

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2022.03.009

基于生长漂移预测模型的浒苔灾害风险动态评估方法研究

高 硕¹, 靳熙芳², 张盼盼³, 艾 波^{1*}

(1. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061; 3. 国家海洋技术中心, 天津 300112)

摘要: 自2008年以来, 浒苔大规模爆发生长已经成为黄海海域最严重的海洋生态灾害, 对沿海地区社会经济发展构成严重威胁。本文基于生长漂移预测模型对浒苔时空动态发展趋势进行预测, 并将预测结果引入到由致险因子危险性和承灾体脆弱性构建的浒苔灾害风险动态评估方法体系中, 同时实现具有灾害预警、多源数据处理与存储、可视化展示等功能的灾害风险评估系统。区别于一般的静态评估方法, 该方法既能融合影响浒苔灾害风险态势的动态数据, 又能够根据浒苔灾害的成灾机理建立具有代表性的指标体系。通过此动态评估方法可为防灾减灾部门提供决策支持, 为科学防治浒苔灾害提供理论依据。

关键词: 浒苔灾害; 漂移预测; 风险动态评估; 致险因子

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2022) 03-0075-08

自2008年以来, 浒苔灾害在我国黄海海域连续爆发, 严重威胁我国沿海部分地区的生产生活, 成为我国主要的海洋生态灾害之一。浒苔具有快速吸收营养物质、繁殖方式多样、生长速度快等特点^[1]。在适宜环境下爆发性增殖会造成景观破坏、设备损坏及环境污染等次生事件。浒苔在海面漂浮移动又同时受季风风向及海流的影响, 这样的特性导致其对承灾体造成一种动态的、持续的风险, 而传统的灾害风险静态评估方法, 无法模拟浒苔灾害的不确定性和动态过程。

当前国内学者针对海洋灾害风险评估进行了大量的研究工作。其中, 在海洋生态灾害方面, 文世勇等^[2]阐述了赤潮灾害风险评估的定义, 通过论述赤潮灾害风险评估指标体系, 最终建立赤潮灾害风险评估的技术流程。在海洋动力灾害方面, 殷杰^[3]提出了台风风暴潮灾害风险评估的理论模型与方法

体系, 针对台风风暴潮灾害影响的多种时空尺度和区域特征, 分别采用适宜的评估方法开展了中国沿海地带的台风风暴潮灾害综合风险评估。在海洋水文气象灾害方面, 解翠等^[4]结合地理环境信息和历史灾害记录, 采用改进的风险评估方法, 实现海啸可视化及灾害风险评估。专家学者通过对各类海洋灾害的特点建立了不同的风险评估方法。由于浒苔灾害发生机理较为复杂, 当前还缺少浒苔灾害风险评估相关的探索。

为提高相关应急部门防灾减灾能力, 降低承灾区域的灾害风险, 本文建立了浒苔灾害风险动态评估模型, 首先通过浒苔生长漂移预测模型实现对浒苔生长漂移过程的推测和模拟, 再从致险因子的危险性和承灾体脆弱性角度出发构建评估指标体系, 并通过客观赋权的层次分析法确立指标权重, 最后结合相关的动态数据实现对浒苔灾害风险动态的评估。

收稿日期: 2022-03-22

作者简介: 高硕 (1990—), 男, 硕士研究生, 从事地理信息可视化方面的理论研究。E-mail: cppgaoshuo@163.com

通讯作者: 艾波 (1979—), 男, 博士, 教授, 从事海洋时空分析和动态可视化研究。E-mail: aibogis@163.com

1 浒苔生长漂移预测模型

浒苔生长漂移预测模型是结合浒苔生物学特性、海洋环境数值预报和北海区三维生态水动力学模型,实现对浒苔漂移路径、影响范围和生物量变化的数值模拟。该模型主要分为两个部分:漂移运输模块和生态模块。

1.1 漂移运输模块

漂移运输模块主要实现浒苔漂移轨迹和分布范围的预测。浒苔在海面漂浮且自身并不具备运动能力。国内外学者针对浒苔漂移轨迹变化规律及驱动因素进行了大量的研究,其中高松等^[5]通过研究对比相邻年份浒苔漂移路径的不同,发现主要是由浒苔发生海域的季风差异及其引起的海表面环流差异共同作用所导致的结果。张广宗等^[6]通过综合利用环境卫星(HJ-1A/1B) CCD影像与MODIS影像发现浒苔中心点漂移方位年际差异较大,整体上浒苔漂移路径方向与海面风风向高度一致。黄娟等^[7]通过对黄海绿潮进行数值模拟分析,发现其漂移轨迹和海流存在密切关系。建立浒苔漂移运输模块需要考虑风、海浪和海流的作用。

本文中浒苔漂移预测模型中的运输模块是采用Lagrange粒子追踪算法来实现,将浒苔斑块视为受海面风场和表层海流共同驱动的质点粒子,利用随机走动模式来模拟粒子的轨迹,数值求解粒子的Lagrange方程,确定每个粒子的位移,实现浒苔粒子的动态追踪。并且忽略粒子加速、转向过程,浒苔粒子的运动位移变量见式(1)。

$$\Delta \vec{S} = (C_d^w \times \vec{U}_w + C_d^c \times \vec{U}_c) \times \Delta t \quad (1)$$

式中, \vec{S} 表示粒子的位移量; C_d^w 表示风作用系数; C_d^c 表示流作用系数; \vec{U}_w 表示风速; \vec{U}_c 表示流速; Δt 表示单位时间。

1.2 生态模块

生态模块主要用来实现浒苔相对生物量变化的模拟。通过研究对比发现浒苔每年初始位置多集中在江苏省盐城市附近海域,在浒苔受风、流等外界强迫驱动下,漂移方向整体上为向北进入山东半岛海域^[8],浒苔漂移扩散到其他海域后促进浒苔生长

和死亡变化的海洋环境也随之变化。众多学者开展了海洋水文气象环境对浒苔生长变化影响的研究,其中张晓红^[9]研究发现,浒苔具有典型的潮间带海藻的光合特性,最适生长的温度范围是20~27℃,在23℃条件下,最大净光合速率最高。庞秋婷等^[9]为探究营养盐对浒苔生长的影响,开展了一系列实验,发现浒苔对营养盐有极强的吸收能力,充足、连续的营养盐补充是浒苔绿潮爆发的物质基础。吴洪喜等^[10]研究发现浒苔在5 000~6 000 lx光照强度下生长最快。通过以上这些研究可以发现,海水温度、光照强度和营养盐浓度等因素对于浒苔生长起到至关重要的作用。因此,黄海浒苔的生物量变化见式(2)。

$$\Delta V_i = C_{\max} \times (C_{temp} \times C_{light} \times C_{nutr}) \times V_i \times \Delta t \quad (2)$$

式中, ΔV_i 表示单位时间浒苔生物量变化; C_{\max} 表示最大生长率; C_{temp} 表示温度限制系数; C_{light} 表示光照限制系数; C_{nutr} 表示营养盐限制系数; V_i 表示斑块生物量。

通过浒苔生长漂移预测模型进行浒苔分布范围和生物量变化模拟并进行结果验证,选取2021年6月上旬中卫星遥感结果受天气影响较小的浒苔监测数据,对未来一段时间内浒苔生长漂移结果进行预测,如图1所示。6月7日浒苔主要集中在江苏盐城东北部海域35°N线附近,并开始聚集生长,零星浒苔分布在南通市海域附近,此时东南季风为主导的风向和表层海流,使浒苔整体向西北方向漂移。6月9日浒苔主体在35°N—36°N线之间靠近山东半岛沿岸,其前锋越过36°N线,浒苔整体向东西两向扩展,并有少量浒苔开始登滩。6月11日浒苔大部分抵达山东半岛沿岸并向岸堆积,零星分布的浒苔向浒苔主体聚集。6月13日受海水温度上升等因素的影响浒苔繁殖达到最盛期,开始大范围增殖,浒苔主体在35°N—37°N,生物量和覆盖面积开始骤然增大,预测的覆盖范围与实际监测的覆盖范围重叠区域达到78%。

2 浒苔灾害风险动态评估模型

浒苔灾害风险动态评估指标体系建立的基本原则,首先,通过对浒苔致灾机理与灾害特点进行分析,科学合理地选取符合浒苔灾害形成机制的指

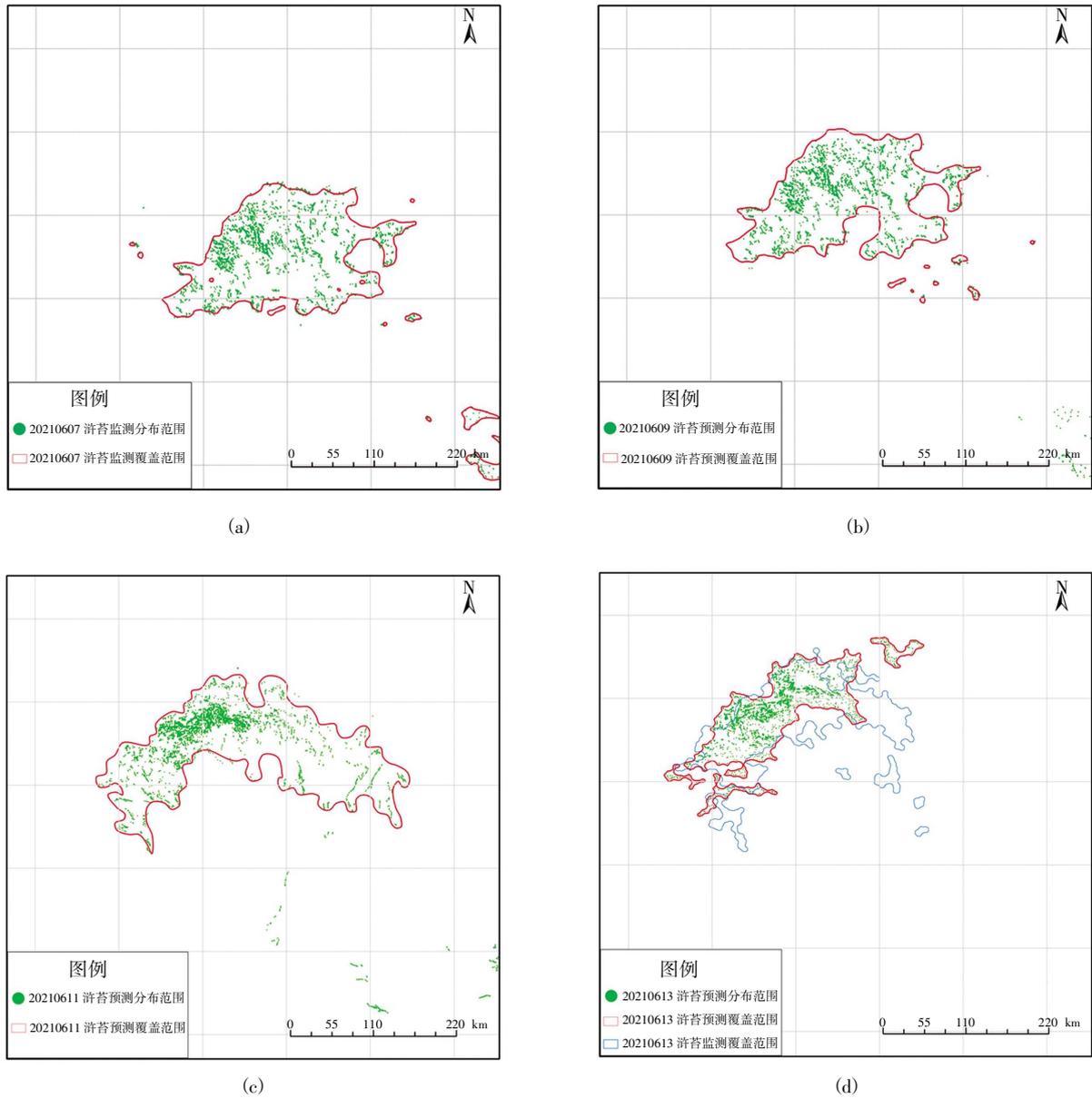


图1 2021年6月7—13日浒苔生长漂移预测结果

标。其次，指标选取过程应确保不同类型的指标具有互斥性，不会相互包含或重叠，从而避免出现重要的指标遗漏，影响评估结果的准确。最后，选取适宜量化的指标来减少主观因素对风险评价结果的影响，使浒苔灾害评估过程中所得评价结果更加准确清晰，如表1所示。通过指标体系中的致险要素和海洋水文气象等动态数据结合实现对浒苔灾害风险动态评估。

2.1 致险因子危险性

浒苔灾害的致险因子形成机理复杂，其对于承灾体危险性的不确定性评估需要通过层次分析法结合定性知识与定量数据，既要考虑到每个危险因子

的概率，也要考虑到和其他因子相互关联的依赖关系。本文构建的危险性评价体系包括：海洋水文气象环境要素变化对浒苔漂移和生长过程造成影响的孕灾环境危险性，浒苔灾害形成的规模和受灾区域历史灾情等组成的灾情危险性，承灾体构建的预警区域与浒苔分布范围空间上相对位置关系的预警区危险性共同组成，其中各要素之间关联耦合共同组成危险性系统的架构。

2.1.1 孕灾环境危险性

孕灾环境危险性主要是浒苔的自身生长因素和漂移因素对承灾体构成的威胁。承灾体所处的空间位置大多处于潮间带和近海区域，其空间分布较为

表1 灾害风险评估指标体系表

目标层	准则层	指标层	
		一级指标	二级指标
浒苔灾害风险评估	致灾因子危险性	灾情危险性	灾害等级
			历史灾害发生频次
		浒苔距离承灾体最近距离	
		监测覆盖率	
		预测覆盖率	
	孕灾环境危险性	核心区覆盖时长	
		海水温度	
		海水营养盐浓度	
	承灾体脆弱性	自然属性	海面风速
			水域自净能力
社会人文价值		功能类型	
		资源价值	
		重要程度	
管理需求	社会繁荣度		

分散具有不规则性和差异性的特点,这就为空间上对动态水文气象要素统计带来了困难。为更加准确、细致地统计水文要素空间上的分布特征,以此推断其对浒苔漂移生长的影响,本文将所研究海域进行空间细化并构建格网,并对每个格网水温、营养盐浓度、风速的值进行分析计算,通过不同种类的承灾体在研究海域上构建缓冲区,再利用构建的缓冲区与浒苔监测和漂移预测范围相交区域来捕捉区域内网格水文气象数据值,并结合其与浒苔灾害风险隶属度,见式(3)至式(5),最终得到孕灾环境危险性实际值。

$$T(x) = \begin{cases} e^{-\left(\frac{x-23}{8}\right)^2}, & 10 \leq x < 23 \\ e^{-\left(\frac{x-23}{2}\right)^2}, & 23 \leq x \leq 30 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $T(x)$ 代表海水温度与浒苔灾害风险隶属度; x 代表海水温度。

$$S(y) = \begin{cases} 0, & y < 7.2 \text{ 或 } y > 53.5 \\ e^{-\left(\frac{y-24}{5}\right)^2}, & 7.2 \leq y < 24 \\ e^{-\left(\frac{y-24}{9}\right)^2}, & 24 \leq y \leq 53.5 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $S(y)$ 代表海水营养盐浓度与浒苔灾害风险隶属度; y 代表营养盐浓度。

$$W(z) = 1 - e^{-z/15}, z \geq 0 \quad (5)$$

式中, $W(z)$ 代表海面风速与浒苔灾害风险隶属度; z 代表海面风速。

2.1.2 灾情危险性

灾情危险性是结合历史灾害发生的情况和当下

浒苔发展趋势对未来浒苔灾害发展情况进行推测。黄海浒苔发生发展过程呈现出“分散发育,聚集爆发,扩散消亡”的特点^[11]。浒苔在爆发初期多呈破碎斑块和条带状,分布也较为分散。在浒苔爆发的盛行期,浒苔呈现出大面积聚集的特点,通过监测浒苔不同生长过程覆盖区域的变化,能够观察到浒苔生消状态的改变,进而推断其对承灾体所造威胁的动态变化。从2008年至2021年,浒苔灾害已经连续多年在我国黄海爆发,浒苔集中爆发的时间约在每年4月到7月间。通过对以往年份在相同时间尺度下受灾区域浒苔爆发频率的研究,能够总结出浒苔发展过程的一般特征,对频繁遭受浒苔侵袭的区域形成一种趋势性的推测,再结合动态监测数据,获取浒苔和承灾体距离的变化也能够体现出浒苔灾害对于承灾体受灾情况的影响。

2.1.3 预警区危险性

面对浒苔灾害的承灾体数量众多,在不同时空状态下浒苔灾害对每个承灾体的影响程度也不尽相同。为便于决策部门的统计分析,根据承灾体不同产业类型进行划分,由每个承灾体类型构建不同条件的预警区域,再将预警区域整体由内向外进行划分,在空间范围进行分割,每个范围对浒苔灾害的敏感程度结合层次分析法构建的权重指标矩阵确定。通过空间分析的方法,确定预警区域分割后的每部分与浒苔监测和预测数据进行叠加分析结果,从而可以获得动态的预警区域危险性指标值。需要注意的是最靠近承灾体中心区域(核心区)的空间

划分相对于浒苔灾害的敏感程度最高, 对过去十天内核区域被浒苔入侵的次数进行统计, 再将统计结果与浒苔灾害的危险程度建立隶属关系, 能够更细致地评价浒苔灾害的风险, 见式(6)。

$$D(x) = 1 - e^{-0.006x^2}, x \geq 0 \quad (6)$$

式中, $D(x)$ 为核心区与浒苔灾害风险隶属度; x 为过去十天浒苔入侵核心区的频次。

2.2 承灾体脆弱性

脆弱性概念最初起源于自然灾害领域, 并在生态学、气候变化、可持续性科学、土地利用变化等诸多方面得到广泛应用^[12-14]。上文阐述的系统暴露于致险因子的危险性是系统的外部作用, 承灾体的脆弱性系统是描述其抵抗浒苔灾害的能力和恢复能力即从内部来组成的, 即内部性。脆弱性评价的目的是探究脆弱性驱动因素和演化机理, 评价系统的发展状态, 维护系统的可持续发展, 缓解外界压力对系统胁迫^[15]。本文脆弱性评价体系构成所采用方法为指标评价法, 具体步骤是结合专家意见分析研究区结构和功能、选择评价指标、评价指标赋权重、计算脆弱性和划分脆弱性等级。

承灾体的脆弱性评价由评价指标和指标权重两部分构成。评价指标反映了评价对象各方面的特性及之间的相互联系, 是构建评价体系的重点。评价因子的权重解释了评价指标对评价目标的重要程度, 是构建评价体系的关键环节^[16]。承灾体应对浒苔灾害所划分的类型不尽相同, 其数量和生态、经济价值的差异可能造成不同的风险损失, 所以在构建浒苔海洋灾害脆弱性评价指标体系时, 应对承灾体的个体差异而选择不同类型指标进行评价。本文通过对相关的指标进行梳理和筛选, 确定了浒苔海洋灾害的脆弱性评价体系指标为: 自然属性、社会人文价值、管理需求。

2.2.1 自然属性脆弱性指数

脆弱性系统用水域的自净能力来描述自然属性, 海洋自净能力是指海洋环境通过自身的物理过程、化学过程和生物过程而使污染物质的浓度降低乃至消失的能力。海洋自净是一个错综复杂的自然变化过程, 自净能力越强, 净化速度越快。在脆弱性体系中, 水域的自净能力体现的是承灾体本身改变和调节适应海洋生态灾害的能力。本文针对浒苔

灾害将承灾体分布的海域由远及近划分为海湾、近岸区域和开放区域, 每一种海域类型对应不同的自净能力, 根据承灾体所处空间上的海域范围, 来确定承灾体自然属性的指标值。

2.2.2 社会人文价值脆弱性指数

社会人文价值在脆弱性体系中反映了在灾害影响下潜在损失的大小^[17], 其脆弱性指数是由其构建承灾体本身的类型来决定的。结合从功能区划和海域使用权属等多源承灾体数据类型中集中归类到渔业、旅游业, 保护区和重要活动区等类型, 从中获得数据属性信息, 再从资源类型、人口数量、渔业价值、旅游业游客数量等方面进行细致划分作为二、三级指标, 尽可能全面反映承灾体的社会价值和经济价值。

2.2.3 管理需求脆弱性指数

管理需求是反映系统抵抗灾害干扰的能力, 取决于系统结构的稳定性^[18], 主要体现承灾体所属城市对区域环境管理的需求和能力, 区域的整体规划布局及管理需求决定承灾体应对浒苔灾害威胁的能力。

2.3 浒苔灾害风险总体评价

浒苔灾害风险总体评价是综合以上致险因子的危险性指标和承灾体的脆弱性指标, 并结合层次分析法构建判断矩阵确定的指标权重, 实现对浒苔灾害风险评价指数的确定, 见式(7)。

$$H_R = \sum_{i=1}^n a_i F_i \times \sum_{j=1}^m b_j N_j \quad (7)$$

式中, H_R 为浒苔灾害风险指数; a_i 表示致险因子危险度评估第 i 个指标权重值; F_i 为致险因子危险度评估第 i 个指标的标度值; b_j 表示承灾体脆弱性第 j 个指标的权重值; N_j 为脆弱性第 j 个指标的标度值, 由海域使用类型确定。 H_R 共分为 4 个风险指数区间: $[0, 2.5)$ 、 $[2.5, 5)$ 、 $[5, 7.5)$ 和 $[7.5, 10]$, 分别对应低风险、一般风险、较大风险和重大风险。

本文选取青岛胶州湾部分承灾体作为评估对象, 如图 2 所示, 2021 年 6 月 7 日, 浒苔灾害致险因素危险性相对较低, 浒苔主体部分距离承灾体距离相对较远, 孕灾区域海洋气象环境对于浒苔灾害形成的促进作用相对不明显。6 月 9 日至 6 月 11

日,受洋流和风向影响,浒苔逐渐漂移到青岛海域附近,并逐渐向海岸线方向靠近,海水盐度、海水温度逐渐适合浒苔生长,最终形成聚集并大范围爆发,浒苔灾害的致险因素增加较快,各承灾体空间

上相隔距离不大且均属于青岛市管辖范围,承灾体本身的经济价值、社会价值导致承灾体脆弱性出现差异,综合各致险因素的危险性,可观察到位置相邻的承灾体的动态风险评估结果出现不同。

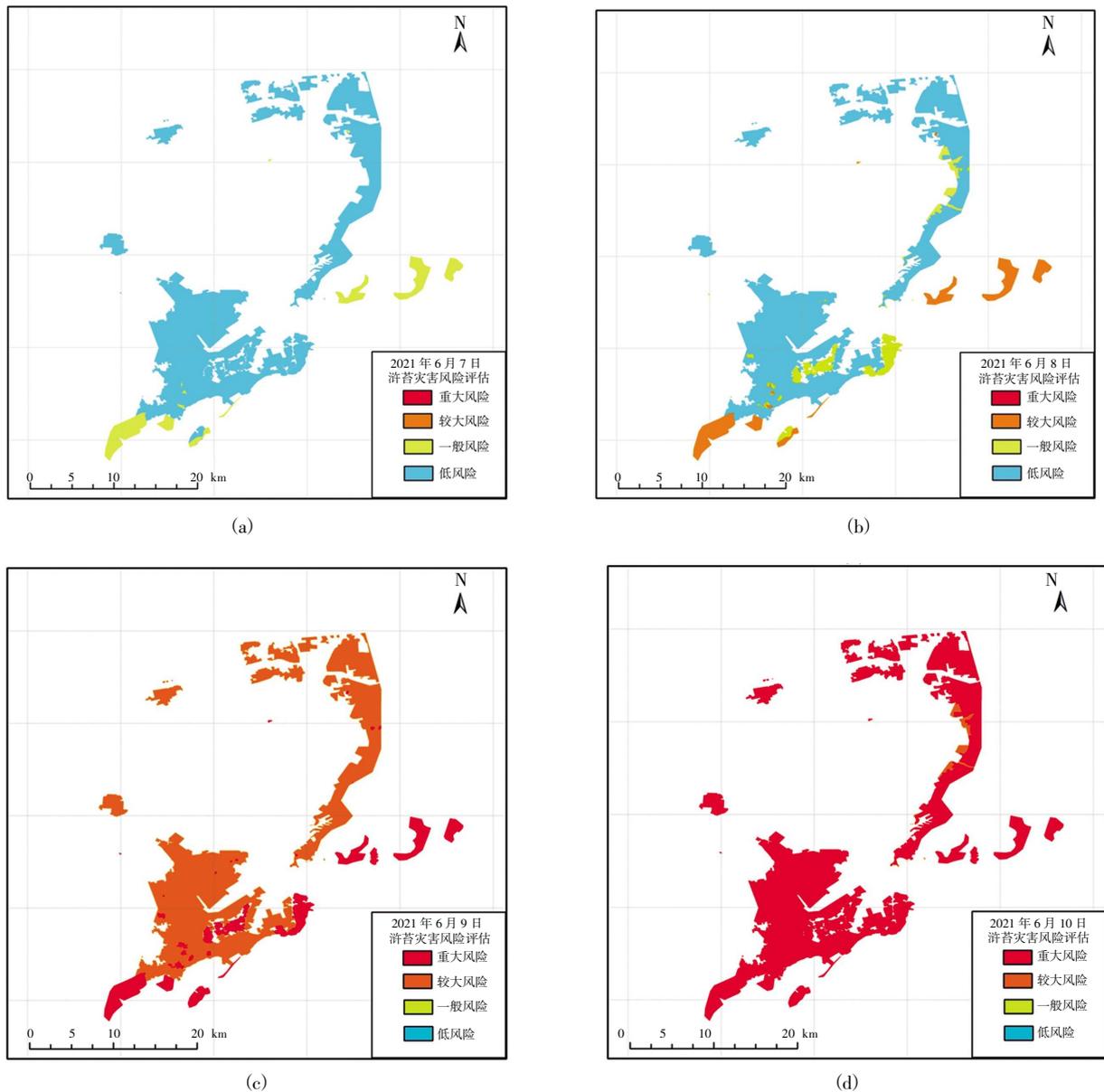


图2 2021年6月上旬浒苔灾害风险动态评估结果

3 浒苔灾害风险动态评估系统实现

浒苔灾害风险评估系统是以构建的浒苔灾害风险动态评估模型为基础建立的,其主要功能包括:多源数据处理与存储,致险因子危险性、承灾体脆弱性数据的量化,风险评估专题图制作,权重订正,灾害风险评估和海洋水文气象数据可视化展示。

由于浒苔灾害的影响因素比较复杂,实现浒苔灾害风险动态评估系统需要多种数据,而这些具有时空特性的多源异构数据,对于模型计算精确性和预测结果的准确性具有着重要影响。传统的关系型数据库对海洋气象数据与其他矢量数据的存储和管理有一定约束,无法满足模型中空间关系与分析的问题解决^[9]。浒苔灾害风险动态评估系统是基于地理空间数据库(ArcGIS Geodatabase)建立起来的,

地理空间数据库既可以满足传统数据库的数据存储与管理,也可以对所存储的空间图形数据和属性数据建立联系,并通过建立空间索引提高效率,为程序的实现提供有效的支撑。

浒苔风险评估系统中最核心的部分,是将数据库存储的致险因子危险性和承灾体脆弱性计算所需数据的输入,进行地理空间信息的分析和数据量化,如图3所示。其中,致险因子危险性计算包括:灾害等级分析中的浒苔监测分布和覆盖面积的

量算,在相同度量空间下的浒苔与承灾体距离的计算,浒苔与承灾体通过迭代所构多环预警区域的空间方位和叠置分析计算,对孕灾区域网格的海洋气象数据的赋值运算、空间范围分析。承灾体脆弱性计算包括根据承灾体所处空间位置来对其自净属性和城市管理属性指标值计算,通过从承灾体属性范围筛选出的属性区段对承灾体经济、社会价值等进行评估计算等。

综合上文对数据信息进行多层次、多方面的量



图3 致险因子危险性计算和数据量化

化,再通过对量化值进行融合来得到灾害风险值,并划分为4个等级用以表达承灾体风险值的大小。系统的成果输出最终是以专题图的形式表达,实现了区块坐标的自动提取、范围查询、制图表达、地图输出等重要功能,可根据实际需求进行动态危险性、脆弱性、风险评估结果专题图的制作。

4 结 论

本文以黄海海域为研究区域,主要研究结论如下。

(1) 针对浒苔灾害这一复杂风险评估对象的不确定性特征,基于灾害风险管理指标系统的思想,

并从灾害特点出发建立了浒苔灾害评估指标体系,其中包括6个一级指标和14个二级指标。并在浒苔生长漂移预测模型的预测结果基础上融合海洋水文气象动态数据,构建浒苔灾害风险动态评估模型。

(2) 建立具有可视化操作界面的浒苔灾害风险动态评估系统,该系统可完成多源异构数据的分析和处理、数据量化、成果输出等功能,便于对承灾体进行受灾风险分析,有助于管理机构做出准确判断,制定具体目标,取得减灾效果。

目前存在的主要不足是建立的浒苔灾害风险评估体系中,由于其形成机理复杂,本文仅从有限的指标出发,且指标权重准确量化方法还需要进一步

改进,模型存在一定局限性。在今后研究浒苔风险致灾因素,优化权重设置,建立更加完善的浒苔灾害风险评估中,应完善优化浒苔风险评估模型,结合更多灾害风险动态评估模型。

参考文献:

- [1] 张晓红. 温度、盐度等环境因子对浒苔及繁殖体生长的影响[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2011.
- [2] 文世勇, 赵冬至, 张丰收, 等. 赤潮灾害风险评估方法[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 106-111.
- [3] 殷杰. 中国沿海台风风暴潮灾害风险评估研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [4] 解翠, 寻锦锦, 周小伟, 等. 海啸可视化仿真及灾害风险评估[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2567-2572, 2577.
- [5] 高松, 黄娟, 白涛, 等. 2008年与2009年黄海绿潮漂移路径分析[J]. 海洋科学, 2014, 38(2): 86-90.
- [6] 张广宗, 吴孟泉, 孙晓, 等. 南黄海浒苔漂移轨迹年际变化规律及驱动因素[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(5): 1084-1093.
- [7] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟[J]. 海洋预报, 2011, 28(1): 25-32.
- [8] 李弘毅. 基于时间序列 GOCI 影像的南黄海浒苔提取与浒苔爆发环境驱动因素研究[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- [9] 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 等. 围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3398-3404.
- [10] 吴洪喜, 徐爱光, 吴美宁. 浒苔实验生态的初步研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2000, 3: 230-234.
- [11] 张海波, 刘珂, 苏荣国, 等. 2018年南黄海浒苔绿潮迁移发展规律与营养盐相互关系探究[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 30-39.
- [12] 黄晓军, 黄馨, 崔彩兰, 等. 社会脆弱性概念、分析框架与评价方法[J]. 地理科学进展, 2014, 33(11): 1512-1525.
- [13] 李双成, 吴绍洪, 戴尔阜. 生态系统响应气候变化脆弱性的人工神经网络模型评价[J]. 生态学报, 2005, 3: 621-626.
- [14] 徐君, 李贵芳, 王育红. 国内外资源型城市脆弱性研究综述与展望[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1266-1278.
- [15] 杨飞, 马超, 方华军. 脆弱性研究进展: 从理论研究到综合实践[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 441-453.
- [16] 杨林, 李渊. 海洋灾害脆弱性综合评价指标体系的设计[J]. 海洋技术, 2013, 32(3): 133-137.
- [17] CUMMING G S, BARNES G, PERZ S G, et al. An exploratory framework for the empirical measurement of resilience[J]. *Ecosystems*, 2005, 8: 975-987.
- [18] 李莉, 王晓婷, 王辉. 脆弱性内涵、评价与研究趋势综述[J]. 中国渔业经济, 2010, 28(3): 161-169.
- [19] 尹文华, 王旭, 张易辰, 等. 基于 GIS 的沙漠地理空间数据库设计[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(4): 7-12, 36.

Risk Dynamic Evaluation of *Enteromorpha Prolifera* Disaster Based on ‘Growth-Drift’ Prediction Model

GAO Shuo¹, JIN Xifang², ZHANG Panpan³, AI Bo¹

(1. College of Geomatics and Spatial Information, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. National Ocean Technology Center, Tianjin 300112, China)

Abstract: Since 2008, the large-scale eruption of *Enteromorpha prolifera* has become the most serious marine ecological disaster in the Yellow Sea, posing a serious threat to the social and economic development in coastal areas. With the growth drift prediction model, this paper presents the prediction method for the spatial-temporal dynamic development trends of *Enteromorpha prolifera*. The prediction results are introduced into the dynamic assessment system of *Enteromorpha prolifera* disaster risk, which is established by the dangerousness of threat causing factors and the vulnerability of disaster-bearing bodies. A disaster risk assessment system with functions, including early warning, multi-source data processing and storage, and visual display, is realized. Different from traditional static evaluation methods, this method will integrate the dynamic risk situations data which affect *Enteromorpha prolifera* and establish a representative indicator system through the *Enteromorpha prolifera* disaster mechanism. This dynamic evaluation method can provide decision support for disaster prevention and mitigation departments, and provide theoretical basis for scientific prevention and control of *Enteromorpha prolifera*.

Key words: enteromorpha prolifera disaster; drift forecasting; risk dynamic evaluation; threat causing factors