

基于InVEST模型的庙岛群岛海岸脆弱性研究

殷丽婷^{1,2}, 郑伟³, 高猛¹, 路景钊⁴

(1.中国科学院烟台海岸带研究所 海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 山东 烟台 264003; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 4.青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 海岛海岸脆弱性评估对海岛生态系统健康维护、科学规划和可持续利用具有重要作用。基于海岸线类型、数字高程模型等基础数据, 借助 InVEST 模型估算庙岛群岛海岸暴露程度, 进而分析其脆弱性程度。结果表明: (1) 在庙岛群岛 10 个有居民岛中, 平均暴露程度由低到高依次为小钦岛、庙岛、南长山岛、南隍城岛、大钦岛、小黑山岛、大黑山岛、砣矶岛、北隍城岛、北长山岛; (2) 各岛平均暴露程度呈现显著差异。以北长山岛和小钦岛为例, 前者平均暴露程度最高, 高暴露程度占比 64.69%, 后者平均暴露程度最低, 低暴露程度和中低暴露程度占比之和为 73.47%; (3) 海岸线类型、海拔、地理位置是庙岛群岛海岸脆弱性主要影响因子, 其中北隍城岛、大钦岛、小钦岛、北长山岛的海岸暴露程度受海岸线类型差异影响较大; 南隍城岛、砣矶岛、大黑山岛、小黑山岛的海岸暴露程度受海拔影响较大; 南长山岛的海岸暴露程度受所处地理位置影响较大。

关键词: 海岸脆弱性; InVEST 模型; 庙岛群岛; 海岸线

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)02-0221-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2021.02.009

Coastal vulnerability of Miaodao archipelago based on InVEST model

YIN Li-ting^{1,2}, ZHENG Wei³, GAO Meng¹, LU Jing-fang⁴

(1.Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.The First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4.Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology(Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: The assessment of islands' coastal vulnerability plays an important role in islands' protection, utilization, and sustainable development. Based on the basic data such as coastline type, DEM, coastal vulnerability of Miaodao archipelago was studied by using InVEST model. The results showed that: (1) In the ten inhabited islands of Miaodao archipelago, the average exposure degree from low to high was Xiaoqin island, Miaodao island, Nanchangshan island, Nanhuangcheng island, Daqin island, Xiaoheshan island, Daheishan island, Tuoji island, Beihuangcheng island and Beichangshan island. (2) In the northern islands of Miaodao archipelago, the coastal exposure of Beihuangcheng island and Tuoji island was high, that of Xiaoqin island was low, and that of Tuoji island and Daqin island was medium. In the southern islands, the coastal exposure degree of Miaodao island was low, that of Beichangshan island was high, and

收稿日期: 2019-12-09, 修订日期: 2020-02-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779048, U1806214); 山东省专项海洋科技资金重大科技创新工程(2018SDKJ0503)

作者简介: 殷丽婷(1994—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事地理信息系统研究及生态评估研究, E-mail: ylt0515@foxmail.com

通讯作者: 郑伟, 副研究员, 主要从事海洋生态评估与管理研究, E-mail: zhengwei@fio.org.cn

that of Nanchangshan island, Daheishan island and Xiaoheishan island was medium. (3) The main factors affecting coastal vulnerability of Miaodao archipelago are coastline type, altitude, location, etc., and the coastal exposure of Beihuangcheng island, Daqin island, Xiaoqin island and Beichangshan island was greatly affected by coastline type; the coastal exposure of Nanhuangcheng island, Tuoji island, Daheishan island and Xiaoheishan island was greatly affected by altitude; the coastal exposure of Nanchangshan island was greatly affected by location.

Key words: coastal vulnerability; InVEST model; Miaodao archipelago; coastline

海岛是人类生产生活的重要载体,兼具陆海双重属性,是典型的脆弱生态系统^[1]。鉴于海岛生态调查工作起步晚、历史数据较少等问题,以往研究中很少有针对海海岸线脆弱性的研究,多数是对海岸带区域进行分析的,如 Armanfar 等^[2]基于气候变化,通过全球海平面上升、显著的波高变化和潮汐强迫研究了沙巴哈尔港地区海岸带脆弱性; Koroglu 等^[3]以巴塞罗那省为例,将海浪、风等自然强迫作用结合人为因素来研究海岸带脆弱性。李睿博等^[4]、刘健^[5]、庞立华等^[6]基于层次分析法和景观生态学指数等方法,评估了胶州湾海岸带脆弱性并建立了其脆弱性空间模型。

目前脆弱性评价的方法繁多,但海岛观测数据匮乏,难以支撑综合性的评价。InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs) 海岸脆弱性模型 (coastal vulnerability model) 则提供了一种解决方法——通过精确提取遥感影像信息来评估海岸脆弱性。海岛面积较小,海岸的脆弱性能较好地反映海岛的脆弱性特征。本文基于海岸线类型、数字高程模型和气候驱动力等基础数据,借助 InVEST 模型对庙岛群岛海岸暴露程度进行估算,进而分析其脆弱性程度。基于此,本文揭示了庙岛群岛的海岸脆弱性特征及其空间格局,探讨了海岸脆弱性的影响因素,以为海岛生态脆弱性的深入理解和海岛生态保护提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

庙岛群岛位于黄渤海交界,包括 10 个有居民海岛和 22 个无人小岛。庙岛群岛各岛均为基岩岛,年平均气温 12.1 °C、降水量 537.1 mm,地表淡水资源较为缺乏^[1]。当前,从人为干扰效应

来看庙岛群岛生态系统健康总体较好,但也呈现出显著的空间差异性^[7]。本文的研究区为 10 个有居民海岛,如图 1 所示。

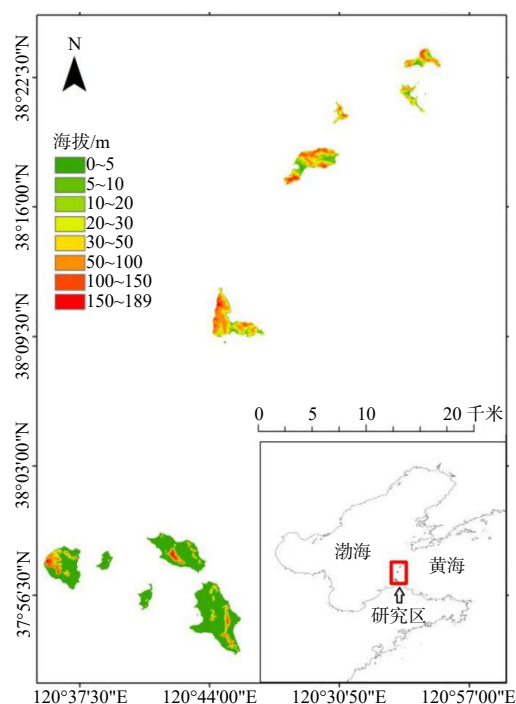


图 1 研究区范围和地理位置

Fig. 1 The extent and location of the study area

1.2 InVEST 评估模型

1.2.1 海岸暴露度指数

海岸暴露度指数^[8-10]计算步骤如下:首先对影响海岸暴露度指数的指标进行量化分级,然后计算海岸暴露度指数,利用该指数进行海岸脆弱性评价。模型通过结合每一段海岸线的各种影响变量等级来计算物理暴露指数,将用来计算的变量从低到高进行分级和赋值,并采用几何平均的方法来计算海岸线段的暴露指数 EI ,具体公式如下:

$$EI = \left(\prod_{i=1}^n R_i \right)^{1/n} \quad (1)$$

式中: R_i 为用户提供的用于计算 EI 第 i 个生物地球物理变量(bio-geophysical variable)级别。

具体来说, 本文以海岸线类型(geomorphology)、地貌(relief)、风暴露(wind exposure)、波浪暴露(wave exposure)等数据为模型参数, 最后计算海岸暴露指数^[11], 模型运行以 30 m×30 m 栅格为计算单元, 评估范围是由海向陆一个栅格的宽度(30 m)。具体公式如下:

$$EI = (R_{\text{Geomorphology}} R_{\text{Relief}} R_{\text{WindExposure}} R_{\text{WaveExposure}})^{1/4} \quad (2)$$

式中: EI 为海岸暴露度指数。

1.2.2 海岸线类型与地貌

岩石峭壁、断崖、海滩以及三角洲等不同类型的海岸线类型受到侵蚀和淹没的程度是不同的。因此, 对于不同的海岸线类型需要根据其抗侵蚀能力等特性进行分级, 分级方案参考 Hammar-Klose 和 Thieler 的分级模式^[9]。运行模型需要记录不同海岸线类型的线矢量数据, 这个矢量数据需要包含海岸线类型等级字段(1~5)。各海岸线类型赋值如表 1 所示。

表 1 海岸线类型等级

Tab.1 Types and grades of coastline

等级	1	2	3	4	5
类型	岩石; 海堤等	中等 悬崖等	低崖; 冲积 平原等	卵石滩; 泻湖等	沙滩; 泥滩等

模型所需地貌数据是指研究区的数字高程模型, 该数据包括陆地高程数据和海洋水深数据。通过数字高程模型对研究区海岸面临的风险性进行评估, 结果表明, 平均海拔较高的地区比低海拔地区拥有更低的风险。

1.2.3 波浪暴露(浪冲)

波浪暴露是指海岸线对于波浪的相对暴露指数, 是估算海岸线潜在侵蚀的一个定性指标。暴露于开阔海域的海岸一般比处于庇护区的海岸具有更高的波浪暴露指数, 因为前者更容易受到巨大波浪的影响。该模型通过计算海洋波动的最大平均能量值估量一段海岸线在波浪中的相对暴露指数 E_w , 海洋波动加权平均能值 E_w^o 与局部风产生的波(locally wind-generated waves) E_w^l ^[12], 公式如下。

$$E_w = \max(E_w^o, E_w^l) \quad (3)$$

$$E_w^o = \sum_{k=1}^{16} H[F_k] P_k^o O_k^o \quad (4)$$

$$H[F_k] = \begin{cases} 0 & \text{if } F_k < 60 \text{ km} \\ 1 & \text{if } F_k = 60 \text{ km} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $H[F_k]$ ^[12] 是一个针对所有 16 个风等角区域(wind equiangular sectors) k 的单位阶跃函数; 在 k 区域, 如果风区长度小于 60 km, 其值为 0, 风区长度等于 60 km, 其值为 1; 不同区域 k 的波能值其时间百分比 O_k^o 不同, 需根据不同区域 k 的 O_k^o 加权计算。

对于所有在每个风等角区域的波, 波能值计算公式为:

$$P = \frac{1}{2} H^2 T \quad (6)$$

式中: P (kW/m) 是根据高度 H (m) 和时间 T (s) 得到的波能值。

对于局部风产生的波 W_w^l , 计算公式为:

$$E_w^l = \sum_{k=1}^{16} P_k^l O_k^l \quad (7)$$

式中: 通过在 k 区域产生的前 10% 的平均风速值 P_k^l 和此区域强风的发生率 O_k^l 来统计通过 16 个风等角区域的波能值。

局部风产生波的高度和周期可以用下列公式估算:

$$\begin{cases} H = \tilde{H}_\infty \left[\tanh(0.343 \tilde{d}^{1.14}) \tanh \left(\frac{2.14 \cdot 10^{-4} \tilde{F}^{0.79}}{\tanh(0.343 \tilde{d}^{1.14})} \right) \right]^{0.572} \\ T = \tilde{T}_\infty \left[\tanh(0.1 \tilde{d}^{2.01}) \tanh \left(\frac{2.77 \cdot 10^{-7} \tilde{F}^{1.45}}{\tanh(0.1 \tilde{d}^{2.01})} \right) \right]^{0.187} \end{cases} \quad (8)$$

式中: 非空间性的波高 \tilde{H}_∞ 和周期 \tilde{T}_∞ 是在某一个特定区域观察出来的前 10% 平均风速值 U (单位: m/s) 的函数: $\tilde{H}_\infty = 0.24 U^2/g$; $\tilde{T}_\infty = 7.69 U^2/g$; 非空间性的广度 \tilde{F}_∞ 和深度 \tilde{d}_∞ 是在区域 F (单位: m) 的风区距离和在研究区域 d (单位: m) 处平均水深的函数: $\tilde{F}_\infty = gF/U^2$; $\tilde{T}_\infty = gd/U^2$, 其中 g (单位: m/s²) 是重力加速度。

1.2.4 风暴露(风吹)

风暴露是指海岸线对于强风的相对暴露指数。若某地区持续受强风影响则该指数的值就会变高。可以通过计算和绘制相对暴露指数来计算等级^[13]。InVEST 海岸脆弱性模型利用长期

记录的测量风速且最高风速为 10% 的时间序列,把罗盘刻度玫瑰图(或是 360 度的指南针)分成 16 个等角区域,结合这些区域的风区(风吹过水面的距离)特性来计算该指数:

$$REI = \sum_{n=1}^{16} U_n P_n F_n \quad (9)$$

式中: U_n 表示在第 n 个等角区域前 10% 的最高风速的平均值(单位: m/s); P_n 表示在感兴趣区第 n 个区域方向吹过的所有风速的百分比; F_n 表示第 n 个区域的风区距离(单位: m)。

对于一个给定的海岸段,模型通过获取风区 k 的平均值,用下面公式来估算每个 16 等角区域的风区距离 $F^{[13]}$:

$$F = \frac{\sum_{n=1}^k f_n \cos \theta}{\sum_{n=1}^k \cos \theta} \quad (10)$$

式中: f_n 是某一个等角区域的第 n 个辐射距,且 $\theta=22.5 \text{ deg}/k(k \leq 9)$ 。

1.3 数据来源与处理

1.3.1 海岸线类型与地貌

模型所需的标记海岸线类型的线矢量文件必须有一个能够识别各种海岸线类型的字段,用数字 1~5 表示等级。

通过中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) 选取庙岛群岛区域 2017 年 8 月低云量 Landsat 8 遥感影像(行列号: 33/34, 120),空间分辨率为 30 m。借助遥感处理软件对图像进行辐射定标、大气校正、影像裁切,结合 Google Earth 通过目视解译方法分析庙岛群岛遥感影像,得出庙岛群岛海岸线类型分布图(图 2),根据实际情况和卫星影像将庙岛群岛海岸线分为 5 级(沙滩等)、4 级(卵石滩等)、1 级(岩石等)岸线 3 类。

模型所需数字高程模型是陆地高程数据和海洋水深数据镶嵌而成。陆地高程数据由中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) 提供(Aster GDEM: 水平分辨率 30 m,垂直分辨率 20 m),利用 ArcGIS 10.2 软件提取出研究区陆地高程数据;海洋水深

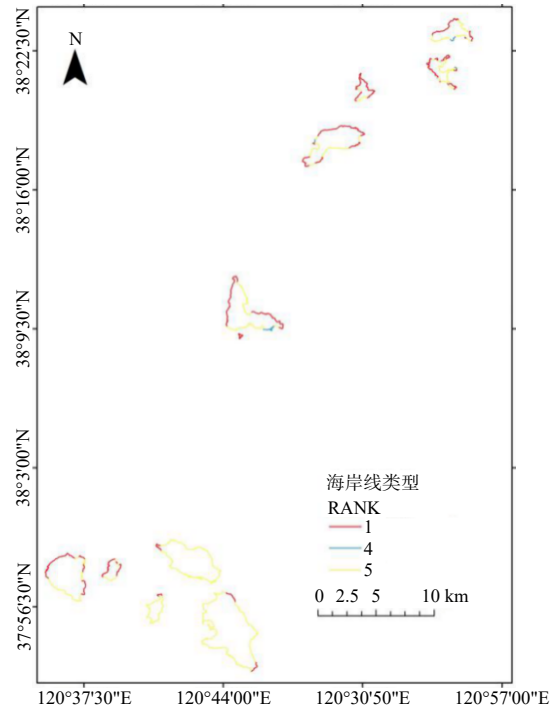


图 2 研究区海岸线类型

Fig. 2 Types of coast in the study area

数据源自美国国家海洋和大气管理局官网 (<https://www.ngdc.noaa.gov/>),并在 SMS 10.1 软件提取,导入 Arcgis 10.2 软件中,将两部分数据进行镶嵌,以计算每个海岸段的暴露值。

1.3.2 气候驱动力文件

气候驱动力文件是指记录了风暴条件下波浪和风变量(wave and wind variables)数值的点矢量文件,用来计算每个海岸段的风暴露和波浪暴露等级。本文所采用的是 InVEST 模型默认的气候驱动力文件,该数据是以 Tolman 汇编 8 年而成的 WAVEWATCH III 模型为源数据^[14-15]进行分析计算而得到的。

1.3.3 大陆架

本文采用的大陆架数据是由 InVEST 模型提供的默认数据,该数据是一个全球性的面矢量文件,绘制的是自然意义上的大陆架,即环绕大陆的浅海地带,用于描述大陆边缘的地理位置或其他局部重要水深等高线的位置^[11]。

2 结果与讨论

2.1 庙岛群岛海岸脆弱性空间分析

基于 InVEST 海岸脆弱性模型对海岸遭受

暴风和强浪侵蚀影响进行定量评估。以暴露程度为标准估算海岛的岸线脆弱性,暴露程度高即易受干扰,生境易受损,其脆弱性相对强,反之暴露程度低,不易受到自然海洋系统干扰,其脆弱性弱。

目前海岸脆弱性的评价还没有统一标准,根据计算结果,本文基于自然断点法将庙岛群岛的暴露程度划分如下,按 1.56~2、2~2.5、2.5~3、3~3.5、3.5~4.16 分成低、中低、中、中高、高 5 个等级(图 3、图 4)。庙岛群岛中南五岛海岸暴露程度整体高于北五岛(如图 3、图 4 所示),主要体现在北长山岛北部岸线、东南岸线以及大黑山岛西南岸线(整体暴露程度高于 3.5),而小钦岛、南隍城岛以及南五岛的庙岛整体暴露程度低,受自然海洋系统干扰弱。

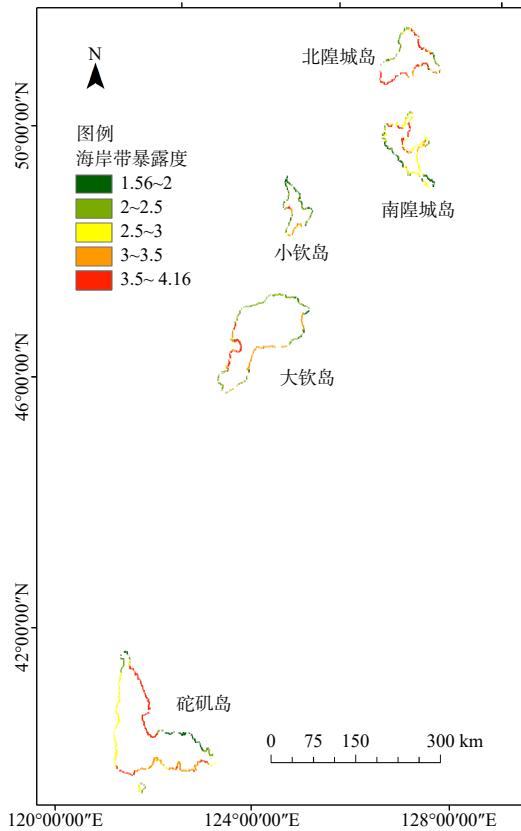


图 3 庙岛群岛北五岛海岸暴露度分布

Fig. 3 Distribution of coastal exposure in five northern islands of Miaodao archipelago

将各岛的海岸暴露程度进行空间叠加,得到各岛的平均暴露程度(图 5),由低到高依次为小钦岛、庙岛、南长山岛、南隍城岛、大钦岛、

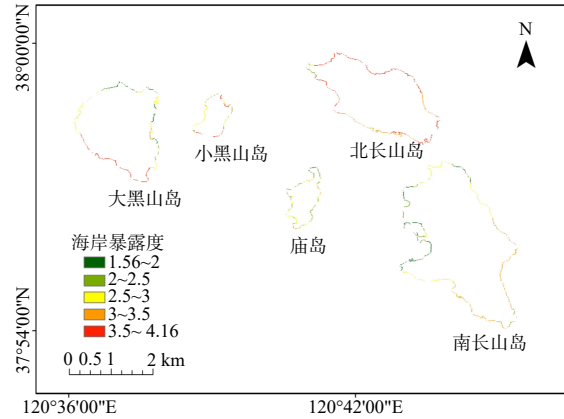


图 4 庙岛群岛南五岛海岸暴露度分布

Fig. 4 Distribution of coastal exposure in five southern islands of Miaodao archipelago

小黑山岛、大黑山岛、砣矶岛、北隍城岛、北长山岛。在庙岛群岛北部岛群中,北隍城岛与砣矶岛海岸暴露程度高,小钦岛海岸暴露程度低,砣矶岛与大钦岛海岸暴露程度中等。在南部岛群中,北长山岛海岸暴露程度高,庙岛海岸暴露程度低,南长山岛、大黑山岛、小黑山岛暴露程度中等。

为准确评估该指标的差异性,本文进行了定量化处理,图 6 为庙岛群岛 10 个主要岛屿海岸各等级暴露程度占比状况,以北长山岛、小钦岛

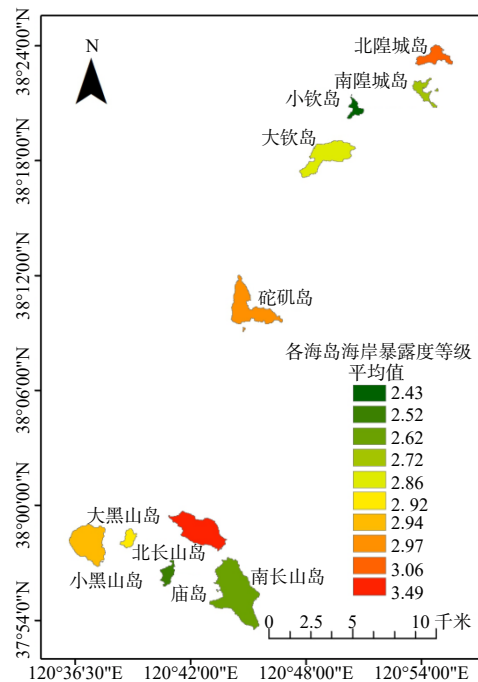


图 5 庙岛群岛各岛海岸暴露度平均值

Fig. 5 Average coastal exposure of Miaodao archipelago

为例,北长山岛海岸平均暴露程度最高,高暴露程度占比 64.69%,而小钦岛海岸平均暴露程度最低,低暴露程度和中低暴露程度占比之和为 73.47%。可见,各岛屿海岸脆弱性差异显著。

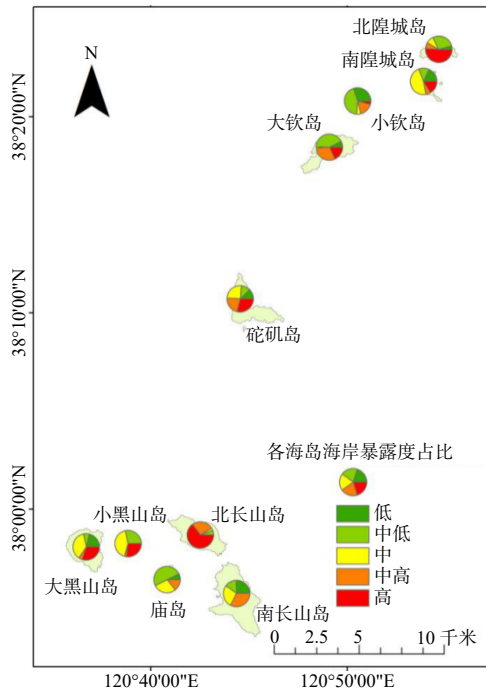


图6 庙岛群岛各岛屿海岸暴露程度占比

Fig. 6 Proportion of coastal exposure at all levels in Miaodao archipelago

2.2 庙岛群岛海岸脆弱性影响因子分析

2.2.1 海岸线类型

海岸线类型是海岸脆弱性的重要影响因素。北隍城岛、大钦岛、小钦岛、北长山岛的海岸暴露程度受海岸线类型影响较大,北隍城岛西部与东南部、小钦岛东部与西部、大钦岛北部、北长山岛西北角海岸线多基岩、悬崖,抗风暴能力较强,暴露程度较低,脆弱性较低。北隍城岛西北部和南部、小钦岛南部、大钦岛西部和东南部、北长山岛除西北角外其他部分海岸线多为沙滩与人工岸线,抗风暴能力较弱,暴露程度较高,所以脆弱性较高。

2.2.2 海拔

海拔是影响海岛脆弱性的重要因素,平均海拔越低的地区越容易受海岸侵蚀、海水入侵、地面沉降等渐变性地质灾害的影响。如图1所示,通过提取的数字高程数据可以看出,南隍城岛北部和南部、砣矶岛西部和北部、大黑山岛西部、

小黑山岛东北部多山地,地势高,基岩硬度高,抗风暴能力强,暴露程度低,脆弱性较低;南隍城岛中部、砣矶岛南部、大黑山岛东部、小黑山岛西南部多建设用地、耕地,人类活动强度高,地势低平,多平原,抗风暴能力弱,暴露程度高,脆弱性较高。

2.2.3 地理位置

海岸区域所处地理位置同样是影响海岸脆弱性的一个重要因素。暴露区相比庇护区更容易受强风、强浪和风暴潮等海洋灾害的影响。一般来说,在周期风暴中,海岸线与大陆架的距离越长,风暴潮就越高。以南长山岛为例,其东部与西部均为建设用地,然而东部面向外海,处于暴露区,西部面向内陆,处于庇护区,与西部相比东部更容易受到风浪的影响,所以东部暴露程度比西部高,东部脆弱性较西部高。

2.3 讨论

本文在 InVEST 模型基础上对研究区海岸脆弱性进行了评估。但该模型仍存在一定的局限性:(1)将海岸侵蚀这一动态过程简化成若干变量的几何平均,没有精确模拟近海地区的风暴潮和水动力条件;(2)以暴露程度为指标去表征脆弱性程度尚不够全面,需要进一步评估庙岛群岛生态系统“恢复力”、“敏感性”等关键指标,不断完善基于 InVEST 模型的海岛脆弱性评估体系;(3)由于庙岛群岛观测数据不足,海平面上升、自然生境、人类活动的相关影响并未进行考量,在一定程度上会影响评估结果的准确性,课题组会进一步补充搜集相关数据,从而进行更加全面的海岛海岸脆弱性评估。

3 结论

(1)庙岛群岛的平均暴露程度由低到高依次为小钦岛、庙岛、南长山岛、南隍城岛、大钦岛、小黑山岛、大黑山岛、砣矶岛、北隍城岛、北长山岛。在庙岛群岛北部岛群中,北隍城岛与砣矶岛海岸暴露程度较高,小钦岛海岸暴露程度较低,砣矶岛与大钦岛海岸暴露程度中等;在南部岛群中,庙岛海岸暴露程度较低,北长山岛海岸暴露程度较高,南长山岛、大黑山岛、小黑山岛暴露程度中等。

(2)各岛平均暴露程度差异性显著。以北长山岛和小钦岛为例,前者平均暴露程度最高,高暴露程度占比 64.69%,后者平均暴露程度最低,低暴露程度和中低暴露程度占比之和为 73.47%。

(3)海岸线类型、海拔、地理位置是庙岛群岛海岸脆弱性主要影响因子,其中北隍城岛、大钦岛、小钦岛、北长山岛的海岸暴露程度受海岸线类型影响较大;南隍城岛、砣矶岛、大黑山岛、小黑山岛的海岸暴露程度受海拔影响较大;南长山岛的海岸暴露程度受地理位置的影响较大。

致谢:本研究过程中得到自然资源部第一海洋研究所石洪华博士、中国水产科学研究院黄海水产研究所崔正国博士的指导和帮助。

参考文献:

- [1] 石洪华,郑伟,王晓丽,等.我国北方典型海岛生态系统固碳生物资源调查与承载力评估[M].北京:海洋出版社,2017:1-10.
- [2] ARMANFAR M, GOHARNEJAD H, NIRI M Z, et al. Assessment of coastal vulnerability in Chabahar Bay due to climate change scenarios[J]. *Oceanologia*, 2019, 61(4): 412-426.
- [3] KOROGLU A, RANASINGHE R, JIMÉNEZ J A, et al. Comparison of coastal vulnerability index applications for Barcelona Province[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2019, 178: 104799.
- [4] 李睿博,江涛,周雪莹,等.胶州湾海岸带生态环境脆弱性空间建模与分析[J].*山东科技大学学报:自然科学版*, 2014, 33(4): 65-75, 93.
- [5] 刘健.胶州湾海岸带环境脆弱性分析[J].*海洋环境科学*, 2016, 35(5): 750-755.
- [6] 庞立华,孔范龙,郝敏,等.胶州湾海岸带生态脆弱性时空变化分析[J].*华东师范大学学报:自然科学版*, 2018, (3): 222-233.
- [7] SHEN C C, SHI H H, ZHENG W, et al. Spatial heterogeneity of ecosystem health and its sensitivity to pressure in the waters of nearshore archipelago[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 61: 822-832.
- [8] GORNITZ V, WHITE T W, CUSHMAN R M. Vulnerability of the US to future sea level rise[C]//Symposium on Coastal and Ocean Management. Long Beach, CA: USDOE, 1991.
- [9] HAMMAR-KLOSE E S, THIELER E R. Coastal vulnerability to sea-level rise: a preliminary database for the US Atlantic, Pacific and Gulf of Mexico coasts[Z]. Gulf of Mexico Coasts: US Geological Survey, 2001.
- [10] COOPER J A G, MCLAUGHLIN S. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis[J]. *Journal of Coastal Research*, 1998, 14(2): 512-524.
- [11] 徐建宁.基于InVEST模型的小江流域生态系统服务评估[D].兰州:兰州交通大学,2016.
- [12] KEDDY P A. Quantifying within-lake gradients of wave energy: interrelationships of wave energy, substrate particle size and shoreline plants in axe lake, Ontario[J]. *Aquatic Botany*, 1982, 14: 41-58.
- [13] USACE. U.S. army corps of engineers, Coastal Engineering Manual (CEM), engineer manual 1110-2-1100[M]. Washington: USACE, 2002.
- [14] 陈璇.最新版WAVEWATCH海浪模式机理简介及个例[J].*海洋科学前沿*, 2016, 3(2): 11-18.
- [15] TOLMAN H L. User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14[M]. Washington: NOAA, 2009.
- [16] SAARI H K, SCHMIDT S, CASTAING P, et al. The particulate $^{7}\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ and $^{234}\text{Th}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ activity ratios as tracers for tidal-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): implications for the budget of particle-associated contaminants[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4784-4794.
- [17] SAARI H K, SCHMIDT S, CASTAING P, et al. Processes[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(2): 467-476.
- [18] BONNIWELL E C, MATISOFF G, WHITING P J. Determining the times and distances of particle transit in a mountain stream using fallout radionuclides[J]. *Geomorphology*, 1999, 27(1/2): 75-92.
- [19] WALLBRINK P J, MURRAY A S. Distribution and variability of ^{7}Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution

(上接第 220 页)

- [20] BONNIWELL E C, MATISOFF G, WHITING P J. Determining the times and distances of particle transit in a mountain stream using fallout radionuclides[J]. *Geomorphology*, 1999, 27(1/2): 75-92.
- [21] WALLBRINK P J, MURRAY A S. Distribution and variability of ^{7}Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution

processes[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(2): 467-476.

- [22] SAARI H K, SCHMIDT S, CASTAING P, et al. The particulate $^{7}\text{Be}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ and $^{234}\text{Th}/^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ activity ratios as tracers for tidal-to-seasonal particle dynamics in the Gironde estuary (France): implications for the budget of particle-associated contaminants[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(20): 4784-4794.