

DOI: 10.5846/stxb201802120366

陈晔倩, 李杨帆, 祁新华, 陈文惠, 林金煌. 基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价——以闽三角为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4214–4225.

Chen Y Q, Li Y F, Qi X H, Chen W H, Lin J H. Assessing ecosystem risk in coastal wetland of the South Fujian Golden Delta using a habitat risk assessment model based on the land-use effect on tidal flat wetland. Acta Ecologica Sinica 2018, 38(12): 4214–4225.

## 基于栖息地风险评价模型的海岸带滩涂湿地风险评价 ——以闽三角为例

陈晔倩<sup>1</sup>, 李杨帆<sup>1</sup>, 祁新华<sup>2,3,\*</sup>, 陈文惠<sup>2</sup>, 林金煌<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> 厦门大学海洋与海岸带发展研究院, 厦门 361102

<sup>2</sup> 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

<sup>3</sup> 福建省湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

<sup>4</sup> 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101

**摘要:** 海岸带湿地是生物多样性最丰富、生产力最高、最具价值的生态系统之一。然而近年来, 随着城市化和工业化进程的加快, 我国海岸带地区的土地利用正发生深刻变化, 生态风险凸显。利用 2000、2005、2010 和 2015 年的 Landsat TM/ETM+ 和 Landsat 8 OLI 遥感影像, 融合行政区划图与地形图, 并引入一个评价多元海洋、海岸带利用对栖息地造成风险的模型, 即 Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) 模型中的栖息地风险评价 (Habitat Risk Assessment, HRA) 模型评价闽三角海岸带滩涂湿地的生态风险。结果表明: (1) 闽三角海岸带滩涂湿地风险以低风险为主; (2) 泉州地区的风险面积最大(约 4389.91 hm<sup>2</sup>), 漳州地区最小(约 4630.73 hm<sup>2</sup>); (3) 修正面积影响的情况下, 其他建设用地造成的暴露和影响较大, 耕地造成的暴露和影响最小。不同区域滩涂湿地风险程度的可视化表达, 可以揭示滩涂湿地高风险地区以及高风险的产生原因, 便于管理者对滩涂湿地采取精准的保育措施。

**关键词:** InVEST 模型; 栖息地风险评价; 海岸带滩涂湿地; 闽三角

## Assessing ecosystem risk in coastal wetland of the South Fujian Golden Delta using a habitat risk assessment model based on the land-use effect on tidal flat wetland

CHEN Yeqian<sup>1</sup>, LI Yangfan<sup>1</sup>, QI Xinhua<sup>2,3,\*</sup>, CHEN Wenhui<sup>2</sup>, LIN Jinhuan<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Coastal and Ocean Management Institute, Xiamen University, Xiamen 361102, China

<sup>2</sup> School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

<sup>3</sup> Key Laboratory for Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

<sup>4</sup> State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract:** Coastal wetlands are one of our most valuable ecosystems; they have high biodiversity and productivity. In recent years, with the development of urbanization and the acceleration of industry progress, the land use in China has undergone some prominent and profound changes, and the ecological risk is becoming increasingly obvious. Here, using original

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0502900); 福建省科学技术厅民生科技专项(引导性项目) (2017Y6002); 福建省自然科学基金资助项目(2015J01122)

收稿日期: 2018-02-12; 修订日期: 2018-05-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fqxh74@163.com

<http://www.ecologica.cn>

Landsat TM/ETM+ and Landsat 8 OLI satellite images from the years 2000, 2005, 2010, and 2015, and merging administrative and topographic maps, we introduce a model which assesses the risk of multiple marine and coastal utilization projects to habitats, called the Habitat Risk Assessment (HRA) model. We use this model to reflect the current ecosystem risk in the South Fujian Golden Delta so that managers of the area can take adaptive measures. The results show that (1) overall, the risk to tidal flat wetland in the coastal South Fujian Golden Delta is mainly low; (2) the risk area in Quanzhou is the largest (about 4389.91 hm<sup>2</sup>) while the risk area in Zhangzhou is the smallest (about 4630.73 hm<sup>2</sup>); (3) after correcting for the influence of each land-use type's area, other construction land has the greatest exposure and consequence to coastal tidal wetlands, whereas plantation has the least exposure and consequence. The visualization of tidal flat wetland risk in different areas enables us to monitor high risk areas, and determine factors that cause high risk areas. Thus, it is more convenient for managers to take adaptive conservation measures.

**Key Words:** InVEST; habitat risk assessment; tidal flat wetland; South Fujian Golden Delta

海岸带是海陆系统的交错地带,具有复杂性与多变性,其特殊的生态环境成为自然、人文活动的活跃区域,同时也是典型的生态脆弱带和环境敏感区<sup>[1]</sup>。海岸带湿地是生物多样性最丰富、生产力最高、最具价值的生态系统<sup>[2]</sup>。近年来,随着城市化和工业化进程的加快,我国海岸带地区的土地利用正发生深刻变化,导致海岸带湿地退化现象严重,海岸带生态系统退化、资源减少和景观破坏,生态风险加剧,极大地威胁海岸带的生态安全<sup>[3-4]</sup>。作为重要海岸带,闽三角(包括厦门、泉州和漳州三个设区市)不仅是滩涂湿地的所在地,更是鸟类的重要栖息地<sup>[5]</sup>。此外,闽三角海岸带地属经济发达地区,大量工业区的兴起和港口、码头开发建设以及船舶往来对其生态环境构成较大的负面影响。

目前,海岸带湿地的研究已经引起学者的高度关注,主要成果集中于海岸带湿地生境、底栖生物数量、栖息地密度、物种多样性<sup>[6-7]</sup>、生态恢复能力评价等内容<sup>[8]</sup>,包括九龙江口红树林湿地底栖生物的种类组成与分布、数量组成与分布、生物多样性指数<sup>[6]</sup>;漳江口、湄洲湾和闽江口红树林湿地互花米草区软体动物的种类、数量、栖息地密度;厦门五缘湾滨海湿地的生态恢复等<sup>[8]</sup>。近年来,有学者开始关注海岸带湿地生态风险问题<sup>[9-10]</sup>,如依据生态风险等级测算海岸带区域生态风险指数,并进行生态风险的空间可视化表达<sup>[9]</sup>。有学者对海洋和海岸带栖息地进行风险评级,并从暴露、影响两个维度评估压力对生态系统造成的风险<sup>[10]</sup>。此外,也有学者通过湿地风险指数和湿地脆弱性指数来测度若尔盖高原沼泽湿地的退化风险<sup>[11]</sup>。然而,学术界对海岸带湿地生态风险的程度与产生机制的揭示仍然相对不足,且把闽三角区域作为研究区的成果鲜见报道。

事实上,海岸带湿地提供了包括防范海岸线受风暴的影响、碳储存和封存等多样化功能,然而海岸带湿地近年来几乎都受到人类活动的影响<sup>[12]</sup>。因此,了解人类活动的作用位置和强度对海岸带生态系统的影响成为海洋海岸带管理的重要内容。而 InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs) 栖息地风险评价模型(Habitat Risk Assessment, HRA) 则能帮助评价人类活动给海岸带生态系统健康带来的威胁<sup>[13]</sup>。鉴于此,本研究对闽三角海岸带滩涂湿地进行栖息地风险评价,探究人类活动对海岸带滩涂湿地的影响与风险,希望能够揭示闽三角海岸带的生态风险问题与产生机制,为维护闽三角海岸带生态安全提供科学支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

闽三角包括厦门、泉州和漳州 3 个设区市(图 1),与我国台湾隔海相望,区域面积约 2.5 万 km<sup>2</sup>(不含金门),2015 年常住人口达 1721 万人,地区生产总值(GDP) 12371.22 亿元<sup>[14-16]</sup>,占福建的 40%,是中国经济较发达的地区之一。闽三角因其独特的地理位置、语言环境和风俗习惯,吸引了大量台商的投资,是大陆台商投资最密集的区域<sup>[17]</sup>。

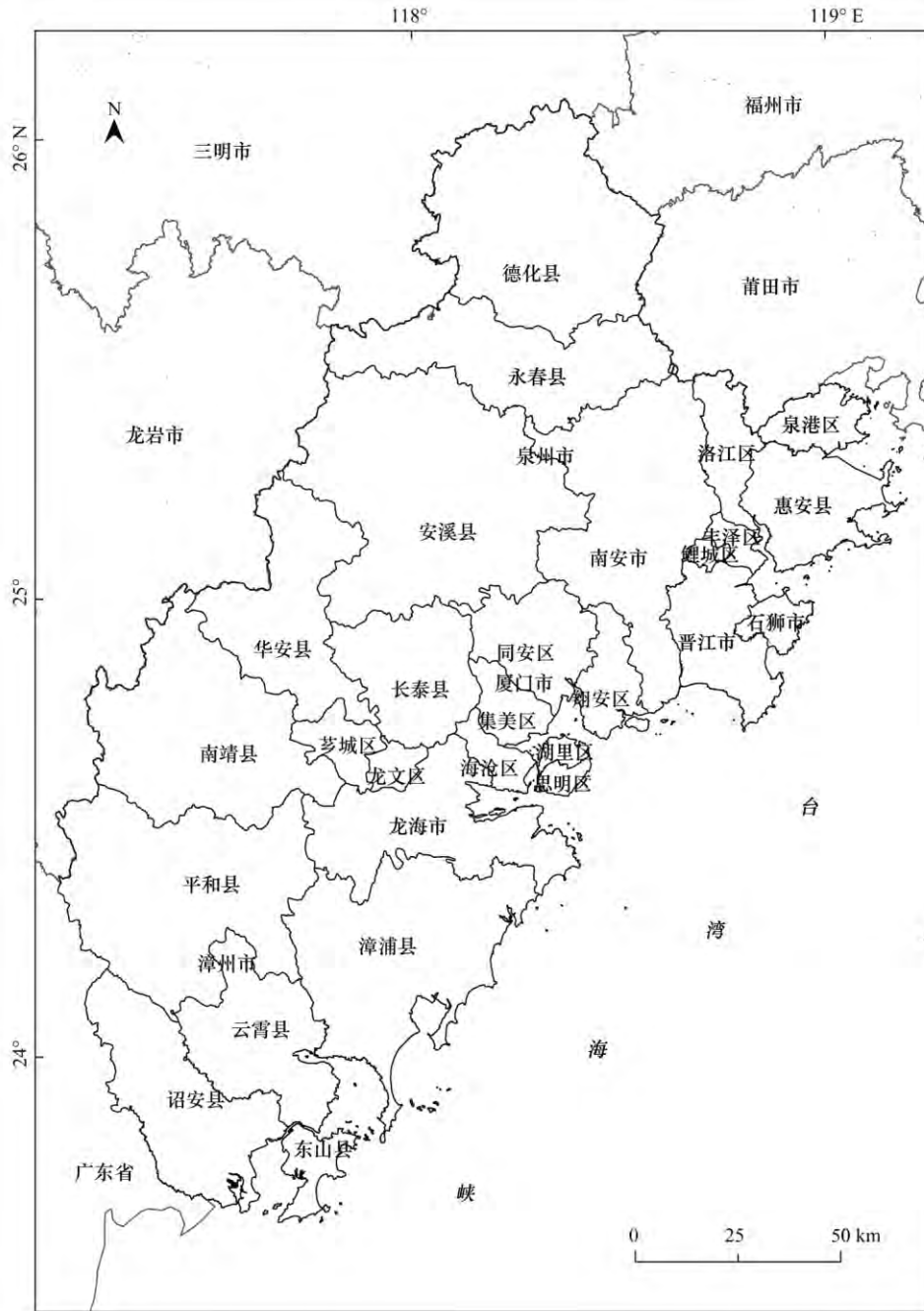


图 1 闽三角区位图

Fig.1 The location of South Fujian Golden Delta

1.2 数据来源

本研究利用 2000、2005、2010 年的 Landsat TM/ETM+ 遥感影像与 2015 年的 Landsat 8 OLI 遥感影像,并结合行政区划图和地形图进行处理(大气校正、辐射定标、几何精校正、影像融合、影像镶嵌、影像切割),再根据土地利用/覆盖分类体系和解译辅助数据(地形图、地貌图、植被图、土地利用图等)在 ArcGIS 软件中进行土地利用/覆盖遥感目视解译,解译精度大于 85%,最终得到 2000、2005、2010 和 2015 年的土地利用图(图 2)。之后,提取 2000、2005、2010 和 2015 年土地利用图中人类活动频繁的类型—耕地、城镇用地、农村居民点和其他建设用地作为压力图层,提取位于海岸带上的 2000、2005、2010 和 2015 年的滩涂作为栖息地图层。与海岸带相关的数据来自国土、海洋渔业部门,经济社会统计数据则来自各区域统计年鉴。

<http://www.ecologica.cn>

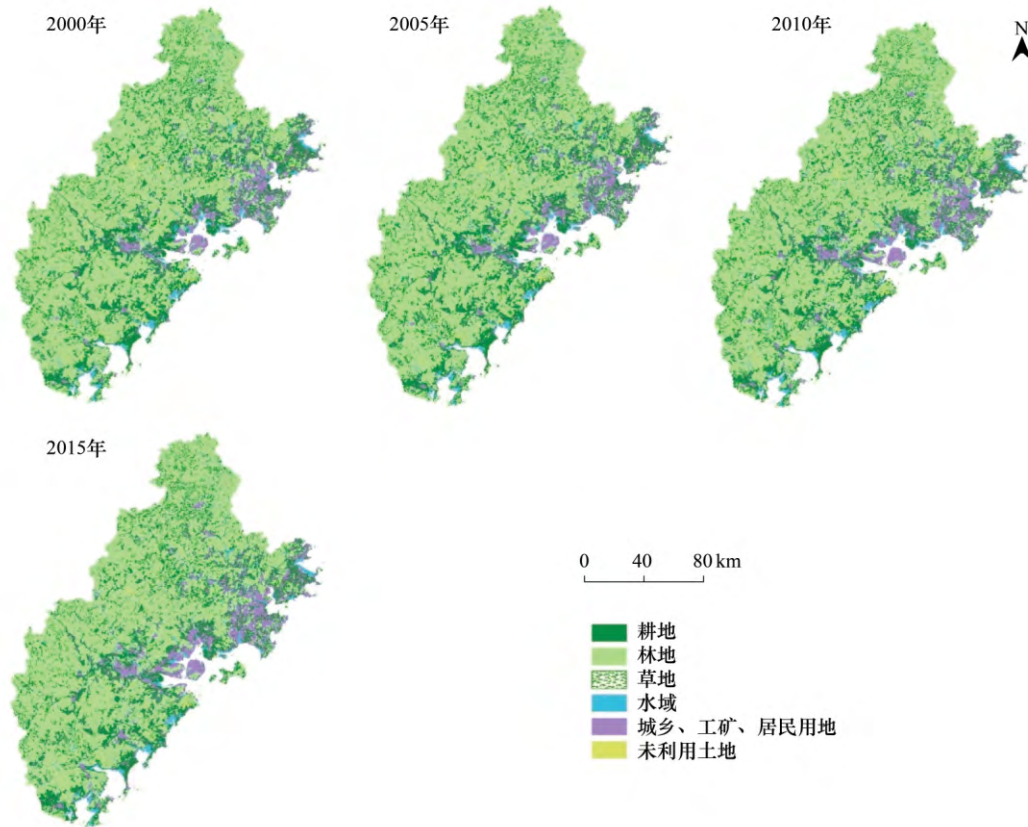


图2 闽三角土地利用图

Fig.2 The land use of South Fujian Golden Delta

## 2 栖息地风险评价框架

### 2.1 评价原理

生态风险评价被定义为评估暴露在一个或多个压力源下负面生态影响正在发生或将要发生的可能性的过程,它可以评估一个或多个压力源和生态组成部分<sup>[18]</sup>。目前,生态风险评价被广泛应用于农田、流域、区域与流域生态系统中<sup>[19-23]</sup>。

本研究运用美国斯坦福大学、大自然保护协会(The Nature Conservation, TNC)与世界自然保护基金会(World Wildlife Fund, WWF)联合开发的生态系统服务和交易的综合评估模型(InVEST),引入其中的栖息地风险评价(HRA)模型对海岸带栖息地进行风险评价<sup>[13]</sup>。在此模型中,风险被定义为人类活动减少近岸栖息地的质量从而使其生态系统服务受损的可能性<sup>[13]</sup>。

本研究选取两种维度的信息计算风险或对生态系统的影响,分别称为“暴露”和“影响”。前者代表因人类活动而导致的栖息地暴露在压力中的程度;后者则反映栖息地物种对与人类活动相关的压力的反馈<sup>[13]</sup>。滩涂湿地作为最具有生态系统服务价值的生态系统类型之一,受人类活动影响最为强烈,本研究将其作为研究对象<sup>[24-25]</sup>。同时,用沿海地区土地利用类型—耕地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地表征人类活动的压力,以此分析人类活动对海岸带滩涂湿地产生的影响和风险。

### 2.2 评价模型

运用两种计算方法计算由压力引起的栖息地风险:一是多元风险算法,此算法中压力 $j$ 对栖息地 $i$ 的风险是暴露和影响的乘积;二是欧几里得法,由压力 $j$ 造成的栖息地 $i$ 的风险是由原点到暴露-影响空间位置的欧几里得距离得出。

<http://www.ecologica.cn>

$$R_{ij} = E \cdot C \quad (1)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(E - 1)^2 + (C - 1)^2} \quad (2)$$

式中  $R_{ij}$  表示由压力  $j$  造成的栖息地  $i$  的风险  $E$  表示暴露  $C$  表示影响。

在欧几里得模型中,对物种造成的风险随着暴露-影响空间位置与起点距离的增加而增长。评价栖息地的暴露和影响,本研究选取了栖息地和压力的空间重叠、强度两个指标(表1)。评价暴露在人类活动下的影响,本研究选择栖息地面积变化和生物多样性作为指标。总暴露  $E$  和总影响  $C$  的分值是每个评价指标  $i$  的暴露值  $e_i$  和影响值  $c_i$  的加权平均值。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{e_i}{d_i \cdot w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \cdot w_i}} \quad (3)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{c_i}{d_i \cdot w_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{d_i \cdot w_i}} \quad (4)$$

式中  $d_i$  代表指标  $i$  的数据质量评分  $w_i$  代表指标  $i$  的重要权重  $N$  代表评价每个栖息地所用的指标数。由于每个指标的等级评价存在一定的不确定性,通过对数据的质量评级可以减少由于等级评价划分而造成的误差,指标权重则可用在计算风险时降低次要影响因素对栖息地的影响。

考虑到人类活动的影响具有超出其所在区域的延展性<sup>[9]</sup>,本研究将人类活动及其缓冲区与栖息地的重叠部分作为人类活动和栖息地的空间和时间重叠部分,以耕地、城镇用地、农村居民点、其他建设用地为中心建立 1.5 km 缓冲区。

为了直观反映滩涂湿地存在的风险状况,用高、中、低风险分类表示不同区域滩涂湿地的风险。选取滩涂湿地与人类活动的空间叠置和强度作为指标可以反映人类活动对滩涂湿地影响的位置及其影响强度。选取滩涂湿地的面积变化作为指标可以反映滩涂湿地对人类活动影响的反应,滩涂湿地损失的面积越多,说明其受人类活动的影响越大,其敏感度越强。选取生物多样性作为指标可表现滩涂湿地在人类活动影响下的恢复力。一般来说,生物多样性越大的滩涂湿地抵御风险的能力越强,但恢复能力随着生物多样性的增多而下降。指标的具体划分标准见表1。

表1 海岸带滩涂湿地风险等级划分

Table 1 Grading of coastal tidal flat wetland risk

指标 Criteria	风险 Risk				
	低风险(1) Low risk (1)	中风险(2) Medium risk (2)	高风险(3) High risk (3)		
暴露指标 Exposure	暴露程度 Exposure extent	空间叠置 Spatial overlap	栖息地与压力重叠 <10%	10% ≤ 栖息地与压力重叠 <30%	栖息地与压力重叠 ≥ 30%
		强度 Intensity	低	中	高
影响指标 Consequence	敏感度 Sensitivity	面积变化 Change in area	低面积损失 (面积损失 < 0.05%)	中面积损失 (0.05% ≤ 面积损失 < 0.21%)	高面积损失 (面积损失 ≥ 0.21%)
		恢复力 Resilience	生物多样性 Biodiversity	生物多样性得分 < 1	1 ≤ 生物多样性得分 < 1.255

### 2.3 指标变量说明与风险等级划分

上述模型中,空间叠置是栖息地的空间位置与人类活动区域的空间位置的重叠,它可评价栖息地与压力

重叠的比例以及压力对栖息地造成的影响。空间叠置的指标评级先用相邻 5 年的滩涂湿地和人类活动区域计算出当年的空间叠置面积比例,再取所有的空间叠置面积比例作为评级对象;之后把得到的所有比例从小到大排列,运用 Excel 条件格式中的色阶分为 3 段,设中间值为中位数,分出低、中、高风险。

栖息地所受的暴露和影响不仅与栖息地和人类活动的空间叠置有关,还与人类活动的强度有关,因此,本文选取强度作为其中一个指标<sup>[9]</sup>。强度指标评级先由 2000、2005、2010、2015 年的空间叠置数据计算出 2000 到 2015 年每 5 年空间叠置变化的百分比,之后步骤同空间叠置的指标评级。

此模型中,面积变化是栖息地暴露在人类活动这一压力后面积变化的比例。面积变化的指标评级是先计算每五年滩涂湿地的面积变化比例,其余步骤同空间叠置的指标评级。

滩涂湿地的生物多样性得分由指标因子赋值与指标权重的乘积计算得出,代表生物多样性的 3 个因子——单位面积物种多度、植物覆盖度、外来物种入侵情况的指标权重分别为 0.108、0.108、0.054,之后根据指标因子赋值,分别计算生物多样性得分并做均值处理。指标因子赋值和权重参考 2015 年《中国湿地资源(福建卷)》<sup>[26]</sup>,选取“福建省各重点调查湿地生态状况得分与评价”表中的福建省漳江口红树林国家级自然保护区等 18 个位于研究区范围内的湿地作为评级对象,考虑到其中生态状况得分是由 12 个因子表示的,而生物多样性得分是由 3 个因子表示,因此把评级生境状况的得分临界值按照 4:1 分配给生物多样性评级临界值,进而进行生物多样性评级。泉州地区和厦门地区的生物多样性评级较低,漳州地区的生物多样性评级高。

### 3 结果分析

#### 3.1 人类活动引发的滩涂湿地风险

##### 3.1.1 人类活动引发的滩涂湿地风险格局

###### (1) 风险格局存在显著的区域差异

用人类活动密集的土地利用类型表示人类活动的压力(图 3),分析人类活动对滩涂湿地产生的风险及其影响。通过模型计算得到图 4,图中的风险代表滩涂湿地受到的所有人类活动对其的影响程度及其从影响中恢复的能力强弱。

滩涂湿地风险分布上,漳州地区的风险区域呈条带状分布,且以低风险为主,仅有少量的中、高风险区域,如图 4a、图 4b;厦门地区的风险区域呈团状集中分布,并向内陆适当延伸,如图 4c,主要以低风险为主,且中、高风险区域较漳州地区多;泉州地区的风险分布既有零散分布于海岸带的条带状区域,又有集中分布的块状区域,块状风险区域明显较厦门地区多,且以低风险为主,如图 4d、e、f。

###### (2) 不同土地利用类型造成的风险各不相同

根据 HRA 模型得到的风险值(图 5),总体而言,农村居民点造成的风险最小。从不同区域分析,不同土地利用类型对滩涂湿地造成的风险如下:耕地造成的风险在漳州地区最大( $R=1.66$ ),厦门地区最小( $R=1.44$ );其他建设用地造成的风险在厦门地区最大( $R=1.56$ ),泉州地区最小( $R=1.46$ );城镇用地造成的风险在厦门地区最大( $R=1.5$ ),漳州地区最小( $R=1.43$ );农村居民点造成的风险在 3 个地区都是最小的( $R\approx 1.4$ )。

InVEST HRA 模型并未考虑不同土地利用类型面积的差异可能造成的风险偏差。鉴于此,运用每一种土地利用类型的面积占总土地利用类型面积的百分比修正 InVEST HRA 模型得到的风险值,如图 6。

修正面积影响后,耕地对海岸带滩涂湿地造成的风险最小,其他建设用地造成的风险较高。从区域分析,不同土地利用类对海岸带滩涂湿地造成的风险如下:农村居民点造成的风险在厦门地区最大( $R=14.09$ ),泉州地区最小( $R=12.43$ );其他建设用地造成的风险在泉州地区最大( $R=22.57$ ),厦门地区最小( $R=11.00$ );耕地造成的风险在厦门地区最大( $R=3.59$ ),漳州地区最小( $R=2.40$ );城镇用地造成的风险在漳州地区最大( $R=15.75$ ),厦门地区最小( $R=4.21$ )。

### 3.1.2 人类活动引发的滩涂湿地风险的区域差异

闽三角海岸带滩涂湿地总风险面积约为 5965.55  $\text{hm}^2$  ,其中 ,高风险面积约为 1021.81  $\text{hm}^2$  ( 17.13% );低风险面积约为 4943.75  $\text{hm}^2$  ( 82.87% ) 。

( 1) 泉州地区的风险面积最大 ,漳州地区的风险面积最小

从不同地区来看 ,泉州地区的风险面积最大( 约 4389.91  $\text{hm}^2$  );漳州的风险面积最小( 约 4630.73  $\text{hm}^2$  ) 。由不同风险程度的比例上看 ,高风险比例最大的是厦门地区( 22.56% ) ,最小的是泉州地区( 15.39% );低风险面积比例最大的是泉州地区( 84.61% ) ,最小的是厦门地区( 77.44% ) 。

( 2) 耕地造成的总风险面积最小

不同土地利用类型上( 图 7) ,其他建设用地造成的风险面积比例最大为 0.289% ,耕地最小为 0.071% 。不同风险程度上 ,城镇用地和其他建设用地造成的高风险面积百分比大于中、低风险面积百分比;耕地和农村居民点造成的低风险面积百分比大于中、高风险面积百分比。一定程度上说明滩涂湿地在城镇用地和其他建设用地影响下更具有脆弱性。

( 3) 人类活动的影响可能提高滩涂湿地风险程度

比较人类活动影响下滩涂湿地风险面积和所有的滩涂湿地风险面积发现 ,受人类活动影响的滩涂湿地面积占 11.46% 。风险程度上 ,高风险面积占 30.30% ,低风险面积占 7.87% 。受人类活动影响后 ,滩涂湿地的中风险面积增加了 44.92  $\text{hm}^2$  。

## 3.2 滩涂湿地受到的暴露和影响

( 1) 滩涂湿地受到的暴露

不同土地利用类型对滩涂湿地造成的暴露( 图 8) 情况如下: 泉州地区为耕地>城镇用地>其他建设用地>农村居民点; 厦门地区为其他建设用=城镇用地>耕地>农村居民点; 漳州地区为耕地>其他建设用地>农村居民点>城镇用地。由于高暴露产生的风险较高、影响大<sup>[13]</sup> ,而 3 个地区中造成较高暴露的土地利用类型为耕地、其他建设用地。因此 ,管理者要加强对着这两种土地利用类型中人类活动的监管 ,减少因人为开垦和开发建设占用滩涂湿地导致的滩涂湿地风险。此外 ,同一种土地利用类型对不同地区滩涂湿地造成的暴露也各不相同。农村居民点造成的暴露为漳州地区>泉州地区>厦门地区; 其他建设用地造成的暴露为厦门地区>漳州地区>泉州地区; 耕地造成的暴露为泉州地区>漳州地区>厦门地区; 城镇用地造成的暴露为厦门地区>泉州地区>漳州地区。

( 2) 滩涂湿地受到的影响

由图 8 可以看出不论是在泉州地区、厦门地区还是漳州地区 ,城镇用地和农村居民点对海岸带滩涂湿地造成的影响都是最小的; 在泉州地区和漳州地区 ,耕地造成的影响大于其他建设用地 ,而在厦门地区二者的影响恰好相反。此外 ,同一种土地利用类型对不同地区滩涂湿地造成的影响也有所差异。农村居民点造成的影响在泉州地区、厦门地区和漳州地区基本相当; 其他建设用地造成的影响为厦门地区>泉州地区=漳州地区; 耕地造成的影响为泉州地区>漳州地区>厦门地区; 城镇用地造成的影响在泉州地区、厦门地区和漳州地区基本相当。



图 3 人类活动分布图

Fig.3 The distribution of human activities



图 4 闽三角海岸带滩涂湿地生态风险分布图

Fig.4 The ecological risk distribution of coastal tidal flat wetland in South Fujian Golden Delta

<http://www.ecologica.cn>



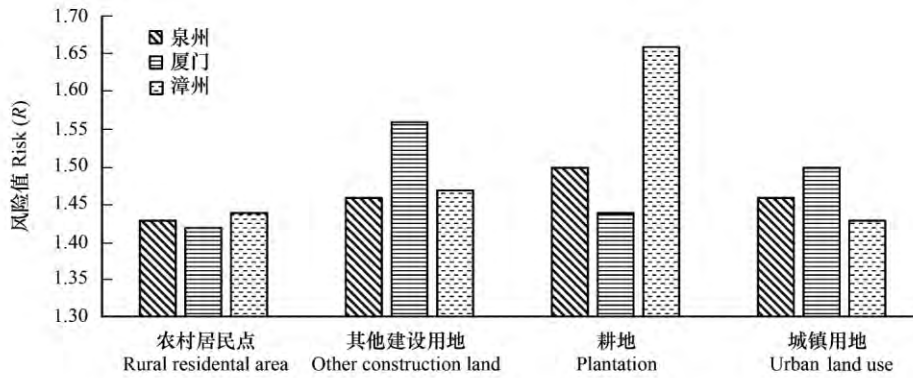


图 5 海岸带滩涂湿地受到的风险

Fig.5 The risk in coastal tidal flat wetland

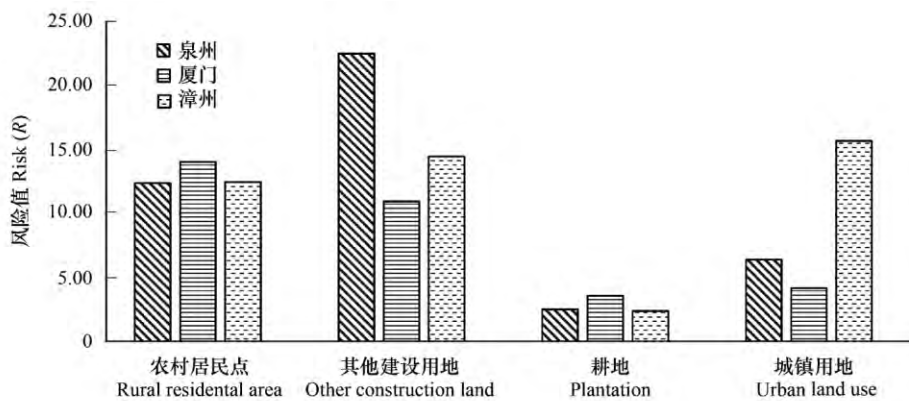


图 6 修正面积影响后海岸带滩涂湿地受到的风险

Fig.6 The risk in coastal tidal flat wetland under correction for area

然而,从 3.1.2 得到的结论上看,耕地造成的风险是最小的,其暴露和影响也应该较小。经过分析发现,耕地的面积远远大于其他土地利用类型,然而 InVEST HRA 模型在计算时没有考虑到压力的面积大小。因此,本研究通过计算每一种土地利用类型的面积占总土地利用类型面积的百分比来修正 InVEST HRA 模型得到的暴露值和影响值,得到结果(图 9)。

(3) 修正面积影响后滩涂湿地受到的暴露

修正面积影响后从暴露上看,不同土地利用类型造成的暴露在泉州地区为其他建设用地>农村居民点>城镇用地>耕地,厦门地区为农村居民点>其他建设用地>城镇用地>耕地,漳州地区为城镇用地>其他建设用地>农村居民点>耕地。修正面积影响后的同一种土地利用类型对不同地区滩涂湿地造成的暴露也各不相同。农村居民点造成的暴露为厦门地区>漳州地区>泉州地区;其他建设用地造成的暴露为泉州地区>漳州地区>厦门地区;耕地造成的暴露为厦门地区>泉州地区>漳州地区;城镇用地造成的暴露为漳州地区>泉州地区>厦门地区。

(4) 修正面积影响后滩涂湿地受到的影响

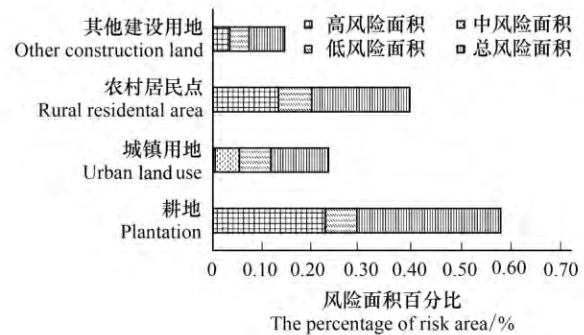


图 7 闽三角不同土地利用类型造成的海岸带滩涂湿地风险面积百分比

Fig.7 The percentage of coastal tidal flat wetland's risk area in South Fujian Golden Delta due to different land use

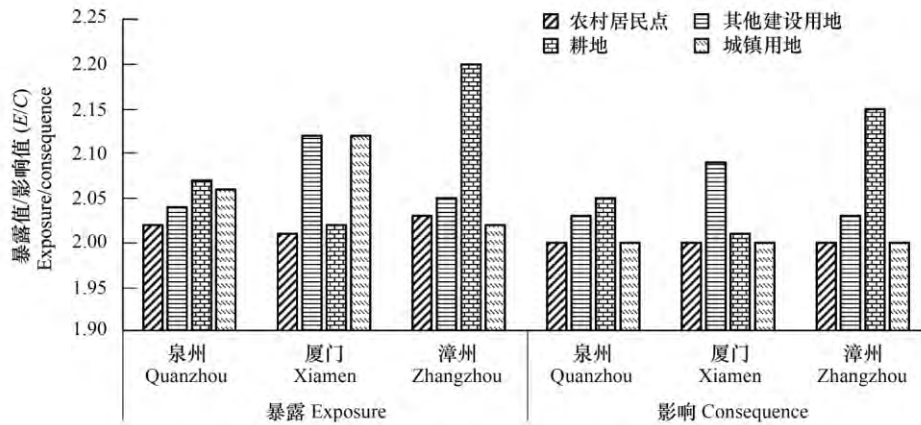


图8 海岸带滩涂湿地受到的暴露和影响

Fig.8 The exposure and consequence in coastal tidal flat wetland

修正面积影响后,不同土地利用类型造成的影响在泉州地区为其他建设用地>农村居民点>城镇用地>耕地,厦门地区为农村居民点>其他建设用地>城镇用地>耕地,漳州地区为城镇用地>其他建设用地>农村居民点>耕地。此外,修正面积影响后,同一种土地利用类型对不同地区造成的影响也不同。农村居民点造成的影响为厦门地区>漳州地区>泉州地区;其他建设用地造成的影响为泉州地区>漳州地区>厦门地区;耕地造成的影响为厦门地区>泉州地区>漳州地区;城镇用地造成的影响为漳州地区>泉州地区>厦门地区。

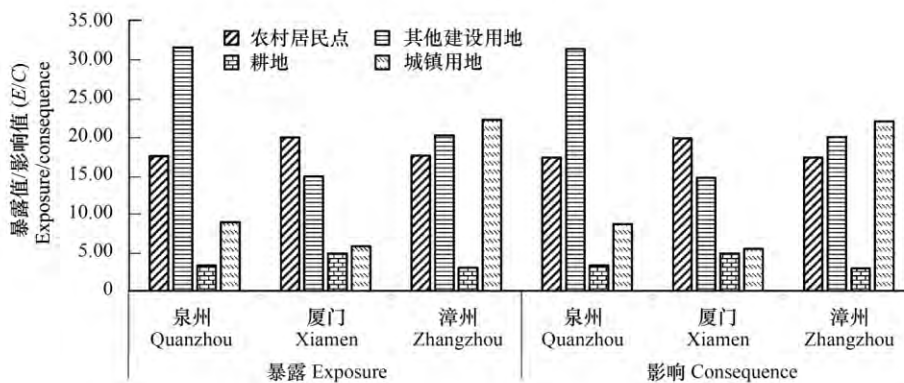


图9 修正面积影响后海岸带滩涂湿地受到的暴露和影响

Fig.9 The exposure and consequence in coastal tidal flat wetland under correction for area

## 4 结论与讨论

### 4.1 主要结论

(1) 总体风险上,闽三角海岸带滩涂湿地风险以低风险为主,但也存在条带状或点状的中、高风险区域,且其主要分布在向陆一侧的海岸带。从滩涂湿地风险分布上看,漳州地区的风险区域多呈条带状分布于海岸带沿线;厦门地区的风险区域呈团状集中分布,且向内陆延伸一定距离;泉州地区的风险分布既有零散分布于海岸带的条带状区域,又有集中分布的块状区域,且其块状风险区域明显较厦门的多。从风险的强度上看,漳州地区滩涂湿地的风险以低风险为主,其中包含少量的中、高风险区域;厦门地区以低风险为主,中、高风险区域较漳州地区的多;泉州地区以低风险为主,中、高风险零散分布于其中。

(2) 从暴露和影响上看,未修正面积影响下,耕地和其他建设用地造成的暴露和影响较大;修正面积影响后,其他建设用地造成的暴露较大,耕地造成的暴露和影响最小。

## 4.2 讨论

(1) 人类活动对海岸带滩涂湿地的影响较大,近三成的海岸带滩涂湿地高风险区域是受人类活动影响的区域;海岸带滩涂湿地的中风险区域则全是因人类活动而产生的(增加 44.92 hm<sup>2</sup>的中风险面积);人类活动造成的海岸带滩涂湿地低风险面积占全部风险面积的比例较小,海岸带滩涂湿地中的低风险更多地是由于自然因素所致。

(2) 未修正面积影响时,耕地造成的暴露、影响和风险值较高,然而,耕地的风险面积占有土地利用类型面积的比例是最小的。经修正面积影响后,单位面积耕地造成的暴露、影响和风险均最小,说明了面积大的土地利用类型大大加剧了其对滩涂湿地造成的暴露、影响和风险程度。

(3) 厦门地区农村居民点造成的暴露、影响和风险较同一地区其他土地利用类型造成的大,可能是厦门地区的城镇化水平高,居民的环保意识较强,减弱了城镇用地中的人类活动对滩涂湿地造成的暴露、影响和风险。

(4) 管理者应特别加强对中、高风险区域进行重点管理和保护,防止滩涂湿地的生境恶化。将海岸带滩涂湿地上人类活动的面积控制在合理的范围内,以免大面积的人类活动造成海岸带滩涂湿地的生态系统功能下降。加强对海岸带滩涂湿地周边居民进行滩涂湿地生态保护的相关教育,提高居民的环保意识,减少因环保意识缺失而造成的海岸带滩涂湿地的生态破坏。

(5) 本研究的先进之处在于从时空上计算了人类活动和海岸带滩涂湿地的重叠及其变化、海岸带滩涂湿地面积的变化及海岸带滩涂湿地生物多样性,较全面地评估了生态系统风险。同时,本研究把风险分为暴露和影响两个方面,能发现并减少因暴露而产生的风险,使更多地减少生态系统整体风险成为可能,且通过栖息地风险评价模型得到的结果能辨认出相对高风险区域及其风险程度,因此本研究对风险管理有一定帮助。此外,本研究运用的栖息地风险评价(HRA)模型可为未来海岸带滩涂湿地的规划管理提供建议。通过风险评级,管理者可以清楚地知道需要重点修复和先修复的区域。但不可忽视的是风险评分是相对的,风险评分较低的区域同样也是受风险影响的区域,这些区域的生态修复工作也不可忽视。对于滩涂湿地面积变化和滩涂湿地与人类活动区域的空间重叠指标评价,本研究平均了2000年到2015年的数据,一定程度上减少了因特定年份数据不准确而产生的误差。

(6) 由于缺少具体人类活动类型的地理数据,本研究未将人类活动划分为具体类别的活动,而是以土地利用分类图中的城镇用地、农村居民点和其他建设用地的分布图作为人类活动的分布图。本研究仅以人类活动较多的土地利用类型作为压力源,研究这些压力对滩涂湿地的风险,没有考虑自然因素可能对滩涂湿地造成的风险。

### 参考文献(References):

- [1] 许学工,彭慧芳,徐勤政. 海岸带快速城市化的土地资源冲突与协调——以山东半岛为例. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(4): 527-533.
- [2] 蒋卫国,李京,李加洪,谢志仁,王文杰. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价. 生态学报,2005,25(3): 408-414.
- [3] 吴晓青,胡远满,贺红土,布仁仓,郝凤明. 沈阳市城市扩展与土地利用变化多情景模拟. 地理研究,2009,28(5): 1264-1275.
- [4] 张慧霞,庄大昌,娄全胜. 基于土地利用变化的东莞市海岸带生态风险研究. 经济地理,2010,30(3): 489-493.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 2015年全国自然保护区名录. [2016-11-08]. <http://sts.mep.gov.cn/zrbhq/zrbhq/201611/P020161125559865886359.pdf>.
- [6] 洪荣标,吕小梅,陈岚,方少华. 九龙江口红树林湿地与米草湿地的底栖生物. 台湾海峡,2005,24(2): 189-194.
- [7] 江锦祥,李荣冠,黄雅琴. 中国红树林湿地软体动物物种多样性研究//中国动物学会·中国海洋湖沼学会贝类学会第九次会员代表大会暨第十五次学术讨论会会议摘要集. 广州:中国海洋湖沼学会,2011.
- [8] 黄海萍,陈彬,俞炜炜,孙元敏,郑成兴,林金兰,陈光程,马志远. 厦门五缘湾滨海湿地生态恢复成效评估. 应用海洋学学报,2015,34(4): 501-508.
- [9] Arkema K K, Verutes G, Bernhardt J R, Clarke C, Rosado S, Canto M, Wood S A, Ruckelshaus M, Rosenthal A, McField M, de Zegher J.

- Assessing habitat risk from human activities to inform coastal and marine spatial planning: a demonstration in Belize. *Environmental Research Letters*, 2014, 9( 11): 114016.
- [10] Townsend M, Thrush S F, Lohrer A M, Hewitt J E, Lundquist C J, Carabines M, Felsing M. Overcoming the challenges of data scarcity in mapping marine ecosystem service potential. *Ecosystem Services*, 2014, 8: 44–55.
- [11] Jiang W G, Lv J X, Wang C C, Chen Z, Liu Y H. Marsh wetland degradation risk assessment and change analysis: a case study in the Zoige Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2017, 82: 316–326.
- [12] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M P, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R, Waston R. A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*, 2008, 319( 5865): 948–952.
- [13] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D, Wood S A, Chaplin-Kramer R, Nelson E, Ennaanay D, Wolny S, Olwero N, Vigerstol K, Pennington D, Mendoza G, Aukema J, Foster J, Forrest J, Cameron D, Arkema K, Lonsdorf E, Kennedy C, Verutes G, Kim C K, Guannel G, Papenfus M, Toft J, Marsik M, Bernhardt J, Griffin R, Glowinski K, Chaumont N, Perelman A, Lacayo M, Mandle L, Hamel P, Vogl A L, Rogers L, Bierbower W, Denu D, Douglass J. InVEST +VERSION+ User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, 2018. <http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/html>.
- [14] 泉州市统计局, 国家统计局泉州调查队. 2015 年泉州市国民经济和社会发展统计公报. [2016-03-19]. [http://qz.fjsen.com/2016-03/31/content\\_17581097\\_all.htm](http://qz.fjsen.com/2016-03/31/content_17581097_all.htm).
- [15] 厦门市统计局, 国家统计局厦门调查队. 厦门市 2015 年国民经济和社会发展统计公报. [2016-03-22]. [http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjgb/ndgb/201603/t20160322\\_28169.htm](http://www.stats-xm.gov.cn/tjzl/tjgb/ndgb/201603/t20160322_28169.htm).
- [16] 漳州市统计局, 国家统计局漳州调查队. 漳州市 2015 年国民经济和社会发展统计公报. [2016-03-23]. [http://zz.fjsen.com/2016-03/23/content\\_17538076\\_all.htm](http://zz.fjsen.com/2016-03/23/content_17538076_all.htm).
- [17] 李芝玲. 构建闽南金三角旅游圈的战略探讨. *集美大学学报: 哲学社会科学版*, 2011, 14( 3): 55–60.
- [18] U. S. Environmental Protection Agency. Framework for Ecological Risk Assessment. EPA/630/R-92/001, Washington DC: Risk Assessment Forum, 1992: 2.
- [19] Xu X G, Lin H P, Fu Z Y. Probe into the method of regional ecological risk assessment——a case study of wetland in the Yellow River Delta in China. *Journal of Environmental Management*, 2004, 70( 3): 253–262.
- [20] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information-based Network Environ Analysis: a system perspective for ecological risk assessment. *Ecological Indicators*, 2011, 11( 6): 1664–1672.
- [21] Lozoya J P, Sardá R, Jiménez J A. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14( 6): 685–696.
- [22] Faber J H, Van Wensem J. Elaborations on the use of the ecosystem services concept for application in ecological risk assessment for soils. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 3–8.
- [23] 凌虹, 孙翔, 朱晓东, 王惠中, 李扬帆. 江苏沿海化工快速发展下区域生态风险评价模型研究. *生态环境学报*, 2010, 19( 5): 1138–1142.
- [24] Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, Melillo J M. Human domination of earth's ecosystems. *Science*, 1997, 277( 5325): 494–499.
- [25] Mitsch W J, Gosselink J G. The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics*, 2000, 35( 1): 25–33.
- [26] 国家林业局. 中国湿地资源( 福建卷). 北京: 中国林业出版社, 2015: 130–134.