

学校代码： 1 0 2 6 4
研究生学号： M140306557

上海海洋大学

硕士学位论文

题 目： 赤潮灾害风险评估研究——以宁德沿海为例
Risk assessment of harmful algal blooms: taking
英文题目： Ningde coast as an example

专 业： 环境科学与工程

研究方向： 海洋生态灾害风险评估

姓 名： 谢宏英

指导教师： 王金辉

二〇一八年五月三十日

上海海洋大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海海洋大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权上海海洋大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐ ，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☐

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

指导教师签名：

日期： 年 月 日

上海海洋大学硕士学位论文 答辩委员会成员名单

| 姓名 | 工作单位 | 职称 | 备注 |
|------|------------------------|-------|-----------|
| 于飞 | 上海海洋大学 | 教授 | |
| 任松 | 国家海洋局东海标准计量中心 | 教授级高工 | |
| 项有堂 | 国家海洋局东海信息中心 | 教授级高工 | |
| 葛震 | 国家海洋局东海监测中心 | | 主持 |
| 吴祥贵 | 国家海洋局东海监测中心 | | 秘书 |
| | | | |
| | | | |
| 答辩地点 | 国家海洋局东海监测中心 713 会议室 | 答辩日期 | 2018.5.22 |

赤潮灾害风险评估研究--以宁德沿海为例

摘 要

赤潮灾害是一种海洋生态灾害,它的发生不仅会威胁爆发海域的生态环境安全,造成海洋食物链的局部中断、破坏生态系统平衡,还可能损坏人类健康和经济发展,把本可以用于发展经济的人力、物力和财力用于灾害救助、抗灾和灾后恢复,已引起各国政府及科学界的广泛关注。当前,作为世界公害的赤潮在全球许多沿海海域频繁出现,已遍及我国所有沿海省市,导致我国成为受赤潮灾害影响严重的国家之一。在此背景下,为维护海洋生态环境安全、保障经济健康发展,开展赤潮灾害风险状况研究尤为必要。

研究海域宁德沿海位于福建省东北部沿海,包括宁德市蕉城区、福安市、霞浦县、福鼎市沿海近岸海域、滩涂。宁德沿海自然环境优良,拥有三都港、沙埕港、三沙湾、福宁湾和晴川湾等众多优良港湾,海洋资源丰富,生态类型多样。宁德沿海以其独特的地理环境优势,成为海水养殖业的重要基地。然而随着海水养殖业的迅速发展,近年来宁德海域频频发生赤潮,严重危害海洋生态平衡和水产资源。根据 2014 年宁德三沙湾赤潮监控区海洋环境监测评价结果:赤潮监控区内水体大部分的磷酸盐、无机氮含量只能满足三类或四类海水水质标准,个别站位甚至为超四类海水水质标准,各站位在监控月份大都处于富营养化中高的水平,极易引发赤潮,影响海洋经济的发展。过去对宁德沿海相关海域的海洋生态环境质量、生物群落、赤潮的特征、成因和预测等方面虽有研究,但对其赤潮灾害风险状况研究尚未见报道,鉴于此,本研究以福建省宁德沿海为研究对象,在评估宁德海域富营养化状况的基础上,基于评价指标主导性、可度量性和易获得性等原则建立了赤潮灾害风险评估指标体系,采用熵权法确定了各评估指标的权重,建立了赤潮灾害致灾因子危险度、孕灾环境因子危险度、承灾体易损度和赤潮灾害风险模型,并借助 GIS 地统计分析工具实现了评估结果的可视化,为宁德沿海的赤潮管理及海产养殖业规划提供依据。

本研究的主要结论:

(1) 宁德海域的各个海湾都处于不同程度的富营养化状态,沙埕港、晴川湾、东吴洋、官井洋、卢门港的富营养化程度高,总体呈现沿岸向外海减轻趋势。

(2) 结合区域灾害系统论及地统计分析理论对宁德沿海的赤潮灾害风险进行评估,从赤潮灾害致灾因子、孕灾环境因子和承灾体三个方面建立评价指标体系;各指标权重采用相对科学的客观分析法熵值法确定,熵值法由于深刻地反映了指标信息熵值的效用价值,其给出的指标权值比当前广泛使用的主观分析法如层次分析法和德尔菲法有较高的可信度。

(3) 对宁德沿海进行赤潮灾害风险评估,得出宁德沿海主要海湾的赤潮灾害危险度、承灾体易损度和赤潮灾害风险。赤潮灾害危险度与富营养化趋势相同,赤潮灾害危险度极高值分布在富营养化等级严重的沙埕港、晴川湾、东吴洋、官井洋、三都澳、卢门港,总体呈现由沿岸向外海递减,三沙湾内赤潮灾害危险度高。承灾体易损度方面,福鼎沿海为赤潮灾害高易损区,蕉城沿海、霞浦沿海赤潮灾害易损度都为中,福安沿海为低易损度区。赤潮灾害风险极高值分布在晴川湾海域附近和沙埕港内,沙埕港外、三沙湾内的东吴洋、官井洋、三都澳赤潮灾害风险高,三沙湾内的白马港的赤潮灾害风险为低,福宁湾赤潮灾害风险为中等。

评估结果与赤潮历史资料及宁德沿海实际情况相一致,与相关文献结论相吻合,从而验证了本研究方法具有可行性和可操作性,可为宁德沿海赤潮灾害监控、防灾减灾及海水养殖提供技术支撑。

(4) 在 GIS 平台上实现了宁德沿海的赤潮灾害危险度、承灾体易损度和赤潮灾害风险的可视化,使评估结果更直观。

关键词: 赤潮灾害, 危险度, 易损度, 风险评估, 宁德沿海

Risk Assessment of Harmful Algal Blooms—Taking Ningde Coast as an Example

Abstract

As a kind of marine ecological hazard, harmful algal blooms(HABs) will not only threaten the safety of the ecological environment in the coast sea area, cause partial disruption of the marine food chain and destroy the balance of the ecosystem, but also damage human health and economic development. HABs takes manpower, material and financial resources originally used to develop economy for disaster relief, disaster resistance and post-disaster recovery. It has drawn wide attention of governments and scientific community in various countries. At present, HABs, which is a public nuisance in the world, have occurred frequently in many coastal waters of the world. It has spread all over the coastal provinces and cities in China, causing China to become one of the countries seriously affected by HABs. In this context, it is necessary to carry out research on the risk assessment of HABs in order to maintain the safety of marine ecological environment and ensure the healthy economic development.

Research area, Ningde coast, is located in the northeastern coast of Fujian Province, including Jiaocheng, Fu'an, Xiapu and Fuding coastal waters and beaches. Ningde coast, with Sandu Bay, Shacheng Harbor, Sansha Bay, Funing Bay and Qingchuan Bay and many other harbor, has excellent natural environment, rich marine resources and diverse ecological types. With its unique geographical and environmental advantages, Ningde coast has become an important base for aquaculture industry. However, because of the rapid development of the marine aquaculture industry, HABs occurred frequently in Ningde sea area in recent years, which seriously damaging the marine ecological balance and aquatic resources. According to the 2014 marine environmental monitoring and evaluation results of Ningde Sansha Bay HABs monitoring area: (1) most of the phosphate, inorganic nitrogen content of the HABs monitoring area can only meet the third or fourth class of sea water quality standard; (2) some sites even exceed the fourth class of sea water quality standard; (3) all stations in the monitoring months are mostly in high level of eutrophication, which can easily lead to HABs and affect the development of marine economy. In the past, the marine eco-environmental quality, biological community, HABs characteristics, causes and prediction of coastal waters in

Ningde have been studied, but the risk of HABs has not been reported yet. In view of this, this study took the Ningde coast, Fujian Province as the research object to carry on risk assessment of HABs. The index systems of risk assessment of HABs were established based on leading, measurable and available principles. The weights of evaluation indexes were determined by entropy method. In addition, hazard assessment model, disaster inducing factor assessment model, vulnerability assessment of disaster-bearing body model and risk assessment model were set up, respectively. Finally, we utilized GIS platform to realize visualization of the assessment results. This study provided the basis for management of HABs and planning of aquaculture industry of Ningde coastal area.

The main conclusions of this study are as follows:

(1) The bays of Ningde are in different levels of eutrophication. The eutrophication degree of Shacheng Harbor, Qingchuan Bay, Dongwuyang Bay, Guanjingyang Bay and Lumen Harbour are most serious. The overall trend is reduced from coast to outer sea.

(2) The risk of HABs in Ningde coast is evaluated by regional disaster system and theory of geostatistical analysis. The evaluation index system is consist of the disaster factors, disaster inducing factors and disaster-bearing bodies. The weight of each indicator is determined by entropy method. Entropy method is an objective and scientific analysis method. Entropy method, as it reflects the utility value of index information entropy profoundly, has higher credibility than the widely used subjective analytic methods such as analytic hierarchy process and Delphi method.

(3) The result show that harmful algal blooms risk degree is the same as the trend of eutrophication. The extreme value of HABs hazard degree is distributed in Shacheng Harbour, Qingchuan Bay, Dongwuyang Bay, Guanjingyang Bay, Sandu Bay, Lumen Harbour. The overall trend is reduced from coast to outer sea. The hazard of HABs is high in Sansha Bay. In terms of the vulnerability of disaster-bearing bodies, Fuding coast is highly vulnerable area, Jiaocheng coast and Xiapu coast are medium vulnerable areas, and Fu'an coast is low vulnerability area. At the risk level of the HABs, the extreme high risk of HABs are located in the vicinity of Qingchuan Bay and the inside of Shacheng Harbour. The outside of Shacheng Harbour, Dongwuyang Bay, Guanjingyang Bay, Sanduao Bay located in Sansha Bay are high risk. The HABs risk in the Baima Harbour located in Sansha Bay is low. Funing Bay is moderately risky.

The results of the assessment are consistent with the historical data of HABs, the actual situation of Ningde coast and the conclusions of the relevant literatures, which proves that the methods we used are feasible and practical. This study can provide technical support for HABs disaster monitoring, disaster prevention and mitigation and

mariculture of Ningde coast.

(4) On the platform of GIS, we realized the visualization of hazard degree of disaster-causing factors of HABs disaster, vulnerability degree of disaster-bearing body and risk of HABs disaster in Ningde coast, which made the evaluation results more intuitive.

KEY WORDS: HABs, hazard, vulnerability, risk assessment, Ningde coast

目 录

| | |
|------------------------------------|-----|
| 摘 要 | I |
| Abstract..... | III |
| 第一章 引 言 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 国内外研究现状 | 2 |
| 1.2.1 赤潮灾害的预测..... | 2 |
| 1.2.2 赤潮灾害的影响..... | 4 |
| 1.2.3 赤潮灾害的评估..... | 5 |
| 1.2.4 分析与展望..... | 11 |
| 1.3 研究的目的及意义 | 11 |
| 1.4 研究内容 | 12 |
| 1.4.1 研究技术路线..... | 13 |
| 1.4.2 论文主要创新点..... | 14 |
| 第二章 研究区概况 | 15 |
| 2.1 宁德海洋环境条件 | 15 |
| 2.2 气象与水文条件 | 15 |
| 2.3 水化学要素特征 | 16 |
| 2.4 宁德沿海使用状况 | 17 |
| 2.5 主要入海污染物 | 18 |
| 2.5.1 主要江河入海污染物总量排放情况及入海口环境质量..... | 19 |
| 2.5.2 重点陆源排污状况及邻近海域环境质量..... | 19 |
| 2.6 浮游植物的群落结构、空间分布特征 | 19 |
| 2.7 赤潮及赤潮生物生态特征 | 20 |
| 第三章 材料与方法 | 25 |
| 3.1 引言 | 25 |
| 3.2 研究海域 | 26 |
| 3.3 数据收集 | 27 |

| | |
|--------------------------|----|
| 3.4 方法 | 28 |
| 3.4.1 宁德海域富营养化状况评价 | 28 |
| 3.4.2 宁德海域赤潮灾害风险评估 | 28 |
| 第四章 结果与分析 | 34 |
| 4.1 宁德海域富营养化状况 | 34 |
| 4.2 宁德海域赤潮灾害风险状况 | 36 |
| 4.2.1 原始数据均值化 | 36 |
| 4.2.2 指标体系权重计算结果 | 43 |
| 4.2.3 赤潮灾害风险评估结果 | 44 |
| 第五章 结论与讨论 | 50 |
| 5.1 结论 | 50 |
| 5.2 讨论 | 50 |
| 参考文献 | 52 |
| 攻读硕士学位期间发表的论文 | 57 |
| 致谢 | 58 |

第一章 引言

赤潮是一种海洋生态异常现象。在一定的环境条件下，海洋中的一些赤潮生物异常性增殖或聚集达到某一水平引发赤潮，将引起海水变色、危害海洋中其他生物生长，甚至威胁到人类的健康。海洋微藻、原生动物和细菌的非正常生长都能导致赤潮，其中又以海洋微藻占绝大多数。根据藻类是否有毒，可将藻类分为无毒无害藻种、无毒有害藻种和鱼毒藻种。无毒无害藻种不产生毒素和黏液，但其大规模繁殖覆盖海面，将阻碍大气与水体的气体交换，并使海洋生物无法进行光合作用造成初级生产力降低、影响海洋生物的生存；无毒有害藻种能向环境中分泌黏液，这些黏液随海洋生物的呼吸、滤食作用黏附在鳃上，使其窒息而死；有毒藻种能产生藻毒素，常见的有腹泻性贝毒（diarrhetic shellfish poisoning, DSP）、神经性贝毒（neurotoxic shellfish poisoning, NSP）、麻痹性贝毒（paralytic shellfish poisoning, PSP）、记忆缺失性贝毒（azasporacid poisoning, ASP）和西加鱼毒（Ciguatera fish poisoning, CFP）等^[1-5]，这些毒素在海洋生物体内经消化、吸收和累积放大，不仅能毒害海洋生物，还可通过食物链危害人体健康；鱼毒藻种产生鱼毒，能使摄食这些藻种的鱼、虾、贝类等中毒或死亡。综上所述，赤潮的发生不仅会威胁爆发海域的生态环境安全，造成海洋食物链的局部中断、破坏生态系统平衡，还可能损坏人类健康和社会经济发展^[6]。

当前，作为世界公害的赤潮在全球许多沿海海域频繁出现，已遍及我国所有沿海省市，导致我国成为受赤潮灾害影响严重的国家之一。有鉴于此，为维护海洋生态环境安全、保障经济健康发展，开展赤潮灾害研究尤为必要。

1.1 研究背景

全球气候的变化和人类活动的加剧使我国近岸海洋生态环境面临较为严峻的形势，赤潮等海洋灾害呈现逐渐增多的现象，已威胁到海洋生态环境、资源、经济和公众健康。

党的十九大将“生态文明建设”单独成篇，提出加快生态文明体制改革，建设美丽中国，坚持陆海统筹，加快建设海洋强国。

福建省是我国赤潮的高发区，省委省政府高度重视赤潮的防灾减灾工作，相继在闽江口、三沙湾、平潭等海域成立了国家级赤潮监控区，在全省沿海重要港湾和赤潮高发海域共布设 14 个生态浮标，并在省海洋与渔业厅的指导下开展了高频率、高密度的监视监测工作。

宁德市海洋与渔业局于 2009 年承担组织了宁德市海域海洋功能区环境质量监测、海湾环境质量监测及陆源入海排污口总量监测等的调查、监测、监视和评价。据《2009 年宁德市海洋环境状况公报》^[7]，2004~2009 年连续 6 年对宁德沿岸生态监控区的海洋环境质量、生物群落结构及人类开发活动进行监测，范围包括蕉城区、福安、霞浦、福鼎沿海近岸和近海部分海域、监测面积 5063km²。结果表明：宁德沿岸生态监控区的生态系统仍然处于亚健康水平，大量市政污水及工农业废水未经处理排放入海，造成宁德市海域中 N、P 等含量持续偏高，上千平方公里的海水 DIN、DIP 超二类海洋水质标准，海水富营养化趋势明显。围填海工程导致滩涂和湿地面积不断减少，水动力条件变化，生物多样性降低，生境受损。据《2015 宁德市海洋环境状况公报》^[8]，2015 年宁德市全市近岸环境问题仍为海湾沿岸 DIN 和 DIP 含量偏高。

1.2 国内外研究现状

赤潮灾害是指因赤潮发生而造成海区生态系统失去平衡，海洋生物资源局部遭到毁灭或破坏的海洋生态灾害^[6]。为加深对目前国内外赤潮灾害研究的了解，下面对已有相关研究结果进行概述，希望在综合现有认知的基础上进一步探究赤潮灾害现象，为科学防治赤潮灾害提供指导。

1.2.1 赤潮灾害的预测

赤潮灾害预测是基于对赤潮现有资料和背景知识的分析，断定在未来时间点或时间段内，某种程度的赤潮灾害是否发生，可以看作为一个二值逻辑问题。赤潮灾害的预测是进行有效防灾、减灾的基础，经验预测法和模型预测法为两种主要的常规方法。

（1）经验预测法预测赤潮灾害

经验预测法通常是在分析处理大量赤潮生消过程监测资料的基础上，采用因

子分析、聚类分析等多元统计方法,选择不同的预测指标,基于一定的判别模式对赤潮发生情况予以预测^[9]。

赤潮爆发是一个多因素综合作用的复杂结果,诸如气象、气候因素、水动力条件、海水的物理化学因素等都可能与赤潮形成密切相关,孤立的考察某些因素来预测赤潮灾害往往表现出明显的局限性,如陆斗定等^[10]在赤潮预测时仅考虑了赤潮生物细胞密度和叶绿素 a 的量。

(2) 模型预测法预测赤潮灾害

模型预测法(也称数值预测法)预测赤潮的原理:主要依据赤潮发生机制,对赤潮前期、孕育期、指数生长期、赤潮稳定期和消散期的整个过程通过各种物理-化学-生物耦合生态动力学数值模型进行拟合^[9]。

Chen 等^[11]建立了基于辐射、营养盐和邻域条件的数值和模糊元胞自动机模型预测荷兰沿海水体的赤潮,由于网格粗糙使得元胞自动机在很大程度上传播边界效应导致假象,需要更精细的网格来改善元胞自动机的性能以减少假象。Allen 等^[12]基于与卫星叶绿素估计值的比较,提出西北欧洲陆架耦合水动力生态系统模型 MRCS(The Medium Resolution Continental Shelf)预测赤潮事件,研究中模型和卫星数据都存在不足:模型在较高阈值和混合层海域处预测能力不高;卫星算法不能准确反演高富营养化区域的叶绿素浓度。

随着人工智能的迅猛发展、交叉学科深度融合,越来越多的科研工作者将人工神经网络模型引入海洋生态领域,许多专家学者已在人工神经网络预测赤潮上有所研究。谢中华等^[13]结合线性相关分析、秩相关分析、Hoeffding 独立性检验、主成分分析建立人工神经网络模型;马玉梅等^[14]通过改进三层前馈(Back Propagation, BP)神经网络模型预测夜光藻赤潮;Velo-Suárez 等^[15]结合主成分分析法与前向人工神经网络的方法预测赤潮;胡婧^[16]、钱振松^[17]分别采用改进的人工神经网络建立了烟台四十里湾的赤潮预测模型,并构建了智能赤潮预测系统。以上研究普遍存在学习样本、检验样本及指标(见表 1-1)比较少的问题,这会降低系统的容错性和可适应性,因此对所建立的模型应持谨慎态度。

表 1-1 人工神经网络模型预测赤潮的相关研究

Tab.1-1 Correlation studies of HABs prediction by artificial neural network model

| 学习样本 | 检验样本 | 指标 | 文献 |
|--|---|--|----------------------|
| 93 | 3 | 光照、风速、气压、表层水温、pH 值、盐度、COD、DO、活性磷酸盐浓度、硅酸盐浓度、硝酸盐浓度、时间、叶绿素、亚硝酸盐浓度、铵盐浓度、浮游植物细胞浓度 | 谢中华等 [13] |
| 24 | 4 | 水温、盐度、DO、TIN、DIP、夜光藻密度、浮游植物密度 | 马玉梅等 [14] |
| 1998—2003 年 <i>Dinophysis acuminata</i> 细胞 浓度周数据 | 2004 年 <i>Dinophysis acuminata</i> 细胞 浓度周数据 | <i>Dinophysis acuminata</i> 细胞浓度 | Velo-Suárez 等[15] |
| 37 | 10 | 水温、透明度、pH、盐度、COD、DO、DIP、DIN、叶绿素 <i>a</i> 、浮游植物密度 | 胡婧 [16] |
| 47 | 16 | 水温、透明度、pH、盐度、COD、DO、DIP、DIN、叶绿素 <i>a</i> 、浮游植物密度 | 钱振松[17] |

Wong 等^[18, 19]定义了水动力稳定风险因子 R 预测赤潮(公式 1-1); Sivapragasam 等^[20]用遗传规划 (genetic programming) 建立数学模型预测香港吐露港赤潮; Roiha 等^[21]采用芬兰气象局 (FMI) 操作三维生物地球化学模型 Baleco 对波罗的海的赤潮进行集合预测; Dippner 等^[22]提出基于 HAMSOM 模型的循环模型和拉格朗日赤潮模型的数值模型; Zhang 等^[23]建立了基于窗口、集成生态太湖模型^[24]的软件 (WSE) 实现 3-5 天的短期预测。

$$R = \frac{4\mu l^2}{E\pi} \quad (1-1)$$

式中: R 为水动力稳定因子; μ 为透光层中藻类生长率; E 为垂直扩散率; l 为透光层深度。

1.2.2 赤潮灾害的影响

(1) 对海洋生态平衡的影响

赤潮灾害的发生使海洋环境因素发生变化,打破了原有的海洋生态系统平衡、破坏了海洋生物赖以生存的栖息环境。

Okey 等^[25]结合西佛罗里达州陆架生态系统平衡营养模型 Ecopath、Ecosim 评估了浮游植物水华的覆盖对群落系统的潜在影响;Capper 等^[26]分析了美国佛罗里达州搁浅的绿海龟与海牛组织内是否存在多种赤潮毒素;Branch 等^[27]用多元群落分析 (ANOSIM, PERMANOVA, MDS, SIMPER)、丰度和生物量分析研究了 1994 年的“黑潮”(Prorocentrum micans, Neoceratium furca, Alexandrium catenella, Dinophysis acuminata)对南非西海岸岩石海岸潮间带群落的影响;Delegrange^[28]进行了为期 45 天的实验来测定鲈鱼暴露于不同浓度的赤潮种柔弱伪菱形藻的脆弱性。

(2) 对人类社会的影响

赤潮灾害爆发期间赤潮生物分泌的赤潮毒素将通过食物链直接或间接危害到人体健康,使人类社会的医疗费用增高。

Backer^[29]综述了佛罗里达赤潮对沿海地区的影响:赤潮期间人们食用被污染区域的贝类会遭受神经性贝毒、人们可能吸入短裸甲藻毒素,导致呼吸系统疾病;赤潮的频繁暴发造成与旅游相关的损失每年超过 2000 万美元;并造成商业性渔业收入的损失、后期修复损失、医疗负担增加等;Hoagland 等^[30]构建了时间序列、截面回归的暴露—响应模型来检测佛罗里达州赤潮对人体健康的影响,并估计了相关的疾病花费。

1.2.3 赤潮灾害的评估

根据研究角度和评估目的的不同,赤潮灾害评估可概括为赤潮灾害风险评估和赤潮灾害灾情评估等,它是赤潮灾害研究的重要内容,对防治赤潮灾害、制定减灾策略具有重要的参考价值。

(1) 赤潮灾害风险评估

文世勇等从灾害学角度提出赤潮灾害风险评估是在一定区域和给定时段内,对风险区内赤潮爆发的可能性及其可能造成的损失后果进行定量分析和评估^[6]。在此基础上,文世勇等根据赤潮藻类最大比生长速率的 N/P 耐受性模型和赤潮发生的基准细胞密度建立了 N/P 与赤潮暴发时间的关系模型^[31];提出了评估赤潮灾害风险的指标体系(图 1-2)和评估赤潮灾害风险的模型,采用层次分析法和德尔菲法确定了各指标权重^[32, 33];对渤海湾海域无毒赤潮、有害赤潮和有毒赤潮三种赤潮进行了评估^[32];在实验室培养条件下,基于营养盐建立了塔玛亚历山大藻的赤

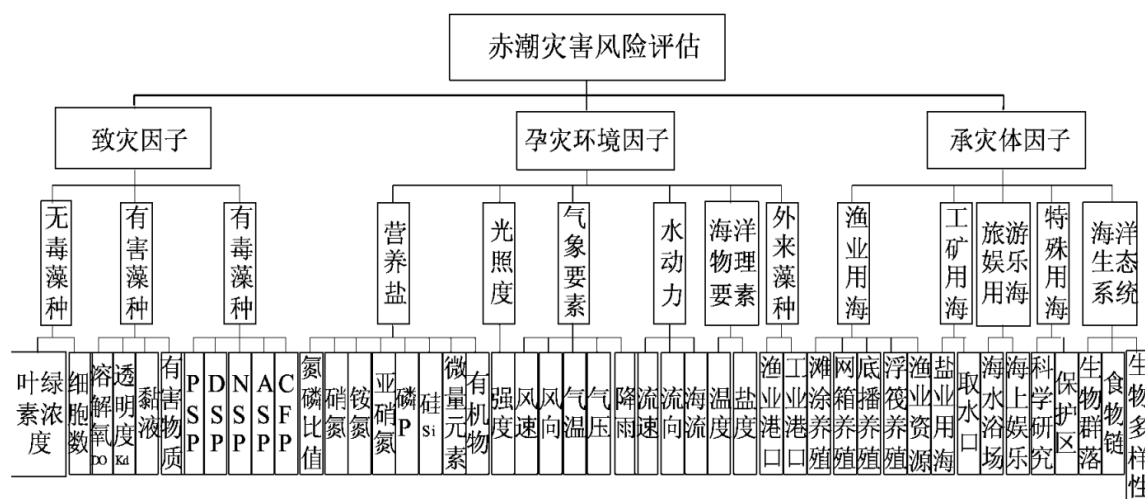


Fig.1-2 Index system for risk assessment of harmful algal blooms

柴勋^[39]在组件式 GIS SuperMap Objects 与 C#开发语言平台上设计实现了赤潮灾害风险评估系统, 分别制作了赤潮灾害危险度和赤潮灾害风险度专题图; Orme-Zavaleta 等^[40]阐述了用综合方法评估蓝藻赤潮风险并提出了概念模型, 该概念模型体现了蓝藻赤潮对人类健康、野生动物种群生存力、水生生产力与结构的危险, 为蓝藻赤潮风险评估提供了一条思路; 郭皓等^[41]根据水体中不同的赤潮生物细胞密度或叶绿素 a 含量, 用 1-10 表示赤潮的风险指数 D_R 并设置四级预警, 郭皓等的研究存在不足, 以叶绿素 a 为例, 并不是所有的藻类体内都具有高叶绿素 a 比重且赤潮发生时不一定叶绿素 a 的含量高; Chen 等^[42]建立了一种结合自组织图

谱和模糊信息理论的创新方法来全面评价赤潮风险与不确定性。

表 1-2 灾害风险评估指标体系^[36]

Tab.1-2 Index system for risk assessment of hazard

| 目标层 | 准则层 | 指标层 | | |
|--------|----------|------|--------|---------|
| | | 一级指标 | 二级指标 | |
| 灾害风险评估 | 致灾因子危险性 | 灾害 | 发生次数 | |
| | | | 影响范围 | |
| | | 人员 | 人口密度 | |
| | 男女比例 | | | |
| | 沿海城市旅游人数 | | | |
| | 承灾体脆弱性 | 社会 | 经济密度 | |
| | | | 耕地比重 | |
| | | | 港口数量 | |
| | | | 港航面积 | |
| | | | 渔业用海面积 | |
| | | | 娱乐用海面积 | |
| | | | 环境 | 岸线长度 |
| | | | | 海洋保护区面积 |

表 1-3 赤潮灾害风险评估模型

Tab.1-3 Models for risk assessment of harmful algal blooms

| 赤潮灾害风险评估模型 | 文献 |
|--|------------------------|
| $t = \frac{(B_t / B_0) - 1}{\mu_0 + A \times \exp\left(-\frac{((N/P) - (N/P)_{opt})^2}{2 \times \sigma^2}\right)}$ | |
| $H_1 = \sum_{i=1}^n a_i F_i, H_2 = \sum_{i=1}^n b_i M_i, H_H = \alpha H_1 + \beta H_2, H_V = \sum_{i=1}^n c_i N_i,$ $H_R = \omega H_V * H_H$ | 文世勇等 [31-35] |
| $H = (a + b * t)^{-1/c}, V = \sum_{i=1}^n a_i V_i, \text{风险度} = \text{危险度} \times \text{易损度}$ | |
| $H = D_1 H_1 + D_2 H_2, V = \sum_{i,j=1}^n T_{ij} V_{ij}$ | 张晓霞 ^[36] |
| $\text{Risk} = f(T) \times f(C) \times f(A) \times f(D) / f(L),$ $\text{Risk} = \alpha \times T \times C \times A \times D / L$ | Wang 等 ^[37] |
| $TH = T \times C \times A \times D \times E / L$ | Wu 等 ^[38] |

注：表中 t 为赤潮藻类在某个氮磷比下的暴发时间（d）； B_t 为形成赤潮时的基准细胞密度

($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), B_0 为 某个氮磷比下的初始细胞密度 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$); μ_0 为赤潮藻类的初始比生长速率 (d^{-1}); N/P 为介质中的氮磷比; $(\text{N/P})_{\text{opt}}$ 为在最适赤潮藻类生长的最佳氮磷比; σ 为该赤潮藻类的耐受度; A 为参数。 H_1 为致灾因子危险度; a_i 为致灾因子危险度评估中第 i 个指标的权重值; F_i 为致灾因子危险度评估中第 i 个指标的标度值; H_2 为孕灾环境因子危险度; b_i 为孕灾环境因子危险度评估中第 i 个指标的权重值; M_i 为孕灾环境因子危险度评估中第 i 个指标的标度值; H_H 为赤潮灾害危险度; α 表示致灾因子在危险度评估中的权重值; β 表示孕灾环境因子在危险度评估中的权重值; H_V 为海洋社会经济易损度; c_i 为海洋社会经济易损度评估中第 i 个指标的权重值; N_i 为海洋社会经济易损度中第 i 个指标的标度值; H_R 赤潮灾害风险指数; ω 为海洋社会经济易损度在赤潮灾害风险评估中的权重值。 H 为赤潮危险度; a, b, c 为参数, 且 $a=1, b=0.012, c=0.1$; V 为承灾体易损度; a_i 为第 i 个承灾体指标的权重; V_i 为第 i 个单个承灾体有可能遭受赤潮灾害的破坏程度 (文世勇等)。

H 为赤潮危险度; D_1, D_2 为灾害发生次数、影响范围的权重; H_1, H_2 分别为灾害发生次数、影响范围的标准化值; T_{ij} 为承灾体脆弱性指标组合权重; V_{ij} 为指标标准化值 (张晓霞等)。

T 为毒性; C 为赤潮种的细胞密度; A 为赤潮发生的区域; D 表示赤潮事件持续的时间; L 表示从赤潮发生点到海岸线的最短距离; $f(T), f(C), f(A), f(D)$ 和 $f(L)$ 分别是 T, C, A, D, L 的函数 (Wang 等)。

TH 为赤潮威胁, E 为赤潮事件是否靠近渔业或养殖设施 (若赤潮事件靠近渔业或养殖设施, $E=1$; 否则 $E=0.5$); T, C, A, D, L 同上 (Wu 等)。

船舶压载水是引入和传播外来赤潮物种的重要渠道。刘冬^[43]、严志宇等^[44]、许海梁等^[45]、王洪超^[46]对船舶压载水导致赤潮灾害的风险进行了探究(见表 1-4)。但相关研究也存在不足, 例如刘冬、严志宇等和许海梁等确定指标权重方法为层次分析法、专家评分法或变异系数法, 层次分析法和专家评分法属主观赋权法, 不需要具备样本数据且对一些模糊的定性指标仍可做出评判, 但都受限于专家群体的知识、经验和主观价值判断^[47]; 变异系数法是客观赋权法的一种, 当评价因子对于评价目标来说比较模糊时采用变异系数法是比较合适的, 但对指标的具体经济意义不够关注, 是其缺点所在。在模型方面, 专家学者构建的模型相对简单; 在指标准则方面, 各专家学者采用的指标准则较为相似。

表 1-4 船舶压载水导致赤潮风险相关的研究

Tab.1-4 Study on the risk of HABs caused by ship's ballast water

| 学者 | 权重确定方法 | 模型 | 指标准则层 |
|----------------------|----------------|---|--|
| 刘冬 ^[43] | 层次分析法 专家打分法 | $Y=1.217X_1+0.578X_2+0.479X_3+0.178X_4-10.595$ | 入侵可能性 定殖可能性 扩散可能性 生态危害性 |
| 严志宇等 ^[44] | 专家打分法 | $A = \sum_{i=1}^5 R_i Q_i$ | 赤潮生物载入的可能性 赤潮生物存活的可能性 赤潮生物定殖的可能性 赤潮生物扩散的可能性 赤潮爆发的可能性 |
| 许海梁等 ^[45] | 变异系数法 | $R = \sqrt[3]{\prod R_i}$ | 载入的可能性 存活的可能性 定殖的可能性 扩散的可能性 爆发的可能性 引入的可能性 |
| 王洪超 ^[46] | / | $R_1 = \frac{C}{C_0} = e^{R \times t}$ 、 $R_2 = 1 - C_{ij}$ 、 $R_3 = (S_{\text{赤潮样本数}} / S_{\text{总预测样本数}}) \times 100\%$ 、 $R_{1\text{级}} = \sqrt[3]{(R_1 \times R_2 \times R_3)}$ | 引入风险 定殖风险 赤潮风险 |

注：表中 Y 为实测细胞数； X_1 为天气状况； X_2 为风向； X_3 为潮汐类型； X_4 为水温(刘冬)。 R_i 为各指标； Q_i 为指标权重(严志宇等)。 $R_i = \sum W_i R_{ij} / \sum W_i$ 或 $R_i = \max(R_{i1}, R_{i2}, \dots, R_{ij})$ ； R 为风险值； R_i 为准则层； R_{ij} 为指标层（许海梁等）。 R_1 为引入风险； C 为预测藻细胞浓度值； C_0 为初始藻细胞浓度值； R 为相关参数； R_2 为定殖风险； C_{ij} 为相似离度； R_3 赤潮风险； $R_{1\text{级}}$ 为总风险（王洪超）。

(2) 赤潮灾害灾情评估

赤潮灾害灾情评估是指对赤潮灾害造成的直间接经济损失、海洋生态环境及资源、人类身体和心理影响等进行定性或定量评估，它是赤潮灾害发生后制定应

急减灾方案、灾害补偿恢复的重要依据^[48]。

Jin 等^[49]建立回归模型评估了 2005 年 *Alexandrium fundyense* 赤潮对新英格兰缅因州和马萨诸塞州贝类渔业的直接经济影响；陈舜等^[50]认为赤潮灾害损失评估包括灾前损失预评估（定性评估）、灾时损失评估（定量初评估）和灾后损失实评估 3 级，将赤潮灾害给养殖业造成的经济损失分为直接经济损失、间接经济损失和资源恢复费用；文世勇等^[51]提出了赤潮灾害经济损失评估指标包括赤潮灾害监测与应急费用、赤潮灾害处置费用、海水养殖业经济损失和滨海旅游业经济损失四大类，同时构建了赤潮灾害经济损失评估模型（表 1-5）。以上研究多以海洋养殖业的损失为主，较少涉及其他方面的损失。

表 1-5 赤潮灾害经济损失评估指标与模型

Tab. 1-5 Economic loss assessment indexes and models of HABs disaster

| 赤潮灾害经济损失指标 | 模型 |
|-------------|---|
| 海水养殖业经济损失 | $E_{CL} = \sum_{i=1, j=1}^{i=n, j=12} (m_{ij} \times V_{ij})$ |
| 滨海旅游业经济损失 | $E_{TL} = n_i \times v_i \times t$ |
| 赤潮灾害监测费用 | $E_{MU} = \sum_{i=1}^{i=n} (V_i + E_{BU})$ |
| 赤潮灾害处置费用 | $E_{TU} = n \times v + E_{BU} + E_{RU}$ |
| 赤潮灾害造成的经济损失 | $E_{RTL} = E_{CL} + E_{TL} + E_{MU} + E_{TU}$ |

注： E_{CL} 为本次赤潮灾害造成海水养殖业的经济损失（元）； m_{ij} 为本次赤潮造成第 j 个养殖月份（时间）下第 i 个养殖品种的损失量（kg），由现场调查获取或通过亩产量与受灾面积之积获取； V_{ij} 为第 j 个养殖月份（时间）下第 i 个养殖品种的社会经济单位价值（元/kg），由现场调研或统计资料数据获取； E_{TL} 为本次赤潮灾害造成滨海旅游业的经济损失（元）； n_i 为受本次赤潮影响的滨海旅游海域的日均人数（人/d），由现场调查或通过历史相关统计资料获取； v_i 为受本次赤潮影响的滨海旅游海域的人均消费额（元/人），由现场调查或通过历史相关统计资料获取； t 为本次赤潮灾害事件的持续时间（d）； E_{MU} 为本次赤潮灾害事件的发生，监测部门需要开展的赤潮灾害业务与应急费用（元）； V_i 为本次赤潮灾害发生后，第 i 个监测站位的监测费用（元），由监测部门统计数据提供； E_{BU} 为本次赤潮发生后，用于支付船舶租用的费用（元），由监测部门统计分析提供； E_{TU} 为由于赤潮灾害事件的发生，处置部门需要开展的赤潮灾害处置费用（元）； n 为本次赤潮处置所需处置材料的消耗量（t），由处置部门现场实际使用量提供； v 为本次赤潮处置材料的经济单位价格（元/t），由采购部门统计数据提供； E_{BU} 为本次赤潮灾害处置，用于支付船舶租用的费用（元），由处置部门统计数据提供； E_{RU} 为本次赤潮灾害处置的人工费等费用（元），由处置部门统计数据提供； E_{RTL} 为本次赤潮灾害事件

造成的经济损失（元）。

1.2.4 分析与展望

由上述赤潮灾害的国内外研究现状可以得出，虽然有关学者已经对赤潮灾害作了大量探索工作，但赤潮灾害的研究相较于其他灾害如地震、洪水、台风等灾害的研究还存在许多不成熟之处，有待往后进一步深入研究：

赤潮灾害预测方面，部分学者采用简化的模式或简单的数学模型往往表现出明显的局限性。因此，在今后的研究中需在深入剖析赤潮灾害生消机理和孕灾环境参量的基础上，选择合适的赤潮灾害相关因子对赤潮做出更准确的预测，同时建立一个兼具赤潮监测、预警和实时预报三位一体的系统为赤潮灾害减灾防灾提供科学可靠的数据，已成为十分迫切的任务。

赤潮灾害评估方面，由于海洋环境的不稳定性和赤潮形成的复杂性，赤潮灾害风险评估尚没有系统成熟的理论和方法体系可供参考，导致目前专家学者对赤潮灾害的评估仍处于摸索尝试阶段。因此，加强赤潮灾害形成机理的研究分析仍是今后研究的重难点。指标体系应在深刻剖析某海域赤潮成因的基础上根据具体的海域选取。

本研究将赤潮灾害风险评估做为侧重点研究福建省宁德市沿海的赤潮灾害风险状况，为宁德沿海赤潮管理及海产养殖业规划提供依据。

1.3 研究的目的及意义

赤潮是海洋中的一些生物在一定的环境条件下爆发性增殖或聚集达到一定水平，使海水变色或危害海洋中其他生物的一种生态异常现象。赤潮的发生，不仅会威胁海洋生态环境、破坏海洋生态平衡，还给人类的健康和社会的发展造成损害^[6]。因此探究赤潮发生机理、进行赤潮灾害研究显得尤为必要。

宁德海域自然环境优良，拥有三都港、沙埕港、三沙湾、福宁湾和晴川湾等众多优良港湾，海洋资源丰富，生态类型多样，基本形成了以海洋渔业、航运业、旅游业、工业等为主的海洋经济体系。2013 年，全市海水养殖面积 62.52 万亩，港湾养殖面积 73.07 万亩，滩涂养殖面积 23.48 万亩，海水产品产量 73.69 亿吨。海洋渔业在宁德市经济中占据相当大的比重，2011 年全市海洋经济总产值 499 亿元，占全市 GDP 的 24.3%；2012 年总产值达到 648 亿元，占 GDP 的 24.84%；2013

年,全市海洋经济总产值高达 891.43 亿元,占 GDP 比重达 27.3%,海洋经济已成为全市国民经济的重要组成部分,带动总体经济的发展,推动着宁德成为海西经济发展的重要力量^[52]。但宁德海域尤其是三都澳地区的海水养殖业存在一些不容忽视的问题,如海水养殖区分布不科学,网箱布设拥挤,养殖密度过高,致使水体交换能力减弱,污染物扩散减缓,造成环境水质恶化。近年来宁德海域频频发生赤潮,严重危害海洋生态平衡和水产资源,且根据 2014 年宁德三沙湾赤潮监控区海洋环境监测评价结果:赤潮监控区内大部分海水的 DIP、DIN 含量只能满足三类或四类海水水质标准,少数站位甚至为超四类海水水质标准,各站位在监控月份大都处于富营养化中高水平,极易引发赤潮影响海洋经济的发展。1989 年 11 月,福鼎市发生首次织纹螺中毒,至 2010 年底,全市共发生织纹螺中毒 22 起,中毒人数 79 人,其中死亡人数 10 人,病死率 12.7%,平均每起中毒人数 3.5 人,主要发生在福鼎、福安、霞浦、蕉城 4 个沿海县(市、区)。织纹螺本身无毒,其体内所含毒素是外界环境因素毒化所致,公认的外因是赤潮,由于海洋环境污染,赤潮频发,织纹螺摄入有毒的藻类,受到毒化后含石房蛤毒素^[53]。

过去对宁德沿海相关海域的海洋生态环境质量、生物群落、赤潮的特征、成因和预测等方面虽有研究^[54-58],但对其赤潮灾害风险状况评估尚未见报道,鉴于此,本文依据宁德沿海具体实际构建了宁德沿海赤潮灾害风险评估指标体系,运用熵权法确定各指标权重,并构建了赤潮灾害致灾因子危险度模型、赤潮灾害承灾体易损度模型和赤潮灾害风险模型,最后将上述研究应用于宁德沿海,得出了宁德各主要海湾的赤潮灾害风险,为宁德沿海赤潮管理及海产养殖业规划提供依据。

1.4 研究内容

(1) 水体富营养化与赤潮发生息息相关,本研究在赤潮灾害风险评估前先对宁德沿海水体富营养化状况进行评价;

(2) 自然灾害风险评估一般包括对灾害致灾因子危险度、孕灾环境因子危险度、承灾体易损度和灾害风险四个方面的评估,本研究内容包含赤潮致灾因子风险评估、孕灾环境因子评估、赤潮承灾体易损度评估和赤潮灾害风险评估;

(3) 结合区域灾害系统论和 ArcGIS 地统计分析,以宁德沿海为研究对象,根据灾害风险评估理论及宁德海域具体情况,基于评价指标主导性、可度量性和易获得性等原则建立宁德沿海赤潮灾害致灾因子评估指标体系、孕灾环境因子评

估指标体系、承灾体易损度指标体系,采用权重确定方法熵权法确定各指标权重;

(4) 建立宁德沿海赤潮灾害致灾因子评估模型、孕灾环境因子评估模型、承灾体易损度评估模型及赤潮风险评估模型;

(5) 收集各指标数据、建立宁德沿海赤潮灾害风险评估数据库;

(6) 将建立的赤潮灾害风险评估指标体系、模型应用于宁德沿海,得出宁德沿海各主要海湾赤潮灾害致灾因子危险度评估结果、孕灾环境因子危险度评估结果、承灾体易损度评估结果和赤潮灾害风险评估结果;

(7) 利用地理信息系统软件(GIS)实现专题图制作,将研究结果与历年来实际情况及相关研究进行比对,验证所建立的评估指标体系及模型的可行性。

1.4.1 研究技术路线

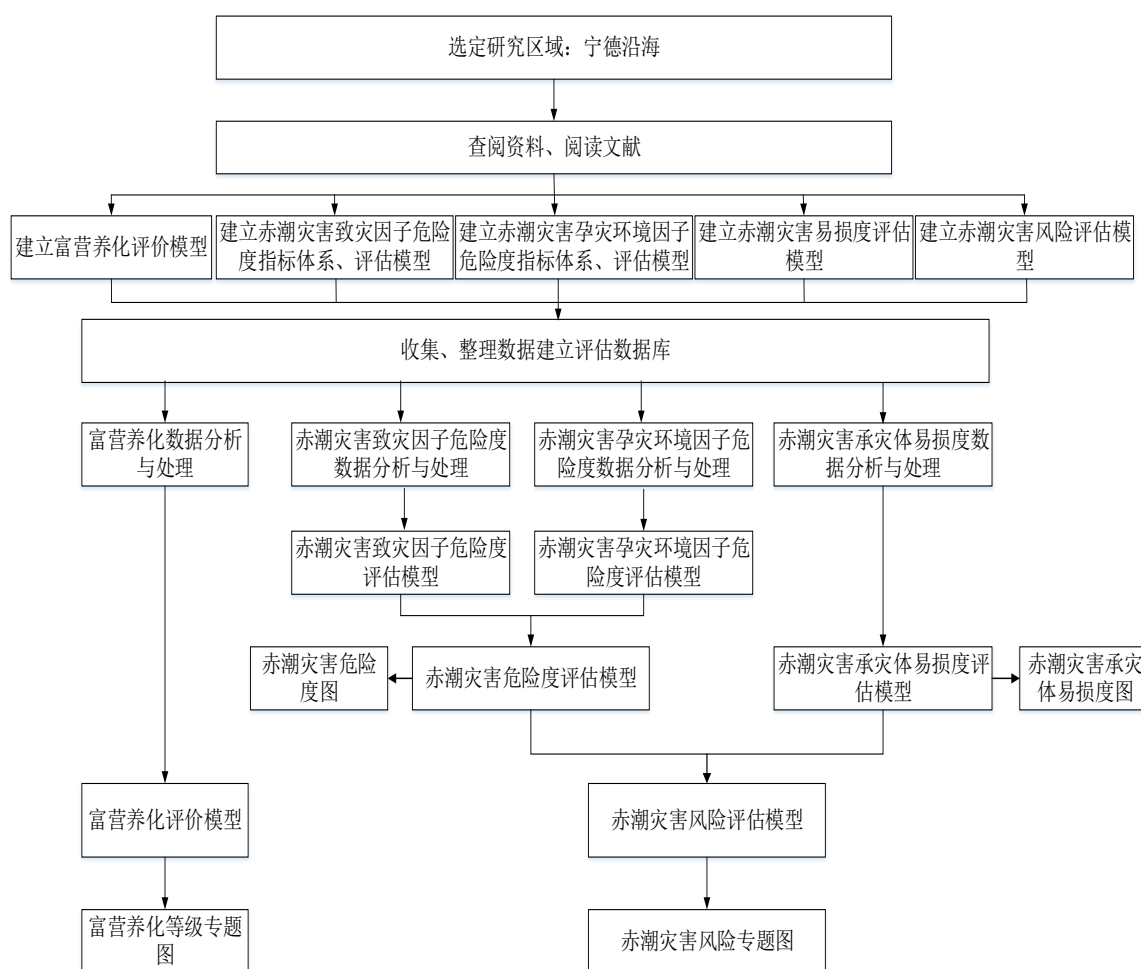


图 1-3 论文技术路线图

Fig.1-3 Technical route in this dissertation

1.4.2 论文主要创新点

（1）本文将区域灾害系统论和地统计分析理论运用于宁德沿海的赤潮灾害风险评估中；为宁德海域赤潮灾害研究、防治提供了有益参考；

（2）在参考前人研究基础上，构建了宁德海域的赤潮灾害风险评估指标体系和评估模型，采用相对科学的熵值法确定各指标权重、得出宁德沿海主要海湾赤潮灾害风险，评估结果与赤潮发生历史资料及相关研究相一致。

（2）在 GIS 地统计分析平台上实现了宁德沿海赤潮灾害危险度、承灾体易损度和赤潮灾害风险的专题图制作，实现了评估结果的可视化，在此基础上对相应海域的赤潮灾害评估结果进行分析，为实现结果的广泛应用提供了思路。

第二章 研究区概况

2.1 宁德海洋环境条件

宁德地处福建省东北部沿海, 介于 $118^{\circ} 32' \sim 120^{\circ} 43' E$ 、 $26^{\circ} 18' \sim 27^{\circ} 40' N$ 之间, 海岸线长度约 1046 千米, 海域面积 44600km^2 , 浅海滩涂面积 934km^2 , 各类岛屿 448 个。范围包括福鼎市、霞浦县、蕉城区和福安市沿海海域、滩涂, 蕴藏丰富的渔业资源、港口资源、滨海旅游资源等, 有鱼类 500 多种, 甲壳类 60 多种, 贝类 70 多种。宁德海域广阔, 优良港湾众多, 包括沙埕港、三都湾等主要港湾, 是我国珍稀物种中华白海豚的栖息地。

沙埕港位于宁德市东北海区, 为深入内陆的弯曲形港湾, 港湾内大部分水深 10m 以上, 最大水深 45m, 港湾条件天然优良。

三沙湾典型特征是与外海沟通的出口小, 湾内面积大, 有三都澳、盐田港、鲟门港、白马港、官井洋、东吴洋等次一级海湾。是福建省乃至我国最大的大黄鱼网箱养殖基地, 它的养殖规模、产量及产值均居全国第一。主要入海河流有霍童溪、杯溪、交溪等。湾内最大水深 90m。

2.2 气象与水文条件

宁德位于中低纬度, 受太阳辐射和山地地形及季风环境影响, 中亚热带海洋性季风气候显著。季节分明, 光热充足, 雨水丰富, 有天然空调城的美誉。

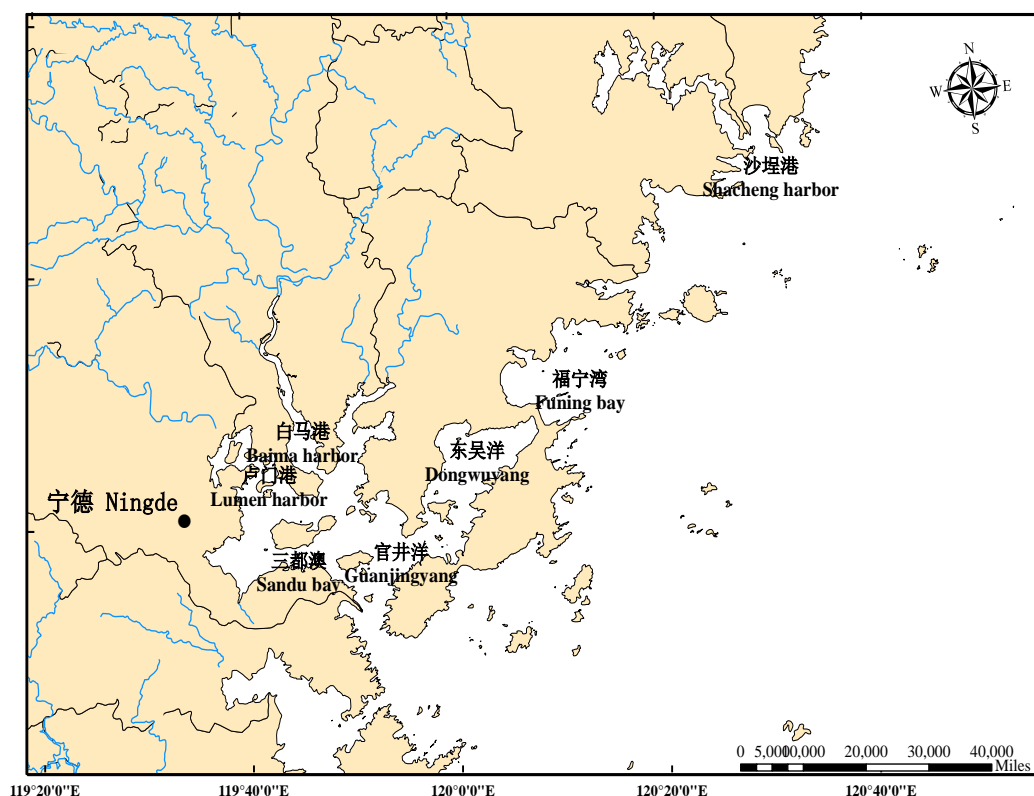
本区的平均气温 $17\sim 19^{\circ}\text{C}$, 最冷月平均气温 $8\sim 10^{\circ}\text{C}$, 稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$, 积温 $5900\sim 6500^{\circ}\text{C}$, 1 月平均 $8.6\sim 9.7^{\circ}\text{C}$, 7 月平均 $28.2\sim 29.12^{\circ}\text{C}$, 极端高温 43.2°C , 极端低温 $0\sim 3.9^{\circ}\text{C}$, 外海年平均气温 $17.3\sim 17.5^{\circ}\text{C}$ 之间, 内海和海岸带 19°C 左右, 夏天外海区小于 35°C , 海岛冬天极少有低于 0°C 的寒冷天气, 海岸带仅 1~6 天, 梅雨季在 3~6 月, 降水量占全市 43~50%, 台风雷雨季在 7~9 月, 降水量占全年 31~39%。无霜期长 270~300 天; 年日照 1700~1900 小时, 太阳总辐射为 $4186.8\sim 4438$ 兆焦耳/ $(\text{m}^2\cdot\text{a})$; 年平均降水量大多数地区 1300~1600 mm。霞浦东南沿海、黄岐半岛、台

山 1000~1200 mm^[59]。

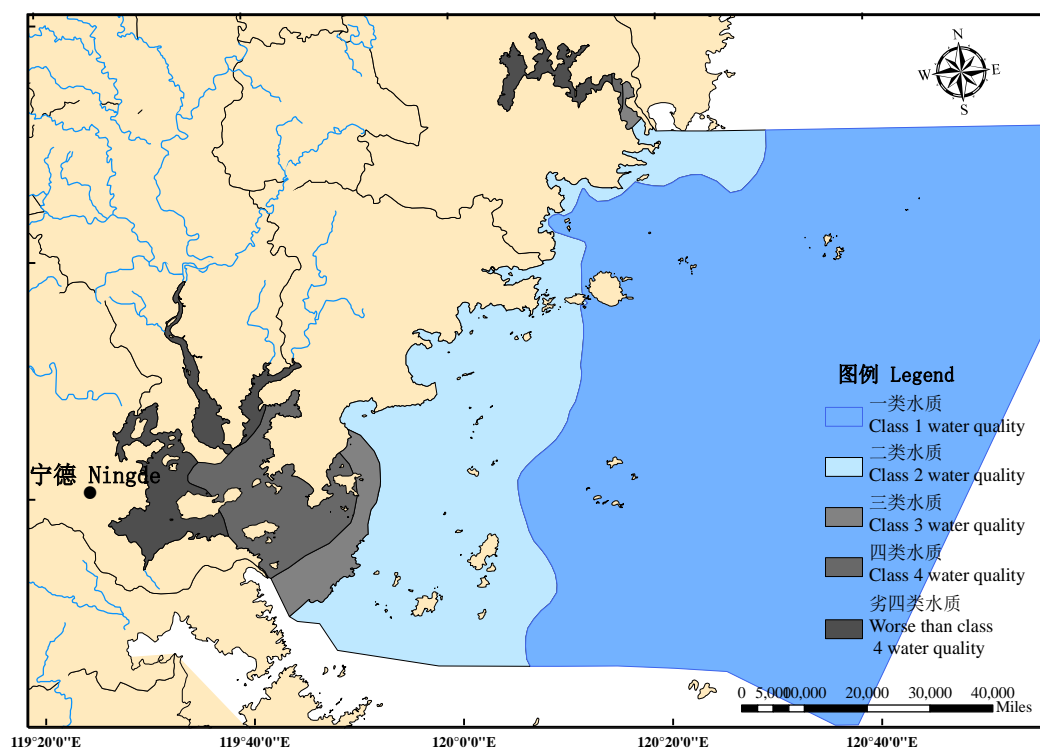
宁德海域位于我国东海南部，东临台湾海峡，夏秋两季受北上黑潮暖流支流控制，冬春两季受南下闽浙沿岸流影响^[60]。受地形作用，沙埕港内基本上是往复流，大潮涨潮流速小于落潮流速，港口狭窄，外海波浪不易进入，小风区波浪影响较小。

2.3 水化学要素特征

宁德市海洋与渔业局于 2015 年 1 月、5 月、8 月对沙埕港、福宁湾、白马港、卢门港、东吾洋、官井洋、三都澳和东冲口 8 个主要海湾（图 2-1a）开展水质监测，监测项目包括 pH、DO、COD、DIN、DIP 等。监测结果表明：8 个主要海湾海水的 pH 值、DO、COD 都满足第一类海水水质标准；DIN 含量方面，福宁湾满足第一类海水水质标准，白马港、东吾洋、官井洋、三都澳和东冲口均符合第三类海水水质标准，超三类海水水质标准的有卢门港、沙埕港；DIP 含量方面，除福宁湾满足第一类海水水质标准外，其他海湾均超第三类海水水质标准^[8]（图 2-1b）。



(a)



(b)

图 2-1 宁德市海域(a)主要海湾; (b)2015 年水质状况

Fig.2-1 Coastal waters of Ningde (a) the main gulf; (b) water quality in 2015

2.4 宁德沿海使用状况

宁德市海域总面积约 8242km²，农渔业区 11 个，面积 604438.31 公顷；旅游休闲娱乐区 4 个，面积 12320.20 公顷；海洋保护区 10 个，面积 313140.00 公顷^[61]。

表 2-1 宁德市海域海洋环境功能区

Tab. 2-1 The environmental functional area of Ningde coastal waters

| 功能区类别 | 功能区名称 |
|---------|------------------|
| 农渔业区 | 八尺门农渔业区 |
| | 姚家屿农渔业区 |
| | 沙埕港农渔业区 |
| | 福宁湾农渔业区 |
| | 渔井农渔业区 |
| | 沙头农渔业区 |
| | 东冲半岛农渔业区 |
| | 东吾洋农渔业区 |
| | 盐田港农渔业区 |
| | 八都农渔业区 |
| | 近海农渔业区 |
| 旅游休闲娱乐区 | 小白露旅游休闲娱乐区 |
| | 晴川湾旅游休闲娱乐区 |
| | 下浒澳旅游休闲娱乐区 |
| | 三都旅游休闲娱乐区 |
| 海洋保护区 | 沙埕港红树林海洋保护区 |
| | 盐田港红树林海洋保护区 |
| | 湾坞红树林保护区 |
| | 台山列岛星仔岛海洋保护区 |
| | 日屿七星列岛海洋保护区 |
| | 福瑶列岛海洋保护区 |
| | 浮鹰岛海洋保护区 |
| | 官井洋大黄鱼海洋保护区 |
| | 环三都澳水禽红树林海洋保护区 |
| | 东引岛-东沙岛领海基点海洋保护区 |

2.5 主要入海污染物

近年来, 国家高度重视海峡西岸经济区发展, 环三都澳区域发展规划得到落实, 宁德市海洋资源开发利用活动日益增多, 宁德沿海借助海岸、海岛和三都湾、沙埕港等优良港湾优势, 已成为核电厂、火电厂、中海油、修造船基地等一大批重点临港工业集中区^[62]。此外近年来宁德沿海城市化步伐加快、沿海经济以及生态旅游业的推进, 未妥善处理的居民生活污水、农业污水和海水养殖业等污水排入海域, 导致宁德海域水环境质量下降和富营养化, 而富营养化是导致赤潮发生的因素之一。

2.5.1 主要江河入海污染物总量排放情况及入海口环境质量

宁德市海洋与渔业局于 2015 年 3 月、5 月、8 月和 10 月对交溪、霍童溪和杯溪的入海污染物总量进行了监测（交溪另增 7 月、11 月两个监测频次），监测项目包括 COD_{Cr}、氮、磷等。结果显示：入海污染物排放总量约 168000 吨/年，排放总量比 2014 年增加 23000 吨。交溪、霍童溪和杯溪的水环境质量监测结果表明，交溪、霍童溪和杯溪入海口无机氮和活性磷盐含量偏高，超二类海水水质标准。

2.5.2 重点陆源排污状况及邻近海域环境质量

2015 年 3 月、5 月、7 月、8 月、10 月和 11 月分别对宁德蕉城市政、福鼎市政、福鼎白琳石材加工区 3 个重点陆源入海排污口开展监测，监测内容包括 COD_{Cr}、NH₄⁺-N、TP、悬浮物等。监测结果显示：宁德蕉城区市政、福鼎市政、福鼎白琳石材加工区入海排污口主要污染物排放总量约为 1.56 万吨/年，N、P 排海总量较 2014 年大。2015 年 5 月和 8 月监测了宁德蕉城市政、福鼎市政、福鼎白琳石材加工区入海排污口附近海域环境质量，结果显示，陆源入海排污口邻近海域遭受不同程度的污染，无机氮和活性磷酸盐含量均超第二类海水水质标准^[8]。

2.6 浮游植物的群落结构、空间分布特征

根据 2014 年海洋生物多样性环境监测结果^[61]：

（1）三沙湾浮游植物群落结构

浮游植物种类 43 种，其中硅藻 39 种，占浮游植物种类的 90.70%，甲藻 4 种。浮游植物细胞数范围在 5.36×10^5 cells/m³~ 1.66×10^7 cells/m³，均值为 5.01×10^6 cells/m³，主要优势种为高盒形藻、琼氏圆筛藻、奇异菱形藻、布氏双尾藻、中肋骨条藻、旋链角毛藻。多样性指数变化范围为 1.88~2.42，均值为 2.13；均匀度指数变化范围为 0.10~0.51，均值为 0.39；丰度指数变化范围为 0.79~2.76，均值为 1.53。

（2）沙埕港浮游植物群落结构

浮游植物种类 20 种，其中硅藻 15 种，占浮游植物种类的 75.00%，甲藻 5 种。浮游植物细胞数 1.01×10^7 cells/m³，主要优势种为脆指管藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻。多样性指数 1.57，均匀度指数 0.36，丰度指数 0.82。

（3）宁德外海浮游植物群落结构

浮游植物种类 44 种，其中硅藻 32 种，占浮游植物种类的 72.73%，甲藻 12 种。宁德外海浮游植物细胞数范围在 4.46×10^4 cells/m³~ 5.27×10^7 cells/m³，均值为 1.30×10^7 cells/m³。主要优势种为脆指管藻、柔弱拟菱形藻、中肋骨条藻。多样性指数变化范围为 0.73~2.77，均值 1.65；均匀度指数变化范围为 0.17~0.78，均值为 0.42；丰度指数变化范围为 0.39~1.04，均值为 0.81。

2.7 赤潮及赤潮生物生态特征

(1) 赤潮发生概况

赤潮发生的历史数据资料来源于《中国赤潮灾害调查与评价(1933-2009)》^[63]，从中统计了 2000-2009 年发生于研究区域的赤潮发生时间、地点及范围见表 2-2、图 2-2，由表 2-2 可知 2000-2009 年霞浦沿海共发生赤潮 20 起，福鼎沿海发生赤潮 10 起，蕉城沿海和福安沿海分别为 2 起和 1 起；从总体上看，发生于霞浦沿海和福鼎沿海的赤潮在总持续时间和总范围上显著大于福安沿海和蕉城沿海。

表 2-2 2000—2009 年宁德各沿海的赤潮发生情况

Tab.2-2 The occurrence of harmful algal blooms Ningde sea area from 2000 to 2009

| 研究海域 | 赤潮发生总次数 | 总持续时间/d | 总面积/km ² |
|------|---------|---------|---------------------|
| 霞浦沿海 | 20 | 95 | 2143 |
| 福鼎沿海 | 10 | 58 | 1977 |
| 蕉城沿海 | 2 | 5 | 12.5 |
| 福安沿海 | 1 | 5 | 150 |

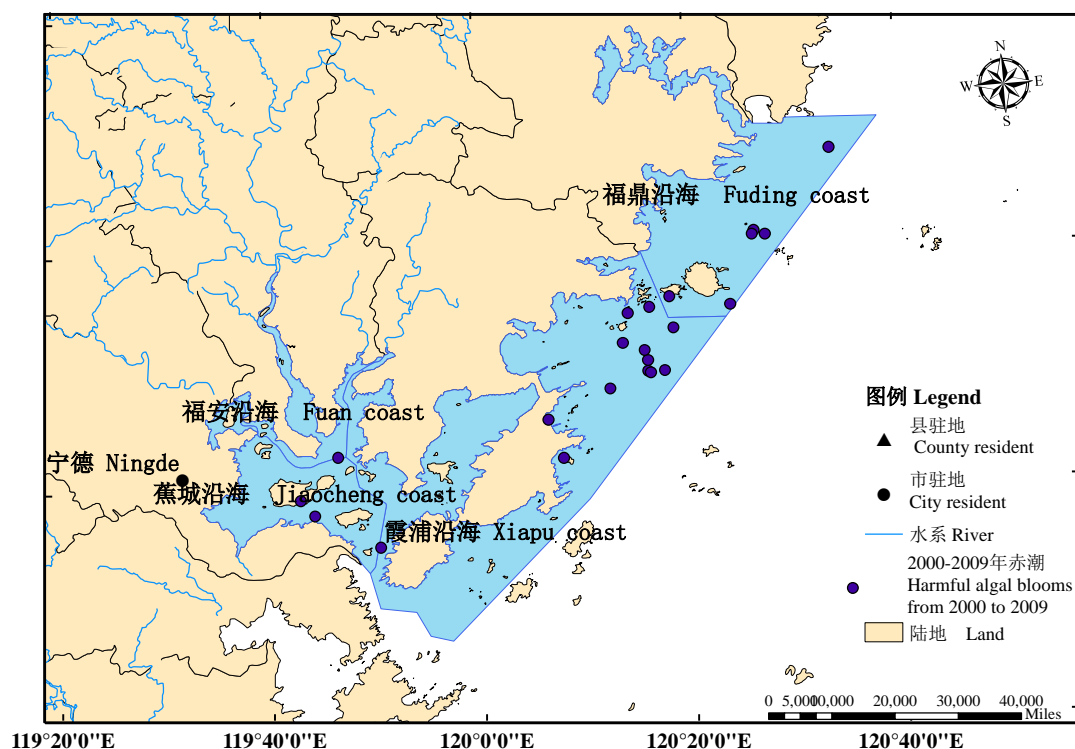


图 2-2 研究区域赤潮灾害统计

Fig.2-2 Statistic of HABs in study area

(2) 赤潮生物季节分布特征

宁德海洋环境监测中心站 2015 年 4 月~10 月三沙湾赤潮监控区常规监测项目中赤潮生物优势种名录如表 2-3。2015 年三沙湾赤潮监控区常规监测 34 个航次调查中赤潮生物优势种 51 种，其中硅藻 43 种，春夏秋三季均有出现，甲藻 8 种，出现在春夏两季。由表 2-3，春夏两季的优势种类较多，秋季优势种减少。主要的优势种有中肋骨条藻、菱形藻属、长菱形藻、新月菱形藻、曲舟藻属、角毛藻属、诺氏海链藻、具槽直链藻、羽纹藻属，中肋骨条藻在每个航次都有出现。

有毒藻种尖刺拟菱形藻、柔弱拟菱形藻含有记忆缺失性贝毒；链状亚历山大藻产 PSP；米氏凯伦藻和血红哈卡藻为其他有毒有害藻类。2015 年 5 月、8 月三沙湾赤潮监控区贝毒检测结果如表 2-4。由表 2-4，2015 年 5 月、8 月对赤潮毒素敏感种类贻贝、缢蛏和牡蛎开展毒性检测，未检出 PSP 和 DSP。

表 2-3 三沙湾赤潮监控区赤潮生物优势种名录

Tab. 2-3 List of HABs plankton dominant species in Sansha bay HABs monitoring area

| 中文名 | 拉丁名 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 出现频次 |
|--------|---|----|----|----|------|
| 硅藻门 | <i>Bacillariophyta</i> | | | | |
| 中肋骨条藻 | <i>Skeletonema costatum</i> | + | + | + | 34 |
| 菱形藻属 | <i>Nitzschia sp.</i> | + | + | + | 22 |
| 长菱形藻 | <i>Nitzschia longissima</i> | + | + | + | 19 |
| 新月菱形藻 | <i>Nitzschia closterium(Her.) smith</i> | + | + | + | 10 |
| 尖刺拟菱形藻 | <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> | + | + | + | 7 |
| 奇异菱形藻 | <i>Nitzschia paradoxa(Gmelin) Grunow</i> | | | + | 1 |
| 柔弱拟菱形藻 | <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> | | + | | 2 |
| 丹麦细柱藻 | <i>Leptocylindrus danicus</i> | + | + | | 6 |
| 小细柱藻 | <i>Leptocylindrus minimus</i> | | | + | 2 |
| 中华盒形藻 | <i>Biddulphia sinensis</i> | + | | + | 5 |
| 长角盒形藻 | <i>Biddulphia longicruris</i> | | + | | 1 |
| 刚毛根管藻 | <i>Rhizosolenia setigera</i> | | + | | 1 |
| 笔尖形根管藻 | <i>Rhizosolenia styliformis</i> | | + | | 3 |
| 柔弱根管藻 | <i>Rhiz. delicatula cleve</i> | + | + | | 2 |
| 地中海指管藻 | <i>Dactyliosolen mediterraneus Per.</i> | | + | | 1 |
| 圆筛藻属 | <i>Coscinodiscus sp.</i> | + | + | + | 8 |
| 有翼圆筛藻 | <i>Cos. Bipartitus</i> | + | | | 1 |
| 琼氏圆筛藻 | <i>Cos. jonesianus Ostenfeld</i> | | + | | 1 |
| 曲舟藻属 | <i>Pleurosigma sp.</i> | + | + | + | 12 |
| 海洋曲舟藻 | <i>Pleurosigma pelagicum</i> | + | + | | 4 |
| 优美旭氏藻 | <i>Schroderella delicatula</i> | + | | | 1 |
| 布氏双尾藻 | <i>Ditylum brightwellii (west) Grunow</i> | + | + | | 3 |
| 条纹小环藻 | <i>Cyclotella striata</i> | + | | + | 2 |
| 角毛藻属 | <i>Chaetoceros sp.</i> | + | + | | 17 |
| 旋链角毛藻 | <i>Chaet. curvisetus cleve</i> | + | + | + | 6 |
| 海链藻 | <i>Thalassiosira sp.</i> | + | + | | 9 |
| 圆海链藻 | <i>Thalassiosira rotula</i> | + | | | 1 |
| 细弱海链藻 | <i>Thalassiosira subtilis</i> | + | | | 1 |
| 诺氏海链藻 | <i>Thalassiosira nordenskioldi</i> | + | + | + | 20 |
| 柏氏角管藻 | <i>Cerataulina bergonii Peragallo</i> | | + | | 1 |
| 针杆藻 | <i>Synedra sp.</i> | | | + | 1 |
| 斯氏几内亚藻 | <i>Guinardia striata</i> | | + | | 1 |
| 海生斑条藻 | <i>Grammatophora marina</i> | | + | | 2 |
| 塔形冠盖藻 | <i>Stephanopyxis turris</i> | | + | | 2 |
| 菱形海线藻 | <i>Thalassionema nitzschioides</i> | + | + | + | 6 |
| 具槽直链藻 | <i>Melosira sulcata (Ehrenberg) cleve</i> | + | + | + | 15 |
| 念珠直链藻 | <i>Melosira moniliformis</i> | + | | | 1 |
| 羽纹藻属 | <i>Pinnularia sp.</i> | + | + | + | 24 |

| 中文名 | 拉丁名 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 出现频次 |
|---------|---|----|----|----|------|
| 短柄曲壳藻 | <i>Achnanthes brevipes</i> Agardh | + | + | | 2 |
| 日本星杆藻 | <i>Asterionella japonica</i> | + | | | 2 |
| 唐氏藻属 | <i>Donkinia</i> sp. | + | | | 1 |
| 舟形藻属 | <i>Navicula</i> sp. | + | + | | 4 |
| 翼茧形藻 | <i>Amphiprora alata</i> | | + | | 1 |
| 甲藻门 | <i>Pyrrophyta</i> | | | | |
| 东海原甲藻 | <i>Prorocentrum donghaiense</i> | + | + | | 8 |
| 血红哈卡藻 | <i>Akashiwo sanguinea</i> | + | | | 2 |
| 锥状斯氏藻 | <i>Scrippsiella trochoidea</i> | + | + | | 6 |
| 米氏凯伦藻 | <i>Karenia mikimotoi</i> | + | + | | 4 |
| 波罗的海原甲藻 | <i>Prorocentrum balticum</i> <i>Loeblich</i> | | + | | 1 |
| 海洋原甲藻 | <i>Prorocentrum micans</i> | | + | | 1 |
| 尖叶原甲藻 | <i>Prorocentrum triestinum</i> | | + | | 1 |
| 链状亚历山大藻 | <i>Alexandrium catenella</i> | | + | | 1 |

注：+表示存在。

表 2-4 2015 年三沙湾赤潮监控区贝毒检测结果

Tab.2-4 The detection result of shellfish toxin in Sansha bay HABs monitoring area in 2015

| 贝毒种中文 学名 | 贝毒种拉丁名 | 贝类采集环 境 | 贝毒种类 | 贝毒含量 MU/100g |
|-------------|------------------------------------|------------|-------|-----------------|
| 贻贝 | <i>Mytilus coruscus</i> | 岩石 | 麻痹性贝毒 | - |
| 贻贝 | <i>Mytilus coruscus</i> | 岩石 | 腹泻性贝毒 | - |
| 缢蛏 | <i>Sinonovacula constrzcta</i> | 滩涂 | 麻痹性贝毒 | - |
| 缢蛏 | <i>Sinonovacula constrzcta</i> | 滩涂 | 腹泻性贝毒 | - |
| 牡蛎 | <i>Ostrea sp.</i> | 岩石 | 麻痹性贝毒 | - |
| 牡蛎 | <i>Ostrea sp.</i> | 岩石 | 腹泻性贝毒 | - |

注：-表示未检出。

第三章 材料与方法

3.1 引言

本研究拟从区域灾害系统论角度结合 ArcGIS 地统计分析方法对宁德海域的赤潮灾害风险进行评估。

区域灾害系统是由致灾因子、孕灾环境因子和承灾体共同组成的地球表层异变系统^[64-67]。灾害的形成就是承灾体对环境变化不能适应或做出调整的结果^[64]，因此研究赤潮灾害，致灾因子、孕灾环境因子与承灾体都应考虑在内。

地统计分析运用概率论和数理统计的方法来研究地理数据的空间分布规律，既可以对未采样的位置进行预测，也可以对预测的不确定性进行度量^[68]。运用地统计分析包括显示数据、数据探索分析、选择适当的插值方法、拟合模型、交叉验证等步骤。空间插值的意义在于，在实际区域研究中要获得区域内所有点的数据是不现实的，但可以通过一些特定的采样点来反映空间分布的全部或部分特征，然后利用空间插值的方法获得未采样点的值^[68]。

本研究运用的地统计分析插值步骤如下：

(1) 将所需插值数据导入 ArcGIS10.0 中创建图层；

(2) 首先借助地统计分析中的探索数据工具条探索将要插值数据的分布、趋势、空间自相关性和方向影响。利用 Histogram、Normal QQ Plot 检验数据是否服从正态分布和寻找数据离群值，在地统计学中，普通克里金法一般要求数据呈正态分布；基于 Trend Analysis 对数据进行趋势分析，如果从各个角度看拟合线平直，则不存在趋势，如果拟合线非平直，说明存在趋势，插值时就要使用确定性插值方法，或在使用克里金法时选择恰当函数消除此种趋势。Semivariogram/ Covariance Cloud 用来检验空间自相关和各向异性，进行空间插值的前提是数据空间自相关。

(3) 根据步骤 2 中探索的数据的统计属性选择合适的插值方法、拟合模型进行交叉验证，评估输出表面是否与预期相匹配。应验证：a. 预测是否具有无偏性，判定条件为标准平均值接近 0；b. 标准误差是准确的，即标准均方根应接近 1；c. 预测与测量值的偏差不大，判定条件是均方根和平均标准误差尽可能小且两者相近。

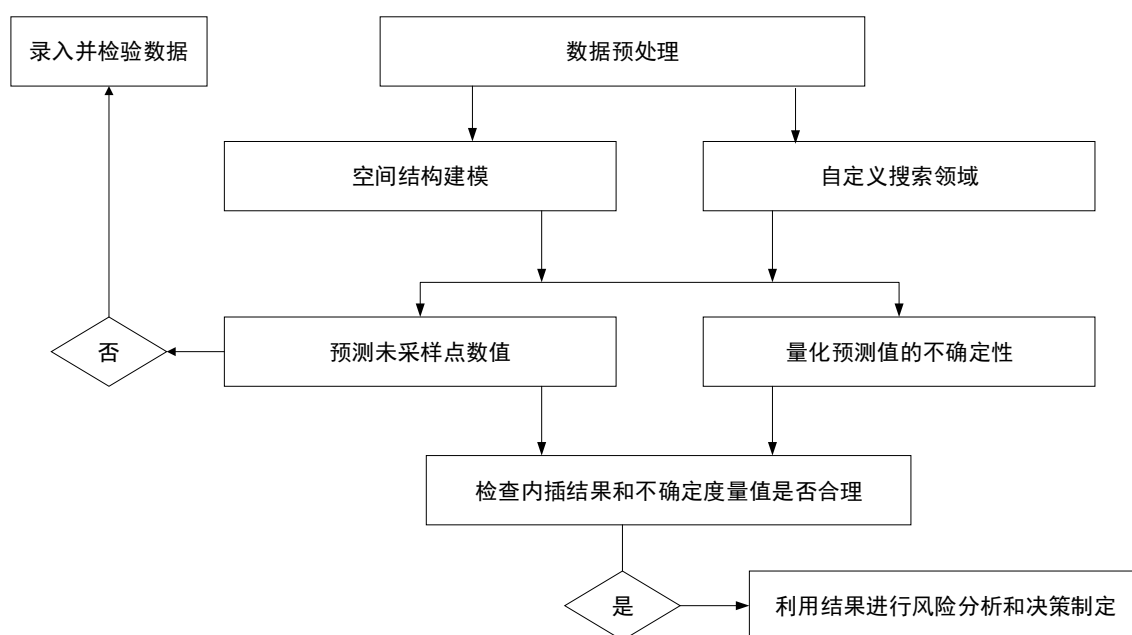


图 3-1 地统计分析原理图

Fig.3-1 Schematic chart of geostatistical analysis

3.2 研究海域

宁德海域位于我国东海南部，拥有一千多公里长的海岸线，四万多公顷的滩涂面积，海洋生物资源十分丰富，具有良好的海水养殖业条件，是海洋经济项目开发的黄金区域^[60]。位于宁德沿海的三沙湾海域是福建省六大天然深水良港之一，是福建省及全国最大的大黄鱼养殖基地^[69, 70]。

本文研究海域范围为宁德沿海，数据来源于 2016 年改革与优化重点用海项目立项环评工作十三个重点海湾（沙埕港和三沙湾）环境与资源现状调查，站点如图 3-2，包括沙埕港 30 个站位（SC1-SC30）、宁德东部海域 49 个站位（NE1-NE49）和三沙湾 71 个站位（SS1-SS71）。

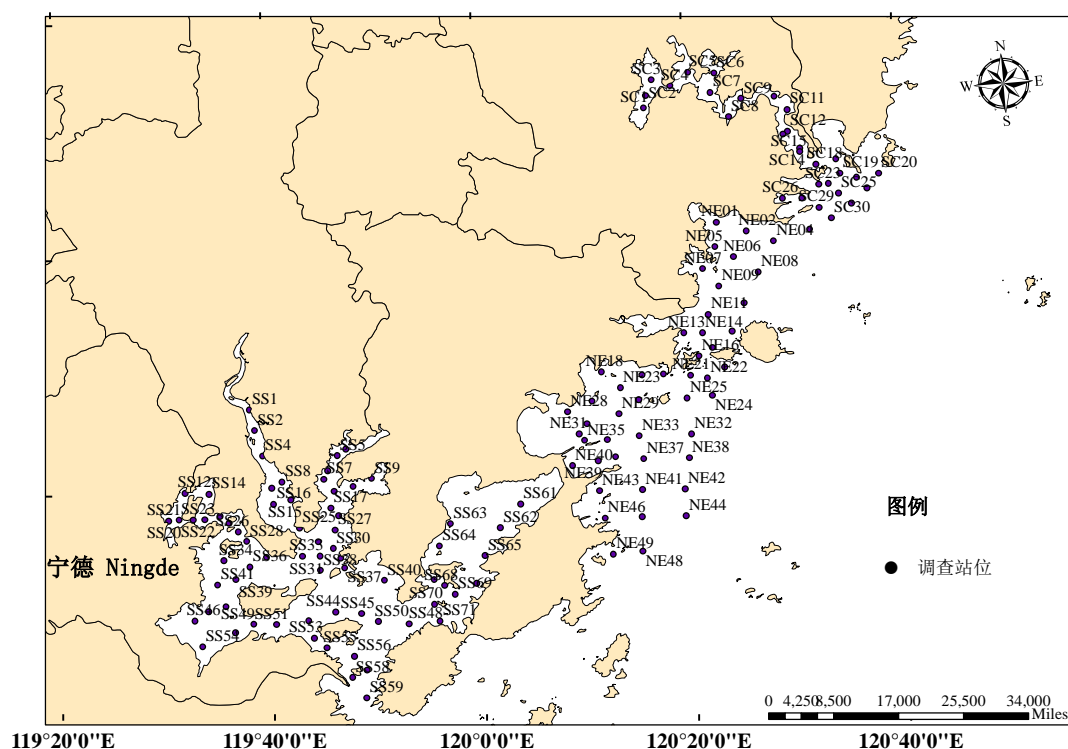


图 3-2 研究区域

Fig.3-2 Study area

3.3 数据收集

赤潮灾害致灾因子、孕灾环境因子、富营养化评价数据来自福建省宁德海洋环境监测中心站 2016 年改革与优化重点用海项目立项环评工作十三个重点海湾（沙埕港和三沙湾）环境与资源现状调查任务的春季（3 月 30 日）数据。

赤潮灾害承灾体数据来源于福建省宁德市海洋与渔业局 2015 年的《福建省渔业统计报表制表制度》。宁德优越的自然条件繁衍了大量海洋生物资源，宁德海域鱼、虾、蟹、贝类资源丰富，除传统的蛎、蚶、蛤、蛸四大贝类外，还引进太平洋蛎、鲍鱼、贻贝等养殖品种。水产养殖业为宁德的主导第一产业，宁德特殊的经济产业决定了发生于宁德沿海的赤潮，海产养殖业是其最直接且最重要的承灾体，此外，赤潮还会对农渔业区、海洋保护区和旅游休闲娱乐区等特殊海区造成影响。

3.4 方法

3.4.1 宁德海域富营养化状况评价

水体富营养化与赤潮发生息息相关，赤潮发生时，几乎海水都会呈现不同程度的富营养化状态^[71]。因此，掌握海域富营养化状况对确保海洋环境健康、海洋经济建设意义深远。本文采用营养指数(E)评价法研究宁德海域的富营养化状况：

$$E = \frac{(COD \times DIN \times DIP \times 10^6)}{4500} \quad (3-1)$$

式中：E 为富营养化指数；COD 为海水中的化学需氧量的实测浓度，单位 mg/L；DIN 为溶解态 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 实测浓度之和，单位 mg/L；DIP 为溶解态活性磷酸盐的实测浓度，单位 mg/L。当 $E \geq 1$ ，代表水体已富营养化；当 $E < 1$ ，代表水体未富营养化，进一步划分标准如下表：

表 3-1 富营养化等级划分^[72]

Tab.3-1 Eutrophication grade

| 富营养化等级 | 贫营养 | 轻度富营养 | 中度富营养 | 重度富营养 | 严重富营养 |
|----------|------|-----------|-----------|------------|-------------|
| 富营养化指数 E | <1.0 | [1.0,2.0] | [2.0,5.0] | [5.0,15.0] | ≥ 15.0 |

3.4.2 宁德海域赤潮灾害风险评估

(1) 指标体系的构建

本文构建的评价指标体系包含赤潮灾害致灾因子危险度、孕灾环境因子危险度和承灾体易损度。

赤潮的发生是个复杂的过程，是各种理化因子共同作用产生的结果，诸如气象、气候因素、水动力条件、海水的物理化学因素等都可能与赤潮形成密切相关，赤潮发生又将反作用于相关海域的生态系统健康。

宁德市海水养殖业发达，赤潮发生对海产养殖业将构成极大的危害，可使鱼类、虾类、蟹类、贝类等海水养殖产品大批死亡，在深入内陆的海湾如三沙湾、沙埕港，甚至可以造成养殖生物的全部死亡^[73]。赤潮灾害对承灾体的破坏还体现在农渔业区、海洋保护区、旅游休闲娱乐区上。初步建立的指标集如图 3-3 所示：

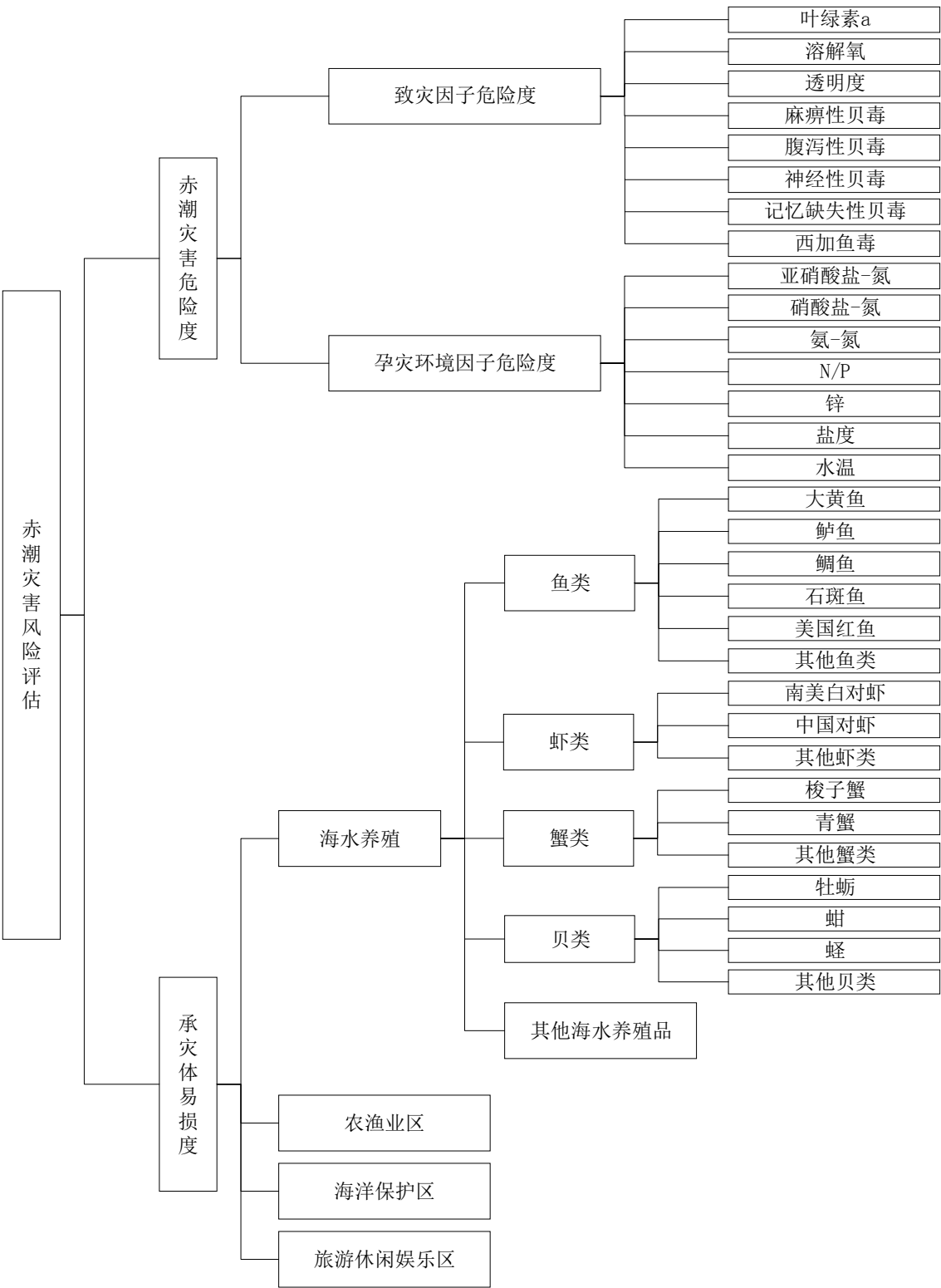


图 3-3 初步构建的宁德沿海赤潮灾害风险评估指标体系

Fig.3-3 Risk assessment index system of harmful algal blooms in Ningde coast

由于本次研究的数据来源于国家海洋局宁德海洋环境监测中心站 2016 年改革

与优化重点用海项目立项环评工作十三个重点海湾（沙埕港和三沙湾）环境资源现状调查项目，该项目未对宁德海域的贝毒展开调查，因此贝毒数据无法获得，故本次研究不作探讨；承灾体中的农渔业区、海洋保护区、旅游休闲娱乐区的相对重要程度无法用各自的面积大小来判定，因此本文也不作探讨。

综上所述，基于评价指标主导性、可度量性和数据的可获取性等原则对上述初步建立的指标体系进行筛选，最终确定了宁德沿海赤潮灾害风险评估指标体系见图 3-4：

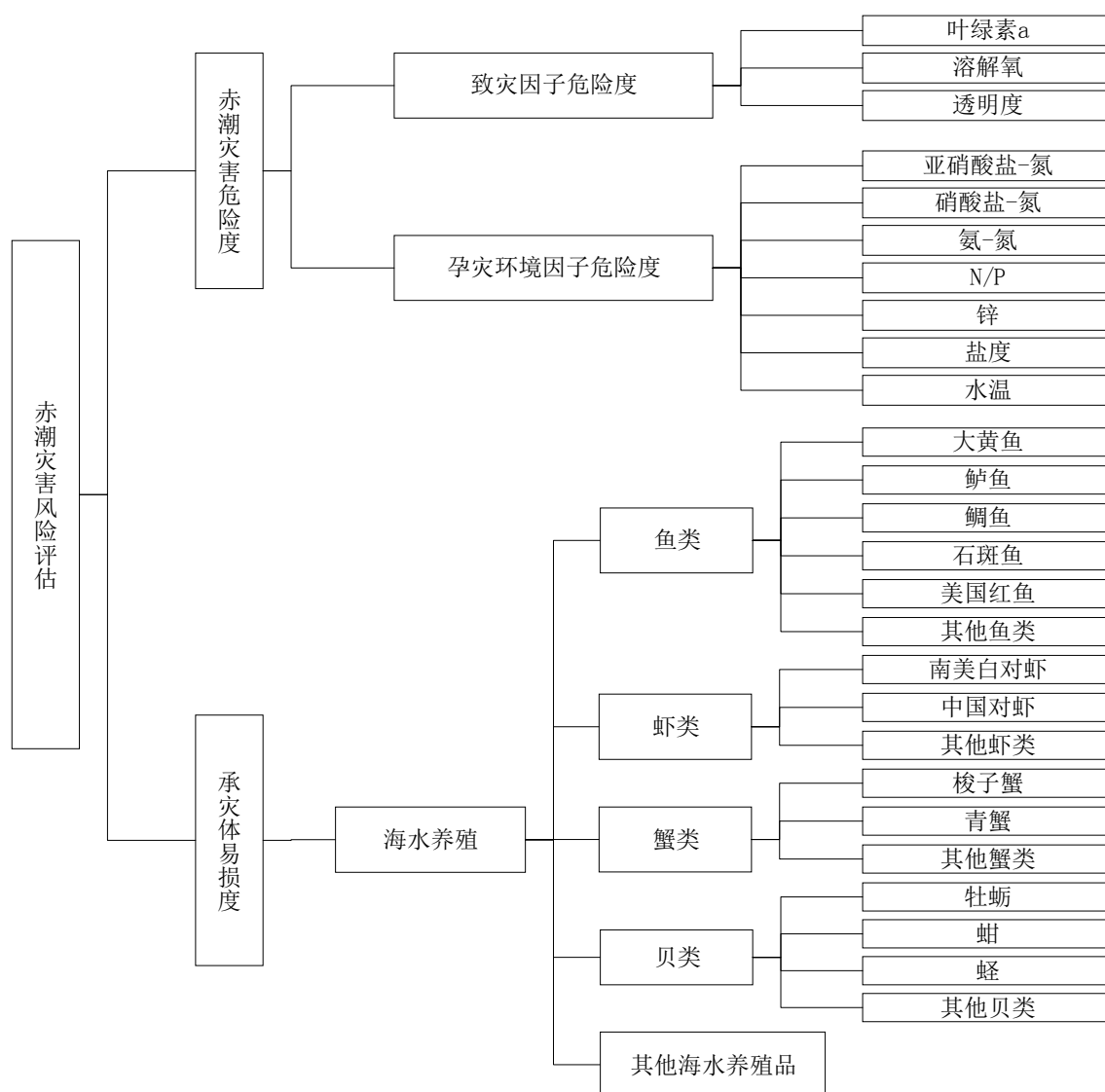


图 3-4 宁德沿海赤潮灾害风险评估指标体系

Fig.3-4 Risk assessment index system of harmful algal blooms in Ningde coast

（2）指标权重的确定

在赤潮灾害风险评估中，确定指标权重是后续评价工作的基础，直接影响评价结果的准确性。目前在赤潮灾害风险评估研究中，绝大多数学者采用层次分析

法和德尔菲法确定指标权重,这两种方法可以归属于一类,借助专家群体的知识、经验和价值评判各指标的相对重要程度,对样本数据不全或一些模糊的定性指标仍适用,层次分析法较德尔菲法更科学之处在于层次分析法对专家的主观评判做了数学处理,但仍然受限于专家的经验 and 知识;而熵值法是根据样本数据自身的信息特征做出判断的客观赋权法,它通过计算指标的信息熵,根据指标的相对变化程度对系统整体的影响来决定指标的权重,相对变化程度大的指标具有较大的权重。由于熵权法充分利用指标信息熵值的效用价值,其给出的指标权值比层次分析法和德尔菲法可信度更高^[47],基于此本文采用熵权法确定各指标权重。

熵权法确定指标权重的流程如下^[74]:

(a) 原始数据的收集与整理 评价系统的初始数据矩阵有 m 个评价指标, n 个评价对象

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad X = \{x_{ij}\}_{m \times n} \quad (0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n) \quad (3-2)$$

式中: x_{ij} 为第 j 个评价对象第 i 个评价指标的数值。

(b) 初始数据矩阵均值化处理

为消除因量纲和数量级的不同对评价结果的影响,需要对各指标进行均值化处理。各指标经均值化处理后不改变指标间的相关系数,因此均值化处理后的数据既消除了指标基本属性和数量级的影响,也包含原始数据的全部信息^[75]。

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\bar{x}_j} \quad (3-3)$$

式中: r_{ij} 为第 j 个评价对象在第 i 个评价指标上的均值化值, $\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n$ 。

经均值化处理后得到均值化矩阵:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} \quad (3-4)$$

(c) 定义熵

$$H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}, i=1,2,\cdots,m \quad (3-5)$$

式中: $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$, $k=1/\ln n$, 当 $f_{ij}=0$ 时, 令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

(d) 定义熵权 第 i 个指标的熵权为

$$w_i = \frac{1 - H_i}{m - \sum_{i=1}^m H_i} \quad (3-6)$$

式中: $0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。

(3) 赤潮灾害风险评估模型的建立

(a) 致灾因子危险度模型

$$H_1 = \sum_{i=1}^m w_i r_i \quad (3-7)$$

式中: H_1 为致灾因子危险度; w_i 为熵权法确定的指标权重; r_i 为原始数据均值化数值。

(b) 孕灾环境因子危险度模型

$$H_2 = \sum_{i=1}^m \omega_i r_i' \quad (3-8)$$

式中: H_2 为孕灾环境因子危险度; ω_i 为熵权法确定的指标权重; r_i' 为原始数据均值化数值。

(c) 赤潮灾害危险度模型

$$H = aH_1 + bH_2 \quad (3-9)$$

式中: H 为赤潮灾害危险度; a 为致灾因子危险度权重, 由熵权法确定; b 为孕灾环境因子危险度权重, 由熵权法确定; H_1 为致灾因子危险度; H_2 为孕灾环境因子危险度。

为研究及讨论的方便, 本文提出的赤潮灾害危险度等级如下:

表 3-2 赤潮灾害危险度等级

Tab.3-2 Hazard degree of HABs

| 危险度范围 | 危险度 |
|---------|-----|
| 0-0.6 | 低 |
| 0.6-1.1 | 中 |
| 1.1-1.6 | 高 |
| >1.6 | 极高 |

(d) 承灾体易损度模型

$$V = \sum_{i=1}^m W_i R_i \quad (3-10)$$

式中： V 为承灾体易损度； W_i 为熵权法确定的指标权重； R_i 为原始数据均值化数值。

为研究及讨论的方便，本文提出的赤潮灾害易损度等级如下：

表 3-3 承灾体易损度等级

Tab.3-3 Vulnerability level of disaster-bearing body

| 易损度范围 | 易损度 |
|---------|-----|
| 0-0.6 | 低 |
| 0.6-1.1 | 中 |
| 1.1-1.6 | 高 |
| >1.6 | 极高 |

(e) 赤潮灾害风险模型

赤潮灾害风险采用 1991 年联合国人道主义事务部提出的模型进行计算

$$R = H \times V \quad (3-11)$$

式中： R 为风险度； H 为致灾因子危险度； V 为承灾体易损度。

为研究及讨论的方便，本文提出的赤潮灾害风险等级如下：

表 3-4 赤潮灾害风险等级

Tab.3-4 Risk level of HABs

| 风险范围 | 风险 |
|---------|----|
| 0-0.6 | 低 |
| 0.6-1.1 | 中 |
| 1.1-1.6 | 高 |
| >1.6 | 极高 |

第四章 结果与分析

4.1 宁德海域富营养化状况

由富营养化公式 3-1 计算得宁德海域各站位富营养化指数如表 4-1, 采用普通克里金法在各站位富营养化值的基础上进行空间插值, 插值结果如图 4-1, 由图 4-1 可知宁德海域的各个海湾都处于不同程度的富营养化状态, 沙埕港、晴川湾、东吴洋、官井洋、卢门港的富营养化程度高, 总体呈现沿岸向外海减轻趋势。

表 4-1 宁德海域各调查站位富营养化评价

Tab.4-1 Eutrophication evaluation of survey stations in Ning sea area

| 站位 | E | 富营养等级 | 站位 | E | 富营养等级 | 站位 | E | 富营养等级 |
|------|-------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|
| SC1 | 12.26 | 重度富营养 | NE21 | 3.97 | 中度富营养 | SS22 | 11.76 | 重度富营养 |
| SC2 | 14.54 | 重度富营养 | NE22 | 3.52 | 中度富营养 | SS23 | 12.46 | 重度富营养 |
| SC3 | 12.20 | 重度富营养 | NE23 | 1.62 | 轻度富营养 | SS24 | 8.70 | 重度富营养 |
| SC4 | 16.48 | 严重富营养 | NE24 | 3.03 | 中度富营养 | SS25 | 3.51 | 中度富营养 |
| SC5 | 15.08 | 严重富营养 | NE25 | 0.35 | 贫营养 | SS26 | 8.24 | 重度富营养 |
| SC6 | 13.47 | 重度富营养 | NE26 | 1.73 | 轻度富营养 | SS27 | 10.68 | 重度富营养 |
| SC7 | 14.33 | 重度富营养 | NE27 | 3.76 | 中度富营养 | SS28 | 6.66 | 重度富营养 |
| SC8 | 5.92 | 重度富营养 | NE28 | 6.02 | 重度富营养 | SS29 | 1.61 | 轻度富营养 |
| SC9 | 9.10 | 重度富营养 | NE29 | 2.53 | 中度富营养 | SS30 | 9.82 | 重度富营养 |
| SC10 | 8.53 | 重度富营养 | NE30 | 5.08 | 重度富营养 | SS31 | 9.00 | 重度富营养 |
| SC11 | 8.43 | 重度富营养 | NE31 | 3.73 | 中度富营养 | SS32 | 4.45 | 中度富营养 |
| SC12 | 4.30 | 中度富营养 | NE32 | 0.44 | 贫营养 | SS33 | 1.66 | 轻度富营养 |
| SC13 | 4.84 | 中度富营养 | NE33 | 0.59 | 贫营养 | SS34 | 7.47 | 重度富营养 |
| SC14 | 4.40 | 中度富营养 | NE34 | 1.58 | 轻度富营养 | SS35 | 6.71 | 重度富营养 |
| SC15 | 5.55 | 重度富营养 | NE35 | 0.40 | 贫营养 | SS36 | 5.54 | 重度富营养 |
| SC16 | 4.87 | 中度富营养 | NE36 | 0.97 | 轻度富营养 | SS37 | 7.87 | 重度富营养 |
| SC17 | 2.55 | 中度富营养 | NE37 | 2.75 | 中度富营养 | SS38 | 0.58 | 贫营养 |
| SC18 | 3.59 | 中度富营养 | NE38 | 0.30 | 贫营养 | SS39 | 5.67 | 重度富营养 |
| SC19 | 0.30 | 贫营养 | NE39 | 3.33 | 中度富营养 | SS40 | 8.76 | 重度富营养 |
| SC20 | 0.09 | 贫营养 | NE40 | 1.08 | 轻度富营养 | SS41 | 5.10 | 重度富营养 |
| SC21 | 0.27 | 贫营养 | NE41 | 0.18 | 贫营养 | SS42 | 4.29 | 中度富营养 |
| SC22 | 0.22 | 贫营养 | NE42 | 0.40 | 贫营养 | SS43 | 5.58 | 重度富营养 |
| SC23 | 0.04 | 贫营养 | NE43 | 0.90 | 贫营养 | SS44 | 2.62 | 中度富营养 |
| SC24 | 0.13 | 贫营养 | NE44 | 0.81 | 贫营养 | SS45 | 8.65 | 重度富营养 |
| SC25 | 0.11 | 贫营养 | NE45 | 0.23 | 贫营养 | SS46 | 4.53 | 中度富营养 |

| 站位 | E | 富营养等级 | 站位 | E | 富营养等级 | 站位 | E | 富营养等级 |
|------|------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|
| SC26 | 0.02 | 贫营养 | NE46 | 0.12 | 贫营养 | SS47 | 2.30 | 中度富营养 |
| SC27 | 0.34 | 贫营养 | NE47 | 0.08 | 贫营养 | SS48 | 3.48 | 中度富营养 |
| SC28 | 0.13 | 贫营养 | NE48 | 1.39 | 轻度富营养 | SS49 | 3.89 | 中度富营养 |
| SC29 | 2.32 | 中度富营养 | NE49 | 0.23 | 贫营养 | SS50 | 6.12 | 重度富营养 |
| SC30 | 0.40 | 贫营养 | SS1 | 4.25 | 中度富营养 | SS51 | 3.42 | 中度富营养 |
| NE01 | 2.08 | 中度富营养 | SS2 | 3.49 | 中度富营养 | SS52 | 4.24 | 中度富营养 |
| NE02 | 2.88 | 中度富营养 | SS3 | 0.85 | 贫营养 | SS53 | 2.19 | 中度富营养 |
| NE03 | 1.88 | 轻度富营养 | SS4 | 5.45 | 重度富营养 | SS54 | 6.26 | 重度富营养 |
| NE04 | 3.22 | 中度富营养 | SS5 | 0.40 | 贫营养 | SS55 | 2.42 | 中度富营养 |
| NE05 | 5.49 | 重度富营养 | SS6 | 0.48 | 贫营养 | SS56 | 1.48 | 轻度富营养 |
| NE06 | 2.77 | 中度富营养 | SS7 | 0.65 | 贫营养 | SS57 | 1.50 | 轻度富营养 |
| NE07 | 0.91 | 贫营养 | SS8 | 3.81 | 中度富营养 | SS58 | 3.87 | 中度富营养 |
| NE08 | 6.38 | 重度富营养 | SS9 | 17.25 | 严重富营养 | SS59 | 3.53 | 中度富营养 |
| NE09 | 2.81 | 中度富营养 | SS10 | 0.81 | 贫营养 | SS60 | 3.18 | 中度富营养 |
| NE10 | 5.26 | 重度富营养 | SS11 | 5.40 | 重度富营养 | SS61 | 9.66 | 重度富营养 |
| NE11 | 2.95 | 中度富营养 | SS12 | 8.28 | 重度富营养 | SS62 | 12.23 | 重度富营养 |
| NE12 | 0.90 | 贫营养 | SS13 | 0.38 | 贫营养 | SS63 | 7.36 | 重度富营养 |
| NE13 | 4.45 | 中度富营养 | SS14 | 4.78 | 中度富营养 | SS64 | 9.81 | 重度富营养 |
| NE14 | 0.77 | 贫营养 | SS15 | 5.38 | 重度富营养 | SS65 | 11.63 | 重度富营养 |
| NE15 | 1.98 | 轻度富营养 | SS16 | 5.12 | 重度富营养 | SS66 | 14.22 | 重度富营养 |
| NE16 | 0.55 | 贫营养 | SS17 | 0.11 | 贫营养 | SS67 | 7.85 | 重度富营养 |
| NE17 | 2.65 | 中度富营养 | SS18 | 8.73 | 重度富营养 | SS68 | 13.81 | 重度富营养 |
| NE18 | 0.70 | 贫营养 | SS19 | 0.94 | 贫营养 | SS69 | 7.39 | 重度富营养 |
| NE19 | 0.88 | 贫营养 | SS20 | 10.16 | 重度富营养 | SS70 | 10.57 | 重度富营养 |
| NE20 | 0.78 | 贫营养 | SS21 | 9.30 | 重度富营养 | SS71 | 12.62 | 重度富营养 |

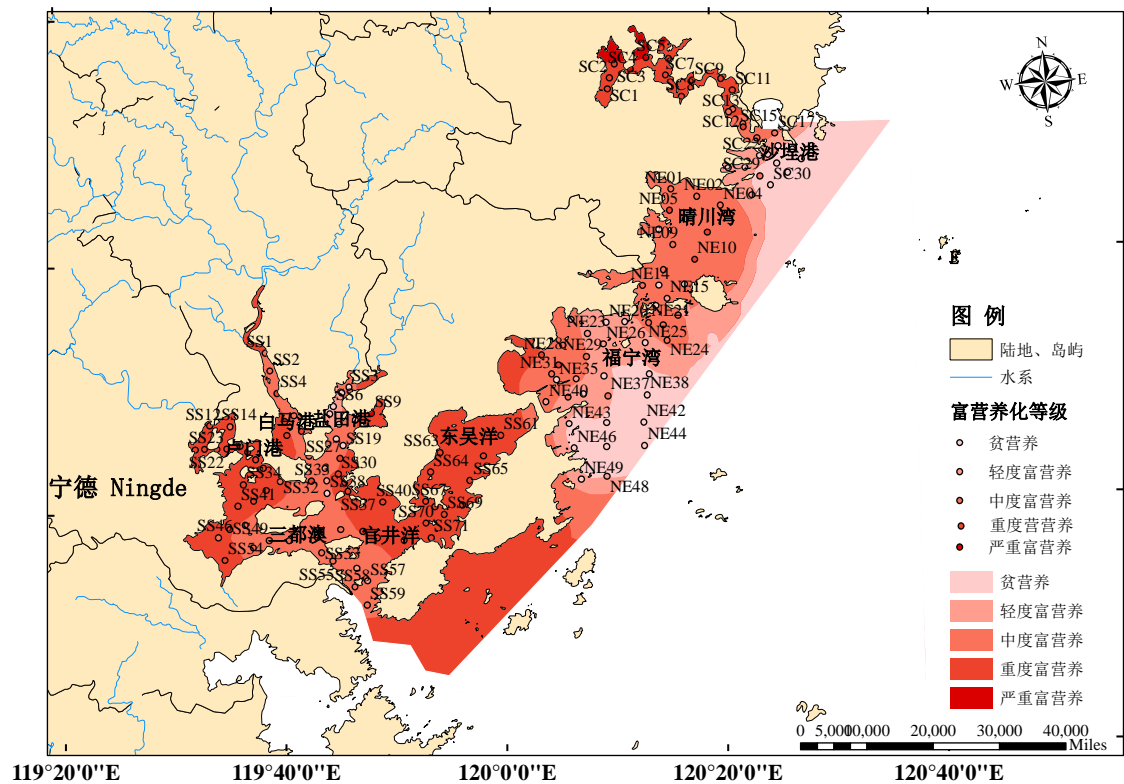


图 4-1 宁德海域富营养化状况
Fig.4-1 Status of eutrophication in Ningde sea area

4.2 宁德海域赤潮灾害风险状况

4.2.1 原始数据均值化

采用公式（3-3）对致灾因子危险度、孕灾环境因子危险度与承灾体易损度原始数据进行均值化处理，均值化结果见表 4-2~4-4。

表 4-2 致灾因子原始数据均值化

Tab.4-2 Equalization of raw data of disaster causing factors

| 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 | 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 |
|-----|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| SC1 | 0.822 | 0.920 | 0.344 | NE45 | 0.496 | 1.034 | 1.376 |
| SC2 | 0.763 | 0.931 | 0.229 | NE46 | 0.876 | 1.119 | 1.147 |
| SC3 | 0.854 | 0.947 | 0.229 | NE47 | 0.761 | 1.056 | 1.147 |
| SC4 | 0.956 | 0.931 | 0.688 | NE48 | 0.752 | 1.135 | 1.376 |
| SC5 | 0.987 | 0.907 | 0.573 | NE49 | 0.729 | 0.968 | 1.491 |
| SC6 | 0.905 | 0.917 | 0.688 | SS1 | 0.934 | 1.114 | 1.147 |
| SC7 | 0.954 | 0.938 | 1.032 | SS2 | 0.923 | 1.177 | 1.147 |

| 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 | 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| SC8 | 0.795 | 0.936 | 1.261 | SS3 | 0.920 | 0.937 | 0.573 |
| SC9 | 0.651 | 0.934 | 0.917 | SS4 | 0.887 | 1.170 | 1.491 |
| SC10 | 0.833 | 0.940 | 1.261 | SS5 | 0.955 | 0.974 | 0.688 |
| SC11 | 0.920 | 0.942 | 1.376 | SS6 | 0.722 | 0.979 | 0.803 |
| SC12 | 0.830 | 0.925 | 0.573 | SS7 | 0.691 | 0.984 | 0.803 |
| SC13 | 0.718 | 0.936 | 1.376 | SS8 | 0.778 | 1.064 | 1.147 |
| SC14 | 0.735 | 0.917 | 0.688 | SS9 | 0.753 | 0.963 | 0.917 |
| SC15 | 0.729 | 0.926 | 1.147 | SS10 | 0.674 | 0.873 | 0.688 |
| SC16 | 0.729 | 0.910 | 1.376 | SS11 | 0.809 | 1.107 | 1.376 |
| SC17 | 0.749 | 0.946 | 1.261 | SS12 | 1.795 | 1.027 | 0.803 |
| SC18 | 0.685 | 0.947 | 1.720 | SS13 | 0.459 | 0.963 | 1.491 |
| SC19 | 0.766 | 1.036 | 0.573 | SS14 | 1.234 | 0.947 | 0.688 |
| SC20 | 0.725 | 1.033 | 0.344 | SS15 | 0.721 | 1.057 | 1.147 |
| SC21 | 0.725 | 1.051 | 0.344 | SS16 | 0.796 | 1.082 | 1.376 |
| SC22 | 0.689 | 1.036 | 1.147 | SS17 | 0.633 | 1.000 | 1.261 |
| SC23 | 0.727 | 1.042 | 1.032 | SS18 | 0.673 | 0.981 | 0.803 |
| SC24 | 0.806 | 1.021 | 0.573 | SS19 | 0.689 | 0.952 | 1.376 |
| SC25 | 0.828 | 1.049 | 0.917 | SS20 | 0.561 | 0.992 | 0.803 |
| SC26 | 1.101 | 1.048 | 1.032 | SS21 | 1.010 | 1.033 | 0.688 |
| SC27 | 1.186 | 0.920 | 0.573 | SS22 | 1.122 | 0.984 | 0.803 |
| SC28 | 1.155 | 1.069 | 1.376 | SS23 | 1.459 | 0.988 | 0.803 |
| SC29 | 0.691 | 0.997 | 0.229 | SS24 | 0.673 | 0.986 | 0.803 |
| SC30 | 0.894 | 1.003 | 0.573 | SS25 | 0.737 | 1.103 | 1.376 |
| NE01 | 0.987 | 0.797 | 0.459 | SS26 | 0.561 | 0.966 | 0.803 |
| NE02 | 2.813 | 1.073 | 0.344 | SS27 | 0.727 | 1.002 | 1.147 |
| NE03 | 0.958 | 0.826 | 1.032 | SS28 | 0.673 | 0.963 | 0.917 |
| NE04 | 0.725 | 1.013 | 0.459 | SS29 | 0.693 | 1.011 | 1.720 |
| NE05 | 1.416 | 1.049 | 0.573 | SS30 | 0.646 | 1.009 | 0.917 |
| NE06 | 9.322 | 1.002 | 0.573 | SS31 | 0.727 | 1.013 | 1.147 |
| NE07 | 0.955 | 0.910 | 0.573 | SS32 | 0.898 | 0.954 | 0.917 |
| NE08 | 3.137 | 1.045 | 1.032 | SS33 | 0.654 | 0.977 | 1.720 |
| NE09 | 0.993 | 0.952 | 0.688 | SS34 | 1.347 | 0.905 | 0.688 |
| NE10 | 3.857 | 1.075 | 0.917 | SS35 | 0.532 | 0.958 | 0.688 |
| NE11 | 1.184 | 0.845 | 0.688 | SS36 | 1.459 | 0.952 | 0.803 |
| NE12 | 1.627 | 0.988 | 0.688 | SS38 | 0.689 | 0.979 | 1.376 |
| NE13 | 0.922 | 1.025 | 0.803 | SS39 | 1.459 | 0.947 | 0.803 |
| NE14 | 1.135 | 1.050 | 0.688 | SS40 | 0.761 | 0.945 | 0.917 |
| NE15 | 0.763 | 1.027 | 0.344 | SS41 | 0.898 | 0.917 | 0.917 |
| NE16 | 0.966 | 1.043 | 0.688 | SS42 | 1.122 | 0.916 | 0.688 |
| NE17 | 0.691 | 1.085 | 0.344 | SS43 | 1.234 | 0.941 | 0.688 |
| NE18 | 1.419 | 1.079 | 0.344 | SS45 | 0.794 | 0.993 | 2.408 |
| NE19 | 0.918 | 1.014 | 0.917 | SS46 | 1.122 | 0.883 | 0.688 |
| NE20 | 0.918 | 1.087 | 0.573 | SS47 | 1.347 | 0.955 | 0.803 |
| NE21 | 0.932 | 1.077 | 0.917 | SS48 | 1.064 | 0.977 | 1.261 |
| NE22 | 0.691 | 1.052 | 1.032 | SS49 | 1.347 | 0.923 | 1.032 |
| NE23 | 1.045 | 1.052 | 0.573 | SS50 | 0.798 | 0.972 | 1.720 |

| 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 | 站位 | 叶绿素 a | 溶解氧 | 透明度 |
|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| NE24 | 0.891 | 0.924 | 1.032 | SS51 | 0.898 | 0.923 | 1.032 |
| NE25 | 1.222 | 1.057 | 1.032 | SS52 | 1.010 | 0.899 | 0.803 |
| NE26 | 0.955 | 1.125 | 1.491 | SS53 | 0.337 | 0.949 | 0.917 |
| NE27 | 1.083 | 1.052 | 0.688 | SS54 | 0.673 | 0.907 | 0.688 |
| NE28 | 0.991 | 1.054 | 0.459 | SS55 | 0.898 | 0.947 | 1.032 |
| NE29 | 0.918 | 1.091 | 1.720 | SS57 | 0.561 | 0.952 | 1.147 |
| NE30 | 1.090 | 1.061 | 1.376 | SS58 | 0.449 | 0.949 | 1.032 |
| NE31 | 1.138 | 1.002 | 0.459 | SS59 | 0.561 | 0.952 | 1.147 |
| NE32 | 0.942 | 1.103 | 1.491 | SS60 | 1.122 | 0.941 | 1.032 |
| NE33 | 1.188 | 1.123 | 1.605 | SS61 | 0.980 | 1.180 | 1.376 |
| NE34 | 1.072 | 0.922 | 0.573 | SS62 | 0.919 | 1.034 | 1.949 |
| NE35 | 1.184 | 1.022 | 0.459 | SS63 | 0.786 | 1.097 | 1.261 |
| NE36 | 1.058 | 1.006 | 1.147 | SS64 | 0.773 | 1.098 | 1.605 |
| NE37 | 0.920 | 0.956 | 1.261 | SS65 | 0.866 | 1.054 | 1.835 |
| NE38 | 0.886 | 1.075 | 1.720 | SS66 | 0.793 | 1.036 | 1.491 |
| NE39 | 1.186 | 1.107 | 1.032 | SS67 | 0.811 | 1.026 | 1.147 |
| NE40 | 0.956 | 1.057 | 0.688 | SS68 | 0.784 | 1.064 | 1.605 |
| NE41 | 0.844 | 1.038 | 1.605 | SS69 | 0.804 | 1.029 | 1.720 |
| NE42 | 0.884 | 1.066 | 1.261 | SS70 | 0.856 | 1.070 | 1.605 |
| NE43 | 0.956 | 0.958 | 1.376 | SS71 | 0.878 | 1.018 | 1.491 |
| NE44 | 0.820 | 1.057 | 1.605 | | | | |

表 4-3 孕灾环境因子原始数据均值化

Tab.4-3 Equalization of raw data of disaster causing factors

| 站位 | 亚硝酸盐-氮 | 硝酸盐-氮 | 氨-氮 | N/P | 锌 | 盐度 | 水温 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SC1 | 1.528 | 1.531 | 2.013 | 0.664 | 2.101 | 0.836 | 0.936 |
| SC2 | 1.367 | 1.572 | 2.034 | 0.705 | 0.841 | 0.840 | 0.930 |
| SC3 | 1.249 | 1.513 | 2.127 | 0.710 | 1.293 | 0.861 | 0.917 |
| SC4 | 1.190 | 1.593 | 2.237 | 0.786 | 0.922 | 0.853 | 0.910 |
| SC5 | 1.097 | 1.567 | 2.106 | 0.853 | 2.134 | 0.907 | 0.904 |
| SC6 | 1.055 | 1.487 | 2.272 | 0.873 | 1.326 | 0.886 | 0.917 |
| SC7 | 1.148 | 1.667 | 1.705 | 0.774 | 1.891 | 0.907 | 0.904 |
| SC8 | 0.962 | 1.564 | 1.588 | 1.056 | 2.862 | 0.928 | 0.898 |
| SC9 | 2.633 | 1.876 | 1.467 | 1.162 | 1.552 | 0.979 | 0.885 |
| SC10 | 0.852 | 1.305 | 1.496 | 0.762 | 1.730 | 1.025 | 0.943 |
| SC11 | 0.869 | 1.253 | 1.603 | 0.744 | 0.971 | 1.017 | 0.994 |
| SC12 | 1.139 | 1.382 | 1.467 | 0.828 | 2.603 | 1.046 | 0.987 |
| SC13 | 1.013 | 1.191 | 1.502 | 0.801 | 1.407 | 1.059 | 0.975 |
| SC14 | 0.954 | 1.495 | 1.097 | 0.776 | 1.116 | 1.075 | 0.898 |
| SC15 | 0.962 | 0.942 | 1.089 | 0.689 | 0.922 | 1.067 | 0.981 |
| SC16 | 1.418 | 1.379 | 0.939 | 1.142 | 2.183 | 1.071 | 0.930 |
| SC17 | 0.962 | 1.086 | 1.025 | 0.863 | 1.067 | 1.063 | 0.910 |

| 站位 | 亚硝酸盐-氮 | 硝酸盐-氮 | 氨-氮 | N/P | 锌 | 盐度 | 水温 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SC18 | 0.937 | 1.117 | 0.916 | 0.972 | 0.744 | 1.067 | 0.917 |
| SC19 | 0.447 | 0.443 | 0.129 | 1.167 | 0.938 | 1.117 | 0.853 |
| SC20 | 0.405 | 0.214 | 0.224 | 1.425 | 1.261 | 1.113 | 0.840 |
| SC21 | 0.321 | 0.363 | 0.170 | 0.911 | 1.002 | 1.109 | 0.846 |
| SC22 | 0.658 | 0.384 | 0.214 | 1.799 | 1.972 | 1.113 | 0.859 |
| SC23 | 0.582 | 0.272 | 0.191 | 4.772 | 1.407 | 1.109 | 0.859 |
| SC24 | 0.211 | 0.262 | 0.156 | 1.492 | 0.971 | 1.109 | 0.846 |
| SC25 | 0.253 | 0.278 | 0.127 | 1.307 | 0.744 | 1.117 | 0.859 |
| SC26 | 0.203 | 0.227 | 0.109 | 4.769 | 0.759 | 1.109 | 0.878 |
| SC27 | 2.633 | 0.272 | 0.214 | 1.062 | 0.728 | 1.109 | 0.885 |
| SC28 | 0.211 | 0.419 | 0.162 | 2.493 | 0.808 | 1.122 | 0.853 |
| SC29 | 0.709 | 1.124 | 0.323 | 1.003 | 1.132 | 1.143 | 0.846 |
| SC30 | 0.380 | 1.009 | 0.209 | 5.845 | 1.067 | 1.122 | 0.878 |
| NE01 | 0.515 | 0.865 | 0.423 | 1.034 | 1.132 | 1.096 | 0.981 |
| NE02 | 0.675 | 1.124 | 0.232 | 1.245 | 1.196 | 1.113 | 0.923 |
| NE03 | 0.633 | 0.926 | 0.156 | 1.101 | 1.407 | 1.122 | 0.878 |
| NE04 | 0.692 | 1.201 | 0.175 | 1.163 | 1.487 | 1.113 | 0.923 |
| NE05 | 0.987 | 1.578 | 0.072 | 1.220 | 1.375 | 1.109 | 0.987 |
| NE06 | 0.717 | 1.519 | 0.109 | 2.140 | 1.601 | 1.113 | 0.981 |
| NE07 | 0.422 | 0.566 | 0.397 | 0.852 | 0.712 | 1.134 | 0.891 |
| NE08 | 0.971 | 1.498 | 0.261 | 0.811 | 0.808 | 1.113 | 0.923 |
| NE09 | 0.844 | 1.180 | 0.433 | 0.892 | 1.132 | 1.126 | 0.872 |
| NE10 | 0.954 | 1.471 | 0.181 | 1.066 | 1.730 | 1.117 | 0.910 |
| NE11 | 0.895 | 1.177 | 0.631 | 1.030 | 1.455 | 1.143 | 0.878 |
| NE12 | 0.515 | 0.836 | 0.166 | 1.267 | 1.099 | 1.130 | 0.872 |
| NE13 | 1.021 | 1.343 | 0.257 | 0.995 | 0.986 | 1.147 | 0.878 |
| NE14 | 0.549 | 0.699 | 0.355 | 1.030 | 0.954 | 1.138 | 0.878 |
| NE15 | 0.768 | 1.404 | 0.152 | 1.511 | 0.873 | 1.143 | 0.859 |
| NE16 | 0.304 | 0.411 | 0.191 | 0.727 | 0.647 | 1.147 | 0.866 |
| NE17 | 0.743 | 0.985 | 0.265 | 0.737 | 0.986 | 1.155 | 0.859 |
| NE18 | 0.388 | 0.472 | 0.209 | 0.804 | 0.971 | 1.143 | 0.923 |
| NE19 | 0.371 | 0.470 | 0.279 | 0.813 | 1.132 | 1.164 | 0.878 |
| NE20 | 0.827 | 0.622 | 0.530 | 1.226 | 1.342 | 1.155 | 0.898 |
| NE21 | 0.751 | 0.998 | 0.228 | 0.888 | 1.051 | 1.164 | 0.859 |
| NE22 | 1.004 | 1.332 | 1.009 | 0.955 | 1.245 | 1.159 | 0.859 |
| NE23 | 0.549 | 0.822 | 0.374 | 1.088 | 0.971 | 1.147 | 0.917 |
| NE24 | 0.903 | 1.156 | 0.370 | 0.862 | 1.375 | 1.159 | 0.859 |
| NE25 | 0.295 | 0.358 | 0.181 | 0.788 | 1.438 | 1.164 | 0.859 |
| NE26 | 0.692 | 0.910 | 0.166 | 1.036 | 0.986 | 1.155 | 0.891 |
| NE27 | 1.080 | 1.253 | 0.366 | 1.007 | 0.971 | 1.134 | 1.007 |
| NE28 | 1.300 | 1.480 | 0.750 | 0.947 | 1.083 | 1.101 | 1.019 |
| NE29 | 1.013 | 1.142 | 0.129 | 1.026 | 1.261 | 1.151 | 0.981 |
| NE30 | 1.122 | 1.413 | 0.323 | 1.015 | 0.857 | 1.130 | 0.981 |
| NE31 | 0.895 | 1.124 | 0.411 | 0.965 | 1.293 | 1.126 | 0.968 |
| NE32 | 0.380 | 0.408 | 0.232 | 0.927 | 0.938 | 1.164 | 0.885 |

| 站位 | 亚硝酸盐-氮 | 硝酸盐-氮 | 氨-氮 | N/P | 锌 | 盐度 | 水温 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NE33 | 0.456 | 0.518 | 0.115 | 1.104 | 0.954 | 1.159 | 0.891 |
| NE34 | 0.599 | 0.857 | 0.171 | 1.119 | 0.630 | 1.168 | 0.949 |
| NE35 | 0.397 | 0.383 | 0.298 | 0.970 | 1.277 | 1.122 | 0.975 |
| NE36 | 0.633 | 0.750 | 0.152 | 1.819 | 1.083 | 1.176 | 0.968 |
| NE37 | 0.911 | 1.225 | 0.146 | 1.172 | 0.971 | 1.180 | 0.962 |
| NE38 | 0.338 | 0.352 | 0.138 | 0.832 | 0.889 | 1.172 | 0.885 |
| NE39 | 0.878 | 1.158 | 0.212 | 1.174 | 0.598 | 1.172 | 0.968 |
| NE40 | 0.490 | 0.601 | 1.200 | 1.414 | 1.034 | 1.164 | 1.007 |
| NE41 | 0.279 | 0.288 | 0.257 | 0.922 | 0.663 | 1.197 | 0.930 |
| NE42 | 0.363 | 0.430 | 0.246 | 0.929 | 1.099 | 1.201 | 0.878 |
| NE43 | 0.397 | 0.560 | 0.199 | 1.094 | 2.101 | 1.193 | 1.007 |
| NE44 | 0.599 | 0.574 | 0.162 | 0.861 | 0.518 | 1.206 | 0.898 |
| NE45 | 0.354 | 0.371 | 0.269 | 1.212 | 0.679 | 1.206 | 0.923 |
| NE46 | 0.236 | 0.262 | 0.171 | 1.084 | 0.954 | 1.193 | 1.013 |
| NE47 | 0.236 | 0.192 | 0.086 | 0.971 | 0.453 | 1.193 | 0.923 |
| NE48 | 1.131 | 0.892 | 0.185 | 1.283 | 0.502 | 1.206 | 0.910 |
| NE49 | 0.329 | 0.296 | 0.191 | 0.901 | 0.647 | 1.214 | 0.981 |
| SS1 | 1.747 | 1.078 | 0.935 | 0.855 | 0.776 | 0.244 | 0.904 |
| SS2 | 1.814 | 1.153 | 0.955 | 0.952 | 1.228 | 0.403 | 0.910 |
| SS3 | 0.447 | 0.369 | 1.561 | 0.733 | 0.728 | 0.832 | 1.103 |
| SS4 | 1.933 | 0.978 | 1.052 | 0.654 | 0.889 | 0.420 | 0.904 |
| SS5 | 0.354 | 0.304 | 1.298 | 0.889 | 0.824 | 0.849 | 1.116 |
| SS6 | 0.354 | 0.320 | 1.309 | 0.791 | 0.663 | 0.916 | 1.096 |
| SS7 | 0.422 | 0.441 | 1.253 | 0.869 | 0.598 | 0.991 | 1.032 |
| SS8 | 1.814 | 1.076 | 0.974 | 1.059 | 2.231 | 0.454 | 0.904 |
| SS9 | 2.928 | 1.765 | 4.013 | 0.809 | 1.181 | 0.899 | 1.372 |
| SS10 | 0.591 | 0.499 | 1.549 | 0.993 | 0.759 | 1.000 | 1.032 |
| SS11 | 1.798 | 1.212 | 1.033 | 0.975 | 1.051 | 0.567 | 0.910 |
| SS12 | 0.844 | 1.230 | 2.689 | 0.711 | 0.485 | 0.256 | 1.000 |
| SS13 | 0.304 | 0.283 | 1.001 | 0.947 | 0.502 | 0.987 | 1.032 |
| SS14 | 1.350 | 1.215 | 2.630 | 0.629 | 0.663 | 0.567 | 1.058 |
| SS15 | 1.882 | 1.101 | 0.779 | 0.925 | 1.342 | 0.731 | 0.910 |
| SS16 | 1.738 | 1.142 | 0.955 | 0.979 | 1.375 | 0.689 | 0.910 |
| SS17 | 0.186 | 0.165 | 0.890 | 0.900 | 0.824 | 1.008 | 0.994 |
| SS18 | 1.266 | 1.150 | 2.474 | 0.564 | 0.549 | 0.479 | 1.045 |
| SS19 | 0.405 | 0.438 | 1.264 | 0.569 | 0.824 | 1.000 | 1.007 |
| SS20 | 1.182 | 1.209 | 2.591 | 0.590 | 0.598 | 0.483 | 0.981 |
| SS21 | 1.097 | 1.135 | 2.533 | 0.569 | 0.534 | 0.304 | 1.045 |
| SS22 | 1.519 | 1.179 | 2.572 | 0.518 | 1.455 | 0.542 | 1.013 |
| SS23 | 1.857 | 1.197 | 2.630 | 0.478 | 1.940 | 0.492 | 1.045 |
| SS24 | 1.350 | 1.109 | 2.435 | 0.529 | 0.518 | 0.433 | 1.071 |
| SS25 | 1.907 | 0.980 | 0.974 | 0.930 | 1.277 | 0.752 | 0.910 |
| SS26 | 1.435 | 1.086 | 2.377 | 0.537 | 0.582 | 0.765 | 1.026 |
| SS27 | 1.511 | 1.615 | 1.773 | 0.917 | 0.549 | 0.975 | 0.987 |
| SS28 | 1.435 | 1.081 | 2.279 | 0.570 | 0.485 | 0.945 | 0.962 |

| 站位 | 亚硝酸盐-氮 | 硝酸盐-氮 | 氨-氮 | N/P | 锌 | 盐度 | 水温 |
|------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| SS29 | 0.599 | 0.750 | 1.029 | 1.030 | 0.728 | 0.933 | 1.090 |
| SS30 | 1.789 | 1.919 | 1.800 | 1.157 | 0.518 | 0.903 | 1.026 |
| SS31 | 1.646 | 1.700 | 1.886 | 0.968 | 0.582 | 0.941 | 1.019 |
| SS32 | 1.350 | 1.155 | 2.221 | 0.658 | 0.663 | 0.802 | 0.962 |
| SS33 | 0.582 | 0.753 | 1.001 | 0.942 | 0.824 | 0.941 | 0.981 |
| SS34 | 2.363 | 1.153 | 1.870 | 0.520 | 0.728 | 0.840 | 0.910 |
| SS35 | 1.317 | 1.423 | 2.242 | 1.030 | 0.355 | 1.054 | 0.949 |
| SS36 | 1.350 | 1.096 | 1.812 | 0.551 | 0.502 | 0.790 | 0.904 |
| SS38 | 0.228 | 0.251 | 0.701 | 0.766 | 0.986 | 0.979 | 1.019 |
| SS39 | 1.350 | 1.106 | 1.792 | 0.575 | 0.437 | 0.920 | 0.904 |
| SS40 | 1.283 | 1.311 | 2.124 | 0.794 | 0.404 | 1.101 | 1.013 |
| SS41 | 1.857 | 1.112 | 1.792 | 0.596 | 0.518 | 0.899 | 0.910 |
| SS42 | 1.435 | 1.114 | 1.481 | 0.563 | 0.485 | 0.983 | 0.904 |
| SS43 | 1.772 | 1.150 | 1.773 | 0.598 | 0.549 | 0.895 | 0.936 |
| SS45 | 1.528 | 1.375 | 1.436 | 0.779 | 0.372 | 1.067 | 0.936 |
| SS46 | 1.941 | 1.209 | 2.201 | 0.570 | 0.534 | 0.928 | 0.936 |
| SS47 | 1.182 | 0.980 | 1.344 | 0.603 | 0.437 | 1.004 | 0.962 |
| SS48 | 1.131 | 1.204 | 1.342 | 1.235 | 0.565 | 1.138 | 0.943 |
| SS49 | 1.603 | 1.078 | 1.422 | 0.481 | 0.841 | 0.962 | 0.923 |
| SS50 | 1.207 | 1.241 | 1.535 | 0.755 | 0.355 | 1.092 | 0.936 |
| SS51 | 1.350 | 1.060 | 1.364 | 0.554 | 0.614 | 0.975 | 0.910 |
| SS52 | 1.350 | 1.132 | 1.520 | 0.571 | 0.663 | 0.979 | 0.917 |
| SS53 | 1.097 | 0.929 | 0.877 | 0.601 | 0.485 | 1.042 | 0.936 |
| SS54 | 1.857 | 1.173 | 1.753 | 0.525 | 0.776 | 0.849 | 0.955 |
| SS55 | 1.182 | 0.978 | 0.779 | 0.717 | 0.485 | 1.046 | 0.923 |
| SS57 | 1.182 | 0.808 | 0.740 | 0.540 | 0.824 | 1.038 | 0.943 |
| SS58 | 1.182 | 0.813 | 0.721 | 0.527 | 0.420 | 1.025 | 0.962 |
| SS59 | 1.097 | 0.780 | 0.740 | 0.508 | 0.453 | 1.067 | 0.917 |
| SS60 | 1.097 | 0.880 | 0.623 | 0.782 | 0.759 | 1.063 | 0.917 |
| SS61 | 1.114 | 1.235 | 1.111 | 0.965 | 0.889 | 1.075 | 1.641 |
| SS62 | 1.241 | 1.325 | 1.188 | 0.809 | 0.824 | 1.122 | 1.712 |
| SS63 | 0.996 | 1.495 | 0.701 | 0.950 | 0.971 | 1.059 | 1.616 |
| SS64 | 1.038 | 1.428 | 1.208 | 0.915 | 0.679 | 1.105 | 1.686 |
| SS65 | 1.249 | 1.377 | 1.169 | 0.829 | 0.906 | 1.155 | 1.763 |
| SS66 | 1.089 | 1.402 | 0.955 | 0.803 | 1.148 | 1.164 | 1.776 |
| SS67 | 0.869 | 1.487 | 0.740 | 0.938 | 1.342 | 1.113 | 1.699 |
| SS68 | 1.046 | 1.433 | 1.033 | 0.877 | 1.261 | 1.155 | 1.763 |
| SS69 | 1.021 | 1.454 | 1.169 | 0.912 | 1.455 | 1.168 | 1.782 |
| SS70 | 1.106 | 1.521 | 0.877 | 0.957 | 1.940 | 1.138 | 1.738 |
| SS71 | 1.114 | 1.467 | 1.033 | 0.878 | 1.310 | 1.147 | 1.750 |

表 4-4 承灾体原始数据均值化
Tab.4-4 Equalization of raw data of disaster-bearing body

| 区域 | 鱼类养殖产量(吨) | | | | | | 虾类养殖产量 (吨) | | | 蟹类养殖产量 (吨) | | | 贝类养殖面积(m ²) | | | | 其他海水养殖 品产量 |
|----------|-----------|-------|-------|-------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|-------|----------|-------------------------|-------|-------|----------|---------------|
| | 大黄鱼 | 鲈鱼 | 鲷鱼 | 石斑鱼 | 美国红 鱼 | 其他鱼 类 | 南美白 对虾 | 中国对 虾 | 其他虾 类 | 梭子蟹 | 青蟹 | 其它蟹 类 | 牡蛎 | 蚶 | 蛏 | 其他贝 类 | |
| 蕉城 海域 | 1.535 | 0.340 | 0.703 | 0.819 | 0.604 | 0.906 | 0.299 | 0.458 | 1.736 | 0.241 | 0.607 | 0.899 | 0.622 | 2.146 | 2.044 | 2.079 | 1.038 |
| 福鼎 海域 | 0.901 | 2.577 | 1.111 | 1.952 | 1.706 | 1.074 | 1.323 | 3.031 | 0.472 | 2.462 | 2.270 | 2.530 | 0.591 | 1.395 | 0.722 | 0.281 | 0.391 |
| 霞浦 海域 | 0.952 | 0.446 | 1.618 | 0.384 | 1.437 | 1.575 | 2.208 | 0.281 | 1.527 | 0.943 | 0.586 | 0.309 | 2.329 | 0.106 | 0.484 | 1.477 | 2.124 |
| 福安 海域 | 0.613 | 0.637 | 0.569 | 0.845 | 0.254 | 0.444 | 0.169 | 0.231 | 0.265 | 0.354 | 0.538 | 0.262 | 0.458 | 0.353 | 0.751 | 0.164 | 0.448 |

4.2.2 指标体系权重计算结果

将表 4-2~4-4 中数据代入公式 3-5、3-6 中，得到各指标权重结果如表 4-5。

表 4-5 指标体系权重

Tab.4-5 The weight of indicator system

| 准则层 | 子准则层 | 权重 | 指标层 | 权重 |
|---------|-----------|-------|--------------|-------|
| 赤潮灾害危险度 | 致灾因子危险度 | 0.530 | 叶绿素 <i>a</i> | 0.630 |
| | | | 溶解氧 | 0.010 |
| | | | 透明度 | 0.360 |
| | 孕灾环境因子危险度 | 0.470 | 亚硝酸盐-氮 | 0.172 |
| | | | 硝酸盐-氮 | 0.125 |
| | | | 氨-氮 | 0.374 |
| | | | N/P | 0.157 |
| | | | 锌 | 0.117 |
| | | | 盐度 | 0.032 |
| | | | 水温 | 0.023 |
| | | | | |
| 承灾体易损度 | 鱼类 | 0.040 | 大黄鱼 | 0.012 |
| | | | 鲈鱼 | 0.080 |
| | | | 鲷鱼 | 0.018 |
| | | | 石斑鱼 | 0.035 |
| | | | 美国红鱼 | 0.044 |
| | | | 其他鱼类 | 0.019 |
| | | | | |
| | 虾类 | 0.294 | 南美白对虾 | 0.082 |
| | | | 中国对虾 | 0.130 |
| | | | 其他虾类 | 0.050 |
| | 蟹类 | 0.310 | 梭子蟹 | 0.082 |
| | | | 青蟹 | 0.051 |
| | | | 其他蟹类 | 0.086 |
| | 贝类 | 0.102 | 牡蛎 | 0.056 |
| | | | 蚶 | 0.084 |
| | | | 蛏 | 0.037 |
| | | | 其他贝类 | 0.081 |
| | 其他海水养殖品 | 0.254 | | 0.051 |

4.2.3 赤潮灾害风险评估结果

(1) 赤潮灾害危险度评估结果

将经过均值化处理的致灾因子危险度指标数据、孕灾环境因子危险度及各指标权重代入公式 3-7、3-8、3-9 中，计算得宁德各沿海县市的赤潮灾害危险度值表 4-6，利用 Arcmap10.0 软件地统计工具制作赤潮灾害危险度专题图（图 4-2）。

表 4-6 赤潮灾害危险度评估结果

Tab.4-6 Hazard degree assessment results of harmful algal blooms

| 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| SC1 | 1.099 | NE08 | 1.593 | NE45 | 0.686 | SS33 | 0.959 |
| SC2 | 0.985 | NE09 | 0.836 | NE46 | 0.743 | SS34 | 1.274 |
| SC3 | 1.044 | NE10 | 1.864 | NE47 | 0.648 | SS35 | 1.020 |
| SC4 | 1.169 | NE11 | 0.966 | NE48 | 0.846 | SS36 | 1.227 |
| SC5 | 1.198 | NE12 | 0.980 | NE49 | 0.741 | SS38 | 0.790 |
| SC6 | 1.171 | NE13 | 0.827 | SS1 | 1.025 | SS39 | 1.224 |
| SC7 | 1.195 | NE14 | 0.819 | SS2 | 1.069 | SS40 | 1.097 |
| SC8 | 1.219 | NE15 | 0.683 | SS3 | 0.872 | SS41 | 1.106 |
| SC9 | 1.174 | NE16 | 0.657 | SS4 | 1.099 | SS42 | 1.045 |
| SC10 | 1.109 | NE17 | 0.602 | SS5 | 0.865 | SS43 | 1.169 |
| SC11 | 1.135 | NE18 | 0.781 | SS6 | 0.798 | SS45 | 1.291 |
| SC12 | 1.053 | NE19 | 0.743 | SS7 | 0.792 | SS46 | 1.221 |
| SC13 | 1.086 | NE20 | 0.810 | SS8 | 1.083 | SS47 | 1.091 |
| SC14 | 0.884 | NE21 | 0.801 | SS9 | 1.630 | SS48 | 1.149 |
| SC15 | 0.920 | NE22 | 0.936 | SS10 | 0.852 | SS49 | 1.200 |
| SC16 | 1.102 | NE23 | 0.783 | SS11 | 1.085 | SS50 | 1.142 |
| SC17 | 0.966 | NE24 | 0.871 | SS12 | 1.465 | SS51 | 1.012 |
| SC18 | 1.003 | NE25 | 0.851 | SS13 | 0.783 | SS52 | 1.041 |
| SC19 | 0.619 | NE26 | 0.905 | SS14 | 1.294 | SS53 | 0.687 |
| SC20 | 0.598 | NE27 | 0.880 | SS15 | 0.982 | SS54 | 0.993 |
| SC21 | 0.538 | NE28 | 0.905 | SS16 | 1.077 | SS55 | 0.897 |
| SC22 | 0.835 | NE29 | 0.985 | SS17 | 0.776 | SS57 | 0.795 |
| SC23 | 0.998 | NE30 | 1.012 | SS18 | 1.078 | SS58 | 0.710 |
| SC24 | 0.633 | NE31 | 0.853 | SS19 | 0.891 | SS59 | 0.764 |
| SC25 | 0.680 | NE32 | 0.847 | SS20 | 1.062 | SS60 | 0.952 |
| SC26 | 1.040 | NE33 | 0.957 | SS21 | 1.162 | SS61 | 1.108 |
| SC27 | 0.921 | NE34 | 0.746 | SS22 | 1.314 | SS62 | 1.212 |
| SC28 | 0.979 | NE35 | 0.764 | SS23 | 1.488 | SS63 | 0.958 |
| SC29 | 0.623 | NE36 | 0.921 | SS24 | 1.071 | SS64 | 1.090 |
| SC30 | 1.057 | NE37 | 0.892 | SS25 | 1.057 | SS65 | 1.180 |
| NE01 | 0.754 | NE38 | 0.839 | SS26 | 1.037 | SS66 | 1.052 |

| 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 | 站位 | 危险度 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| NE02 | 1.356 | NE39 | 0.923 | SS27 | 1.119 | SS67 | 0.961 |
| NE03 | 0.839 | NE40 | 0.932 | SS28 | 1.078 | SS68 | 1.095 |
| NE04 | 0.687 | NE41 | 0.811 | SS29 | 0.980 | SS69 | 1.160 |
| NE05 | 0.966 | NE42 | 0.795 | SS30 | 1.109 | SS70 | 1.144 |
| NE06 | 3.666 | NE43 | 0.912 | SS31 | 1.160 | SS71 | 1.114 |
| NE07 | 0.699 | NE44 | 0.816 | SS32 | 1.155 | | |

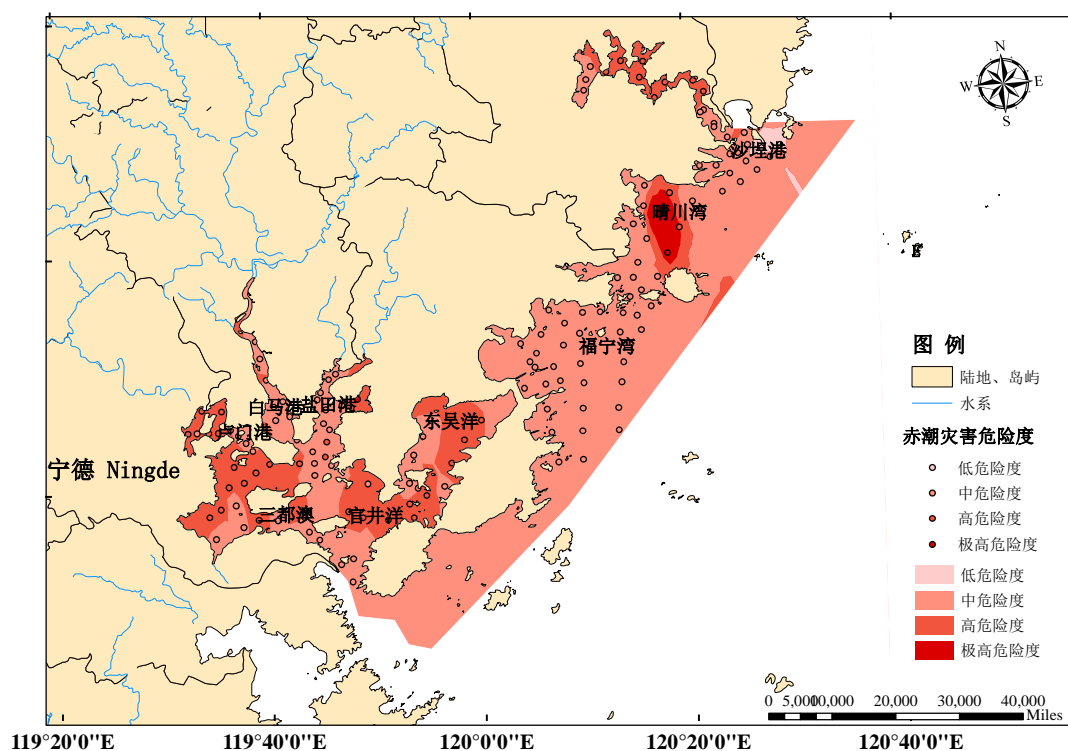


图 4-2 赤潮灾害危险度分布

Fig.4-2 Hazard degree distribution of harmful algal blooms

由表 4-6 和图 4-2 可得，赤潮灾害危险度与富营养化趋势相同，赤潮灾害危险度极高值分布在富营养化等级严重的沙垵港、晴川湾、东吴洋、官井洋、三都澳、卢门港，总体呈现由沿岸向外海递减，三沙湾内赤潮灾害危险度高，由于三沙湾是口小腹大近封闭的海湾，海区内网箱养殖无序发展，大量网箱连续分布，通道小而少，养殖密度过大，且水流交换能力差，水流不畅，由于当地海水发达的养殖业，加上部分养殖户未对生活污水、废物、残饵以及死鱼进行处理便任意抛弃入海等，使得三沙湾海水水质全年整体处于富营养化中、高水平^[72]，理论上在这样的环境背景下、沙垵港、晴川湾、三沙湾极易发生赤潮。

(2) 赤潮灾害承灾体易损度评估结果

利用公式 3-10 计算得赤潮灾害承灾体易损度值如表 4-7, 承灾体易损度专题图如图 4-3。

表 4-7 承灾体易损度评估结果

Tab.4-7 Vulnerability degree assessment results of disaster-bearing body

| 区域 | 承灾体易损度 |
|------|--------|
| 福鼎海域 | 1.683 |
| 霞浦海域 | 0.999 |
| 蕉城海域 | 0.944 |
| 福安海域 | 0.374 |

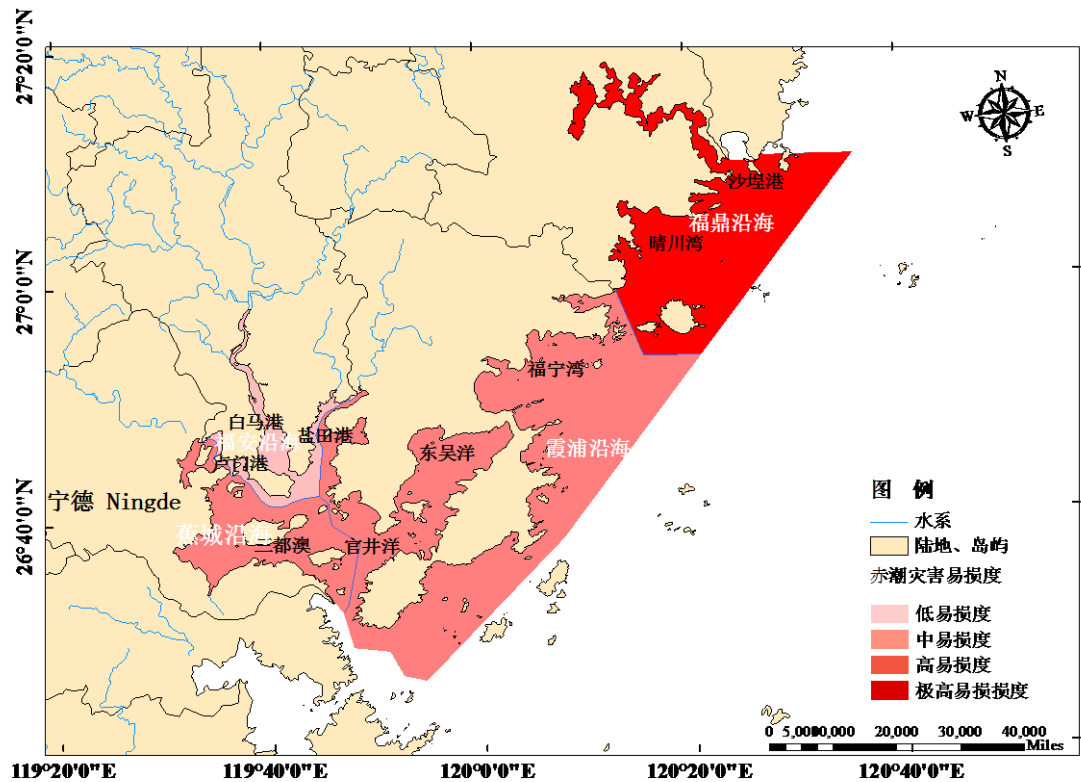


图 4-3 赤潮灾害承灾体易损度分布

Fig.4-3 Vulnerability distribution of harmful algal blooms disaster-bearing body

如表 4-7 和图 4-3 可知，福鼎沿海为赤潮灾害极高易损区，蕉城沿海、霞浦沿海赤潮灾害易损度都为中，福安沿海为低易损度区。福鼎沿海易损度高是由于福鼎是海洋大市，同时也是渔业大市，养殖用海面积占全市用海面积的 80% 以上，其 2015 年鱼类、虾类、蟹类、贝类等海产品产量是宁德 4 沿海县中最高的，因此

赤潮的发生会给福鼎的养殖业带来较大影响；2015 年霞浦沿海和蕉城沿海的鱼类、虾类、蟹类、贝类等海产品产量相当，蕉城沿海略大于霞浦沿海；福安沿海面积对宁德沿海四县市来说最小，其海水养殖面积及产量都相对小，因此赤潮灾害对福安沿海造成的损失也相对最小。

(3) 赤潮灾害风险评估结果

将赤潮灾害致灾因子危险度和承灾体易损度评估结果代入赤潮灾害风险模型（公式 3-11），计算得宁德沿海的赤潮灾害风险及风险等级（表 4-8），并用 Arcmap10.0 软件绘制出赤潮灾害风险专题图（图 4-4）。

表 4-8 赤潮灾害风险评估结果

Tab.4-8 Risk assessment results of harmful algal blooms

| 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| SC1 | 1.907 | NE08 | 2.762 | NE45 | 0.706 | SS33 | 0.370 |
| SC2 | 1.708 | NE09 | 1.450 | NE46 | 0.765 | SS34 | 1.240 |
| SC3 | 1.811 | NE10 | 3.232 | NE47 | 0.667 | SS35 | 1.049 |
| SC4 | 2.028 | NE11 | 1.676 | NE48 | 0.871 | SS36 | 1.194 |
| SC5 | 2.078 | NE12 | 1.699 | NE49 | 0.763 | SS38 | 0.769 |
| SC6 | 2.030 | NE13 | 0.851 | SS1 | 0.395 | SS39 | 1.192 |
| SC7 | 2.073 | NE14 | 1.420 | SS2 | 0.412 | SS40 | 1.128 |
| SC8 | 2.114 | NE15 | 1.185 | SS3 | 0.336 | SS41 | 1.076 |
| SC9 | 2.036 | NE16 | 0.676 | SS4 | 0.424 | SS42 | 1.017 |
| SC10 | 1.924 | NE17 | 1.044 | SS5 | 0.334 | SS43 | 1.137 |
| SC11 | 1.968 | NE18 | 0.803 | SS6 | 0.308 | SS45 | 1.256 |
| SC12 | 1.827 | NE19 | 0.764 | SS7 | 0.305 | SS46 | 1.188 |
| SC13 | 1.883 | NE20 | 0.833 | SS8 | 0.418 | SS47 | 1.062 |
| SC14 | 1.533 | NE21 | 0.825 | SS9 | 1.678 | SS48 | 1.182 |
| SC15 | 1.595 | NE22 | 0.963 | SS10 | 0.876 | SS49 | 1.168 |
| SC16 | 1.911 | NE23 | 0.806 | SS11 | 0.418 | SS50 | 1.175 |
| SC17 | 1.675 | NE24 | 0.896 | SS12 | 1.426 | SS51 | 0.985 |
| SC18 | 1.739 | NE25 | 0.876 | SS13 | 0.806 | SS52 | 1.013 |
| SC19 | 1.074 | NE26 | 0.932 | SS14 | 0.499 | SS53 | 0.668 |
| SC20 | 1.038 | NE27 | 0.905 | SS15 | 0.379 | SS54 | 0.966 |
| SC21 | 0.934 | NE28 | 0.931 | SS16 | 0.416 | SS55 | 0.873 |
| SC22 | 1.448 | NE29 | 1.014 | SS17 | 0.299 | SS57 | 0.774 |
| SC23 | 1.731 | NE30 | 1.042 | SS18 | 0.416 | SS58 | 0.691 |
| SC24 | 1.098 | NE31 | 0.878 | SS19 | 0.917 | SS59 | 0.786 |
| SC25 | 1.179 | NE32 | 0.872 | SS20 | 1.034 | SS60 | 0.979 |
| SC26 | 1.803 | NE33 | 0.985 | SS21 | 1.131 | SS61 | 1.140 |
| SC27 | 1.598 | NE34 | 0.768 | SS22 | 1.279 | SS62 | 1.247 |
| SC28 | 1.697 | NE35 | 0.787 | SS23 | 1.449 | SS63 | 0.985 |
| SC29 | 1.080 | NE36 | 0.948 | SS24 | 0.413 | SS64 | 1.122 |
| SC30 | 1.834 | NE37 | 0.918 | SS25 | 0.408 | SS65 | 1.214 |
| NE01 | 1.307 | NE38 | 0.863 | SS26 | 0.400 | SS66 | 1.083 |
| NE02 | 2.352 | NE39 | 0.950 | SS27 | 1.151 | SS67 | 0.989 |

| 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 | 站位 | 赤潮风险 |
|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| NE03 | 1.455 | NE40 | 0.959 | SS28 | 0.416 | SS68 | 1.127 |
| NE04 | 1.191 | NE41 | 0.834 | SS29 | 0.378 | SS69 | 1.194 |
| NE05 | 1.675 | NE42 | 0.819 | SS30 | 1.141 | SS70 | 1.177 |
| NE06 | 6.358 | NE43 | 0.938 | SS31 | 0.447 | SS71 | 1.146 |
| NE07 | 1.212 | NE44 | 0.840 | SS32 | 0.445 | | |

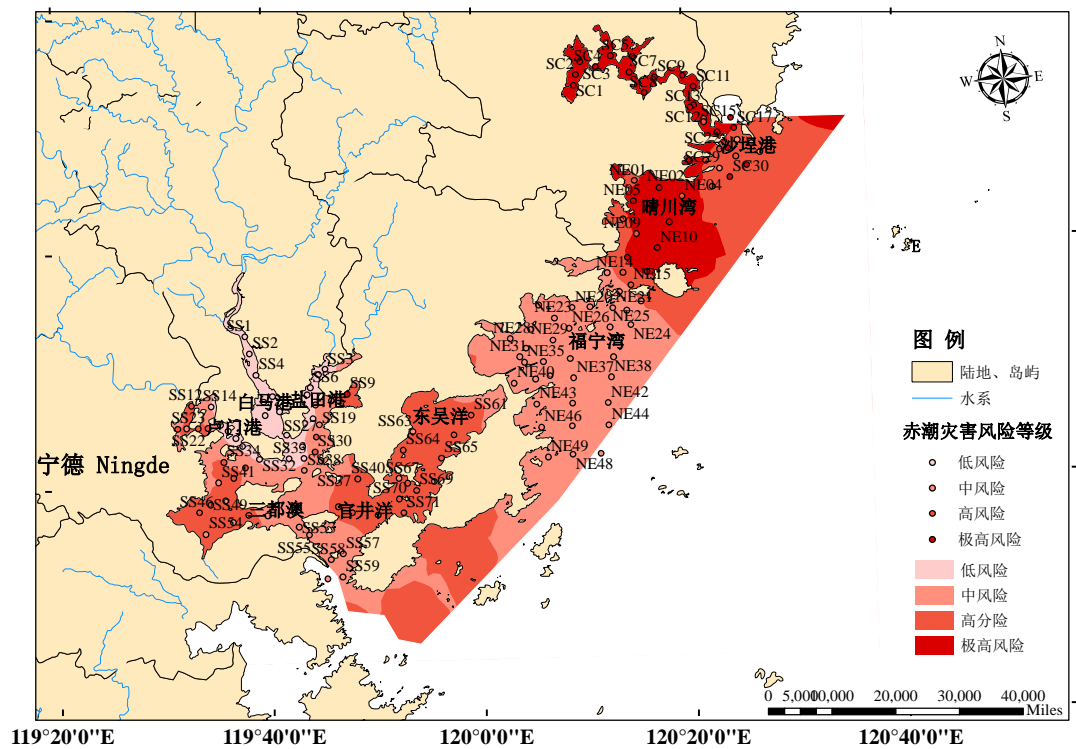


图 4-4 赤潮灾害风险分布
Fig.4-4 Risk distribution of harmful algal blooms

由表 4-8 和图 4-4,晴川湾海域附近和沙垵港内赤潮灾害风险极高,沙垵港外、三沙湾内的东吴洋、官井洋、三都澳赤潮灾害风险为高,三沙湾内的白马港的赤潮灾害风险为低,福宁湾为中等风险。三沙湾内赤潮灾害风险相对赤潮灾害危险度来说相对较低,这是由于三沙湾内有淡水径流存在,退潮流大于涨潮流,“外源性”赤潮生物不易进入湾内,湾内虽氮、磷含量常超三类水质标准,但由于 4~5 月份赤潮高发期的浮游生物优势种多为体形很小,贝虾蟹幼体可以摄食的硅藻类,生态系统处于良性循环状态,所以也不易发生“内源性”赤潮。为数不多的几次赤潮发生的原因可能是:(a)流域入湾的生活污水等陆源污染严重,使海水呈富营

养化；(b)湾内流域已晴热干旱多时，淡水径流量明显减少，氮、磷污染物不易外排，在光照强，水温高的条件下，有利于藻类的大量繁殖；(c)贝、虾、蟹等生物种类的浮游、滤食期大多已过，对藻类的摄食量大幅减少，这些均有利于藻类数量级的积累而发生赤潮^[76]。沙埕港、晴川湾水温、营养盐变化与三沙湾类似，但其海域海水透光性高，营养盐浓度较高，具有利于赤潮发生的物质基础和光照条件^[71]，加上海洋倾废、船舶污染和沿海工业建设等不合理用海和过度用海等造成海洋环境问题突出，所以沙埕港、晴川湾海域附近经常发生赤潮。

(4) 赤潮灾害风险分析结果验证

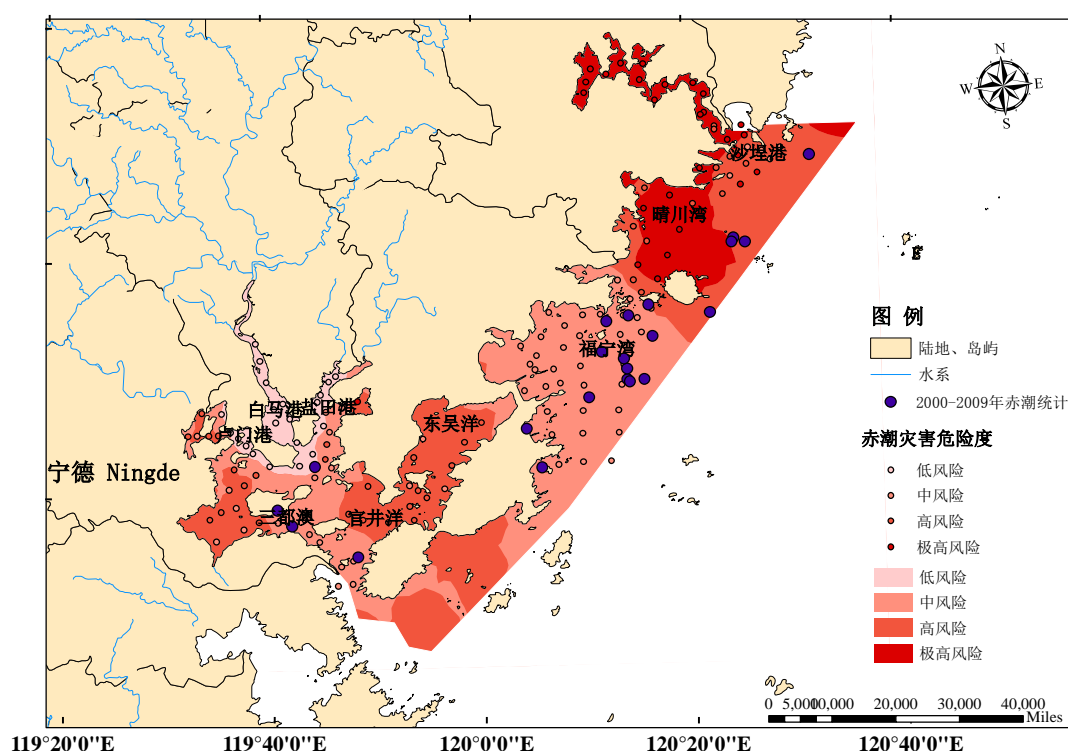


图 4-5 赤潮灾害风险分析结果验证

Fig.4-5 Verification of the risk result of harmful algal blooms

将 2000-2009 年发生于宁德沿海的赤潮事件以点的形式添加到赤潮灾害风险评估图中，对比得出，赤潮灾害风险高的海域赤潮发生的次数相对于赤潮风险低的海域多，说明评估结果与实际情况具有较好的一致性；此外，本文评估结果与房月英^[71]的研究结论相吻合。

第五章 结论与讨论

5.1 结论

本文以宁德海域为研究对象,根据宁德海域具体实际建立了赤潮灾害评估指标体系和评估模型进行赤潮灾害风险评估,取得了如下结果:

(1) 结合区域灾害系统论和 ArcGIS 地统计分析角度对宁德沿海的赤潮灾害进行风险评估;采用相对科学的熵值法确定各指标权重。

(2) 对宁德沿海进行赤潮灾害风险评估,得出宁德沿海的赤潮灾害风险。赤潮灾害危险度与富营养化趋势相同,赤潮灾害危险度极高值分布在富营养化等级严重的沙埕港、晴川湾、东吴洋、官井洋、三都澳、卢门港,总体呈现由沿岸向外海递减,三沙湾内赤潮灾害危险度高。承灾体易损度方面,福鼎沿海为赤潮灾害高易损区,蕉城沿海、霞浦沿海赤潮灾害易损度都为中,福安沿海为低易损度区。赤潮灾害风险极高值分布在晴川湾海域附近和沙埕港内,沙埕港外、三沙湾内的东吴洋、官井洋、三都澳赤潮灾害风险为高,三沙湾内的白马港的赤潮灾害风险为低,福宁湾为中等风险。

(3) 在 GIS 平台上实现了宁德沿海赤潮灾害危险度、承灾体易损度和赤潮灾害风险的可视化。

5.2 讨论

本文对宁德沿海的赤潮灾害风险评估结果虽与历史赤潮发生趋势相一致,但在评估方法上还存在许多要在今后的研究中进一步深入完善的地方。

(1) 指标选取方面的不足

本文在选取赤潮致灾因子危险度、承灾体易损度指标时,由于指标数据不足,尚有许多重要的指标未纳入评价体系中,如缺少赤潮藻类毒性数据,海洋气象要素、水动力方面的数据;承灾体指标也仅考虑海水养殖产品,对于其他同样受赤潮影响的工矿用海、旅游娱乐用海、特殊用海和海洋生态系统等要素并未考虑在内。鉴于本文在选取指标上存在局限性,未来的研究中,应更加全面地补充赤潮

生物、营养盐、光照、气象要素、水动力、外来赤潮生物、工矿用海、旅游娱乐用海、特殊用海等指标。

（2）用熵权法确定指标权重的不足

熵权法充分利用了指标信息熵值的效用价值，其得出的指标权重比德尔菲法和层次分析法可信度更高，但它缺乏各指标之间的横向比较，且如果所有指标熵值都接近 1 时，即使很小的差距都会引起熵权成倍数地改变，导致部分指标被赋予了与其重要性不符合的权重，影响了最终结果的判断。鉴于指标权重确定方法各有优缺点，在今后的研究中应对所用数据属性充分了解的前提下将不同的赋权方法组合起来，充分利用和发挥各种赋权方法的优点，以达到更加满意的结果。

（3）模型建立方面的不足

本文用简单的数学函数评估赤潮灾害风险，与赤潮复杂的形成机制并不适应，会产生较大的误差。今后的研究中可以根据具体海域赤潮发生机制，将两种或多种方法模型相结合，单一模型的评估会导致结果的不可比性，将多个模型的评估结果与实际赤潮发生情况进行比对，选择最符合实际的评估模型。

参考文献

- [1] Anderson D M, Burkholder J M, Cochlan W P, et al. Harmful algal blooms and eutrophication: Examining linkages from selected coastal regions of the United States[J]. Harmful Algae,2008,8(1):39-53.
- [2] Hoagland P, Anderson D M, Kaoru Y, et al. The economic effects of harmful algal blooms in the United States: Estimates, Assessment Issues, and Information Needs[J]. Estuaries and Coasts,2002,25(4b):819-37.
- [3] Turki S, Dhib A, Fertouna-Bellakhal M, et al. Harmful algal blooms (HABs) associated with phycotoxins in shellfish: What can be learned from five years of monitoring in Bizerte Lagoon (Southern Mediterranean Sea)?[J]. Ecological Engineering, 2014,67:39-47.
- [4] 王金辉, 秦玉涛, 刘材材. 长江口赤潮多发区潜在有毒藻类和赤潮毒素的初步调查[J]. 海洋环境科学,2006,25(z1):15-9.
- [5] 邬建勇, 王金辉, 程祥圣. 上海市海产品市场的麻痹性贝毒检测和分析[J]. 毒理学杂志,2006,20(1):52-3.
- [6] 赵冬至, 文世勇, 宋琍琍. 赤潮灾害风险评估理论与区划方法[M]. 北京:海洋出版社,2013.
- [7] 宁德市海洋与渔业局. 2009 年宁德市海洋环境状况公报[R]. 宁德: 宁德市海洋与渔业局, 2010.
- [8] 宁德市海洋与渔业局. 2015 年宁德市海洋环境状况公报[R]. 宁德: 宁德市海洋与渔业局, 2016.
- [9] 丕丛福, 张丰收, 曲丽梅. 赤潮灾害监测预报研究综述 [J]. 灾害学,2008,23(2):127-30.
- [10] 陆斗定, Gobel J, 王春生, 等. 浙江海区赤潮生物监测与赤潮实时预测[J]. 东海海洋,2000,18(2):33-44.
- [11] Chen Q, Mynett A E. Modelling algal blooms in the Dutch coastal waters by integrated numerical and fuzzy cellular automata approaches[J]. Ecological Modelling, 2006,199(1):73-81.
- [12] Allen J I, Smyth T J, Siddorn J R, et al. How well can we forecast high biomass algal bloom events in a eutrophic coastal sea?[J]. Harmful Algae,2008,8(1):70-6.
- [13] 谢中华, 晏丽红. 赤潮预报的人工神经网络方法 [J]. 海洋技术,2007,26(2):31-3+46.

- [14]马玉梅,高静宇,王清华. 基于人工神经网络的赤潮预测模型[J]. 海洋预报,2007,24(1):38-44.
- [15]Velo-Suárez L, Gutiérrez-Estrada J C. Artificial neural network approaches to one-step weekly prediction of *Dinophysis acuminata* blooms in Huelva (Western Andalucía, Spain)[J]. Harmful Algae,2007,6(3):361-71.
- [16]胡婧.神经网络算法在赤潮灾害智能预警系统中的应用[D].山东:山东大学,2009.
- [17]钱振松.小波网络及组合预测在赤潮灾害智能预警系统中的应用研究[D].山东:山东大学,2010.
- [18]Wong K T M, Lee J H W, Harrison P J. Forecasting of environmental risk maps of coastal algal blooms[J]. Harmful Algae,2009,8(3):407-20.
- [19]Wong K T M, Lee J H W, Hodgkiss I J. A simple model for forecast of coastal algal blooms[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2007,74(1-2):175-96.
- [20]Sivapragasam C, Muttill N, Muthukumar S, et al. Prediction of algal blooms using genetic programming[J]. Marine pollution bulletin,2010,60(10):1849-55.
- [21]Roiha P, Westerlund A, Nummelin A, et al. Ensemble forecasting of harmful algal blooms in the Baltic Sea[J]. Journal of Marine Systems,2010,83(3-4):210-20.
- [22]Dippner J W, Nguyen-Ngoc L, Doan-Nhu H, et al. A model for the prediction of harmful algae blooms in the Vietnamese upwelling area[J]. Harmful Algae,2011,10(6):606-611.
- [23]Zhang H, Hu W, Gu K, et al. An improved ecological model and software for short-term algal bloom forecasting[J]. Environmental Modelling & Software,2013,48:152-62.
- [24]Hu W, Jørgensen S E, Zhang F. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China[J]. Ecological Modelling,2006,190(3-4):367-98.
- [25]Okey T. Simulating community effects of sea floor shading by plankton blooms over the West Florida Shelf[J]. Ecological Modelling,2004,172(2-4):339-59.
- [26]Capper A, Flewelling L J, Arthur K. Dietary exposure to harmful algal bloom (HAB) toxins in the endangered manatee (*Trichechus manatus latirostris*) and green sea turtle (*Chelonia mydas*) in Florida, USA[J]. Harmful Algae,2013,28:1-9.
- [27]Branch G M, Bustamante R H, Robinson T B. Impacts of a 'black tide' harmful algal bloom on rocky-shore intertidal communities on the West Coast of South Africa[J]. Harmful Algae,2013,24:54-64.
- [28]Delegrange A, Vincent D, Courcot L, et al. Testing the vulnerability of juvenile sea bass (*Dicentrarchus labrax*) exposed to the harmful algal bloom (HAB) species *Pseudo-nitzschia delicatissima*[J]. Aquaculture,2015,437:167-74.

- [29] Backer L C. Impacts of Florida red tides on coastal communities[J]. Harmful Algae, 2009, 8(4): 618-22.
- [30] Hoagland P, Jin D, Beet A, et al. The human health effects of Florida red tide (FRT) blooms: an expanded analysis[J]. Environment international, 2014, 68: 144-53.
- [31] 文世勇, 赵冬至, 赵玲, 等. 基于氮磷比的赤潮灾害危险度评估方法研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(2): 84-9.
- [32] 文世勇. 赤潮灾害风险评估理论与方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [33] 文世勇, 赵冬至, 张丰收, 等. 赤潮灾害风险评估方法_文世勇[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(1): 106-11.
- [34] Wen S, Song L, Long H, et al. Nutrient-based method for assessing the hazard degree of red tide: a case study in the Zhejiang coastal waters, East China Sea[J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(6): 2671-8.
- [35] 文世勇. 基于营养盐的赤潮灾害风险评估技术与应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.
- [36] 张晓霞, 许自舟, 程嘉熠, 等. 赤潮灾害风险评估方法研究_以辽宁近岸海域为例[J]. 水产科学, 2015, 34(11): 708-13.
- [37] Wang J, Wu J. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea[J]. The Science of the total environment, 2009, 407(13): 4012-21.
- [38] Wu Z, Yu Z, Song X, et al. The spatial and temporal characteristics of harmful algal blooms in the southwest Bohai sea[J]. Continental Shelf Research, 2013, 59: 10-7.
- [39] 柴勋. 基于组件式 GIS 的赤潮灾害风险评估系统的设计与实现——以浙江省海域为例[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
- [40] Orme-Zavaleta J, Jr. W R M. Integrating human and ecological risk assessment application to the cyanobacterial harmful algal bloom problem. Peter Hackett, Peter D. Wagner. Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs[J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2008, 619: 867-83.
- [41] 郭皓, 林凤翱, 刘永健, 等. 近年来我国海域多发性赤潮生物种类以及赤潮风险指数分级预警方法[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(1): 94-8.
- [42] Chen Q, Rui H, Li W, et al. Analysis of algal bloom risk with uncertainties in lakes by integrating self-organizing map and fuzzy information theory[J]. The Science of the total environment, 2014, 482-483: 318-24.
- [43] 刘冬. 船舶压载水引发大连港赤潮风险的评价方法研究[D]. 大连 大连海事大学, 2008.

- [44]严志宇,王天葳,刘冬.船舶压载水引发赤潮的风险评价[J].科技资讯,2009(4):160-2.
- [45]许海梁,刘冬,王天葳.船舶引入赤潮生物的风险评估[J].科技创新导报,2009(5):133-4.
- [46]王洪超.船舶压载水引发赤潮风险的评价方法研究[D].大连:大连海事大学,2010.
- [47]王靖,张金锁.综合评价中确定权重向量的几种方法比较[J].河北工业大学学报,2001,30(2):52-7.
- [48]商彦蕊.我国自然灾害研究进展与减灾思路调整[J].地域研究与开发,2005,24(2):6-10.
- [49]Jin D, Thunberg E, Hoagland P. Economic impact of the 2005 red tide event on commercial shellfish fisheries in New England[J]. Ocean & Coastal Management, 2008,51(5):420-9.
- [50]陈舜,佟蒙蒙,江天久,等.赤潮灾害对水产养殖业损失的分级评估[J].水产学报,2009,33(4):610-6.
- [51]文世勇,宋旭,田原原,等.赤潮灾害经济损失评估技术方法[J].灾害学,2015,30(1):25-8+62.
- [52]陈爱丽,施生旭,刘峰.宁德建设海洋经济强市的SWOT分析及其策略选择[J].科技和产业,2015,15(10):40-44+54.
- [53]郭胜利.22起食用织纹螺中毒事件的分析[J].现代预防医学,2012,39(14):3515-3516.
- [54]林永添.三沙湾赤潮种类与理化要素关系的初步探讨[J].现代渔业信息,2010,25(6):11-5.
- [55]苏新红,金丰军,杨奇志,等.基于BP神经网络模型的福建海域赤潮预报方法研究[J].水产学报,2017,41(11):1744-55.
- [56]王颢,魏姗姗,阳藻,等.福建三沙湾夏季海水溶解氧分布及低氧现象初探[J].海洋湖沼通报,2014(3):167-74.
- [57]徐佳奕,徐兆礼.三沙湾浮游动物生态类群演替特征[J].生态学报,2013,33(5):1413-24.
- [58]朱峰,石志洲,凌信文,等.宁德三沙湾网箱养殖与环境质量的关系[J].海洋通报,2013,32(2):171-7.
- [59]国家海洋局宁德海洋环境监测中心站.2014年海洋生物多样性环境监测报告[R].宁德:国家海洋局宁德海洋环境监测中心站,2014.

- [60] 丰卫华, 王志富, 张荣保, 等. 宁德海域表层沉积物氧化还原环境特征及其影响因素[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(6): 882-7+907.
- [61] 宁德市海洋与渔业局. 宁德市海洋功能区划 (2013-2020) 文本 [EB/OL]. [2017-08-22]. http://www.ningde.gov.cn/zwgk/ghjh/ghgy/201605/t20160526_21310.htm.
- [62] 王庆业. 宁德沿海风暴潮特征及数值模拟研究[D]. 山东: 中国海洋大学, 2014.
- [63] 梁玉辉, 江天久, 刘仁沿, 等. 中国赤潮灾害调查与评价 (1933-2009) [M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [64] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 6-17.
- [65] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 1-9.
- [66] 史培军. 四论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2005, 14(6): 1-7.
- [67] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践[J]. 自然灾害学报, 2009, 18(5): 1-9.
- [68] 牟乃夏, 刘文宝, 王海银, 等. ArcGIS10 地理信息系统教程—从初学到精通[M]. 北京: 测绘出版社, 2012.
- [69] 黄伟卿, 陈彩珍, 张艺, 等. 诱发三都湾海域赤潮的原因探讨[J]. 河北渔业, 2012(9): 33-6.
- [70] 周进, 纪炜炜. 三都澳大型底栖动物次级生产力[J]. 海洋渔业, 2012, 34(1): 32-8.
- [71] 房月英. 三都湾赤潮监控区海水富营养化与赤潮发生的关系研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2008.
- [72] 陆杰. 宁德市近岸海域富营养化评价[J]. 海峡科学, 2015(2): 5-7.
- [73] 李绪兴. 赤潮及其对渔业的影响[J]. 水产科学, 2006, 25(1): 45-7.
- [74] 邹志红, 孙靖南, 任广平. 模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用[J]. 环境科学学报, 2005, 25(4): 552-6.
- [75] 陈孝新. 熵权法在股票市场的应用[J]. 商业研究, 2004, (16): 139-140+14.
- [76] 宁德市海洋与渔业环境监测站. 三都湾局部海域旋链角毛藻等硅藻类大量繁殖引起海水颜色异常[EB/OL]. [2017-08-22]. <http://www.gjyfish.com/Item/747.aspx>.

攻读硕士学位期间发表的论文

- (1) 谢宏英, 王金辉. 赤潮灾害的研究进展. 海洋环境科学. (已录用)
- (2) 谢宏英, 王金辉. 宁德沿海赤潮灾害风险状况研究. 上海海洋大学学报. (已录用)

致谢

心怀感恩，天地宽，回首四年的研究生生涯，满心的感恩。

首先感恩给我读研机会的恩师王金辉老师，面对我的过失，老师一次又一次地给了我机会，读研期间由于迷失了自我错过了一次毕业的机会，当我重新打起精神决定把握最后的机会时，老师又无比宽容地给了我第二次机会，从没有半句责怪。在学术上他总是给我无限宽松的科研环境，让我能够在学术的氛围中尽情驰骋；对于生活上他又像一位至亲，给予包容、理解和关心。他温文尔雅的学者风范及一丝不苟的学术态度是我今后努力的方向标。

感恩我的母校上海海洋大学、在校领导老师及辅导员徐英华老师，在面临困难时，当我最坚强的后盾。

感恩东海预报中心及宁德海洋环境监测中心站的全体领导和同事在我实习期间为我提供优质的生活、工作和学习环境，让我每天都充实饱满。感恩宁德中心站马祖友马老师、樊立静樊老师为我提供宁德海域背景资料与数据，同时也感激李允师兄、郑碧琪、李超、吴毓儒、黄文、李超、程宏、唐娅菲、汲生磊、小安等一如既往的关心与支持，他们家人式的爱护让我在原本陌生的环境里，生活的更加多姿多彩！

感恩宁德市海洋与渔业局的工作人员提供 2015 年《福建省渔业统计报表制表制度》，让我得以顺利地完成论文的写作。

感恩海洋公益性行业科研专项经费项目（201305027）的经费资助。

感恩爸爸妈妈、哥哥姐姐，姐夫、嫂子和二舅妈，无论我们相隔多远，我永远都是你们最牵挂的小妹妹，也无论自己多么任性，你们永远都对我不离不弃，求学期间不管是物质上还是精神上都给予我最大的支持，让我没有后顾之忧，有你们我是多么幸福。

感恩生命中的贵人逸林老师，在我最迷茫的时候他帮助我认清了自己，找到了自我，遇到了更好的自己。每次与老师的讨论中，都能颠覆我的思想，让我即使面对难题也变得有勇气有智慧，他让我知道做为人，是需要对自己所犯的过错负责的，但是找到了自我，所有的问题都不再是问题，在生命的转折点得一名师指点，何其荣幸。

感恩刘海阳师兄在论文写作上无私地帮助，每次打退堂鼓的时候他都会不断地鼓励我，让我更有动力和勇气朝着自己既定的方向奔跑。

感恩找上我的所有麻烦，是它们让我成长，前进。每一个挑战都提供一个机

会让我在学习掌握状况中去渡过。

最后，感恩评阅本论文的专家老师们，谢谢你们付出宝贵的时间和辛勤的劳动！祝老师们身体健康，工作顺利！