

山东沿海赤潮灾害基本特征及防控对策建议

周 健¹, 王 玮², 吴志宏¹, 王其翔¹,
王 源¹, 高 翔¹

(1.山东省海洋预报减灾中心, 山东 青岛 266104; 2.青岛市海洋减灾中心, 山东 青岛 266071)

摘 要: 基于 1952 年—2017 年山东省沿海赤潮事件的统计资料, 对赤潮灾害的时间变化、空间分布及原因种构成等基本特征进行系统分析。结果表明: 山东沿海最常发规模 <10 km²、单相型的无毒甲藻 (Pyrrophyta) 赤潮; 赤潮暴发多集中在 5 月—9 月; 东营黄河口、莱州湾中西部、长岛近海、烟台四十里湾、青岛胶州湾及前海、日照东港近海为易发赤潮灾害的海域; 最频发的赤潮生物为夜光藻 (*Noctiluca scintillans*), 其暴发次数和暴发面积均远高于其他种类; 新世纪以来, 有毒赤潮和双相型赤潮占比显著增加, 赤潮生物种类明显增多。针对山东沿海赤潮灾害表征特点, 提出了提高赤潮监控信息化水平、开展赤潮灾害风险评估与区划、推动海洋生态环境综合治理的防控对策建议。

关键词: 山东沿海; 赤潮; 基本特征; 防控对策

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2020)04-0537-07

The basic characteristics and prevention countermeasures of red tide in Shandong coast waters

ZHOU Jian¹, WANG Wei², WU Zhi-hong¹, WANG Qi-xiang¹,
WANG Yuan¹, GAO Xiang¹

(1. Shandong Marine Forecast and Hazard Mitigation Service, Qingdao 266104, China; 2. Qingdao Marine Hazard Mitigation Service, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on historical records of red tides from 1952 to 2017, and according to the analysis of their temporal, spatial, and biological variation, the basic characteristics of red tides in Shandong coastal waters are studied with preventive countermeasures proposed. Non-toxic dinoflagellate blooms are frequently observed with a scale less than 10 km² in Shandong coast waters. The incidence of red tides is high from May to September and most events occur in the Yellow River Estuary, midwest of Laizhou Bay, Changdao offshore waters, Sishili Bay, Donggang offshore waters, Jiaozhou Bay and the Qingdao coast. Compared with other species, *Noctiluca scintillans* is frequently found. However, new causative organisms have been identified and the proportion of toxic and biphasic red tides has also increased since 2000. In order to prevent red tides, the level of information monitoring should be improved, risk assessments carried out and comprehensive management of the marine environment promoted.

Key words: Shandong coast waters; red tide; basic characteristics; prevention countermeasures

收稿日期: 2019-02-18, 修订日期: 2019-03-28

基金项目: 国家海洋局海洋减灾中心委托科研业务项目(2016AA059); 山东省自然科学基金(ZR2016DQ03)

作者简介: 周 健(1985-), 男, 山东菏泽人, 助理研究员, 主要从事海洋生态灾害防治研究, E-mail: zhoujian.park@163.com

通讯作者: 高 翔(1979-), 男, 山东青岛人, 副研究员, 研究方向为海洋灾害防范, E-mail: gaoping01@shandong.cn

赤潮(red tide)是指在特定环境条件下海水中某些浮游植物、原生动物或细菌暴发性增殖或聚集引起的生态现象。赤潮暴发不仅危害区域海洋环境与资源,扰乱滨海旅游和海水养殖等活动正常经营秩序,甚至还可能因藻毒素富集在食用海产品而危及人员健康/生命安全。上世纪 50 年代以来,由于沿海地区工农业生产的日益发展和人口增加,大量富含氮、磷等元素的工业废水和生活污水排放入海,使河口、内湾和沿岸水域的渐趋富营养化,赤潮灾害的发生也越来越频繁^[1]。进入 21 世纪后,我国海域内赤潮事件年均暴发约 70 余次,年均面积约 11500 km²,几乎每年都发生超过 1000 km² 的特大赤潮^[2]。我国因赤潮而造成的经济损失有的年份可达 10 亿元以上,一次大规模的赤潮就可能造成高达数亿元的直接经济损失^[3]。总体而言,我国近岸海域赤潮发生具有全年、全海域、多种类、高危害等特点^[4],并已经成为了滨海各省市均高度重视的海洋灾害。

山东省近海区域位于渤海、黄海之滨,西起大口河与河北省接壤,北同辽东半岛遥相对峙,南至绣针河河口与江苏相接,介于 35°6.2'N—38°24.01'N、117°46.1'E—122°42.3'E,海岸线长约 3345 km,毗邻海域总面积为 15.96×10⁴ km²。自费鸿年在 1952 年记录黄河口夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮以来^[5],山东沿海陆续有发生赤潮事件的报道。目前,学者们关于山东沿海赤潮灾害的研究多集中于成因分析、生消动态、遥感监测、毒素检测、危害防治等方面,而对于防灾减灾工作具有基石意义的灾害时空特征和变化规律的探究则相对较少。基于此,本文通过系统查阅已有资料(政府公报、灾害专著、学术论文等)对近 66 a (1952 年—2017 年)来山东沿海赤潮灾害事件进行统计及梳理,并根据赤潮灾害的时间变化、空间分布及原因种构成等基本特征分析结果,提出了针对性的防控措施建议,以期山东省赤潮灾害的监测预警、风险区划和综合治理等工作开展提供数据支撑和资料参考。

1 数据来源

本文所分析的赤潮事件,其统计数据来源于:《中国海洋灾害公报》(1989—2017)、《北海

区海洋灾害公报》(2012—2017)、《山东省海洋环境质量公报》(2001—2017)、《青岛市海洋环境公报》(2001—2017),赤潮灾害专著^[6-8]和近年相关学术论文^[9-13]。

2 特征分析

2.1 基本概况

据统计资料显示,1952 年—2017 年的 66 年间,山东沿海共记录赤潮事件 111 次,累计发生面积超过 18300 km²。在所有赤潮事件记录中,山东沿海共暴发面积<10 km² 的赤潮 36 次(占比为 32.43%),远大于其他规模的赤潮灾害次数(表 1)。无毒赤潮记录次数约为有毒赤潮的两

表 1 山东沿海记录赤潮事件分类统计简况

Tab.1 The brief classification of red tides recorded in shandong coast waters

分类统计	类型	次数	占比/(%)
暴发面积	特大赤潮 (≥1000 km ²)	8	7.21
	重大赤潮 (500 ~ 1000 km ²)	6	5.41
	大型赤潮 (100 ~ 500 km ²)	15	13.51
	中型赤潮 (50 ~ 100 km ²)	14	12.61
	小型赤潮 (10 ~ 50 km ²)	16	14.41
	微型赤潮 (<10 km ²)	36	32.43
	面积不详	16	14.41
赤潮生物种类多少	单相型赤潮	81	72.97
	双相型赤潮	13	11.71
	藻种不详	17	15.32
藻种有/无毒性	无毒赤潮	60	54.05
	有毒赤潮*	34	30.63
	藻种不详	17	15.32
赤潮生物所属门类	甲藻门	48	43.24
	黄藻门	10	9.01
	硅藻门	9	8.11
	金藻门	6	5.41
	原生动物	8	7.21
	同门异种同发	7	6.31
	不同门类同发	6	5.41
藻种不详	17	15.32	

注: *双相型赤潮事件中若出现有毒藻种,即归为有毒赤潮类

倍,分别为60次和34次。赤潮灾害基本以单相型为主,偶有双相型赤潮事件发生。甲藻(Pyrrophyta)是最为常发的赤潮生物,占比约为43.24%。综上,山东沿海最常发生的赤潮灾害类型为规模<10 km²、单相型的无毒甲藻赤潮。

2.2 时间变化特征

1990年前,山东沿海仅零星记录了4次赤潮事件,累计面积为2000 km²(图1)。1990年—2017年,共记录赤潮事件107次,年均均为3.8次,但年度赤潮灾害次数呈波动性变化,各峰值间隔周期为2~3 a;2004年、2005年暴发的赤潮次数(10次)为历年最多。年度累计面积方面,总体呈现波动下降趋势,间隔周期为5~6 a;1990年赤潮累计面积(3751 km²)为历年最高。此外,如5 a滑动均值数据分析所示,自2004年以来,赤潮灾害年度暴发次数和累计面积均呈现缓慢下降趋势,表征山东沿海发生赤潮灾害的风险正逐年降低。

山东沿海暴发赤潮多集中在5月—9月,此期间的暴发次数及暴发面积分别约占全年总值的79%和97%(图2)。8月是赤潮灾害暴发最为频繁的月度,暴发次数(23次)和暴发面积(4626.8 km²)均居年度之冠(图2)。

2.3 空间分布特征

在山东近海均有赤潮暴发的记录(图3),东营黄河口邻近海域、莱州湾中西部(寿光至龙口)海域、长岛县海域、烟台四十里湾、青岛胶州湾及前海、日照东港近海为最为常发赤潮灾害的区域(表2)。青岛胶州湾及前海(28次)和烟台四十里湾(20次)为暴发次数最多的海域,其和占总数的43.2%,但两个区域所暴发的事件多以中小型赤潮(面积<100 km²)为主。莱州湾中部海域最容易暴发大规模赤潮,13次赤潮灾害的累计面积达到了6616 km²,仅单次成灾面积≥1000 km²的赤潮就多达5次,典型事件如1990年6月的夜光藻赤潮1000 km²、1998年9月的

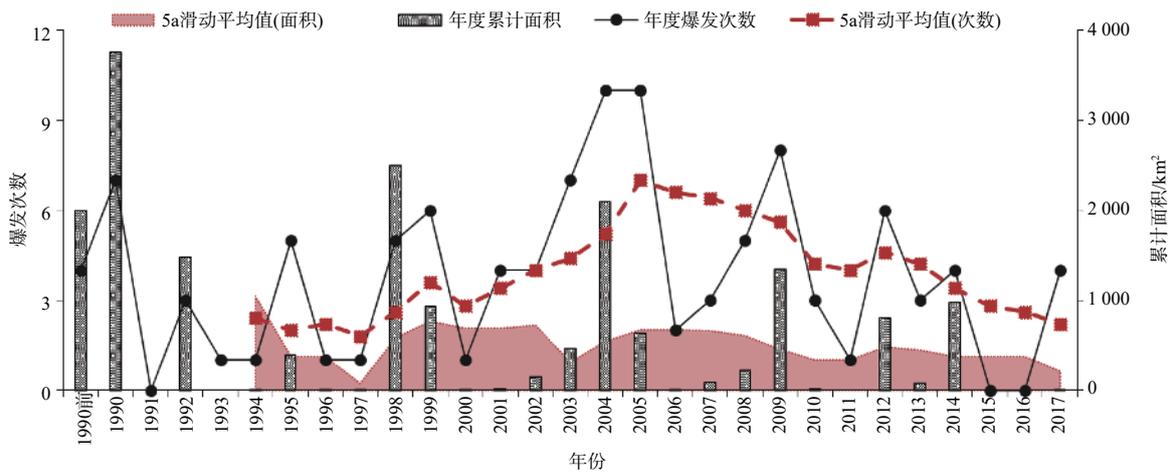


图1 山东沿海赤潮灾害年际变化情况(面积不详事件暂忽略)

Fig. 1 Annual variation of of red tides in Shandong coast waters (Area record fuzzy events are temporarily ignored)

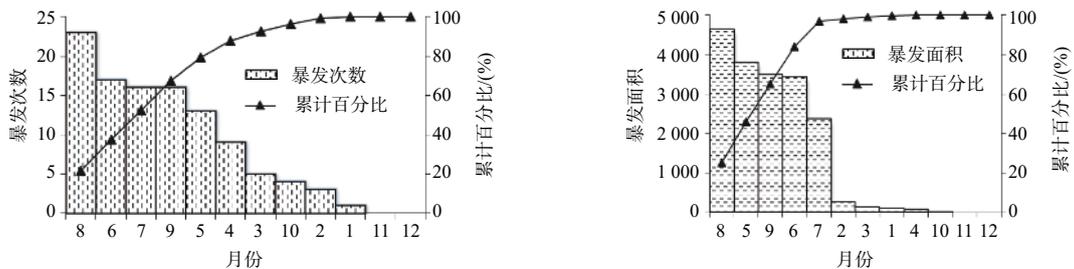


图2 山东沿海各赤潮灾害月度变化情况

Fig. 2 Monthly variation of of red tides in Shandong coast waters

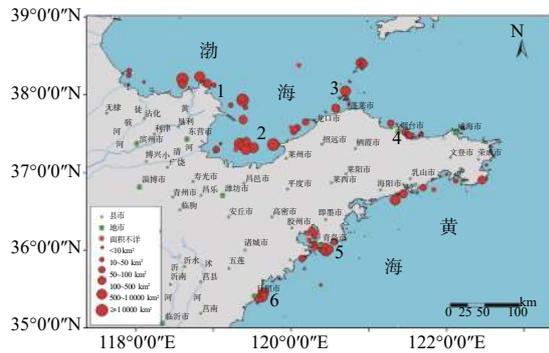


图 3 山东沿海赤潮灾害暴发位置

Fig. 3 Spatial distribution of red tides in Shandong coast waters

叉角藻(*Ceratium furca*)赤潮 1200 km²。东营黄河口邻近海域也是较常发大面积赤潮的区域,记录赤潮灾害事件的次数为 11 次、累计面积为 4626.6 km²。长岛县海域和日照东港近海均记录赤潮灾害事件 6 次,累计面积分别为 1577 km²和 1784 km²。

表 2 山东沿海赤潮灾害主要暴发区域情况

Tab.2 Major outbreak area of red tides in Shandong coast waters

编号	区域	累计次数/次	累计面积/km ²
1	东营黄河口邻近海域	11	4626.6
2	莱州湾中西部海域	13	6616
3	长岛县海域	6	1577
4	烟台四十里湾	20	415.2
5	青岛胶州湾及前海	28	2106.4
6	日照东港近海	6	1784
-	其他	27	1211.2

2.4 原因种特征

2.4.1 单相型赤潮类型

除藻种记录不详事件外,山东沿海共发生单相型赤潮 81 次,原因种共涉及 5 门 20 种。其中,甲藻门暴发次数为 48 次,累计面积高达 8131.99 km²;其次为黄藻门、硅藻门、原生动物和金藻门(表 3)。夜光藻是山东沿海最为常发的赤潮生物,也是记录暴发面积最大的赤潮灾害,共发生 31 次,累计面积达到 6559.25 km²。夜光藻赤潮在山东省 7 个沿海地市辖区均有暴发记录,灾情较严重区域则为东营老黄河口、莱州湾中西部等多处海域。其中,2012 年 5 月,在日照东部近海暴发了持续近 40 d 的夜光藻赤

潮,面积为 780 km²,藻体平均密度达到了 2.46×10^5 cells/L。

山东沿海共记录单相型有毒赤潮 25 次,累计面积为 3678.59 km²,分别约占总数的 22.5% 和 20.1%(表 3)。红色赤潮藻(*Akashiwo sanguinea*)共暴发 7 次,是最为常发的有毒藻种;而球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa* Scherffel)则是累计暴发面积(1900 km²)最大的有毒藻种。烟台四十里湾为暴发有毒赤潮最为集中的海域,红色赤潮藻、裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)均有在此处有过暴发的记录。

2.4.2 双相型赤潮类型

山东沿海共记录 13 次双相型赤潮,中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、红色赤潮藻和海洋卡盾藻是最易与其他生物同发的赤潮藻种(表 4)。在所有双相型赤潮事件中,有 9 次发现有有毒藻种,其占比高达 69.2%。2005 年 6 月,在黄河口附近海域暴发的红色赤潮藻/中肋骨条藻赤潮(137 km²)是暴发面积最大的双相型赤潮事件。青岛胶州湾和烟台四十里湾是最常发生双相型赤潮的海域。

21 世纪以前,山东沿海共记录赤潮灾害 36 次,但仅发生过一次有毒赤潮(1998 年,烟台四十里湾红色赤潮藻赤潮)和一次双相型赤潮(1998 年,青岛胶州湾中肋骨条藻/高贵盒形藻赤潮),原因种基本以本区常见且无毒的夜光藻和叉角藻为主。2000 年以后,有毒赤潮(33 次)和双相型赤潮(12 次)均呈现明显增加的趋势,生物种类也明显增多,之前在本区域罕见的种类(如海洋卡盾藻、球形棕囊藻等)都引发了赤潮。

3 讨论

国内自上世纪 90 年代后才逐步建立系统的海洋环境监测体系,之前某些海域屡有出现的“臭水”,往往因监测不及时难以确认为“赤潮事件”^[14]。因此推测,1990 年之前山东沿海实际发生的赤潮事件的数量应不仅仅是文献资料中记录的 4 起。赤潮的发生、发展和消亡是生物、化学、水文和气象等多因素综合作用的结果,包含

表3 山东沿海赤潮灾害原因种(单相型赤潮)

Tab.3 List of the red tide species in Shandong coast waters (single type)

原因种	拉丁名	次数	累计面积/km ²	主要暴发海域
甲藻门	Pyrrophyta	48	8131.99	
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	31	6559.25	东营老黄河口、莱州湾中西部等多处海域
红色赤潮藻* (血红哈卡藻、红色裸甲藻)	<i>Akashiwo sanguinea</i> = <i>Hakashiwo sanguinea</i> = <i>Gymnodinium sanguineum</i>	7	210.09	烟台四十里湾
叉角藻	<i>Ceratium furca</i>	3	1300	莱州湾中部
裸甲藻*	<i>Gymnodinium</i> sp.	2	48.88	烟台四十里湾、威海近海
具刺膝沟藻	<i>Gonyaulax spinifera</i>	2	9	青岛前海(一浴、沙子口)
塔玛亚历山大藻*	<i>Alexandrium tamarense</i>	1	2.37	长岛县南隍城岛海域
角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	1	2	烟台四十里湾
旋沟藻	<i>Cochlodinium</i> sp.	1	0.4	青岛前海(浮山湾)
黄藻门	Xanthophyceae	10	1307.25	
海洋卡盾藻*	<i>Chattonella marina</i>	5	1065.45	长岛县海域、威海辖区沿海
赤潮异弯藻*	<i>Heterosigma akashiwo</i>	4	155.8	烟台四十里湾、青日近海
卡盾藻*	<i>Chattonella</i> sp.	1	86	青岛附近海域
硅藻门	Bacillariophyta	9	76	
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	4	65	青岛胶州湾、滨州近海
大洋角管藻	<i>Cerataulina pelagica</i>	1	10	寿光小清河口海域
尖刺伪菱形藻	<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	1	1	烟台四十里湾海域
短角弯角藻	<i>Eucampia zoodiacus</i>	1	不详	青岛胶州湾东北海域
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i> Ehrenberg	1	不详	青岛胶州湾北部海域
柔弱几内亚藻	<i>Guinardia delicatula</i>	1	不详	青岛胶州湾东北海域
金藻门	Chrysophyta	6	2113	
棕囊藻*	<i>Phaeocystis</i> sp.	4	213	东营黄河口附近海域
球型棕囊藻*	<i>Phaeocystis globosa</i> Scherffel	2	1900	黄河口以北、套儿河外海
原生动物	Protozou	8	671	
红色中缢虫	<i>Mesodinium rubrum</i>	8	671	青岛胶州湾及前海海域

注: *有毒藻种

了一系列复杂的海洋学和生态学过程,但海水富营养化和适宜温度是公认的重要环境驱动因素。最为典型的案例是日本濑户内海赤潮事件,上世纪70年代由于工业化的高速发展,大量陆源污染物排入浅水海湾,致使海水中的氮、磷含量急剧增加,濑户内海富营养化程度严重,仅1976年就暴发赤潮达326次之多^[15]。王光升^[16]基于向量自回归(vector auto regression, VAR)模型,指出我国赤潮发生次数随海洋第二产业增长而增加,海洋环境污染累计污染指数对赤潮的影

响作用最大。另据《山东省海洋环境质量公报》等(2001年—2017年)资料显示:1)2004年度山东近岸未达清洁海域(约21423 km²)和严重污染海域(约1753 km²)均为记录中的历史最高值,而当年度记录的赤潮灾害次数(10次)和累计面积(2092 km²)亦为年际变动中的峰值;2)2004年之后,山东沿海近岸海水质量年趋转好,富营养化程度逐年降低,与赤潮灾害暴发次数和面积总体呈现缓慢下降趋势的相符。此外,山东沿海5月—9月的水温变化范围一般为12℃~29℃,8月份

表 4 山东沿海赤潮灾害原因种(双相型赤潮)

Tab.4 List of the red tide species in Shandong coast waters (double type)

时间	赤潮藻种	拉丁名	面积/km ²	暴发海域
1998-07	中肋骨条藻/高贵盒形藻	<i>Skeletonema costatum/Biddulphia regia</i>	2	青岛胶州湾东北部
2003-05	赤潮异弯藻*/海洋卡盾藻*	<i>Akashiwo sanguinea/Chattonella marina</i>	不详	蓬莱19-3油田海域
2003-08	夜光藻/海洋卡盾藻*	<i>Noctiluca scintillans/Chattonella marina</i>	3	滨州烟墩石湾
2004-03	中肋骨条藻/诺氏海链藻	<i>Skeletonema costatum/Thalassiosira excentric</i>	70	青岛胶州湾红岛海域
2004-05	夜光藻/棕囊藻*	<i>Noctiluca scintillans/Phaeocystis</i> sp.	不详	烟台四十里湾
2005-05	微小原甲藻*/哈曼褐多沟藻	<i>Prorocentrum minimum/Phaeopolykrikos hamannii</i>	4	滨州近岸海域
2005-06	红色赤潮藻*/棕囊藻*	<i>Akashiwo sanguinea/Phaeocystis</i> sp.	137	黄河口附近海域
2005-08	红色赤潮藻*/中肋骨条藻	<i>Akashiwo sanguinea/Skeletonema costatum</i>	50	烟台四十里湾
2005-09	红色赤潮藻*/原甲藻*	<i>Akashiwo sanguinea/Prorocentrum</i> sp.	60	烟台套子湾
2008-06	异甲藻*/红色中缢虫	<i>Heterocapsa circularisquama/Mesodinium rubrum</i>	20	青岛胶州湾
2008-08	海洋卡盾藻*/中肋骨条藻	<i>Chattonella marina/Skeletonema costatum</i>	100	乳山南黄岛外海
2010-09	中肋骨条藻/尖刺伪菱形藻	<i>Skeletonema costatum/Pseudo-nitzschia pungens</i>	6.02	烟台四十里湾
2013-02	中肋骨条藻/朱吉直链藻	<i>Skeletonema costatum/Melosira juergensi</i>	70	寿光小清河口

注: *有毒藻种

水温约为 23.2 °C ~ 28.7 °C^[17], 而此恰是多数赤潮生物最适宜生长发育/孢囊萌发的温度环境^[18-19], 进而出现了赤潮在该时段内高/频发的现象。

根据赤潮灾害发生的空间位置、水动力、营养物质来源等因素, 可将赤潮灾害类型划分为河口型、海湾型、养殖型、沿岸流型、上升流型和外海型等六类^[20]。黄河(年均径流量为 3.22×10¹⁰ m³)每年携带大量的淡水和营养物质入海, 并且沿岸石化工厂遍布、海水养殖活动众多, 加之黄河口海域水少沙多、海水水动力较弱, 其邻近海域多年呈现富营养化状态, 形成了典型的河口型赤潮灾害区。莱州湾和胶州湾均属于受人类活动影响较大的半封闭型海湾, 临海城镇化程度较高, 水流相对平缓, 在反复的潮汐作用下促使 N、P 等营养元素在沿岸积聚, 为赤潮生物暴发性增殖提供了充足的营养物质。烟台四十里湾和长岛县海域都是我国北方典型的海水养殖区, 筏式养殖活动兴盛, 养殖对象包括贻贝(*Mytilus edulis*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)和海带(*Larinaria japonica*)等, 但同时由于残饵、排泄物和含氮化合物等养殖废物的排出造成该区海域富营养化^[21]。日照市浅海水域广阔, 岸线平直, 赤潮灾害集中发生在春夏之交(5月—6月), 表现出受

鲁南沿岸流(黄海西部沿岸流的分支)影响明显的特征。

与引发我国海域赤潮灾害的生物特征类似^[4, 22]: 山东沿海也以单相型赤潮为主, 间有双相型赤潮发生, 主要原因种为甲藻门, 夜光藻赤潮的发生次数与范围均远高于其他种类。而不同点则在于: 米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)为我国海域(尤其为南方海域)最频发的有毒赤潮藻, 对山东沿海威胁较大的有毒藻则是红色赤潮藻和球形棕囊藻。

4 防控对策建议

4.1 提高赤潮监控信息化水平

通过在常发赤潮海域(胶州湾、黄河口、莱州湾等)布放具有自动监测功能的生态环境浮标, 尤其是在易发时段(5月—9月)的加密布控, 提升赤潮监控的原位长期监测和实时动态监测能力。在常规人工监测的基础上, 综合应用在线监测、卫星遥感监测、无人机(船)监测等现代化监测手段和海洋信息可视化技术, 拓展监测数据的覆盖度和复杂度。基于大数据系统管理视角, 在体制机制方面推动各部门间监测数据的共享共用, 并进行数据质控标准化, 建设山东沿海赤潮动态监测信息平台。

4.2 开展赤潮灾害风险评估与区划

结合赤潮灾害系统中的致灾因子发生(暴发次数、面积和有无毒性等)、承灾体分布(脆弱性、敏感性等)与孕灾环境变化(水质监测信息等),构建赤潮灾害风险评估模型。借助 ArcGIS 空间分析软件,通过空间信息展布和矢量化叠加运算,对各海域不同风险等级进行识别,制作山东沿海赤潮风险区划专题图件,构筑赤潮灾害风险评估和防范决策支持系统。

4.3 推动海洋生态环境综合治理

科学评价莱州湾、胶州湾、烟台四十里湾等近岸海域环境承载力,调整优化海洋产业布局,转变粗放开发方式,同时按照“以海定陆”原则,实施污染物排海总量控制和主要河流(黄河、小清河等)污染物监控,防治船舶与养殖等海上污染,构建区域海洋生态环境安全格局,进而改变孕灾环境和致灾条件,从根本上避免赤潮灾害的暴发。对已受损的海洋生态系统实施综合整治和生态修复恢复工程,因地制宜采取适当的人工措施(恢复海草床、建设海洋牧场等),实现生态系统服务功能的恢复,提升海洋生态服务功能与可持续发展保障能力,并使之成为海洋产业绿色发展新的增长点。

参考文献:

- [1] 苏纪兰. 中国的赤潮研究[J]. 中国科学院院刊, 2001, 16(5): 339-342.
- [2] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报(年报)[Z]. 北京: 国家海洋局, 1989-2017.
- [3] 周名江, 朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673-679.
- [4] 郭皓, 丁德文, 林凤翱, 等. 近20a我国近海赤潮特点与发生规律[J]. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 547-558.
- [5] 费鸿年. 发生赤潮的原因[J]. 学艺, 1952, 22(1): 1-3.
- [6] 杨华庭, 田素珍, 叶琳, 等. 中国海洋灾害四十年资料汇编(1949-1990)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 126.
- [7] 梁玉波. 中国赤潮灾害调查与评价(1933-2009)[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 666.
- [8] 赵冬至. 中国典型海域赤潮灾害发生规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 414.
- [9] 张绪良. 山东省海洋灾害及防治研究[J]. 海洋通报, 2004, 23(3): 66-72.
- [10] 吴玉霖, 孙松, 张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(6): 487-498.
- [11] 宋秀凯, 袁廷柱, 孙玉增, 等. 山东乳山近海海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)赤潮发展过程及其成因研究[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(3): 425-430.
- [12] 张继红, 王巍, 韩婷婷, 等. 桑沟湾春季营养盐分布特征及赤潮暴发诱因[J]. 水产学报, 2012, 36(1): 132-139.
- [13] 喻龙, 马兆虎, 郝彦菊, 等. 四十里湾2012年一次血红哈卡藻赤潮的调查分析[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 84-91.
- [14] 田家怡, 吕学军, 闫永利, 等. 黄河三角洲生态环境灾害与减灾对策[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 210.
- [15] 林琼芳. 国外赤潮调查研究概况[J]. 海洋环境科学, 1988, 7(1): 28-35.
- [16] 王光升. 中国沿海地区经济增长与海洋环境污染关系实证研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013: 190.
- [17] 侯英民. 山东海情[M]. 北京: 海洋出版社, 2010: 395.
- [18] EPPLEY R W. Temperature and phytoplankton growth in the sea[J]. Fishery Bulletin, 1972, 70: 1063-1085.
- [19] 丁德文, 刘胜浩, 刘晨临, 等. 孢囊及其与赤潮爆发关系的研究进展[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(1): 1-10.
- [20] 赵冬至, 赵玲, 张丰收. 我国海域赤潮灾害的类型、分布与变化趋势[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(3): 7-11.
- [21] 于宁, 于建生, 吕振波, 等. 山东海域赤潮灾害特征及预警管理[J]. 生态学杂志, 2012, 31(5): 1272-1281.
- [22] 张芳. 基于小波分析的东海浮游植物种类荧光光谱识别技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 282.