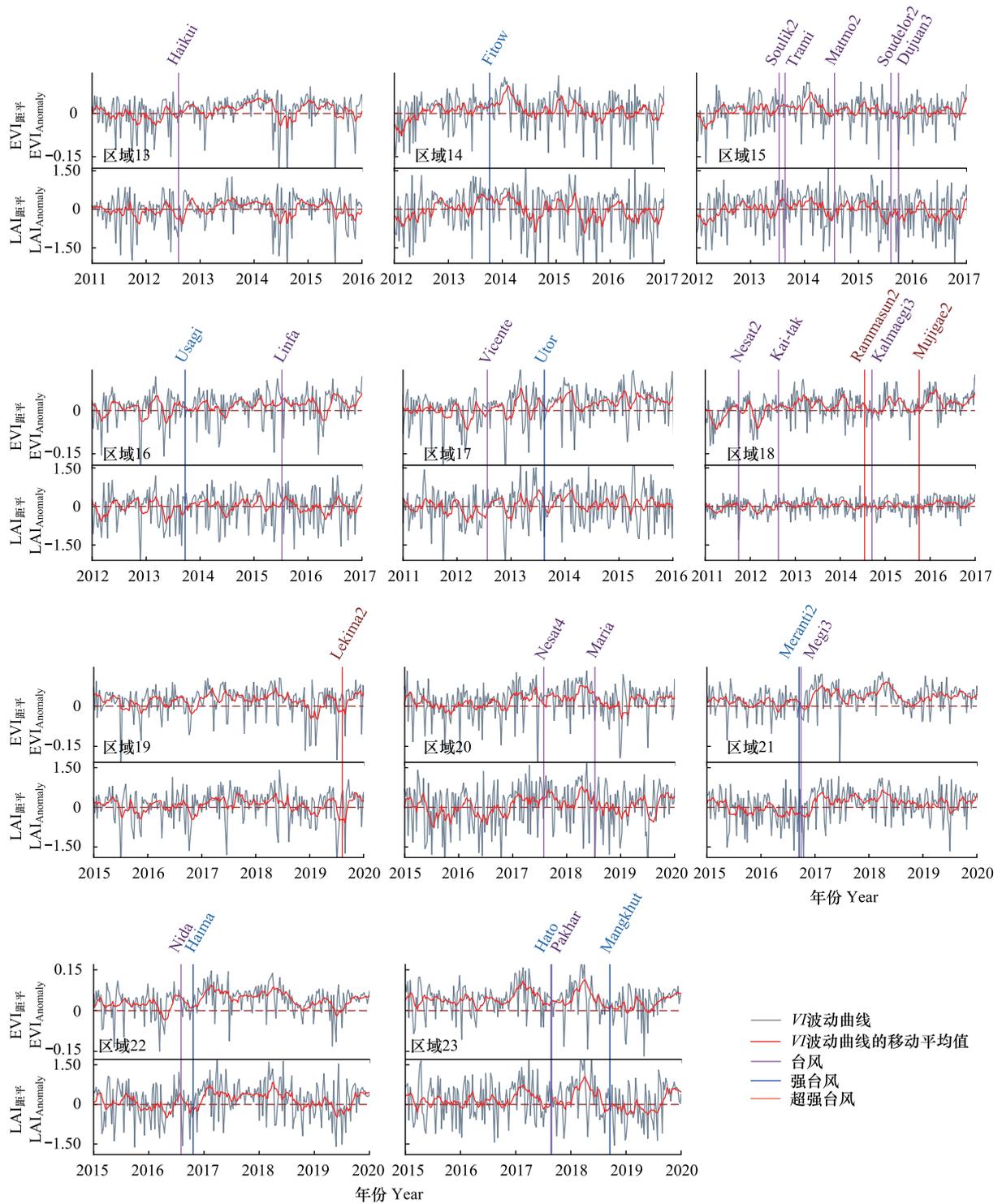


图 5 区域 13—23 植被 EVI 和 LAI 的动态变化

Fig.5 Temporal trends of vegetation EVI and LAI in the regions 13—23

海南省植被对大多数台风干扰具有较高抗性,通常在台风干扰后可以得到快速恢复(图 6)。其中 2005 年登陆的台风 Damrey (SuperTY)造成的植被恢复时间最长,植被 EVI 约在 7 个月恢复,LAI 在约 5 个月恢复。此外,2011 年的 Nesat1 (TY)对海南省的植被的损伤也较大,Nesat 登陆后植被 EVI 与 LAI 显著下降,约 2 个月恢复。其余台风登陆后海南省植被均在 2 个月以内得到恢复,如 2010 年 Conson (TY)后植被约 1 个

月后恢复,而且未造成 LAI 的下降。部分等级较高的台风的登陆也并未造成海南省 EVI 与 LAI 的明显下降,如 2015 年的 Mujigae2 (SuperTY) 登陆后海南省的植被 LAI 并未出现明显下降趋势,EVI 还呈现出上升趋势。

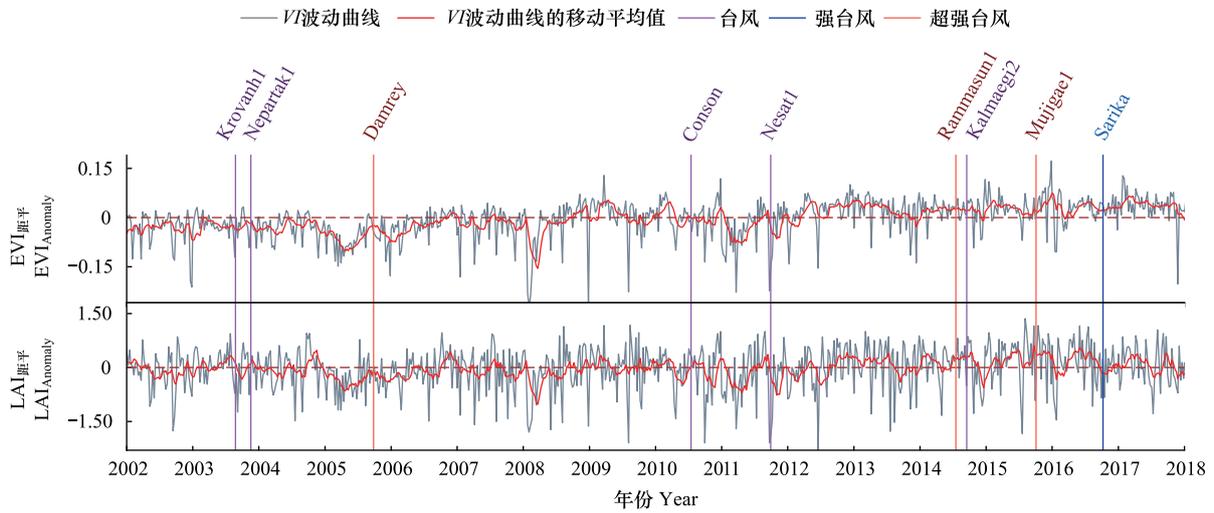


图 6 海南省植被 EVI 和 LAI 的动态变化

Fig.6 Temporal trends of vegetation EVI and LAI in Hainan

与海南省相似,台湾省植被在经历台风干扰后恢复速度较快,只有少数台风对植被的影响较大(图 7)。2001 年 Nari (TY) 和 Lekima1 (TY) 先后登陆后,植被 EVI 和 LAI 均在约 2 个月后恢复;2015 年 Soudelor1 (STY) 与 Dujuan2 (STY) 登陆后台湾省植被 EVI 和 LAI 在约 5 个月后恢复;2016 年 Nepartak2 (SuperTY) 对台湾省植被的影响最大,Nepartak2 登陆后植被 EVI 和 LAI 在约 6 个月后恢复。其他台风对台湾省植被的影响均较小,如 2008 年该地先后经历了 Fong - Wong1 (TY)、Kalmaegi1 (STY)、Sinlaku2 (STY) 和 Jangmi (SuperTY) 共四个台风登陆,其 EVI 与 LAI 的植被波动曲线并没有出现明显的下降趋势。2014 年 Matmo1 (STY) 的登陆后,两种植被指数均呈现上升趋势。

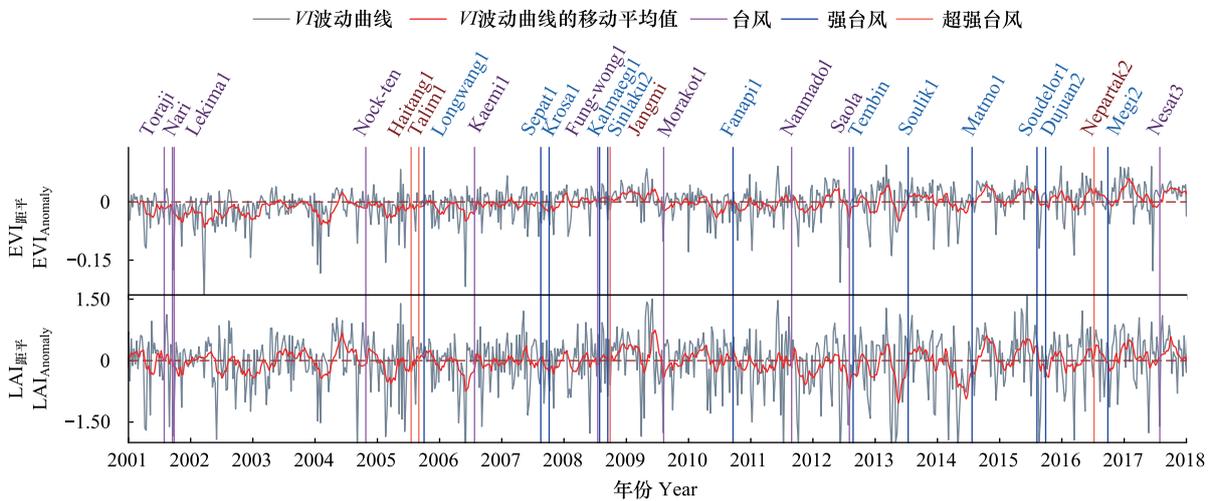


图 7 台湾省植被 EVI 和 LAI 的动态变化

Fig.7 Temporal trends of vegetation EVI and LAI in Taiwan

3 讨论

台风导致植被的变化受多种因素的共同影响。首先,台风等级是评估台风对植被影响的重要因素之一。

登陆风速最低的 TY 对 EVI 与 LAI 造成的净变化率最小,表明 TY 的风力不足以对植被冠层造成较大影响,且 TY 登陆时形成的降水还可以促进植物的生长^[31]。然而,登陆风速最大的 SuperTY 造成的植被指数净减少率并没有 STY 高,说明登陆风速并不是决定台风对植被影响的唯一因素。其次,台风对植被的影响大小与登陆地的植被类型有关。张旭^[11]的研究结果显示当 Lekima2 (SuperTY) 登陆于浙江南部时,常绿针叶林和混交林植被的破坏程度比常绿阔叶林和竹林更为严重。本研究发现台风对浙江省的植被影响最为严重,一方面由于浙江省有大量的农田分布,与林地相比,更易受台风的影响(图 1),另一方面原因在于浙江省混交林面积比其他沿海省份更大^[11]。同时,浙江省也有较多的 STY 登陆,导致 STY 对我国植被净变化率的平均值的总体影响增大。此外,台风的影响力还与其降水强度(水汽含量)和对区域影响的持续时间有关。邓睿^[4]的研究表明,2007 年的台风 Morakot (TY) 在台湾省登陆后,其短期的强降雨造成了高雄县发生了泥石流,对比台风前后的 HJ-1 影像可以明显地看出台风后山间的部分植被变成了裸地。张庆红等^[6]的研究表明尽管 2006 年的强热带风暴 Bilis 登陆风速比超强台风 Saomai 小,但 Bilis 气旋携带的水汽含量是 Saomai 的两倍。由此可以推断,尽管 STY 风速没有 SuperTY 高,但部分 STY 的气旋可能携带有大量水汽,造成了持续的强降雨,并引发诸如洪涝、泥石流、滑坡等对植被损害更为严重的次生灾害,导致其影响大于 SuperTY,这在一定程度上也能解释为何台湾省的 STY 比 SuperTY 对植被的影响力更强。通常处于高海拔、迎风坡、陡坡地形的在遭遇飓风干扰时更易发生次生灾害,植被受损最为严重^[12,35]。除上述原因外,台风干扰频率同样会影响台风对植被的干扰程度。本研究发现在 2005 年,强台风 Matsa 和 Khanun 先后登陆于区域 1,台风 Haitang2 和 Talim2 先后登陆于区域 3,但后者对植被的影响程度均低于前者(图 4)。Peereman 等^[36]对台湾省的研究发现,若同一片森林在一年或两年内有多多个台风相继登陆,那么后登陆的台风造成的森林的 NDII 减小率普遍小于首个登陆的台风。

台风后,植被的再次生长,如树枝和树叶的重新生长以及林下植被的更新,导致植被冠层恢复至台风前水平^[29]。植被指数的时间动态表明大部分研究区植被 EVI 与 LAI 均可在约 3 个月后恢复,但有小部分台风登陆后植被需要约半年以上的时间恢复,如 Rananim (SuperTY),这说明台风的风速并不是决定植被恢复时间的唯一因素。例如,de Beurs 等^[37]使用 MODIS 干扰指数监测干旱和飓风对四个加勒比主岛的影响,发现当严重干旱发生时古巴的干扰指数有明显下降;Gang 等^[29]的研究结果显示,受飓风 Katrina 影响的地区比受飓风 Rita 影响的地区(都以常绿森林为主)需要更长的恢复周期,因为受 Katrina 飓风影响的地区后来遭遇了中度干旱,说明干旱可能会加剧飓风干扰后树木的死亡。除此之外,植被类型也是决定其恢复时间长短的重要因素,Gong 等^[38]的研究结果显示与树冠较短的森林相比,树冠较高的森林受到风灾影响更大,恢复期更长。最后,人类活动也会影响植被的恢复,南颖等^[28]发现在长白山森林遭遇风灾后,距离道路越近的森林植被的恢复速度越快,说明人工干预对植被恢复起着积极的作用。在本研究中浙江、广东、台湾、海南等省份均有较大面积的耕地(图 1),在台风登陆前,农业生产者会根据气象预报及时对已成熟的作物进行抢收,同时做好清沟排水等防涝工作,以减小台风对农业生产的损失,台风后农民针对性地扶持倒苗、重播补播也有助于农田植被的快速恢复^[39];福建省沿海防护林的建设可以有效抵御台风,减少耕地受风灾的影响^[40]。需要指出的是本研究中植被恢复是指植被冠层水平的恢复,而生态系统水平结构和功能的完全恢复依赖于植被的更新和演替,通常需要更长的时间。

植被指数抵抗力的计算方法与研究区的划分也在一定程度上影响了结果的准确性。本研究选取的台风前与台风后的遥感影像天数相差 16d,而植被在台风过后的数天内可以得到一定程度的恢复,部分 TY 的登陆对于登陆地周围的植被 EVI 与 LAI 的变化无明显影响,无法准确地划定台风的影响区域。邓睿^[4]把台湾南投县的一部分作为研究区,发现 Morakot 登陆后研究区内植被 EVI 平均值从 0.48 下降到 0.39;而本研究中由于研究时间范围较长,将整个我国台湾省作为研究区域,发现 Morakot 登陆使得台湾省的平均 EVI 上升了 44.61%。因此,若研究区域面积过大,可能会低估台风对植被的影响,因为降水的增加可能导致部分地区植被指数的上升^[31-32]。

4 结论

(1) 2001—2019 年间共有 70 个台风登陆于我国东南沿海地区,其中台湾省和广东省是台风登陆的高频地区。

(2) 在整个研究区范围内, TY、STY 与 SuperTY 造成的 EVI 净变化率分别为 4.88%、-7.48%、-1.85%, LAI 净变化率分别为 22.28%、-65.70%、-17.60%。TY 造成的植被损失最小,而 STY 造成的植被指数下降高于 SuperTY,说明台风对植被的影响程度不仅与登陆时风速有关,而且与植被类型等其它因素有关。台风对浙江省沿海地区植被影响程度最大,海南省和台湾省的植被对台风干扰具有较高的抵抗力。

(3) 在经历台风干扰后,我国东南沿海地区大部分的植被在台风登陆后 3 个月内可以恢复。浙江省与广东省植被需要较长的恢复时间,海南省与台湾省植被的恢复时间较短。植被的恢复时间不仅受到台风等级的影响,而且跟台风频次、植被类型和人类干预程度等因素有关。在未来极端气候事件频发的背景下,需加强多源高时空分辨率遥感监测和地面观测,结合适当的人为管理措施,以降低台风对我国东南沿海地区植被的影响。

参考文献 (References):

- [1] 冯利华. 中国热带气旋与厄尔尼诺事件. 海洋科学, 2001, 25(9): 36-38.
- [2] 吴吉东, 傅宇, 张洁, 李宁. 1949—2013 年中国气象灾害灾情变化趋势分析. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1520-1530.
- [3] 陶建平, 李旭光. 强风干扰对森林生态系统的复杂影响: 研究进展和未来展望. 自主创新与持续增长第十一届中国科协年会论文集(1). 重庆, 2009: 410-429.
- [4] 邓睿. 多源遥感数据和 GIS 支持下的台风影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [5] 王一鸣. 台风暴雨型泥石流灾害风险研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [6] 张庆红, 韦青, 陈联寿. 登陆中国大陆台风影响力研究. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(7): 941-946.
- [7] 牛海燕. 中国沿海台风灾害风险评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [8] Marroquín-Páramo J A, Suazo-Ortuño I, Urbina-Cardona N, Benítez-Malvido J. Cumulative effects of high intensity hurricanes on herpetofaunal assemblages along a tropical dry forest chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 2021, 479: 118505-.
- [9] Negrón-Juárez R, Baker D B, Chambers J Q, Hurtt G C, Goosem S. Multi-scale sensitivity of Landsat and MODIS to forest disturbance associated with tropical cyclones. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 140: 679-689.
- [10] Hu T G, Smith R. The impact of hurricane maria on the vegetation of Dominica and Puerto Rico using multispectral remote sensing. *Remote Sensing*, 2018, 10(6): 827.
- [11] 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.
- [12] Feng Y L, Negrón-Juárez R I, Chambers J Q. Remote sensing and statistical analysis of the effects of hurricane María on the forests of Puerto Rico. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 247: 111940.
- [13] Lagomasino D, Fatoyinbo T, Castañeda-Moya E, Cook B D, Montesano P M, Neigh C S R, Corp L A, Ott L E, Chavez S, Morton D C. Storm surge and ponding explain mangrove dieback in southwest Florida following Hurricane Irma. *Nature Communications*, 2021, 12: 4003.
- [14] 田庆久, 闵祥军. 植被指数研究进展. 地球科学进展, 1998, 13(4): 327-333.
- [15] 宋富强, 邢开雄, 刘阳, 刘志超, 康慕谊. 基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价. 生态学报, 2011, 31(2): 354-363.
- [16] 王正兴, 刘闯, HUETE Alfredo. 植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI. 生态学报, 2003, 23(5): 979-987.
- [17] 郭锐. 植被指数及其研究进展. 干旱气象, 2003, 21(4): 71-75.
- [18] Rogan J, Schneider L, Christman Z, Millones M, Lawrence D, Schmook B. Hurricane disturbance mapping using MODIS EVI data in the southeastern Yucatán, Mexico. *Remote Sensing Letters*, 2011, 2(3): 259-267.
- [19] 王希群, 马履一, 贾忠奎, 徐程扬. 叶面积指数的研究和应用进展. 生态学杂志, 2005, 24(5): 537-541.
- [20] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [21] 罗敏, 古丽·加帕尔, 郭浩, 郭辉, 张鹏飞, 孟凡浩, 刘铁. 2000—2013 年塔里木河流域生长季 NDVI 时空变化特征及其影响因素分析. 自然资源学报, 2017, 32(1): 50-63.
- [22] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2084-2097.
- [23] 徐玲玲, 延昊, 钱拴. 基于 MODIS-NDVI 的 2000—2018 年中国北方土地沙化敏感性时空变化. 自然资源学报, 2020, 35(4): 925-936.

- [24] 张心茹, 曹茜, 季舒平, 陈浩, 张廷靖, 刘建. 气候变化和人类活动对黄河三角洲植被动态变化的影响. 环境科学学报, 2022, 42(1): 56-69.
- [25] 叶席, 匡鸿海. 基于多时相 Landsat 数据的汶川地震后王家岩滑坡植被恢复估计. 西南大学学报: 自然科学版, 2022, 44(6): 150-159.
- [26] 王冰, 张金钰, 孟勖, 张秋良. 基于 EVI 的大兴安岭火烧迹地植被恢复特征研究. 林业科学研究, 2021, 34(2): 32-41.
- [27] 王颖婷. 基于多时相遥感影像的火烧迹地提取及植被恢复评价[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [28] 南颖, 刘志锋, 朱卫红, 武耀祥, 薛俊刚. 长白山的台风灾区范围及植被恢复动态——基于遥感技术的研究. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 131-139.
- [29] Gang C C, Pan S F, Tian H Q, Wang Z N, Xu R T, Bian Z H, Pan N Q, Yao Y Z, Shi H. Satellite observations of forest resilience to hurricanes along the northern Gulf of Mexico. Forest Ecology and Management, 2020, 472: 118243.
- [30] Wang W T, Qu J J, Hao X J, Liu Y Q, Stanturf J A. Post-hurricane forest damage assessment using satellite remote sensing. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(1): 122-132.
- [31] Wang F G, D'Sa E J. Potential of MODIS EVI in identifying hurricane disturbance to coastal vegetation in the northern gulf of Mexico. Remote Sensing, 2009, 2(1): 1-18.
- [32] 刘少军, 张京红, 蔡大鑫, 田光辉. 台风对植被变化的影响研究. 第 27 届中国气象学会年会现代农业气象防灾减灾与粮食安全分会场论文集. 北京, 2010: 707-711.
- [33] 李英, 陈联寿, 张胜军. 登陆我国热带气旋的统计特征. 热带气象学报, 2004(01): 14-23.
- [34] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 热带气旋等级: GB/T 19201—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [35] 欧阳屏. 中尺度地形影响下台风 Hato(2017)强降雨带的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [36] Peereman J, Aaron Hogan J, Lin T C. Intraseasonal interactive effects of successive typhoons characterize canopy damage of forests in Taiwan: a remote sensing-based assessment. Forest Ecology and Management, 2022, 521: 120430.
- [37] de Beurs K M, McThompson N S, Owsley B C, Henebry G M. Hurricane damage detection on four major Caribbean Islands. Remote Sensing of Environment, 2019, 229: 1-13.
- [38] Gong Y, Staudhammer C L, Kenney G, Wiesner S, Zhang Y L, Starr G. Vegetation structure drives forest phenological recovery after hurricane. Science of the Total Environment, 2021, 774: 145651.
- [39] 唐达, 吕胜根, 陈倩婷. 台风“山竹”致江门 25 万亩农田受灾, 大片香蕉甘蔗死亡. 世界热带农业信息, 2018(9): 27-28.
- [40] 任程龙. 新中国灾害应急治理工作的地方探索——以福建风灾治理为例(1949—1966)[D]. 福州: 福建师范大学, 2021.