

赤潮灾害的研究进展

谢宏英^{1,2}, 王金辉³, 马祖友¹, 樊立静¹

(1.国家海洋局宁德海洋环境监测中心站,福建 宁德 352000; 2.上海海洋大学海洋科学学院,上海 201306;
3.国家海洋局东海分局,上海 200137)

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,已引起各国政府及科学界的广泛关注。本文综述了国内外赤潮灾害的预测、评估和影响状况,分析了当前赤潮灾害研究工作中存在的问题,提出了未来赤潮灾害研究的发展方向,以期科学防治赤潮灾害提供指导。

关键词: 赤潮灾害; 预测; 风险; 灾情; 影响

中图分类号: X43; X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2019)03-0482-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2019.03.023

Review of harmful algal blooms hazard

XIE Hong-ying^{1,2}, WANG Jin-hui³, MA Zu-you¹, FAN Li-jing¹

(1. Central Marine Environmental Monitoring Station of Ningde, SOA, Ningde 352000, China; 2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China 3. East China Sea Branch of State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China)

Abstract: As a kind of marine ecological hazard, harmful algal blooms hazard will not only threaten the safety of the ecological environment in the outburst area, cause partial disruption of the marine food chain and destroy the balance of the ecosystem, but also damage human health and economic development. It has drawn wide attention of governments and scientific community in various countries. This paper summarizes the prediction, evaluation and influences of harmful algal blooms hazard at home and abroad, analyzes the existing problems in the current research work, and puts forward the future research direction, so as to provide guidance for scientific prevention and control of harmful algal blooms hazard.

Key words: harmful algal blooms hazard; forecast; risk; disaster; influences

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^[1]。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。赤潮灾害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。因此,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。不同学者从不同角度对赤潮灾害进行了针对性研究,本文对已有相关研究结果进行了概述,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。

收稿日期: 2017-10-20, 修订日期: 2018-01-18

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201305027); 国家海洋公益性行业科研专项项目“海洋站生态环境长期综合观测系统集成技术与示范”(201505007)

作者简介: 谢宏英(1991-),女,福建宁德人,硕士研究生,主要研究方向为海洋生态灾害的风险评估, E-mail: hyxie113@hotmail.com

通讯作者: 王金辉(1974-),教授,主要从事海洋生态环境、海洋生态灾害和海洋生物多样性研究, E-mail: wangjinhui@eastsea.gov.cn

1 赤潮灾害的预测

1.1 经验预测法预测赤潮灾害

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,常规方法主要包括经验预测法和模型预测法。

经验预测法一般是对大量赤潮生消过程监测资料进行分析处理,基于多元统计方法,如判别分析、主成分分析等,在选择不同的预报因子的同时,利用一定的判别模式对赤潮进行预测^[2]。

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^[3]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:当水中赤潮生物的细胞密度持续上升并逐渐接近安达六郎提出的赤潮发生的细胞浓度临界值时,可以预报赤潮即将发生;如果叶绿素 a 的含量从常量上升到 10 mg/m^3 以上且有迅速增加的趋势,那么赤潮即将发生。

1.2 模型预测法预测赤潮灾害

模型预测法(数值预测法)主要根据赤潮发生机理,通过各种物理-化学-生物耦合生态动力

学数值模型模拟赤潮发生、发展、高潮、维持和消亡的整个过程而对赤潮进行预测^[2]。

Chen 等^[4]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^[5]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。

随着计算机软件技术、人工智能的迅猛发展,部分专家学者将人工神经网络模型应用于赤潮预测。谢中华等^[6]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^[7]将改进的三层 BP(back propagation) 神经网络模型运用于夜光藻赤潮的预测;Velo-Suárez 等^[8]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^[9]、钱振松^[10]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)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 人工神经网络模型预测赤潮
Tab.1 Harmful algal blooms 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、盐度、化学耗氧量、溶解氧、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	[6]
24	4	水温、溶解氧、盐度、总氮、可溶性无机磷、浮游植物密度、夜光藻密度	[7]
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	[8]
37	10	水温、透明度、pH、盐度、化学耗氧量、溶解氧、磷酸盐、总氮、叶绿素 a 、浮游植物密度	[9]
47	16	水温、透明度、pH、盐度、化学耗氧量、溶解氧、磷酸盐、总氮、叶绿素 a 、浮游植物密度	[10]

Wong 等^[11-12]定义了水动力稳定风险因子 R 预测赤潮(公式 1); Sivapragasam 等^[13]用遗传规划(genetic programming) 建立数学模型预测香港吐露港赤潮; Roiha 等^[14]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^[15]等提出基于 HAMSOM 模型的循环模型和拉格朗日赤潮模型的数值模型; Zhang 等^[16]建立了基于窗口、集成生态太湖模型^[17]的软件(WSE) 实现 3~5 d 的短期预测。

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

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。

2 赤潮灾害的评估

2.1 赤潮灾害风险评估

赤潮灾害评估是赤潮灾害研究的重要内容。

根据不同的研究角度和评估目的, 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。

船舶压载水是携带和传播外来物种的重要途径。刘冬^[18]、严志宇等^[19]、许海梁等^[20]、王洪超^[21]对船舶压载水引发赤潮灾害的风险进行了研究(见表 2)。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定性的模糊指标仍可做出判断, 但都局限于专家群体的知识、经验和价值判断^[22]; 变异系数法是客观法赋权法的一种, 当评价指标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, 缺点在于对指标的具体经济意义重视不够, 也会存在一定的误差。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 2 船舶压载水引发赤潮的风险研究

Tab.2 Study on the risk of harmful algal bloom caused by ship's ballast water

文献来源	权重确定方法	模型	指标准则层
[18]	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
[19]	专家打分法	$A = \sum_{i=1}^5 R_i Q_i$	扩散可能性
			生态危害性
[20]	变异系数法	$R = \sqrt[7]{\prod R_i}$	赤潮生物载入的可能性
			赤潮生物存活的可能性
[21]	/	$R_1 = \frac{C}{C_0} = e^{R \times C_i}; R_2 = 1 - C_{ij};$ $R_3 = (S_{\text{赤潮样本数}} / S_{\text{总预测样本数}}) \times 100\%;$ $R_{1\text{级}} = \sqrt[3]{(R_1 \times R_2 \times R_3)}$	赤潮生物定殖的可能性
			赤潮生物扩散的可能性
[21]	/		赤潮爆发的可能性
			载入的可能性
[21]	/		存活的可能性
			定殖的可能性
[21]	/		扩散的可能性
			爆发的可能性
[21]	/		引入的可能性
			引入风险
[21]	/		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)

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^[1]。在此基础上,文世勇等根据赤潮藻类最大比生长速率的氮磷比耐受性模型和赤潮形成基准细胞密度建立了氮磷比与赤潮暴发时间的关系模型^[23];提出了赤潮灾害风险评估指标体系(图 1)和赤潮灾害风险评估模型,采用层次分析法和德尔菲法确定了各指标权重^[24-25];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实例评估^[24];在实验室培养条件下,以塔玛亚历山大藻为对象建立了基于营养盐的赤潮危险度评估模型^[26],并在 GIS 平台上实现了评估结果的空间可视化^[24-25 27];张晓霞^[28]借鉴文世勇等

的理论方法评估了辽宁沿海 6 市的赤潮风险;Wang 等^[29]提出了评价东海赤潮相对风险的简化模型;Wu 等^[30]对 Wang 等^[29]提出的赤潮风险模型进行了改进,结合 GIS 技术和统计方法分析了渤海西南部海域的赤潮事件。图 1 为文世勇等建立的赤潮灾害风险评估指标体系,从致灾因子、孕灾环境因子和承灾体因子三方面较全面地选取了与赤潮灾害发生密切相关的因子作为评估指标;表 3 为张晓霞建立的赤潮灾害风险评估指标体系,其以灾害发生次数和影响范围作为赤潮灾害致灾因子指标不能反映赤潮的成因,承灾体脆弱性指标中的男女比例、耕地比重与赤潮的脆弱性相关性不大;由表 4 可见,目前赤潮灾害风险评估模型较为简单。

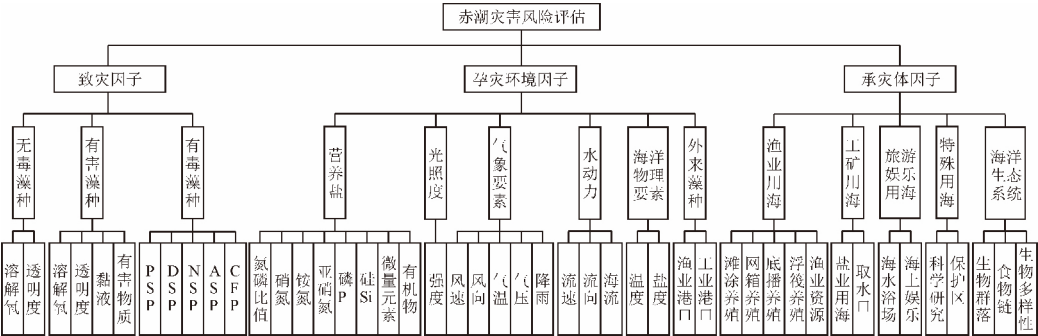


图 1 赤潮灾害风险评估指标体系^[25]

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

表 3 灾害风险评估指标体系 ^[28]			
Tab.3 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
			人口密度
		人员	男女比例
			沿海城市旅游人数
			经济密度
	承灾体 脆弱性	社会	耕地比重
			港口数量
			港航面积
		环境	渔业用海面积极
			娱乐用海面积极
			岸线长度
			海洋保护区面积

柴勋^[31]结合组件式 GIS 平台 SuperMap Objects 与 C#开发语言设计与实现了赤潮灾害风险评估系统,得出了浙江海域赤潮灾害危险度专题图和赤潮灾害风险专题图; Orme-Zavaleta 等^[32]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^[33]根据水体中不同的赤潮生物细胞密度或Chl *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Chl *a* 为例,并不是所有的藻类体内都以 Chl *a* 为主且高 Chl *a* 浓度不一定是赤潮;Chen 等^[34]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 4 赤潮灾害风险评估模型

Tab.4 Models for risk assessment of harmful algal blooms hazard

赤潮灾害风险评估模型	文献
$t = \frac{(B_L/B_0) - 1}{\mu_0 + A \times \exp\left(\frac{-(N/P) - (N/P)_{opt}}{2 \times \sigma^2}\right)}$	[23-27]
$H_1 = \sum_{i=1}^n a_i F_i; H_2 = \sum_{i=1}^n b_i M_i; H_H = \alpha H_1 + \beta H_2; H_v = \sum_{i=1}^n c_i N_i; H_R = \omega H_v * H_H$	
$H = (a + b * t)^{-1/c}; V = \sum_{i=1}^n a_i V_i; \text{风险度} = \text{危险度} \times \text{易损度}$	
$H = D_1 H_1 + D_2 H_2; V = \sum_{i,j=1}^n T_{ij} V_{ij}$	[28]
$\text{Risk} = f(T) \times f(C) \times f(A) \times f(D) / f(L); \text{Risk} = \alpha \times T \times C \times A \times D / L$	[29]
$TH = T \times C \times A \times D \times E / L$	[30]

注: 表中 t 为赤潮藻类在某个氮磷比下的暴发时间(d); B_L 为形成赤潮时的基准细胞密度(cell/L); B_0 为某个氮磷比下的初始细胞密度(cell/L); 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; $(N/P)_{opt}$ 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; α 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)

2.2 赤潮灾害灾情评估

灾情评估是对灾害造成的人员伤亡、直接经济损失以及间接经济损失进行评估,它是进行有效的灾害救助、灾害补偿以及灾后恢复重建的重要依据^[35]。

Jin^[36] 等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^[37] 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^[38] 提出了赤潮灾害经济损失评估指标包括海水养殖业经济损失评估指标、滨海旅游业经济损失评估指标、赤潮灾害监测与应急费用和赤潮灾害处置费用 4 大类。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。

3 赤潮灾害的影响

3.1 赤潮灾害对海洋生态系统的影响

赤潮灾害的发生将改变海洋环境因素,致使一些海洋生物不能正常生长、发育和繁殖,破坏了原有的生态平衡。

Okey 等^[39] 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^[40] 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^[41] 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^[42] 进行了为期 45 d 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。

3.2 赤潮灾害对人类社会的影响

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^[43]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^[44]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。

4 分析与展望

本文对赤潮灾害的预测、评估及影响进行了概述,可帮助了解赤潮灾害研究的主要内容和关键问题,为进一步研究赤潮灾害提供参考资料。虽然,有关学者已经对赤潮灾害作了大量研究工作,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,需要在今后的研究中进一步完善。

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,在今后的研究中须综合考虑赤潮生态发育过程和环境参量,选择恰当表征赤潮的因子做出更准确的预测,同时为了给减灾防灾提供及时迅速和可靠的科学信息,建立一个赤潮监测、预警和实时预报系统已成为十分迫切的任务。

赤潮灾害评估方面,赤潮灾害风险评估尚没有系统成熟的理论与方法体系可供参考,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。采用层次分析法、德尔菲法、变异系数法和熵值法确定指标权重,这些方法各自的缺点不可避免地会对赤潮灾害风险结果造成影响。因此,未来的研究中可根据指标数据情况选择组合赋权法校正某些方法的偏性,使各种赋权方法的优点融为一体,综合运用和发挥最佳效应。现有的赤潮灾害评估模型更多依赖于人为的简单线性假定,今后的研究可将多个模型的评估结果与实际赤潮发生情况

进行比对后选择最符合实际的评估模型。此外,赤潮灾害风险评估的核心要抓住有毒有害赤潮和由其引起的中毒事件及应突出有毒有害赤潮的风险区域和时段。另外,应加强赤潮灾害对海洋生态系统、人体健康、社会经济等多方面的损失评估。

赤潮灾害的影响方面,重大的有毒有害赤潮将导致资源环境破坏、人员伤亡和社会经济损失,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,这些影响都有待于今后进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 赵冬至,文世勇,宋珊珊.赤潮灾害风险评估理论与区划方法[M].北京:海洋出版社,2013.
- [2] 丛丕福,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):127-130.
- [3] 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.
- [4] CHEN Q W,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.
- [5] 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):70-76.
- [6] 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):31-33,46.
- [7] 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.
- [8] 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):361-371.
- [9] 胡婧.神经网络算法在赤潮灾害智能预警系统中的应用[D].济南:山东大学,2009.
- [10] 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].济南:山东大学,2010.
- [11] 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):175-196.
- [12] 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):407-420.
- [13] SIVAPRAGASAM C,MUTTLIL N,MUTHUKUMAR S,et al. Prediction of algal bloom using genetic programming[J]. Marine Pollution Bulletin,2010,60(10):1849-1855.
- [14] ROHIA 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):210-220.
- [15] DIPPER 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.
- [16] ZHANG H J, HU W P, GU K et al. An improved ecological model and software for short-term algal bloom forecasting[J]. *Environmental Modelling & Software* 2013, 48: 152-162.
- [17] U W P, JØRGENSEN S E, ZHANG F B. A vertical-compressed three-dimensional ecological model in Lake Taihu, China[J]. *Ecological Modelling* 2006, 190(3/4): 367-398.
- [18] 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.
- [19] 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): 160-162.
- [20] 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): 133-134.
- [21] 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.
- [22] 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): 52-57.
- [23] 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): 84-89.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] WEN S Y, SONG L 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): 2671-2678.
- [27] 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.
- [28] 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): 708-713.
- [29] WANG J H, WU J Y. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea[J]. *Science of the Total Environment* 2009, 407(13): 4012-4021.
- [30] WU Z X, YU Z M, SONG X X et al. The spatial and temporal characteristics of harmful algal blooms in the southwest Bohai sea[J]. *Continental Shelf Research* 2013, 59: 10-17.
- [31] 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.
- [32] ORME-ZAVALA J, MUNNS W R Jr. Integrating human and ecological risk assessment: application to the cyanobacterial harmful algal bloom problem[M]//HUDNELL H K. *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research Needs*. Advances in Experimental Medicine and Biology. New York, NY: Springer, 2008, 619: 867-883.
- [33] 郭皓, 林凤翔, 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): 94-98.
- [34] CHEN Q W, RUI H, LI W F et al. Analysis of algal bloom risk with uncertainties in lakes by integrating self-organizing map and fuzzy information theory[J]. *Science of the Total Environment* 2014, 482/483: 318-324.
- [35] 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.
- [36] 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): 420-429.
- [37] 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): 610-616.
- [38] 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): 25-28, 62.
- [39] OKEY T A, VARGO G A, MACKINSON S et al. Simulating community effects of sea floor shading by plankton blooms over the West Florida Shelf[J]. *Ecological Modelling* 2004, 172(2/3/4): 339-359.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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: 167-174.
- [43] BACKER L C. Impacts of Florida red tides on coastal communities[J]. *Harmful Algae* 2009, 8(4): 618-622.
- [44] 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: 144-153.