海平面上升背景下的海岸带脆弱性评价

——以东营市为例

王守强[1], 周相君[2*], 朱晓彤[1], 李淑芸[1], 朱安成[2], 柳 杰[2]

（1. 自然资源部 第一海洋研究所渤海海峡生态通道野外科学观测研究站, 山东 青岛 266061;
2. 山东省海洋预报减灾中心, 山东 青岛 266104）

摘 要: 海平面上升是全球海岸带区域面临的共同威胁。构建以地面高程、地面沉降速率、沟壑密度、地表坡度、人口密度、国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）密度、建筑密度和斑块密度为指标的脆弱性评价体系，利用层次分析（Analytic Hierarchy Process, AHP）法并采用海岸带脆弱性指数模型评价了海平面上升引起的山东东营市海岸带脆弱性状况。研究结果表明：轻度脆弱区和中度脆弱区分别为 2 134.79 km^2 和 1 967.61 km^2，在评价区域中占比较大，约占评价区域的 33.09% 和 30.50%；其次为重度脆弱区和低度脆弱区，面积分别为 1 061.18 km^2 和 891.80 km^2，分别占评价区域的 16.45% 和 13.82%；极度脆弱区面积最小，为 396.31 km^2，仅占评价区域的 6.14%。东营市的县区中，东营区几乎完全被极度脆弱区与重度脆弱区覆盖，受海平面上升威胁最严重；广饶县也拥有较多的重度和极度脆弱区；河口区内部脆弱程度东高西低；垦利区脆弱度总体相对较低；利津县是脆弱程度最低的县区，辖区内绝大部分区域为低度或轻度脆弱区，没有重度或者极度脆弱的区域。东营市各地区可参考评估结果，有针对性地采取应对措施并在未来的经济发展与城区规划过程中充分考虑脆弱性评估的结果，适度规划海岸防护工程，为城市的可持续发展提供技术保障。

关键词: 海平面上升；生态经济系统；脆弱性评价；层次分析法

中图分类号: P748; X826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-3682（2022）03-0233-09

doi: 10.12362/j.issn.1002-3682.20220315001

引用格式: 王守强, 周相君, 朱晓彤, 等. 海平面上升背景下的海岸带脆弱性评价：以东营市为例[J]. 海岸工程, 2022, 41（3）: 233-241. WANG S Q, ZHOU X J, ZHU X T, et al. Assessment of coastal zone vulnerability in the context of sea level rise: taking Dongying City as the example[J]. Coastal Engineering, 2022, 41（3）: 233-241.

近百年来，全球变暖导致海面上升，沿海地区生态经济系统正以前所未有的速度发生显著变化。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的第 6 次气候变化评估报告指出，目前的海平面上升处于加速状态，并会在未来持续上升且呈现不可逆趋势[1]。1980 年至 2020 年这 40 a 来，中国沿海海平面上升呈加速趋势，平均上升速率为 3.4 mm/a，高于同期全球平均海平面上升速率（3.1 mm/a）；其中 2011 年至 2020 年这 10 a 间中国沿海平均海平面持续处于高位[2]。海平面上升的长期累积效应会增加咸潮入侵、风暴潮和海岸侵蚀等海洋灾害的发生频率以及加剧其危害程度，影响海岸带地区的生态经济系统和海洋经济发展[3-5]。

为评估自然灾害和环境变化的区域影响程度，生态经济系统和社会经济系统研究者提出了系统承受外界条件改变能力的脆弱性（Vulnerability）概念。1981 年 Timmerman 将脆弱性概念引入地学领域[6]，由于研究对象和研究视角不同，目前不同研究领域界定“脆弱性”概念的角度和方式，以及概念的内涵有很大差异[7]。海平面上升导致的海岸带生态经济系统脆弱性是指海平面上升导致的海岸带生态系统结构和功能的异常变化与社会经济系统的不稳定特征。脆弱的海岸带生态经济系统自我恢复和再生能力较差，致使人类适应脆

收稿日期: 2022-03-15

资助项目: 中国典型河口生物多样性保护、修复和保护区网络建设示范项目（全球环境基金-联合国粮农组织 GCP/CPR/045/GFF）

作者简介: 王守强（1982—）, 男, 工程师, 硕士, 主要从事海岸带管理方面研究. E-mail: wangshouqiang@fio.org.cn

*** 通信作者:** 周相君（1989—）, 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋生态保护与灾害防控方面研究. E-mail: zxj267@126.com

（王 燕 编辑）

弱的海岸带生态经济系统能力有限。因此，评价和研究全球变化背景下的区域海岸带生态经济系统脆弱性，对海岸带地区实现区域可持续发展目标具有重要意义。

我国已开展了大量海平面上升对沿海地区影响的研究。例如：以沿海县级行政区域为评估单元，从海岸带自然环境和社会经济两方面，综合评价海平面上升背景下我国海岸带地区的生态经济系统脆弱性及区域差异[8]；用静态情景模拟与基于地理信息系统（Geographic Information System, GIS）淹没分析相结合的情景分析方法综合评价中国海岸带典型区域长江三角洲在全球气候变化背景下的脆弱性特征[9]；运用源-路径-受体-影响（Source-Pathway-Receptor-Consequences, SPRC）模型构建中国沿海地区发展脆弱性评价指标体系，分析海平面上升对沿海地区发展脆弱性的影响及机理[10]；构建沿海发展脆弱性评价指标体系，利用投影寻踪聚类模型综合评价沿海地区发展的脆弱性，分析海平面上升对沿海地区资源环境和社会经济发展的影响[11]；评估海平面上升对天津滨海新区各海洋功能区社会经济发展的影响和风险[12]。基于韧性城市理论构建海平面上升影响及韧性评价模式，以厦门市为例开展不同时间情景下的海平面上升影响分析及韧性评估[13]。基于 IPCC 气候变化综合风险理论框架，构建了“暴露度-敏感性-适应性”脆弱性评价指标体系，评估海平面上升和台风事件背景下海南东寨港红树林生态系统的脆弱性主要特征[14]；通过确定滨海湿地的高程资本，分析滨海湿地高程相对海平面上升的变化趋势，揭示控制高程变化的地表和地下过程，以此来预测未来滨海湿地对海平面上升的响应[15]。

国外也取得了一系列海平面上升对沿海地区影响的研究成果。例如：选定暴露度、敏感性和恢复力三类代表沿海物理、社会经济特征的 17 个参数定制海平面上升的海岸带脆弱性指数（Coastal Vulnerability Index, CVI）评价模型，利用 GIS 和遥感技术（Remote Sensing, RS）和 CVI 将非洲沿海地区划分为不同脆弱性程度的区域[16]；使用美国 10 个潮汐沼泽地表高程表将水位上升与沼泽地表高程变化率进行比较，研究沼泽类型和地貌环境对高程变化、地表吸积、地下变化、沼泽海拔、与河道的距离以及潮差的影响[17]；根据海平面上升 2.8 m 的总增幅评估脆弱区，使用层次分析法确定更大上升范围的影响，并利用地理数据处理和研究区域的数字地形模型，在 GIS 环境中模拟出了最脆弱区域[18]；使用 4 个社会经济变量和 8 个地质变量，基于随机森林模型（Random Forest, RF）选择 4 种不同迭代方法将所有变量基于像素的差分加权等级值积分，以确定影响海岸脆弱性指数的重要因素，评估发展和社会经济活动在海岸脆弱性分析中的作用[19]；在假设不确定海平面是否上升情况下，利用地理信息系统技术，Landsat 7 ETM+在内的无云卫星影像遥感数据、高程数据以及行政边界地图、铁路和公路网、灌溉和城市区划图等其他专题地区数据估算了埃及达米埃塔（Damietta）海岸的海岸线后退情况并评估了海平面上升的影响[20]；根据印度尼西亚巴伦−巴波东嘎（Baron-Pok Tunggal）海岸类型，采用海岸脆弱性指数方法，结合多个机构的建模和预测结果推导出的平均显著波高、平均潮差、平均海平面上升等流体动力因子，以及通过观测、系统采样的野外直接测量、航拍照片提取和数字地表模型（Digital Surface Model, DSM）等方法获得的地貌、海岸坡度、合并海滩平均宽度等形态动力学因子评估海岸脆弱性水平，确定基于脆弱性特征的海岸管理模式[21]。利用基于 GIS 的综合指数法，分析识别了 5 个物理变量（地貌、海拔、绝对海平面上升、侵蚀−沉积、潮差）和 1 个社会变量（人口密度），评估了印度孙德尔本斯（Sundarbans）海岸带地区的脆弱程度[22]。

海平面加速上升的趋势目前难以遏制，其对海岸带区域的影响也不容忽视，我们需要对其引起的海岸带脆弱性进行科学评估，以便提前布局规划一些针对性措施。东营市作为黄河入海口，其独特的地理条件和发达的社会经济发展水平决定了其海岸带对海平面上升的敏感度更高。开展东营市的海岸带脆弱性评估，为海岸带防灾减灾和城市发展规划提出科学建议，提高东营市的可持续发展潜力，是落实中央《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》的重要工作。

1 研究区概况

山东省东营市是我国重要的石油化工基地，胜利油田 80% 的石油地质储量和 85% 的产量集中在东营[23]，

所以东营市经济发达, 人均生产总值居山东首位、全国前列。该市常住人口数量保持稳步增长, 截至 2021 年末, 常住人口数量达 219.50 万。东营市地处中纬度, 背陆面海, 属暖温带季风型大陆性气候, 降水量季节与年际变化大, 易形成旱、涝灾害, 而且该市海岸线覆盖范围广, 全长 413 km, 所有区县均与海为邻, 在享受海洋带来的资源与便利的同时也直面着海洋带来的各种风险。

东营市地处黄河三角洲中心位置, 黄河穿境而过, 地势沿黄河走向自西南向东北倾斜, 总体地势低平, 平均海拔仅 8.8 m, 是山东省平均海拔最低的沿海城市, 也是我国沿海最年轻的陆地城市, 全市“0” m 至岸线的滩涂面积为 1 019 km^2, —10 m 等深线以内浅海面积为 4 800 km^2。河海交汇的优越条件形成了完整、广阔、丰富的湿地生态系统, 这里建有包括黄河三角洲国家级自然保护区在内的 6 个国家级自然保护区, 是候鸟沿东亚—澳大利西亚和环西太平洋两条迁徙路线迁徙时的中转站、觅食地和繁殖地, 目前已记录的鸟类种类已达 371 种。受黄河尾闾河道频繁摆动、海岸侵蚀、河口淤积、植被演替和土壤发育等自然过程的影响, 东营成为黄河流域环境动力系统最复杂、生态系统最脆弱的地带之一[24]。

东营市的自然地理条件决定了其易受洪涝与风暴潮等灾害的影响, 尤其是叠加上海平面上升等因素, 会加重其危害程度和范围。东营市发达的社会经济发展水平和多样的湿地生态系统在面对海平面上升时, 也显得尤为敏感与脆弱。因此, 东营市未来的发展规划与布局必须充分考虑海岸带脆弱性水平, 及时开展海平面上升背景下的海岸带脆弱性评估。

2　评价方法

根据山东省东营市生态经济系统和社会经济发展实际情况, 遵循以人为本原则, 从人类承受能力角度评估海平面上升造成的海岸带脆弱性, 选择地面高程、地面沉降速率、沟壑密度、地表坡度等自然因子, 以及人口密度、国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)密度、建筑密度和斑块密度等社会经济因子这 2 类因子指标构建海平面上升脆弱性评价指标体系, 用层次分析(Analytic Hierarchy Process, AHP)法确定评价指标权重, 将各指标数据标准化处理后, 借助 GIS 平台采用海岸带脆弱性指数(Coastal Vulnerability Index, CVI)评价模型, 定量评价海平面上升背景下山东省东营市海岸带的脆弱性, 并划分脆弱区、分析各脆弱区的脆弱性特征和区域差异, 为东营市应对海平面上升和气候变化, 实现区域可持续发展提供参考。

2.1　评价指标选取和评价指标体系的构建

构建海平面上升引起的海岸带脆弱性评价指标体系和评价模型涉及自然、社会、经济诸多方面, 选取参评指标时要尽量兼顾各种影响因素, 全面反映海平面上升引起的海岸带脆弱性的本质特征。参考国内外相关研究成果[9-22], 结合东营市的实际情况, 根据区域生态经济系统对海平面上升及引起的海洋灾害敏感程度, 选择自然因子和社会经济因子两类评价指标, 构建评价指标体系(图 1)。其中, 自然因子类指标主要体现海平面上升对海岸带生态经济系统的压力, 社会经济因子类指标主要体现海平面上升对海岸带人类经济活动的影响。

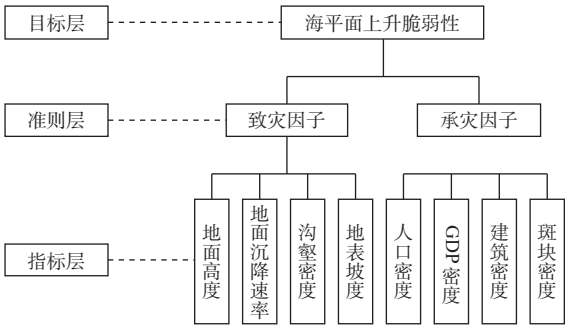

图 1　海平面上升引起的海岸带脆弱性评价指标体系

Fig. 1　Assessment index system of coastal zone vulnerability caused by sea level rise

2.2　评价方法

2.2.1　计算评价指标权重

评价运算前, 采用 AHP 法计算各评价指标的权重。首先根据东营市实际情况按层次用九标度法对各项

指标进行专家量化打分(1～9 分),再分层次构造判断矩阵,计算各指标的相对重要性。然后进行层次排序及一致性检验,通过一致性检验后确定各层次评价指标的权重。最后由 3 位专家分别打分,计算得到权重取算数平均值得到最终的各项指标权重(表 1)。

表 1 东营市海平面上升导致的海岸带脆弱性评价指标体系

Table 1 Assessment index system of coastal zone vulnerability caused by sea level rise in Dongying City

目标层	准则层	指标层	指标特征	权 重
海岸带脆弱性	自然因子	地面高程	负向指标	0.33
		地面沉降速率	正向指标	0.18
		沟壑密度	正向指标	0.08
		地表坡度	负向指标	0.04
	社会经济因子	人口密度	正向指标	0.17
		GDP 密度	正向指标	0.09
		建筑密度	正向指标	0.05
		斑块密度	正向指标	0.03

2.2.2 数据来源及数据预处理

评价采用的高程数据源自国际科学数据服务平台 90 m 分辨率数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据,地面沉降数据源自 2019 年东营市地面沉降监测数据[25],沟壑密度和地面坡度是从东营市 DEM 数据提取后,进一步筛选分析并插值处理后的数据,人口密度和 GDP 密度源自中国科学院资源环境科学与数据中心 2019 年中国人口空间分布公里网格数据集[26] 和中国 GDP 空间分布公里网格数据集[26],建筑密度和斑块密度是筛选中国科学院资源环境科学与数据中心 2020 年中国土地利用遥感监测数据[26] 并运算得到的,以上所有数据最终在 GIS 平台中通过掩膜提取保持与东营市地理范围一致。

2.2.3 数据标准化处理

在运算前,首先采用 Min-max 标准化方法对其进行标准化处理,计算公式为:

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \tag{1}$$

式中:X'为标准化数据;X 为原始数据;$X_{\min}$ 为原始数据极小值;$X_{\max}$ 为原始数据极大值。

将数据映射在区间 [0, 1],根据原数据有效数字的要求,新数据的数值区间为 [0, 1 000],计算公式为:

$$X' = \frac{(X - X_{\min}) \times 1\,000}{X_{\max} - X_{\min}}, \tag{2}$$

式中:X'为新数据;X 为原始数据;$X_{\min}$ 为原始数据极小值;$X_{\max}$ 为原始数据极大值。

由于评价指标中既包含正向指标,又包含负向指标(表 1),为改变负向指标数据的性质,使所有指标对脆弱性评价的作用相同,还须进行正向化处理,即将原数据乘以−1 后再进行标准化处理。

2.2.4 评价模型运算

利用海岸带脆弱性指数(CVI)法计算并衡量东营市的海平面上升导致的脆弱性,脆弱性指数大小反映海岸带脆弱性程度[27],脆弱性指数的数学表达式包括“积”与“和”两种,研究发现采用“和”表达方式的脆弱性指数评价效果更好[28]。“和”表达方式的脆弱性指数计算公式为:

$$\mathrm{CVI} = \Sigma P_i \times C_i, \tag{3}$$

式中:CVI 为海平面上升引起的海岸带脆弱性指数;P_i 为某项指标的标准化数据值;C_i 为某项指标权重。

3　评价结果与分析

3.1　评价结果

采用 CVI 法在 GIS 平台中运算, 得到东营市海平面上升脆弱性各栅格单元的数值, 数值范围为 243.16～760.55, 呈近似正态分布, 即脆弱性等级大部分在中等脆弱性程度附近浮动。总体而言, 海平面上升引起的东营市脆弱性综合表现显著: 中部沿海地区最高, 这主要是由于人口、财富等受灾对象主要聚集于东营市中部主城区, 且该区域地势较低, 以及长期采油、抽取地下卤水等导致地面沉降速率大。东北部沿海区域次之, 这是因为东北部地势同样较低, 地面沉降速率也较大, 但人口密度相对较小。西部和南部内陆地区最低(图 2), 这是因为南部和西部地势较高、人口较少, 未经过剧烈开发, 地面沉降速率较低。

3.2　评价结果分析

采用 GIS 软件的自然间断点分割法对评价单元对象进行分类, 将数据中分布比较明显的"断裂"处作为分类边界点, 得到 5 个脆弱性等级(图 3)。东营市轻度脆弱区和中度脆弱区面积较大, 分别为 2 134.79 和 1 967.61 km^2, 分别约占评价区域总面积的 33.09% 和 30.50%; 其次为重度脆弱区和低度脆弱区, 分别为 1 061.18 和 891.80 km^2, 各占评价区域总面积的 16.45% 和 13.82%; 极度脆弱区面积最小, 396.31 km^2, 仅占总面积的 6.14%(表 2)。

东营市海平面上升的海岸带脆弱性由成灾因素与受灾因素共同作用所致。前者是海岸带环境与全球海平面上升交互影响而表现出压力, 偏重于自然属性; 后者则主要是生存于海岸带的人与其活动区域及其生产的财富, 偏重于人文属性。从海平面上升脆弱性空间分布格局来看, 东营市脆弱性整体处于较高水平, 尤其人口和工业比较集中的主城区和北部区域。东营市整体低平的地势和较低的平均海拔决定了在面对海平面上升时面临的风险很高。极度脆弱区域主要集中于市区主要建成区及北部孤岛镇、仙河镇等油田化工集中区域, 在相似的自然地理条件下, 更高的人口密度和经济活动集中度将面临更高的脆弱性风险。

尽管有些县区(如利津)多数区域处于低度和轻度脆弱等级, 但由于本评估结果及脆弱等级划分是基于东营本市的评估结果范围, 仅代表东营市范围内一

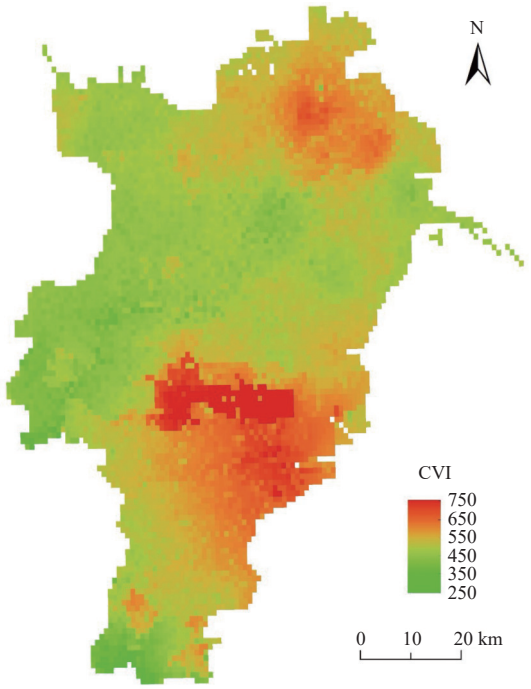

图 2　海平面上升背景下东营市海岸带脆弱性指数

Fig. 2　CVI in Dongying City in the context of sea level rise

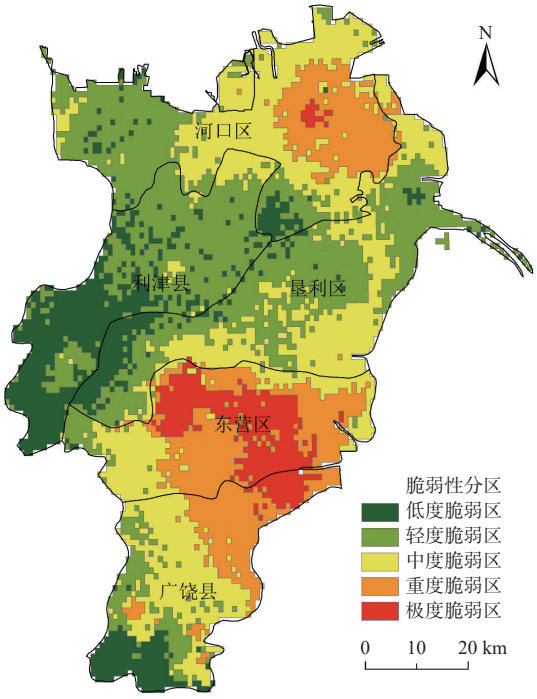

图 3　不同程度海平面上升脆弱性空间分布格局

Fig. 3　Spatial distribution patterns of vulnerable areas with different degrees

个相对结果，并不代表该区域的脆弱性可以忽视。海平面上升是未来需要重视的一个普遍性问题，其引起的海岸带脆弱性等级划分标准需要建立在更大的范围基础上。

表 2 海平面上升背景下东营市海岸带脆弱区面积及占比

Table 2 Area and proportion of the coastal zone vulnerable areas in Dongying City in the context of sea level rise

脆弱性等级	CVI 范围	面积/km^2	占比/%
低度脆弱	243.16～403.45	891.80	13.82
轻度脆弱	403.45～458.23	2 134.79	33.09
中度脆弱	458.23～525.19	1 967.61	30.50
重度脆弱	525.19～610.40	1 061.18	16.45
极度脆弱	610.40～760.55	396.31	6.14

4 结论与建议

海平面上升已经具有不可逆转的趋势，海平面上升影响沿海地区生态经济系统脆弱性形势严峻。本文利用层次分析法并采用海岸带脆弱性指数模型构建了以地面高程、地面沉降速率、沟壑密度、地表坡度、人口密度、国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）密度、建筑密度和斑块密度为指标的脆弱性评价体系，进而评估了由海平面上升引起的山东东营市脆弱性状况。基于评估结果，得出如下结论。

1）东营市海岸带脆弱性整体处于较高水平，尤其人口和工业比较集中的主城区和北部人口和工业比较集中区域。根据海平面上升引起的东营市脆弱性程度，可将全市划分为低度脆弱区、轻度脆弱区、中度脆弱区、重度脆弱区和极度脆弱区，其中，轻度脆弱区和中度脆弱区占总面积比例较大，分别为 33.09% 和 30.5%。

2）海平面上升引起的东营市脆弱性分布具有明显的区域变化趋势，呈从东北到西南递降的显著特征。

3）东营市所属县区中东营区受海平面上升的威胁最严重，几乎全部属于极度脆弱区和重度脆弱区，广饶县也是重度脆弱区域和极度脆弱区域面积较大的县区，河口区内部脆弱程度东高西低；垦利区脆弱度总体相对较低，除与东营区和河口区临近的局部区域外，几乎没有极度脆弱区和重度脆弱区；利津县是脆弱性程度最低的县区，辖区内绝大部分区域为低度脆弱区或轻度脆弱区。

海平面上升背景下的东营市海岸带脆弱性既受全球气候变化与海平面上升等自然致灾因素影响，也与海岸带区域的人类活动息息相关。在全球气候变化与海平面上升这些持续且不可逆的趋势下，预先开展相关的科学研究，加强监控与预测的能力，构建科学、合理的应对与化解机制十分必要。海岸带区域作为受气候变化和海平面上升影响最明显的区域，深入开展脆弱性评估与应对研究非常必要。

东营市海岸带脆弱性评估结果可供东营市各地区管理部门决策参考，为未来经济发展与城区规划决策过程提供依据。根据评估结果，结合东营市海岸带状况，提出以下建议。

1）不同区域可结合本地目前的人口、产业分布，根据以上分析评估结果，有针对性地采取相应措施。可在极度脆弱区和重度脆弱区布局海岸防护工程，保护沿海防护林及滨海湿地，建设生态海堤，提高应对海平面上升带来的自然灾害强度与频率增加等的能力。

2）重视对海平面上升导致的海洋灾害研究，建立权责明晰的海洋防灾减灾体制，加大海洋防灾减灾投入。

3）建设和完善区域海洋观测网络，将海平面上升导致的生态脆弱区作为重点监控区域。

4）将海平面上升脆弱性评价纳入区域发展与管理决策体系，对不同脆弱等级区域制定不同的处置和应对策略，应对海平面上升引起的生态经济系统脆弱性加剧问题。

5）应科学规划与管控地下卤水及石油开采，缓解地面沉降，降低相对海平面上升速率，尽量避免在极度

脆弱区和重度脆弱区域布局大规模生产与生活区[29], 沿海区域城市规划严格遵循海岸建筑退缩线制度的管控要求, 在充分论证海平面上升、风暴潮、海水入侵、海岸侵蚀等海洋灾害最新影响范围基础上, 确保将重点地区纳入核心退缩区, 以减轻各类海洋灾害及次生灾害的威胁。

本评估结果中最终等级的划分基于评估区域内的数据, 是一个区域内的相对结果。在将来的海岸带防灾减灾实践中, 进一步深入开展海岸带脆弱性评估具有重要意义, 尤其是扩展研究区域, 并制定一定的评估标准, 可以获得更加准确并可横向比较的结果, 为全国的海岸带经济发展规划及防灾减灾工作提供支持。

参考文献 (References):

[1] FOX-KEMPER B, HEWITT H T, XIAO C, et al. Ocean, cryosphere and sea level change[M]//MASSON-DELMOTTE V P, ZHAI A, PIRANI S L, et al. Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021: 1211-1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011.

[2] Department of Marine Early Warning and Monitoring, Ministry of Natural Resources. China sea level bulletin 2020[EB/OL]. (2021-04-26)[2022-04-22]. http://gi.mnr.gov.cn/202104/t20210426_2630186.html. 自然资源部海洋预警监测司. 2020年中国海平面公报[EB/OL]. (2021-04-26)[2022-04-22]. http://gi.mnr.gov.cn/202104/t20210426_2630186.html.

[3] 黄光玮, 匡翠萍, 顾杰, 等. 海平面上升对珠江口咸潮入侵的影响[J]. 水动力学研究与进展, 2021, 36(3): 370-379. HUANG G W, KUANG C P, GU J, et al. Impact of sea level rise on saltwater intrusion in the Pearl River Estuary[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(3): 370-379.

[4] 张敏, 米婕, 戴志军, 等. 海平面上升对北部湾风暴潮增水影响研究——以2012 年台风“山神”为例[J]. 海洋通报, 2021, 40(3): 309-318. ZHANG M, MI J, DAI Z J, et al. Impacts of sea-level rise on storm surge in the Beibu Gulf: a case study on Typhoon Son-Tinh in 2012[J]. Marine Science Bulletin, 2021, 40(3): 309-318.

[5] 左健忠, 韩雪, 潘锡山, 等. 海平面变化对江苏沿海的影响分析[J]. 淮海工学院学报(自然科学版), 2019, 28(4): 81-86. ZUO J Z, HAN X, PAN X S, et al. Analysis of the influence of sea level change on Jiangsu Coastal Area[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology (Natural Science Edition), 2019, 28(4): 81-86.

[6] TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of models and possible climatic applications[M]. Toronto, Canada: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.

[7] 李鹤, 张平宇, 程叶青, 等. 脆弱性的概念及其评价方法[J]. 地理科学进展, 2008, 27(2): 18-25. LI H, ZHANG P Y, CHENG Y Q, et al. Concepts and assessment methods of vulnerability[J]. Progress in Geography, 2008, 27(2): 18-25.

[8] 李响, 段晓峰, 张增健, 等. 中国沿海地区海平面上升脆弱性区划[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 103-109. LI X, DUAN X F, ZHANG Z J, et al. The vulnerability zoning research on the sea level rise of Chinese Coastal[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 103-109.

[9] 王洁, 王卫安, 王守芬. 气候变化背景下中国沿海地区典型区域脆弱性评价——以长三角为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2017, 40(3): 81-89. WANG J, WANG W A, WANG S F. Climate change and coastal vulnerability assessment: a case study of China’s Yangtze River delta region[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2017, 40(3): 81-89.

[10] 张栋杨, 黄健元, 焦嫚. 海平面上升对沿海地区发展脆弱性影响评价[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(4): 63-69. ZHANG D Y, HUANG J Y, JIAO M. Assessment of coastal areas vulnerability under sea level rise[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2018, 38(4): 63-69.

[11] 焦嫚, 张栋杨. 海平面上升情景下沿海地区发展脆弱性评价[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 41-47. JIAO M, ZHANG D Y. The vulnerability assessment on the development of the coastal area in the context of sea level rise[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 41-47.

[12] 李杰, 谭晓璇, 李响, 等. 天津沿海海平面上升影响风险等级研究[J]. 海洋开发与管理, 2022(1): 49-53. LI J, TAN X X, LI X, et al. Risk level study on the impact of sea level rise along the coast of Tianjin[J]. Ocean Development and Management, 2022(1): 49-53.

[13] 陈奇放, 翟国方, 施益军. 韧性城市视角下海平面上升对沿海城市的影响及对策研究——以厦门市为例[J]. 现代城市研究, 2020(2): 106-116. CHEN Q F, ZHAI G F, SHI Y J. The impacts of sea level rise on coastal cities and measures from the perspective of resilience city: a case study of Xiamen[J]. Modern Urban Research, 2020(2): 106-116.

[14] 颜秀花, 蔡榕硕, 郭海峡, 等. 气候变化背景下海南东寨港红树林生态系统的脆弱性评估[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(3): 338-349. YAN X H, CAI R S, GUO H X, et al. Vulnerability of Hainan Dongzhaigang mangrove ecosystem to the climate change[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(3): 338-349.

[15] 王国栋, 赵延彤, 赵美玲, 等. 评估滨海湿地应对海平面上升的脆弱性的研究范式[J]. 湿地科学, 2021, 19(1): 59-63. WANG G D, ZHAO Y T, ZHAO M L, et al. A research paradigm for assessing the vulnerability of coastal wetlands to sea level rise[J]. Wetland Science, 2021, 19(1): 59-63.

[16] EL-SHAHAT S, EL-ZAFARANY A M, EL SEOUD T A, et al. Vulnerability assessment of African coasts to sea level rise using GIS and remote sensing[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(2): 2827-2845.

[17] HAAF L, WATSON E B, ELSEY-QUIRK T, et al. Sediment accumulation, elevation change, and the vulnerability of tidal marshes in the Delaware Estuary and Barnegat Bay to accelerated sea level rise[J]. Estuaries and Coasts, 2022, 45(2): 413-427.

[18] ARAUJO J C, DIAS F F. Multicriterial method of AHP analysis for the identification of coastal vulnerability regarding the rise of sea level: case study in Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil[J]. Natural Hazards, 2021, 107(1): 53-72.

[19] PRAMANIK M K, DASH P, BEHAL D. Improving outcomes for socioeconomic variables with coastal vulnerability index under significant sea-level rise: an approach from Mumbai coasts[J]. Environment, Development and Sustainability, 2021, 23(9): 13819-13853.

[20] SAMRA R M A, EL-GAMMAL M, AL-MUTAIRI N, et al. GIS-based approach to estimate sea level rise impacts on Damietta coast, Egypt[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(6): 429-1-429-13.

[21] WIDURA E, MARDIATNO D. Assessment of the coastal vulnerability index (CVI) for disaster mitigation strategies in some coastal tourism areas in Gunungkidul, Yogyakarta-Indonesia[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science, 2022, 989: 012014-9-012014-9.

[22] BERA R, MAITI R. An assessment of coastal vulnerability using geospatial techniques[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(8): 306-1-306-18.

[23] 刘沛, 张朝晖, 王晶, 等. 山东省东营市海岸带状况报告[M]. 北京: 海洋出版社, 2013. LIU P, ZHANG Z H, WANG J, et al. State of the coast report of Dongying, Shandong Province[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013.

[24] 张高生, 王仁卿. 现代黄河三角洲生态经济系统的动态监测[J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 380-384. ZHANG G S, WANG R Q. Research on dynamic monitoring of ecological environment in modern Yellow River Delta[J]. China Environmental Science, 2008, 28(4): 380-384.

[25] 钟储汉, 王强, 王霞迎, 等. 基于InSAR技术的东营市地面沉降监测及多诱发因素分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(7): 727-731. ZHONG C H, WANG Q, WANG X Y, et al. Surface displacement monitoring and inducing factors analysis of Dongying City base on InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(7): 727-731.

[26] 中国科学院资源环境科学与数据中心 [EB/OL]. [2022-03-13]. https://www.resdc.cn/. Resource and Environment Science and Data Center, Chinese Academy of Sciences[EB/OL]. [2022-03-13].https://www.resdc.cn/.

[27] GORNITZ V. Global coastal hazards from future sea level rise[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 89(4): 379-398.

[28] 刘宏伟, 孙晓明, 文冬光, 等. 基于脆弱指数法的曹妃甸海岸带脆弱性评价[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 105-109. LIU H W, SUN X M, WEN D G, et al. Vulnerability evaluation of the Caofeidian coastal area based on coastal vulnerability index method[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 105-109.

[29] 山东省自然资源厅, 山东省发展和改革委员会, 山东省工业和信息化厅, 等. 关于建立实施山东省海岸建筑退缩线制度的通知[EB/OL]. (2022-01-10)[2022-07-15]. http://dnr.shandong.gov.cn/zwgk_324/xxgkml/ywdt/tzgg_29303/202202/t20220221_3861289.html. Shandong Provincial Department of Natural Resources, et al. Notice on establishment and implementation of coastal building retreat line system in Shandong Province [EB/OL]. (2022-01-10)[2022-07-15]. http://dnr.shandong.gov.cn/zwgk_324/xxgkml/ywdt/tzgg_29303/202202/t20220221_3861289.html.

Assessment of Coastal Zone Vulnerability in the Context of Sea Level Rise: Taking Dongying City as the Example

WANG Shou-qiang[1], ZHOU Xiang-jun[2], ZHU Xiao-tong[1], LI Shu-yun[1], ZHU An-cheng[2], LIU Jie[2]

(1. *Observation and Research Station of Bohai Eco-Corridor*, *First Institute of Oceanography*, *MNR*, Qingdao 266061, China;
2. *Shandong Marine Forecast and Hazard Mitigation Service*, Qingdao 266104, China)

Abstract: Sea level rise is a common threat to all coastal zones in the world. By establishing a vulnerability assessment system which takes parameters such as ground elevation, land subsidence rate, gully density, surface slope, population density, gross domestic product (GDP) density, building density and patch density as the indicators and by using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and the coastal area vulnerability index model, the vulnerability situation of the coastal zone caused by the sea-level rising in Dongying City, Shandong Province is evaluated. The results show that the mild and moderately vulnerable areas are 2 134.79 km^2 and 1 967.61 km^2 respectively, accounting for a relatively large proportion in the evaluation area and making up about 33.09% and 30.50% of the evaluation area respectively. The heavy and low-degree vulnerable areas have an area of 1 061.18 km^2 and 891.80 km^2 respectively, making up 16.45% and 13.82% of the evaluation area respectively. The extremely vulnerable area is the smallest, being 396.31 km^2 and accounting for only 6.14% of the evaluation area. Among the counties and districts of Dongying City, Dongying District is almost completely covered by the heavy and extremely vulnerable areas, indicating that this district would be most seriously threatened by the sea level rise. In Guangrao County there are also many areas belonging to the heavy and extremely vulnerable areas. Within Hekou District the vulnerability degree is high in the east and low in the west. The vulnerability in Kenli District is in general relatively low. Lijin County is the area where the vulnerability is the lowest, with most parts of the county belonging to the mild and low-degree vulnerable areas and having no the heavy or extremely vulnerable areas. The results of the vulnerability assessment should be fully taken into account in the process of future economic development and urban planning in each district and county of Dongying City, so that the targeted response measures could be taken. This study can provide technical support for moderate planning of coastal protection projects and sustainable development of the city.

Key words: sea level rise; ecological and economic system; vulnerability assessment; Analytic Hierarchy Process (AHP) method

Received: March 15, 2022