

DOI: 10.5846/stxb202103130679

李卉, 朱彤彤, 刘侦海, 李霞, 王绍强, 王小博, 刘媛媛. 东南亚沿海与内陆植被对洪水事件响应的稳定性差异. 生态学报, 2022, 42(16): 6745-6757.
Li H, Zhu T T, Liu Z H, Li X, Wang S Q, Wang X B, Liu Y Y. Stability differences of coastal and inland vegetation to flood events in Southeast Asia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6745-6757.

东南亚沿海与内陆植被对洪水事件响应的稳定性差异

李卉¹, 朱彤彤¹, 刘侦海¹, 李霞³, 王绍强^{1,2,*}, 王小博², 刘媛媛²

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院区域生态过程与环境演变实验室, 武汉 430070

2 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

3 生态环境部对外合作与交流中心, 北京 100035

摘要:为探讨东南亚沿海与内陆地区植被对洪水事件的响应差异, 基于东南亚 2000—2018 年 MODIS 卫星遥感数据和洪水数据, 通过比较东南亚洪水发生区域, 共确定自 2000 年来影响最大、破坏程度相近的 2 个沿海洪水事件、2 个内陆洪水事件以及 1 个沿海内陆洪水事件。以 Google Earth Engine 为数据处理平台, 利用 Sen+Mann-Kendall 趋势法分析了 2000—2018 年研究区 NDVI 变化, 发现 5 个研究区 19 年间 NDVI 均呈现出上升趋势, 平均增速为 0.013/10a, 沿海与内陆植被在时空演变格局上无明显差异; 基于灾害植被破坏指数的分析发现, 内陆与沿海植被在洪水影响下的植被破坏指数分别为 0.29 与 -0.25, 植被破坏面积分别占比为 14.29% 与 18.11%, 内陆植被破坏程度小于沿海地区。同时, 排除人类干扰强烈的耕地与人工地表, 沿海研究区植被生态系统对洪水事件的抵抗力指数为 88.15, 明显强于内陆地区的 28.89。草地表现出最强的抵抗力, 其次为林地; 而在植被恢复力方面, 表现出相反的趋势。人类活动影响降低了内陆地区洪水灾害对植被的破坏。研究东南亚沿海与内陆植被对单次洪水事件的差异响应, 排除内陆与沿海地区洪水事件累计影响, 能够为东南亚沿海与内陆植被抵抗洪水灾害提出有针对性的建议。

关键词:灾害植被破坏指数; 洪水灾害; Sen+Mann-Kendall 趋势分析法; 植被稳定性

Stability differences of coastal and inland vegetation to flood events in Southeast Asia

LI Hui¹, ZHU Tongtong¹, LIU Zhenhai¹, LI Xia³, WANG Shaoqiang^{1,2,*}, WANG Xiaobo², LIU Yuanyuan²

1 Laboratory of Regional Ecological Processes and Environmental Evolution, School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430070, China

2 Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China

3 Center for Foreign Cooperation and Exchange, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100035, China

Abstract: In order to explore the vegetation response difference to flooding events in the coastal and inland areas, this study used the MODIS satellite remote sensing data from 2000 to 2018 in Southeast Asia and the flood data. Two coastal flood events, two inland flood events and one coastal inland flood event with the largest impact since 2000 were identified by comparing the flood occurrence regions in the Southeast Asia. Using Google Earth Engine as the data processing platform, Sen+Mann-Kendall trend method was used to analyze the variation of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in the study area from 2000 to 2018. It was found that the NDVI in the five study areas showed an upward trend during the 19 years, with an average growth rate of 0.013/10 a. There was no significant difference in the spatial and temporal evolution pattern between coastal and inland vegetation. Based on the analysis of disaster vegetation damage index, it was

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFA0600202); 中国地质大学(武汉)科研启动基金资助项目(162301192642)

收稿日期:2021-03-13; **采用日期:**2021-12-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: sqwang@igsnrr.ac.cn

found that the vegetation damage index of inland and coastal areas under the influence of flood was 0.29 and -0.25, respectively, while the vegetation damage area accounted for 14.29% and 18.11%, respectively. The vegetation damage degree of inland vegetation was less than that of coastal areas. At the same time, excluding the cultivated land and man-made surface with strong human disturbance, the resistance index of vegetation ecosystem to flood events in coastal study area was 88.15, which is significantly stronger than 28.89 in inland area. Grassland showed the strongest resistance, followed by woodland. However, there was an opposite trend in vegetation resilience. In the study, the impact of human activities has reduced the damage of flood disasters to vegetation in inland areas. Researching the differential responses of the coastal and inland vegetation in Southeast Asia to a single flood event and excluding the cumulative effects of flood events in the inland and coastal areas can provide the targeted suggestions for the coastal and inland vegetation in Southeast Asia to resist flood disasters.

Key Words: disaster vegetation destruction index; flood disaster; Sen+Mann-Kendall trend method; vegetation stability

洪水是全球最主要的自然灾害之一,其覆盖范围广、时空分布不均、形成原因多样,严重影响着人类的生产生活^[1]。近年来人类的高强度生产活动使得地表植被覆盖状况发生了较大变化,导致洪涝灾害发生频率进一步增加^[2]。降雨与植被是影响洪水形成的主要因素,其中森林植被能有效削减洪水流量^[3]。但洪水也对植被产生一定影响,使植被大量破坏,生长受阻^[4]。

NDVI 及其变异指数广泛应用于评价洪涝灾害对植被的破坏或对农业生产的影响程度^[5-7],但仅使用 NDVI 变化衡量洪水对植被破坏的程度,可能受不同地区原有植被及云层覆盖^[8]影响较大。灾害植被破坏指数(Disaster vegetation destruction index, DVDI)的提出有效计算了自然灾害发生前后植被状况的差异,尤其是在洪水灾害影响下的植被破坏程度^[7]。生态系统稳定性指标(Ecosystem stability metrics, ESMs)是具体衡量某一地区生态系统稳定性时广泛采用且有效的指标体系,其中抵抗力和恢复力稳定性可以通过量化植被指数时间序列得到^[9]。已有研究证明,生物多样性可以增加生态系统对极端气候事件的抵抗力,而对于恢复力没有显著影响^[10];但也有研究指出物种贫乏系统比物种丰富的系统对扰动的抵抗力更强,同时也在扰动后也显示出了更强的恢复力^[11]。

东南亚国家地处热带,受太平洋以及印度洋热带气旋影响,洪水发生频率明显高于世界其他地区^[12-13]。同时东南亚作为全球生物多样性较高的地区之一,其在气候变化影响下的植被变化状况对于全球生态系统影响明显^[14-15]。由于沿海洪水灾害风险高于内陆地区^[16],且沿海与内陆地区的生态系统组成差异大^[17],植被对洪水灾害的响应可能存在差异^[18]。对比内陆地区与沿海地区的植被生态系统时,吴春生等发现从沿海到内陆生态稳定性逐渐增强,但人为生产活动会对其产生干扰^[19]。即使是在同一区域,不同土地类型上的植被生态系统存在着明显的稳定性差异^[20]。当前有关沿海与内陆植被对洪水事件的响应研究多集中于累计洪水事件的分析,结果有可能会受到洪水事件发生频率的差异影响^[18]。通过对比分析沿海与内陆不同生态系统对洪水事件的响应,有助于理解沿海与内陆生态系统稳定性存在差异的原因,提出应对洪水灾害的合理建议。

因此,本研究基于 GEE 平台,以东南亚地区单次洪水事件为数据基础,探究(1)东南亚沿海与内陆地区洪水发生区 2000—2018 年 NDVI 时空变化格局;(2)以灾害植被破坏指数为表现手段,有效评价洪水灾害对沿海与内陆研究区植被的破坏程度;(3)在沿海与内陆研究区不同生态系统组成的基础上对比探讨,并分析差异的原因。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

本研究洪水相关数据均来源于达特茅斯洪水观测站大型洪水事件数据集(DFO, <http://floodobservatory.colorado.edu/Archives/index.html>),该数据集涵盖了从 1985 年 1 月 1 日至今全球范围内的陆地洪水事件,具

有较好的时效性^[21]。数据集包括每次洪涝灾害事件的发生地点、时间、受影响的人群和地区、严重程度、规模和发生原因^[22—23]。

在利用 MODIS 遥感数据计算地表植被的 NDVI 时,由于洪水事件持续时间短、影响范围大小不一,利用 2000—2018 年 MODIS 地表反射率数据集 MOD09GQ (空间分辨率 250 m,时间分辨率 1 d)对地表植被生长状况进行评价^[24]。考虑到沿海与内陆地区植被生态系统的差异,所采用的土地覆盖类型来自于自然资源部发布的 30 米全球地表覆盖数据(GlobeLand30, <http://www.globallandcover.com/home.html>)。

1.2 研究方法

1.2.1 沿海与内陆地区洪水事件的选取

以达特茅斯洪水观测站大型洪水事件数据集为基础,筛选东南亚地区自 2000 年 1 月 1 日以来,影响面积大于 50000 km²且严重程度为 2 级的洪水事件,最终筛选出 37 个洪水事件。其中,严重程度是根据洪水灾害破坏的程度与灾害重复程度所确定的,在数据集中共分为 3 类,其中第 2 类代表着极端洪水事件且灾害重复间隔大于 100 年。根据中华人民共和国海洋行业标准《沿海行政区域分类与代码》(HY/T 094—2006),沿海地区指有海岸线的沿海省、自治区和直辖市及其所辖海域、海岛等^[25]。在此基础上,根据达特茅斯洪水观测站大型洪水事件数据集,将洪水发生范围是否沿海作为划分沿海与内陆洪水事件的主要依据^[26],选择沿海洪水事件 2 次,内陆洪水事件 2 次以及沿海与内陆地区均有覆盖的洪水事件 1 次(图 1),具体信息如表 1。

表 1 选取洪水事件具体信息
Table 1 The information of flood events

研究区 Study area	发生地区 Area	开始时间 Start time	结束时间 End time	持续时间/d Duration	影响面积/km ² Influential areas	发生原因 Reason
沿海与内陆洪水区 Coastal and inland flood zone	老挝、越南	2000-8-28	2000-9-1	4	208158.42	季风雨
沿海洪水区 1 Coastal flood zone1	越南	2017-11-4	2017-11-8	5	52429.68	热带气旋降水
沿海洪水区 2 Coastal flood zone2	印度尼西亚	2004-12-26	2004-12-29	3	55444.50	潮水涌浪
内陆洪水区 1 Inland flood zone1	缅甸	2002-8-17	2002-9-4	18	125461.42	季风雨
内陆洪水区 2 Inland flood zone2	泰国	2006-5-22	2006-6-11	20	78277.05	季风雨

1.2.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

Google 提供的 Google Earth Engine(GEE)是一个能够处理海量地理信息的分析处理云平台,集在线数据选取、数据在线处理、影像可视化等优点于一体^[27],广泛应用于全球植被指数分析^[28]、极端气候事件评估^[29]和作物产量估计^[30]等研究方向。

本研究基于 Google Earth Engine 地理计算云平台在线访问 MOD09GQ 表面反射率产品,计算 2000—2018 年研究区域的 NDVI,获得 19 年间相应地区的植被生长状况。Sen 趋势度分析法能够有效降低时间序列中噪声的干扰^[31],但无法判断序列趋势显著性判断,Mann-Kendall 方法很好的解决了这个问题^[32—34]。因此,Sen+Mann-Kendall 趋势分析法被广泛应用于气候变化、植被变化分析中^[35—36]。

本研究主要探讨东南亚沿海与内陆生态系统对洪水事件的响应差异,首先应当对二者的整体变化趋势有一个比较明确的认知。本研究选取的单次洪水灾害是在比较东南亚地区自 2000 年以来发生的所有洪水灾害中影响最大、破坏程度最严重的洪水事件,在此基础上探究研究区 2000—2018 年的植被生长状况是否会因为此次洪水事件发生比较明显的年际波动现象,是后续对比不同植被生态系统稳定性的前提。因此,利用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析法计算 19 年间研究地区的植被变化趋势。其中,Sen 趋势度的计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), j > i$$

(1)

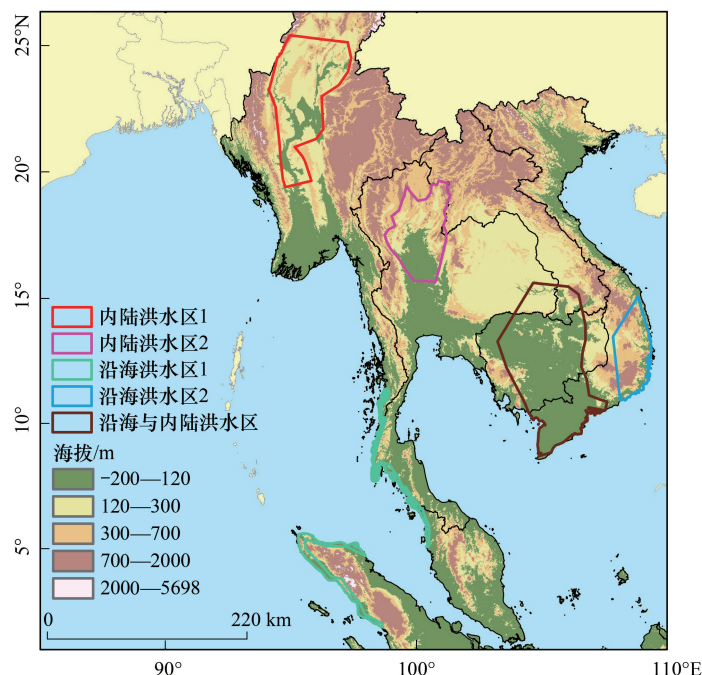


图1 研究区位置分布

Fig.1 Location of the study areas

式中, x_i 和 x_j 为研究区域特定时间 i 和 j 对应的植被指数数据, 同时 i 和 j 是连续的时间序列且 $j > i$, β 表示 NDVI 时间序列的趋势度。当 $\beta > 0$ 时, NDVI 呈上升趋势; 反之表现出下降趋势。

同时, 对 19 年间的 NDVI 时间序列进行 Mann-Kendall 趋势检验。对于整个 NDVI 时间序列 ($x_i, x_j, \dots, x_n$) 计算所有 $n(n-1)/2$ 个 $x_j - x_i$ 大小关系 ($j > i$) 记为 S 。由于统计量 S 近似服从标准正态分布 (公式 2) 且研究时间序列长度超过 10, 需要使用检验统计量 Z 进行趋势检验 (公式 3):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{VAR}(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^g t_p(t_p-1)(2t_p+5)]/18$, n 是序列中元素个数, g 是序列中按照相同元素分组后的组数; t_p 是第 p 组中元素的个数。在双边趋势检验中, 在给定显著性水平 α 下, 在正态分布表中查得临界值 $Z_{1-\alpha/2}$, 当 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ 时, 趋势不显著; 若当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 认为趋势显著。本研究显著水平定为 0.05, 临界值 $Z_{1-\alpha/2}$ 为 1.96。

1.2.3 灾害植被破坏指数计算

灾害植被破坏指数 (DVDI) 主要取决于灾害发生前后的植被条件指数中位数 (mVCI), 虽然均值和中位数都表示数据的中心趋势, 但均值对异常值更加敏感。因此, 为了避免其他噪声对 NDVI 的影响, 使用中位数 NDVI 而不是均值 NDVI 监测植被生长状况^[7,37]。

同样使用 Google Earth Engine 地理计算云平台, 利用 MOD09GQ 表面反射率产品质量筛选后生成时间序

列的空间分辨率为 250 m 的 MODIS 影像。由于洪水发生迅速消退快,一般洪水的持续时间不超过两个星期^[21,38-39],因此使用洪水出现前 14 天和消退后 14 天的影像计算 mVCI,定量描述洪水事件对植被的破坏状况。

$$DVDI = mVCI_a - mVCI_b \quad (4)$$

$$mVCI = \frac{(NDVI - NDVI_m)}{(NDVI_{max} - NDVI_m)} \quad (5)$$

式中,NDVI 为洪水持续时间段内的 NDVI 均值,NDVI_m为除发生年份外洪水开始前(结束后)14 天的 NDVI 中值,NDVI_{max}为除发生年份外洪水开始前(结束后)14 天的 NDVI 最大值,mVCI_a为洪水结束后的 mVCI,mVCI_b为洪水开始前的 mVCI,如式(4)。当 DVDI 为正值时,表明植被没有受到灾害影响,且数值越大生长越旺盛;DVDI 为负值时表明植被受到灾害破坏,且数值越小破坏越严重。

1.2.4 植被对洪水事件的抵抗力与恢复力

在对比沿海与内陆地区植被对洪水灾害的响应时,利用 NDVI 指数在极端气候事件发生前后的变化,来表示生态系统对于极端气候事件的抵抗力和恢复力^[10]。其中,生态系统的抵抗力反映其抵抗环境扰动以及在环境扰动后维持原始状态的能力,量化了环境扰动对生态系统的影响,如式(6);恢复力指生态系统受到扰动后恢复到原始状态的速率,如式(7):

$$\Omega = \frac{\overline{Y_n}}{|Y_e - \overline{Y_n}|} \quad (6)$$

$$\Delta = \left| \frac{Y_e - \overline{Y_n}}{Y_l - \overline{Y_n}} \right| \quad (7)$$

式中, Ω 和 Δ 分别代表生态系统抵抗力和恢复力; $\overline{Y_n}$ 是无环境扰动时的平均植被指数,即洪水事件开始前 14 天的 NDVI 值; Y_e 是扰动结束后的植被指数,即洪水事件结束后 14 天 NDVI 值; Y_l 是正常情况下的平均植被指数,即除洪水事件发生当年外,其他年份洪水持续时间段内的 NDVI 值。

更大的 Ω 和 Δ 代表更强的抵抗力和恢复力,较强的抵抗力指标代表洪水事件发生后区域内 NDVI 的降低趋势不显著;较强的恢复力指标代表植被的快速恢复。此外,如果洪水事件发生后植被恢复速度超过正常水平,也会导致恢复力降低^[40]。

2 结果与分析

2.1 研究区 NDVI 变化趋势分析

经过比较 2000—2018 年 5 个洪水覆盖区的年际 NDVI 值,发现 5 个研究区的植被 NDVI 均大体呈现波动上升的趋势。2 个沿海研究区植被 NDVI 整体强于内陆地区,沿海植被年际 NDVI 均值为 0.92,内陆植被为 0.88;但总体增强趋势内陆植被强于沿海植被,分别为 0.014/10a、0.011/10a(表 2)。其中以沿海洪水区 2 的 NDVI 最高,且在洪水发生的 2004 年表现出微弱的下降趋势;沿海洪水区 1 与内陆洪水区 2 的年际 NDVI 值接近,变化趋势也相似,分别在洪水发生的 2017 年以及 2006 年出现下降趋势,但内陆表现得极不明显;沿海与内陆洪水区和内陆洪水区 1 的波动趋势类似,且分别在洪水发生的 2000 年以及 2002 年表现出上升趋势。5 个研究区的 NDVI 最大值出现集中,除内陆洪水区 1 为 2016 年,其余均为 2015 年;但最小值出现并不一致,2 个沿海区分别出现在 2000 年、2005 年,2 个内陆区都出现在 2004 年(图 2)。

在全球变暖的大背景下,极端气候事件增强了植被生态系统的脆弱性^[41],但 Fensholt 等在对比全球 1981—2010 年的 NDVI 时间序列时发现全球 NDVI 变化趋势并不统一,在东南亚沿海地区表现出了上升趋势^[42],这与图 2 表现出的 5 个研究区 2000—2018 年 NDVI 变化趋势符合。有研究提出了东南亚植被呈现出由西北向东南生物量及生产力增加、沿海植被生长强于内陆植被的动态变化趋势^[17],也与本研究中的沿海植被 NDVI 强于内陆地区植被的观点一致。但也有研究证明由于人类建设用地的增加使得 NDVI 呈现出由沿海

向内陆递增的趋势,且显著增加区域多出现在人造地表上^[43]。东南亚内陆地区的农业用地覆盖率的快速增加以及森林大量砍伐所导致的人造地表增多^[44],可能是导致 2000—2018 年东南亚地区内陆植被 NDVI 增速强于沿海植被的主要原因。

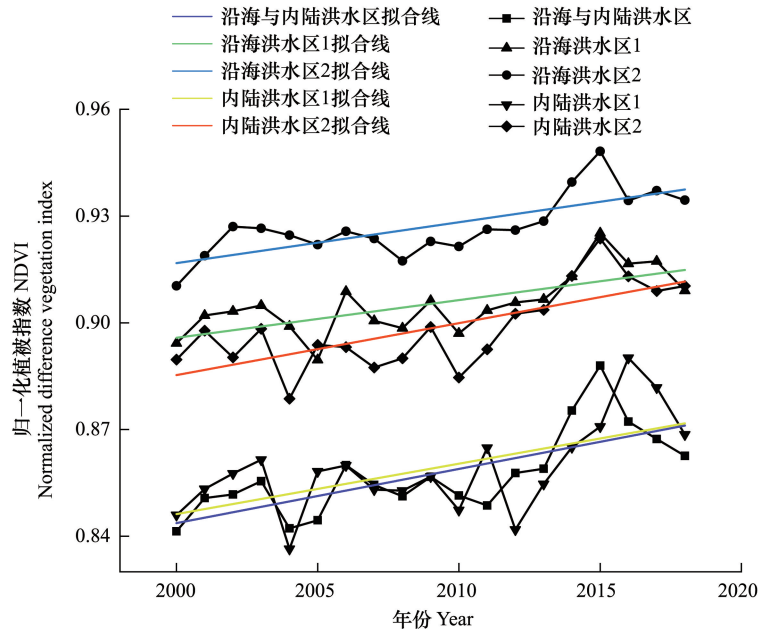


图 2 研究区 2000—2018 年年际 NDVI 值变化

Fig.2 Interannual variation of normalized difference vegetation index in the study areas from 2000 to 2018

表 2 研究区 2000—2018 年年际归一化植被指数 (NDVI) 拟合线相关参数

Table 2 Parameters of interannual normalized difference vegetation index (NDVI) fitting lines in the study areas from 2000 to 2018

指标 Index	沿海与 内陆洪水区	沿海 洪水区 1	沿海 洪水区 2	内陆 洪水区 1	内陆 洪水区 2
截距 Intercept	-2.20±0.70	-1.22±0.53	-1.38±0.50	-1.99±0.89	-2.04±0.69
斜率 Slope	0.0015±5.50	0.0010±3.21	0.0012±2.74	0.0014±8.02	0.0015±5.38
皮尔逊相关系数 Pearson correlation coefficient	0.73	0.70	0.75	0.61	0.72

基于 Sen+Mann-Kendall 趋势法的 2000—2018 年间 5 个研究区的年际 NDVI 时空格局变化分析发现,研究区 NDVI 总体变化显著,且趋势较为一致;植被 NDVI 以不显著上升趋势为主,其中内陆洪水区 2 的上升趋势最为显著;相反,下降主要呈现为显著下降趋势,其中沿海洪水区 2 最为明显(表 3)。但研究区 NDVI 空间分布变化趋势较为无序,没有明显的特征,超过 60%的区域表现出 NDVI 上升趋势(图 3)。某一区域的 NDVI 变化主要受到气温、降水等气象因素的影响,且降水对植被的影响高于温度对植被的影响;此外土地覆盖类型的变化也会显著影响 NDVI 的大小^[45—46],但某件特定的洪水事件并不能明显影响全年平均值某件特定的洪水事件并不能明显影响全年平均值。

2.2 研究区灾害植被破坏指数分析

在对 5 个研究区域的灾害植被破坏指数进行计算后,为了进一步确定沿海地区与内陆地区洪水损坏的程度与差异,使用等间隔分类法^[37]将植被 DVDI 分为以下 6 个级别:严重破坏、中等破坏、轻微破坏、轻微生长、中等生长与明显生长(表 4)。相较于沿海区域,内陆地区受到洪水影响所导致的植被破坏情况均小于沿海地区,分别占沿海与内陆研究区的 42.88%与 58.01%,尤其是内陆洪水区 1 植被破坏区域仅占该地区的 32.19%。同时,植被轻微生长区在内陆地区比沿海地区占比更大,内陆洪水区的占比 45.14%与沿海洪水区的占比

29.24%形成了较大的差异对比(图4)。通过分析5个研究区DVDI频率分布,也证明了沿海植被受到洪水事件的破坏程度更大,DVDI均值在沿海与内陆地区分别为-0.25与0.29(图5)。

表3 研究区2000—2018年NDVI的Sen+Mann-Kendall趋势分析结果面积占比/%

Table 3 Area proportion of Sen+Mann-Kendall trend analysis results of normalized difference vegetation index in the study area from 2000 to 2018

研究区 Study area	显著上升 Significantly increase	不显著上升 Slight increase	不显著下降 Slight decrease	显著下降 Significant decrease	无变化 No change
沿海与内陆洪水区	16.78	49.61	4.43	29.15	0.02
沿海洪水区1	11.79	55.42	2.76	29.97	0.06
沿海洪水区2	14.64	58.13	1.83	25.30	0.09
内陆洪水区1	11.35	58.64	2.26	27.71	0.03
内陆洪水区2	12.16	63.31	0.04	23.66	0.00

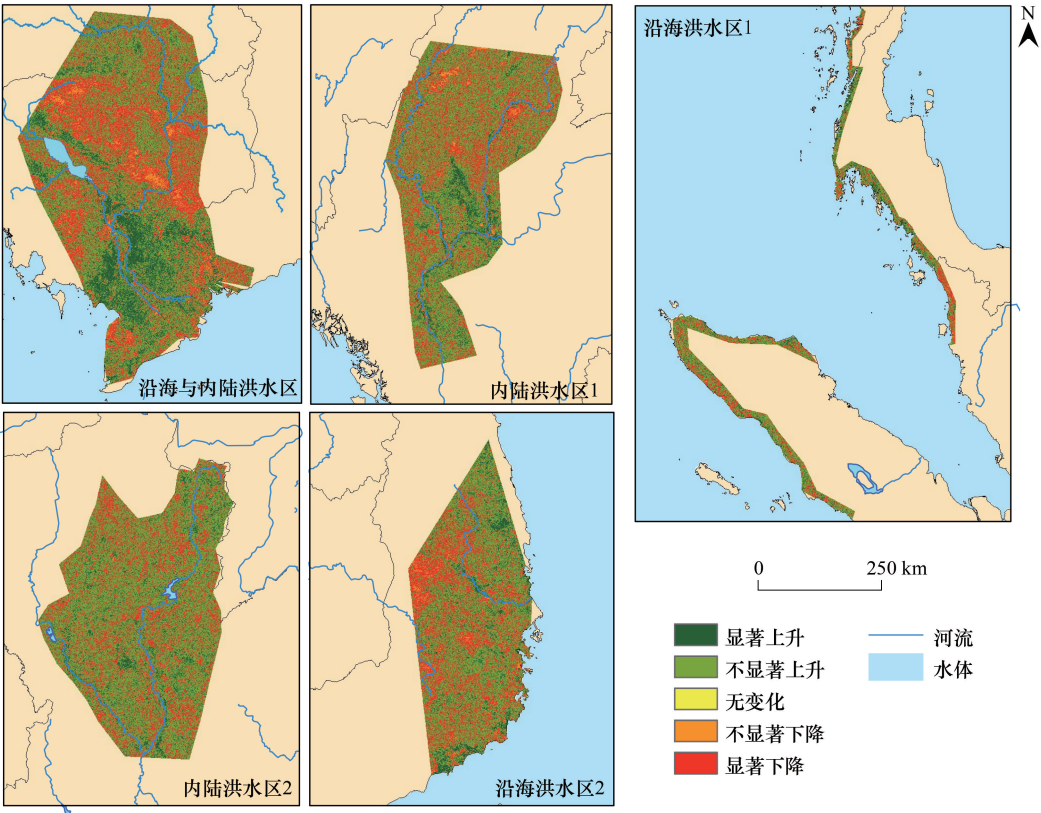


图3 研究区2000—2018年NDVI的Sen+Mann-Kendall趋势分析结果

Fig.3 Results of Sen+Mann-Kendall trend analysis for the normalized difference vegetation index series in the study areas from 2000 to 2018

表4 研究区灾害植被破坏指数(DVDI)分类

Table 4 Classification of disaster vegetation destruction index (DVDI) in the study areas

DVDI 范围 DVDI range	分类 Classification	DVDI 范围 DVDI range	分类 Classification
$DVDI \leq 5$	明显生长	$0 < DVDI \leq -2.5$	轻微破坏
$5 < DVDI \leq 2.5$	中等生长	$-2.5 < DVDI \leq -5$	中等破坏
$2.5 < DVDI \leq 0$	轻微生长	$DVDI < -5$	严重破坏

害植被破坏指数主要是利用灾害发生前和灾后的植被条件指数中位数(mVCI)对比灾害的破坏程度,因此快速、有效地用于监测受到台风、洪水等产生速度快、破坏程度强的灾害事件影响的植被生长状况^[37,39]。

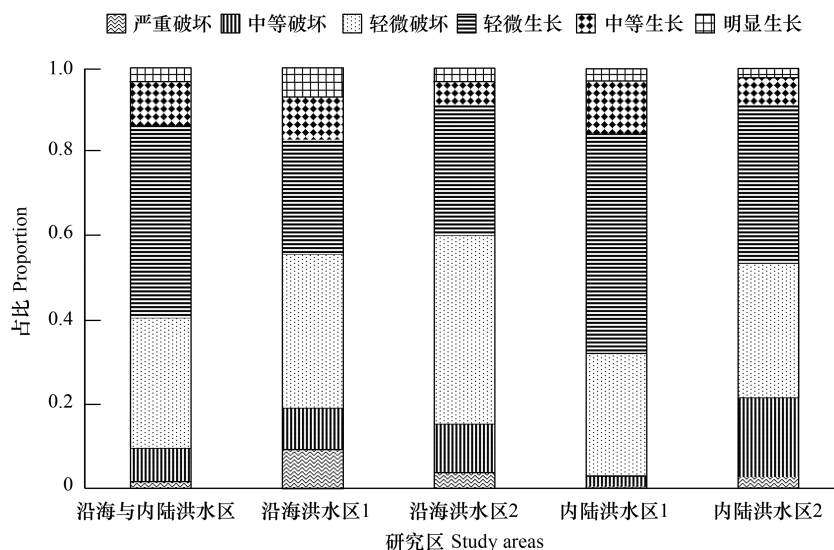


图4 研究区灾害植被破坏指数 DVDI 区域占比

Fig.4 The proportion of disaster vegetation destruction index in the study areas

沿海地区的植被受到洪水影响而导致的植被破坏程度明显强于内陆地区,尤其是沿海洪水区2,但其植被破坏程度均以轻微破坏为主。且内陆洪水区的植被在洪水灾害事件后反而以轻微生长为主。东南亚湄公河三角洲的植被对于极端气候事件的响应也表现出沿海强于内陆的特点^[38];但有研究发现,中国广西地区洪涝灾害危险程度表现出由沿海向内陆降低的趋势,植被从沿海向内陆的破坏程度逐渐增强^[47]。此外,可能由于不同土地覆盖类型的影响差异,某些地区的植被洪水灾害可能对植被的影响非常有限^[48],例如,有研究利用遥感数据对美国东南部的极端洪水灾害事件进行评价时,通过监测沿海与内陆地区的植被活动发现植被活动减弱地区主要出现在沿海地区以及内陆的农业区与湿地^[49]。

图6是研究区不同土地覆盖类型的占比情况,排除了裸地与水体的影响,沿海与内陆地区占比差异较为明显的表现在耕地、林地以及湿地方面。耕地作为人类活动影响较为频繁的地区,内陆地区的占比大于沿海地区,在人类的干预下洪水灾害对于内陆植被的破坏没有沿海地区明显。类似的研究有,对长期中国植被动态变化来说,人类活动增加了植被的覆盖程度^[50],证明了人类的活动可能干扰洪水灾害对于植被的破坏程度。具体表现为,人类活动区域植被在长期的极端气候事件影响下反而较其他区域生长更加旺盛^[43],人类在灾害结束后的即刻干预是导致这一现象出现的主要原因。

同样的,沿海地区林地与湿地的占比相对内陆地区更大,破坏程度也较内陆更强,这一观点与成方妍等人对沿海湿地的观点一致,但林地却相反^[51-52],在人类频繁活动的影响下,东南亚地区滨海湿地已大量转化为经济效益更高的渔场,湿地植被大量被人为破坏^[53],遭受洪水破坏程度越加显著;沿海地区林地相较于内陆破坏程度更强,这可能是由于东南亚沿海研究区林地红树林占比明显高于内陆,淡水洪水使得红树林的破坏程度

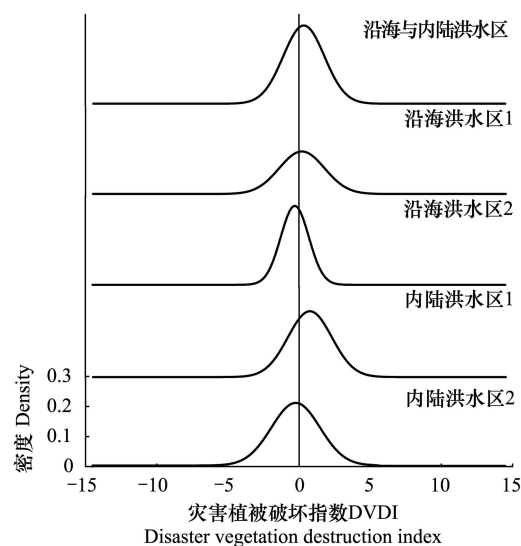


图5 研究区灾害植被破坏指数 DVDI 密度分布

Fig.5 The density distribution of disaster vegetation destruction index in the study areas

较其他植被更加明显^[54]。

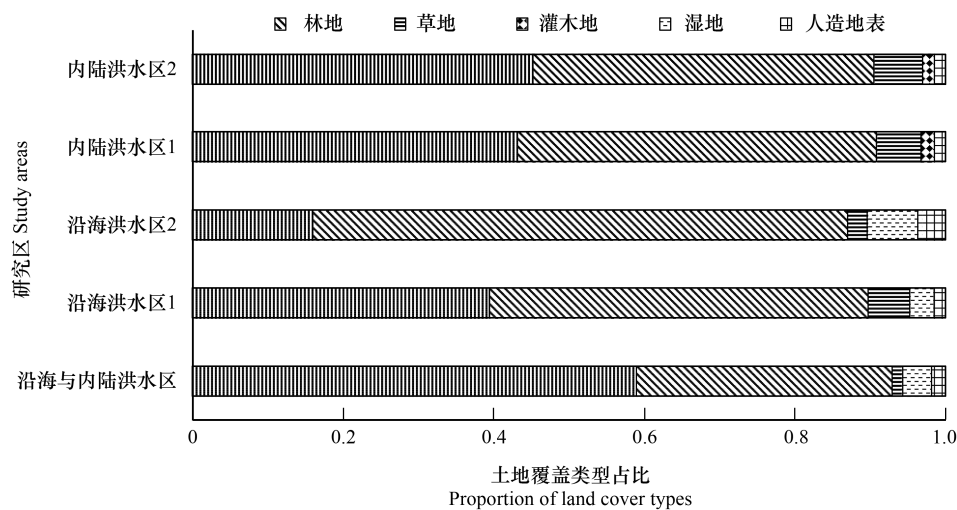


图6 研究区不同土地覆盖类型面积占比

Fig.6 Area proportion of different land cover types in the study areas

2.3 沿海及内陆植被对洪水灾害事件抵抗力与恢复力

5个研究洪水区的对于单次洪水灾害的抵抗力出现了明显差异(图7),总体表现为沿海洪水区植被抵抗力强于内陆,分别为88.15与28.89。同一类型不同研究区之间也存在着较大差异。其中内陆洪水区1的植被对洪水影响抵抗力最低为9.57,而内陆洪水区2的抵抗力相对较高,但仍低于沿海地区。沿海洪水区2的植被在5个研究区中表现出了最强的抵抗力,尤其是超过抵抗力20的区域在本研究区可以占到37.13%,而其余地区均小于20%。植被恢复力方面,2个沿海洪水区的植被在其洪水发生期间的恢复力差别不大,但内陆研究区之间却存在显著差异:内陆洪水区1的植被恢复力有明显增强,内陆洪水区2整体抵抗力低于其他研究区。

在研究不同土地覆盖类型的植被对洪水抵抗力方面,沿海与内陆地区的差异较为明显(图8):沿海地区植被对洪水灾害的抵抗力显著强于内陆地区;但在耕地与人造地表类型区,内陆地区较沿海区域更强。无论是内陆还是沿海,最强的植被抵抗力出现在草地地区,其次为灌木地与林地;抵抗力最差的湿地与人造地表在内陆与沿海地区表现出截然不同的抵抗力,内陆地区的湿地与沿海地区的人造地表抵抗力极差。内陆与洪水地区植被抵抗力差异最大也出现在草地。

然而,不同土地覆盖类型的植被对洪水破坏的恢复力方面与抵抗力相反,总体上表现出内陆洪水区植被的恢复力要强于沿海地区,在湿地与灌木地表现的尤其突出。但耕地植被恢复力却呈现出沿海地区更强的趋势。对比植被的抵抗力与恢复力,内陆地区的人造地表植被较为一致,即抵抗力与恢复力均强于沿海地区;除耕地与人造地表外,其余的土地覆盖类型均表现为沿海地区抵抗力较高而内陆地区植被恢复力更高。本研究区中的内陆植被受洪水事件破坏小,主要是从灾害植被破坏指数进行整体区域探讨的结果。但由于内陆研究区与沿海研究区的植被生态系统组成状况存在差异。在对不同土地覆盖类型的植被对洪水破坏的恢复力方面与抵抗力分析时发现,由于内陆地区人类活动区域占比大,人类在灾害过后的即刻干预导致内陆研究区植被受破坏的程度较沿海研究区更小。但在不考虑各种植被生态系统分布面积以及排除人类活动影响强烈的耕地与人造地表的情况下,沿海植被对洪水事件的抵抗力更强。

植被生态系统的稳定性是判断对于不同灾害响应程度的有效手段,尤其在抵抗力与恢复力方面表现得更加突出^[10,40]。沿海植被对于洪水灾害的抵抗力强于内陆植被,但在恢复力方面没有突出的特点,这可能主要是由于二者之间的生态系统丰富度存在差异以及人为干扰因素影响。东南亚地区中南半岛生态系统的丰富

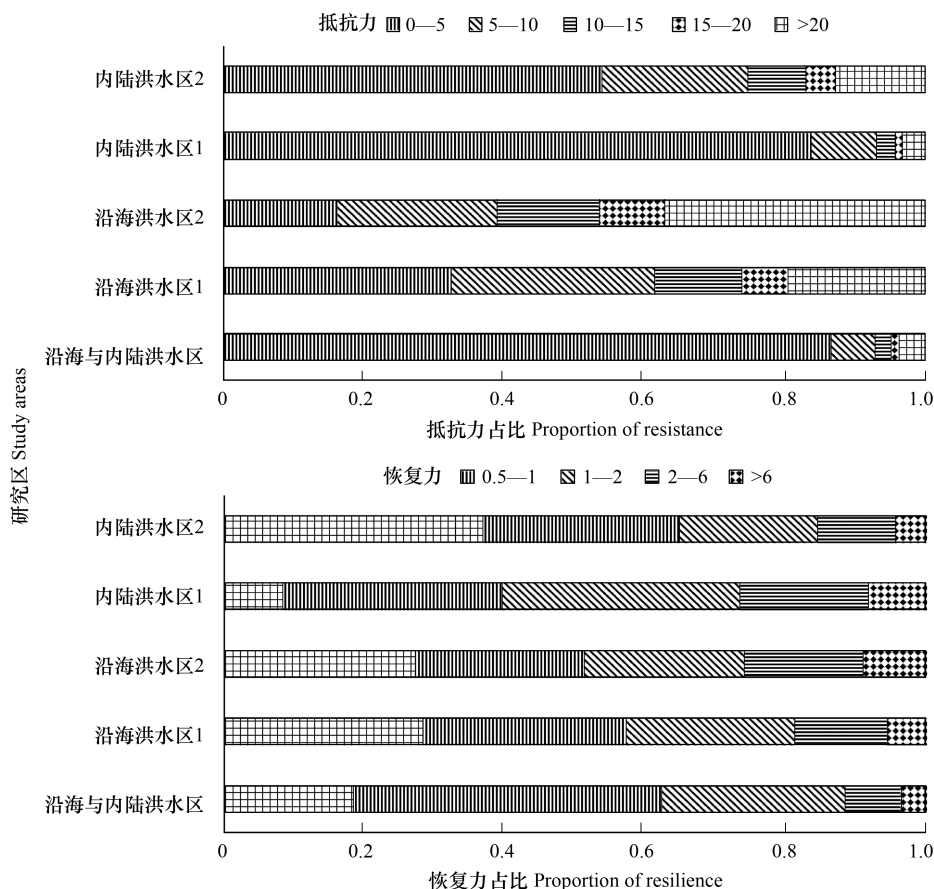


图7 研究区抵抗力与恢复力面积占比

Fig.7 Area proportion of resistance and resilience in the study areas

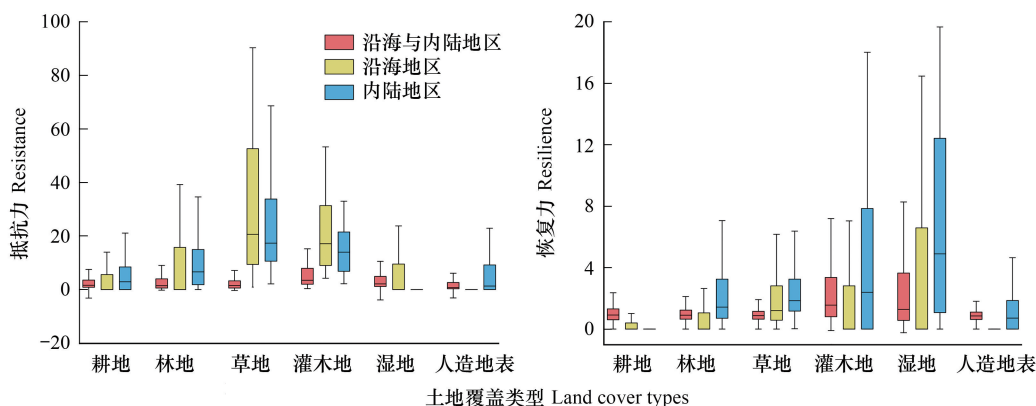


图8 研究区不同土地覆盖类型的抵抗力与恢复力

Fig.8 Resistance and resilience of different land cover types in the study area

度由内陆向沿海递增,植被的生物量也存在这种趋势^[17]。有研究证明,极端气候事件对于生物丰富度小的生态系统扰动更加强烈,即生物多样性大的生态系统抵抗力更强,人类生产生活干扰也会对其产生影响^[11,40]。同时,生物多样性更强的区域植被不仅表现出对洪水较强的抵抗能力,而且在洪水事件之后区域的生物量较之前有增加^[55]。

就二者的土地覆盖类型来看,沿海研究区的耕地与人造地表占比小于内陆地区(图6),人类对自然的改造以及破坏活动使得东南亚内陆区域的植被多样性大大下降^[53,56],对于极端气候灾害的抵抗能力有下降的趋势。对沿海地区与内陆地区的不同植被覆盖类型的抵抗力与恢复力来说,总体上沿海洪水区的植被对洪水事件的抵抗力明显强于内陆地区,但在人类干扰强烈的耕地与人造地表却相反。其中草地表现出最强的抵抗力,其次为林地。而有研究表明,森林生态系统对极端气候灾害表现了最强的生态稳定性,其次为草地、农田^[57-58]。草地的抵抗力高可能是因为,草原缺乏森林冠层的遮蔽,平原表面可能有更完整的植被覆盖,浅层的根和表层的茎连接,将植被和基质结合在一起形成浓密的垫层^[59],大大降低了洪水对其的破坏程度。但东南亚森林由于红树林占比大,且淡水洪水对于红树林生长的海水环境有很强的破坏作用^[54],因此抵抗力没有草地突出。就植被恢复力方面,内陆洪水区植被的恢复力要强于沿海地区,但耕地恢复力也与之相反。由于研究区域内内陆湿地明显少于沿海地区以及灌木地主要集中在内陆地区(图6),因此排除湿地与灌木地的恢复力对比。林地与草地的恢复力较为一致,均高于耕地与人造地表,这也与 Hawkins 等的研究一致^[20]。内陆洪水区相较于沿海洪水区海拔更高,分别为 42.89 m 与 290.53 m,高地势有利于洪水的快速消退^[60],短时间内植被能最大程度恢复其原有生长状态。

3 结论

本研究基于 Google Earth Engine 地理计算云平台,以沿海与内陆植被生态系统对洪水事件的响应程度为研究方向,分析了东南亚 5 个洪水灾害发生区洪水事件对植被的灾害植被破坏指数以及植被生态稳定性,并探讨了沿海与内陆地区洪水诱发的植被破坏差异的原因。结果表明:

- (1) 东南亚沿海与内陆研究区 2000—2018 年 NDVI 值均表现出上升趋势,且内陆植被 NDVI 上升幅度强于沿海植被,分别为 0.014/10a 与 0.011/10a;
- (2) 洪水灾害对沿海地区植被破坏程度明显强于内陆地区,二者的灾害植被破坏指数分别为 -0.25 与 0.29,但植被破坏程度以轻微破坏为主,内陆研究区的植被在洪水灾害事件后反而以轻微生长为主;
- (3) 排除人类干扰强烈的耕地与人造地表,沿海研究区植被生态系统对洪水事件的抵抗力指数为 88.15,明显强于内陆地区的 28.89。其中草地表现出最强的抵抗力,其次为林地,人造地表与耕地表现出内陆强于沿海植被的趋势;就植被恢复力方面,内陆洪水区植被的恢复力要强于沿海地区,但耕地恢复力与之相反;
- (4) 本研究中表现出的单次洪水事件对沿海植被的破坏程度大于内陆植被,主要是受到人类活动影响,内陆研究区人类活动影响区域占比大。人类在洪水事件结束后的立刻干预,使得抵抗力强的沿海区域植被遭受的破坏程度反而更大。

对于单次洪水事件,应该加强对东南亚沿海地区草地以及林地的保护,大力发展退耕还林还草活动,提高沿海地区的生态系统丰富度,以尽量减少洪水事件的破坏作用。对于人造地表尤其是耕地的面积,应当合理规划,与自然植被生态系统相结合,加以人工防洪措施最大程度降低和减免洪水的侵袭,减轻洪灾损失。

参考文献 (References):

- [1] Rahman M S, Di L P. The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management. *Natural Hazards*, 2017, 85(2): 1223-1248.
- [2] 林锐. 基于 ECMWF 的洪水预报研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [3] 盛菲, 曾建玲, 刘士余, 王艳艳, 周昌明, 张婷, 赵黎雯. 场次暴雨条件下降雨和植被变化对洪水影响的定量评估——以彭冲洞小流域为例. *应用生态学报*, 2020, 31(11): 3805-3813.
- [4] 成克武, 臧润国, 周晓芳, 张炜银, 白志强. 洪水对额尔齐斯河河岸天然林植被的影响研究. *北京林业大学学报*, 2006, 28(2): 46-51.
- [5] Powell S J, Jakeman A, Croke B. Can NDVI response indicate the effective flood extent in macrophyte dominated floodplain wetlands? *Ecological Indicators*, 2014, 45: 486-493.
- [6] Shrestha R, Di L P, Yu G N, Shao Y Z, Kang L, Zhang B. Detection of flood and its impact on crops using NDVI-Corn case//Proceedings of 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics). Fairfax: IEEE, 2013.
- [7] Di L P, Yu E, Shrestha R, Li L. DVDI: a new remotely sensed index for measuring vegetation damage caused by natural disasters//Proceedings of

- 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Valencia: IEEE, 2018.
- [8] Kogan F, Salazar L, Roytman L. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(9/10): 2798-2814.
- [9] De Keersmaecker W, Lhermitte S, Honnay O, Farifteh J, Somers B, Coppin P. How to measure ecosystem stability? An evaluation of the reliability of stability metrics based on remote sensing time series across the major global ecosystems. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2149-2161.
- [10] Isbell F, Craven D, Connolly J, Loreau M, Schmid B, Beierkuhnlein C, Bezemer T M, Bonin C, Bruehlheide H, de Luca E, Ebeling A, Griffin J N, Guo Q F, Hautier Y, Hector A, Jentsch A, Kreyling J, Lanta V, Manning P, Meyer S T, Mori A S, Naeem S, Niklaus P A, Polley H W, Reich P B, Roscher C, Seabloom E W, Smith M D, Thakur M P, Tilman D, Tracy B F, van der Putten W H, van Ruijven J, Weigelt A, Weisser W W, Wilsey B, Eisenhauer N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 2015, 526(7574): 574-577.
- [11] Pfisterer A B, Schmid B. Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning. *Nature*, 2002, 416(6876): 84-86.
- [12] Hu P, Zhang Q, Shi P J, Chen B, Fang J Y. Flood-induced mortality across the globe: spatiotemporal pattern and influencing factors. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 171-182.
- [13] Chhin R, Trilaksono N J, Hadi T W. Tropical cyclone rainfall structure affecting Indochina Peninsula and lower Mekong river basin (LMB). *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 739: 012103.
- [14] Hughes A C. Understanding the drivers of Southeast Asian biodiversity loss. *Ecosphere*, 2017, 8(1): e01624.
- [15] 谭珂, Malabrigo P L, 任明迅. 东南亚生物多样性热点地区的形成与演化. *生态学报*, 2020, 40(11): 3866-3877.
- [16] 李文彬, 覃东华, 翟高鹏. 区域洪水灾害风险快速评估研究——以上海市为例. *安全与环境工程*, 2012, 19(6): 93-96, 100-100.
- [17] 林小惠. 中国南部及东南亚森林植被碳固定遥感估算[D]. 南昌: 江西师范大学, 2011.
- [18] 岳祝. 中国大陆沿海地区极端气温和降水时空趋势及其对植被生长的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [19] 吴春生, 黄翀, 刘高焕, 刘庆生. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价. *生态学报*, 2018, 38(13): 4584-4595.
- [20] Hawkins C P, Bartz K L, Neale C M U. Vulnerability of riparian vegetation to catastrophic flooding: implications for riparian restoration. *Restoration Ecology*, 1997, 5(4): 75-84.
- [21] Chen A F, Giese M, Chen D L. Flood impact on Mainland Southeast Asia between 1985 and 2018—The role of tropical cyclones. *Journal of Flood Risk Management*, 2020, 13(2): e12598.
- [22] Brakenridge G R, Syvitski J P M, Niebuhr E, Overeem I, Higgins S A, Kettner A J, Prades L. Design with nature: causation and avoidance of catastrophic flooding, Myanmar. *Earth-Science Reviews*, 2017, 165: 81-109.
- [23] Najibi N, Devineni N. Recent trends in the frequency and duration of global floods. *Earth System Dynamics*, 2018, 9(2): 757-783.
- [24] Qian Y L, Yang Z W, Di L P, Rahman M S, Tan Z Y, Xue L, Gao F, Yu E G, Zhang X Y. Crop growth condition assessment at county scale based on heat-aligned growth stages. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 2439.
- [25] 国家海洋信息中心. HY/T 094—2006 沿海行政区域分类与代码. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [26] 侯西勇, 徐新良, 毋亭, 李晓伟. 中国沿海湿地变化特征及情景分析. *湿地科学*, 2016, 14(5): 597-606.
- [27] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [28] Schmid J N. Using Google Earth Engine for Landsat NDVI time series analysis to indicate the present status of forest stands[D]. Basel: Georg-August-Universität Göttingen, 2017.
- [29] Coltin B, McMichael S, Smith T, Fong T. Automatic boosted flood mapping from satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(5): 993-1015.
- [30] Lobell D B, Thau D, Seifert C, Engle E, Little B. A scalable satellite-based crop yield mapper. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 164: 324-333.
- [31] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [32] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [33] Kendall M G. Rank correlation methods. London: C. Griffin, 1948.
- [34] Pfanagl J. The advanced theory of statistics. *Technometrics*, 1963, 5(4): 525-528.
- [35] 刘洋, 李诚志, 刘志辉, 邓兴耀. 1982—2013 年基于 GIMMS-NDVI 的新疆植被覆盖时空变化. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [36] 周紫燕, 汪小钦, 丁哲, 陈芸芝, 汪传建. 新疆生态质量变化趋势遥感分析. *生态学报*, 2020, 40(9): 2907-2919.
- [37] Lu L Z, Wu C Y, Di L P. Exploring the spatial characteristics of typhoon-induced vegetation damages in the southeast coastal area of China from 2000 to 2018. *Remote Sensing*, 2020, 10(12): 1692.

- [38] Tran T V, Tran D X, Myint S W, Latorre-Carmona P, Ho D D, Tran P H, Dao H N. Assessing spatiotemporal drought dynamics and its related environmental issues in the Mekong River Delta. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2742.
- [39] Rahman M S, Di L P, Yu E, Lin L, Yu Z Q. Remote sensing based rapid assessment of flood crop damage using novel disaster vegetation damage index (DVDI). *International Journal of Disaster Risk Science*, 2021, 12(1): 90-110.
- [40] Huang K, Xia J Y. High ecosystem stability of evergreen broadleaf forests under severe droughts. *Global Change Biology*, 2019, 25(10): 3494-3503.
- [41] 赵安周, 张安兵, 赵延旭, 范倩倩, 赵玉玲. 基于 MODIS-NDVI 数据的陕甘宁地区植被覆盖时空变化及其对极端气候的响应. *水土保持研究*, 2018, 25(3): 224-231.
- [42] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends — Comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 131-147.
- [43] Zheng Y, Yu G. Spatio-temporal distribution of vegetation index and its influencing factors—a case study of the Jiaozhou Bay, China. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2017, 35(6): 1398-1408.
- [44] Zhang J J, Su F Z. Land use change in the major bays along the coast of the South China Sea in southeast Asia from 1988 to 2018. *Land*, 2020, 9(1): 30.
- [45] 张敏, 曹春香, 陈伟. 基于 MODIS NDVI 数据的广西植被覆盖时空变化遥感诊断. *林业科学*, 2019, 55(10): 27-37.
- [46] Chuai X W, Wen J Q, Zhuang D C, Guo X M, Yuan Y, Lu Y, Zhang M, Li J S. Intersection of physical and anthropogenic effects on land-use/land-cover changes in coastal China of Jiangsu province. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2370.
- [47] 钟喆. 基于 3S 技术的广西海岸带生态风险评价研究[D]. 南宁: 广西师范学院, 2017.
- [48] Bendix J. Impact of a flood on southern California riparian vegetation. *Physical Geography*, 1998, 19(2): 162-174.
- [49] Brun J, Barros A P. Vegetation activity monitoring as an indicator of eco-hydrological impacts of extreme events in the southeastern USA. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(2): 519-544.
- [50] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [51] 成方妍, 刘世梁, 尹艺洁, 吕一河, 安南南, 刘昕明. 基于 MODIS NDVI 的广西沿海植被动态及其主要驱动因素. *生态学报*, 2017, 37(3): 788-797.
- [52] Bhattacharjee K, Behera B. Does forest cover help prevent flood damage? Empirical evidence from India. *Global Environmental Change*, 2018, 53: 78-89.
- [53] 张磊, 武友德, 李君, 李灿松. 中缅泰老"黄金四角"地区缅甸段土地利用与景观格局变化分析. *世界地理研究*, 2018, 27(4): 21-33.
- [54] Goldberg L, Lagomasino D, Thomas N, Fatoyinbo T. Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 5844-5855.
- [55] Fischer F M, Wright A J, Eisenhauer N, Ebeling A, Roscher C, Wagg C, Weigelt A, Weisser W W, Pillar V D. Plant species richness and functional traits affect community stability after a flood event. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2016, 371(1694): 20150276.
- [56] 周洪建, 王静爱, 岳耀杰, 李睿. 人类活动对植被退化/恢复影响的空间格局——以陕西省为例. *生态学报*, 2009, 29(9): 4847-4856.
- [57] 梁变变, 石培基, 王伟, 唐笑, 周文霞, 敬烨. 基于 RS 和 GIS 的干旱区内陆河流域生态系统质量综合评价——以石羊河流域为例. *应用生态学报*, 2017, 28(01): 199-209.
- [58] Anderegg W R L, Trugman A T, Badgley G, Anderson C M, Bartuska A, Ciais P, Cullenward D, Field C B, Freeman J, Goetz S J, Hicke J A, Huntzinger D, Jackson R B, Nickerson J, Pacala S, Randerson J T. Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, 2020, 368(6497): eaaz7005.
- [59] Murgatroyd A L, Ternan J L. The impact of afforestation on stream bank erosion and channel form. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1983, 8(4): 357-369.
- [60] Buytaert W, Celleri R, Willems P, De Bièvre B, Wyseure G. Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: a case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3/4): 413-421.