

渤海湾赤潮特征研究

王彬¹, 崔健¹, 李玲¹, 石海明¹,
王嘉琦¹, 刘春琳²

(1.国家海洋局天津海洋环境监测中心站,天津 300453; 2.天津市海洋咨询评估中心,天津 300450)

摘要:对 1977 年至 2018 年渤海湾发现的赤潮进行统计,分析研究了赤潮的规模变化、引发物种、空间分布以及时间规律特征。结果表明:渤海湾赤潮多为面积在 1000 km² 以下的小规模赤潮,引发物种主要是夜光藻 (*Noctiluca scintillans*)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、叉角藻 (*Ceratium furca*)、球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*)、米氏凯伦藻 (*Kareniamiki motoi*) 和红色中缢虫 (*Mesodinium rubrum*),主要暴发地点为渤海湾西北近岸海域,高发期为 8 月—9 月。

关键词:海洋生态; 赤潮; 渤海湾

中图分类号: X55

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)02-0200-07

Characteristics of red tide in the Bohai Bay

WANG Bin¹, CUI Jian¹, LI Ling¹, SHI Hai-ming¹, WANG Jia-qi¹, LIU Chun-lin²

(1.Tianjin Marine Environment Monitoring Central Station, State Oceanic Administration, Tianjin 300453, China; 2.Tianjin Marine Research and Consulting Center, Tianjin 300450, China)

Abstract: Analysis of the scale of change, the causative species, spatial distribution, and temporal characteristics of the Bohai Bay red tides during the period of 42 a from 1977 to 2018 showed that most of the red tides in the Bohai Bay were small-scale with area of less than 1000 km². The main species that caused the red tides were *Noctiluca scintillans*, *Skeletonema costatum*, *Ceratium furca*, *Phaeocystis globosa*, *kareniamiki motoi* and *Mesosinolum rubrum*. The red tides primarily happened between August and September in the northwest coastal area of the Bohai Bay.

Key words: marine ecology; red tide; Bohai Bay

《赤潮监测规程 HY/T 069—2005》将赤潮 (red tide) 定义为“海洋中的一些微藻、原生动物或细菌在一定环境条件下爆发性增殖或聚集达到某一水平,引起水体变色或对海洋中其他生物产生危害的一种生态异常现象”^[1],这一定义对赤潮的成因和特征进行了较为全面和准确的描述。自 1933 年费鸿年第一次记录发生在浙江沿海的赤潮事件以来^[2],我国沿海地区多次发现赤潮的踪迹。渤海作为我国唯一的半封闭内海,

在 1952 年至 2016 年共发现 189 次赤潮,而位于渤海西部的渤海湾又是渤海之中赤潮暴发最为频繁的海域之一^[3]。

在对渤海湾历年赤潮监测调查数据进行整理的基础上,分析赤潮生物、空间、时间及规模等特征,以期了解渤海湾赤潮发生、发展的历史和现状,为针对赤潮灾害进行防灾减灾工作提供科学技术支持。

收稿日期: 2019-10-21, 修订日期: 2020-02-04

基金项目: 天津市海洋环境风险排查及评估区划

作者简介: 王彬 (1981—), 男, 山东临清人, 高级工程师, 主要研究方向为海洋生态, E-mail: wangbinone@hotmail.com

1 材料与方法

1.1 研究区域

渤海湾位于渤海西部,北起河北省乐亭县大清河口,南至山东省老黄河入海口,地理坐标为 $38^{\circ}00'N-39^{\circ}04'N$ 、 $117^{\circ}25'E-118^{\circ}50'E$,海域面积约 10000 km^2 ,平均水深 18 m ,是典型的半封闭缓坡淤泥质海湾。渤海湾三面被陆地包围,北面是河北省唐山市,南面是河北省沧州市以及山东省滨州市和东营市,西面是天津市。渤海湾是海河水系、黄河水系多条河流的入海处(图1)。

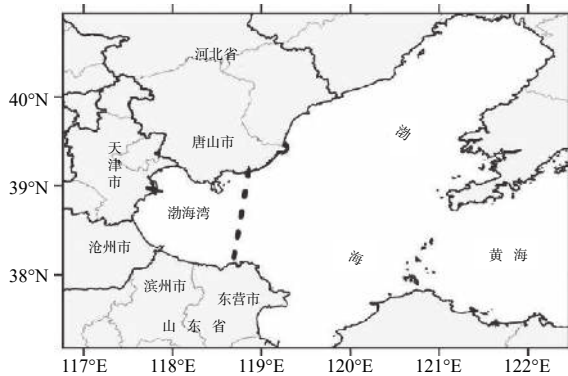


图1 渤海湾位置

Fig. 1 The location of the Bohai Bay

1.2 数据来源和处理

搜集了1977年至2018年发现的渤海湾赤潮情况历史记录,数据来源于赤潮研究的相关著作^[3-7]、1997—2018年中国海洋环境质量公报、2001—2018年中国海洋灾害公报、2012—2017年北海区海洋灾害公报、1999—2018年天津市海洋环境质量公报、2003—2018年河北省海洋环境质量公报和2001—2018年山东省海洋环境质量公报。

对搜集到的数据进行规范整理,对同一赤潮事件的不同记录口径进行梳理,对同种赤潮生物的异名进行合并,对一些仅有地理名称的赤潮位置进行追溯补充,建立渤海湾赤潮信息数据库。

本文使用 Access 和 Excel 软件进行数据库建设和统计、处理,使用 OriginPro 软件进行统计图片的绘制,使用自由、开源、跨操作系统的地理信息系统软件 QGIS 进行地理信息数据处理、分析以及地理信息图片的制作,地理坐标系采用 WGS-84 坐标系。

1.3 核密度估计

虽然赤潮影响的海域具有一定面积,且形状多呈条带状、片状甚至不规则。但为了利用 GIS 技术强大的空间分析能力以及核密度估计(kernel density estimation, KDE)展现点群数据的聚集特点功能,实现赤潮分布密度的区域差异,进而找出渤海湾赤潮高发区域。本文将赤潮形状假定为圆形,并以赤潮的“中心点”来代表赤潮的位置。

核密度估计是在概率论中用来估计未知的密度函数,它认为在一定的区域范围内,任意位置的可测度事件密度可以通过其周围单位面积区域内已经发生的事件点数量估计^[8-10],因此可以应用在 GIS 软件中来区分某事件在空间上的分布模式^[11-14]。

核密度估计方法的原理简单,给出 n 个点 X_1, X_2, \dots, X_n ,对于某个位置 s 个的核密度估计值为:

$$\lambda(s) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{nr^2} K\left(\frac{d_{is}}{r}\right) \quad (1)$$

式中: d_{is} 为 X_i 到 s 的距离; r 为搜索带宽; K 为核函数。

在应用核密度估计方法时,搜索带宽会在很大程度上影响分析结果。根据实际操作的相关结果,当 r 值较大时,会得到平滑的密度表面,但有可能掩盖想要研究的热点区域;当 r 值较小时,密度表面会凹凸不平,有可能会忽视大尺度上事件的整体关联性^[15-17]。在研究中,获取一个适当的 r 值,对于核密度估计结论的合理性非常关键。

赤潮具有一定的面积,通过计算已发现的赤潮平均面积和中位数面积半径的平均值确定 r 值,即:

$$r = \frac{\sqrt[2]{\bar{S}} + \sqrt[2]{\bar{S}_m}}{2} \quad (2)$$

式中: \bar{S} 为渤海湾赤潮的平均面积; \bar{S}_m 为渤海湾赤潮的中位数面积; π 为圆周率。

2 结果与讨论

2.1 赤潮的规模特征

将赤潮规模按照《赤潮监测规程 HY/T 069—

2005》^[1]中赤潮分级响应系统的面积标准划分为4个等级(表1)。

渤海湾的赤潮记录始见于1977年^[7],截至2018年,共发现大小赤潮88次。从1998年9—10月横跨辽东湾、渤海湾、莱州湾的5000 km²叉角藻(*Ceratium furca*)赤潮到2016年8月天津海域发现的0.6 km²太平洋海链藻(*Thalassiosira*

pacifica)赤潮,渤海湾暴发的赤潮规模大小不一。其中,赤潮面积在1000 km²以下的小规模赤潮为69次,占78.4%;面积在1000~2000 km²的中规模赤潮为4次,占4.6%;面积在2000~3000 km²的大规模赤潮为0次,占0%;面积在3000 km²以上的特大规模赤潮为6次,占6.8%;面积不详的赤潮次数为9次,占10.2%(图2)。

表1 赤潮规模等级

Tab.1 The grade of red tide

项目	小规模	中规模	大规模	特大规模
赤潮面积	1000 km ² 以下	1000~2000 km ²	2000~3000 km ²	3000 km ² 以上

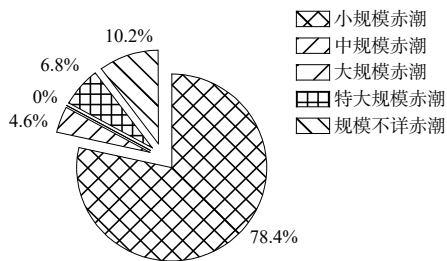


图2 渤海湾不同规模赤潮比例(1977—2018年)

Fig.2 The variation of different red tide scales in the Bohai Bay during 1977—2018

中小规模赤潮多发于渤海湾距离海岸线25 km以内的海域。特大规模赤潮的中心点多位于渤海湾中心或湾口区域,影响整个海湾,甚至渤海西部(图3)。

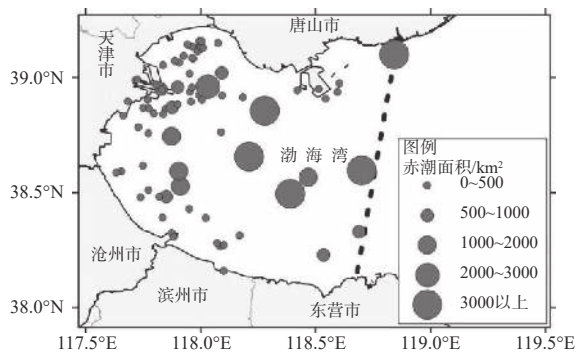


图3 渤海湾赤潮分布(1977—2018年)

Fig.3 Map showing the spatial distribution of red tide in the Bohai Bay during 1977 to 2018

渤海湾的年度赤潮累积规模同样差别巨大:累积面积小于1000 km²的有14年,累积面积在1000~2000 km²的有3年,累积面积在2000~3000 km²的有1年,累积面积超过3000 km²的有6年,累积面积不详的有3年,未见赤潮报道

的有15年。1996年至2012年的17年间,渤海湾的年度赤潮累积规模较大,年均赤潮累积面积为1905 km²,1998年和2009年,渤海湾年度赤潮累积面积均超过5000 km²。2013年—2018年,渤海湾年度赤潮累积规模迅速降低,年均赤潮累积面积为301 km²,再未超过1000 km²(图4)。

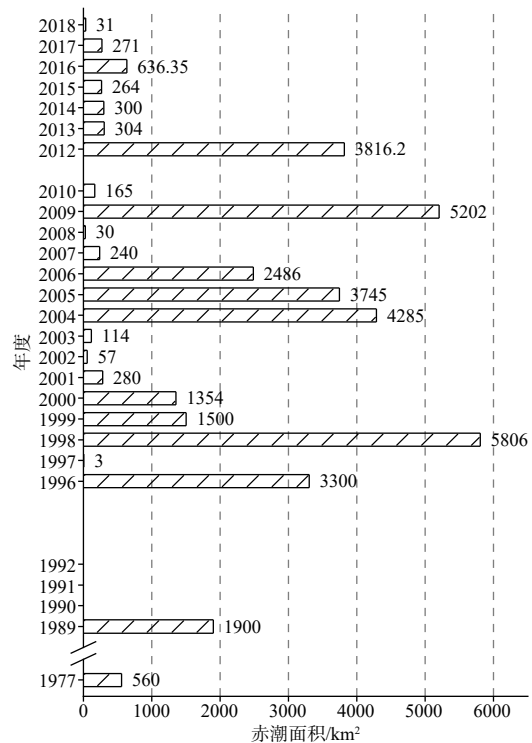


图4 渤海湾年度赤潮累积面积(1977—2018年)

Fig.4 Interannual occurrence area of red tide in the Bohai Bay during 1977 to 2018

2.2 赤潮的引发物种特征

渤海湾发现的88次赤潮中有10次缺少赤潮生物物种记录,其余78次均有较为详细的赤

潮生物信息记录。根据统计,渤海湾赤潮的引发生物分属5个门,共48种(含未定名种);按生物门类划分,硅藻门22种(含未定名种),甲藻门19种(含未定名种),着色鞭毛藻门4种(含未定名种),蓝藻门2种(含未定名种),原生动物门1种;按毒性划分,有毒赤潮生物11种,疑似有毒赤潮生物2种,无毒赤潮生物35种。

按照生物门类划分,甲藻门生物引发的赤潮次数最多,达到54次(含跨门类的混合型赤潮,下同);硅藻门生物次之,为50次;着色鞭毛藻门

生物17次;原生动物6次;蓝藻门生物2次。按照物种划分,以夜光藻(*Noctiluca scintillans*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)赤潮最为常见,分别出现了16次和11次;叉角藻(*Ceratium furca*)、球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)和红色中缢虫(*Mesodinium rubrum*)次之,分别出现了9次、7次、6次和6次。引发渤海湾赤潮频率较高的生物多数为无毒种,仅米氏凯伦藻含有某种毒素(表2)。

表2 渤海湾赤潮引发种

Tab.2 The causative red tide organisms in the Bohai Bay

序号	赤潮生物名称	毒性	引发赤潮次数	引发赤潮年份
硅藻门				
1	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>		1	2012
2	窄面角毛藻(奇异角毛藻) <i>Chaetoceros paradoxus</i>		1	2013
3	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.		3	1991、2001
4	威氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus wailesii</i>		1	2010
5	长角弯角藻 <i>Eucampia cornuta</i>		2	2017
6	短角弯角藻(浮动弯角藻) <i>Eucampia zodiacus</i>		3	2007、2016、2018
7	环纹娄氏藻(环纹劳德藻) <i>Lauderia annulata</i>		2	2001、2017
8	丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>		3	1992、2012、2017
9	菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.		1	1992
10	长菱形藻原变种 <i>Nitzschia longissimi</i> var. <i>longissima</i>		1	1992
11	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>		1	2008
12	柔弱拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	ASP	2	2012、2013
13	尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	ASP	4	2005、2010、2013、2017
14	根管藻 <i>Rhizosolenia</i> sp.		1	1992
15	刚毛根管藻 <i>Rhizosolenia setigera</i>		2	2017、2018
16	柔弱几内亚藻(柔弱根管藻) <i>Guinardia delicatula</i>		1	2017
17	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>		11	2001、2002、2004、2005、2007、2009、2013、2012、2017
18	诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskioldii</i>		1	2013
19	太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>		4	2016、2017
20	圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>		3	2001、2016、2017
21	离心列海链藻 <i>Thalassiosira excentrica</i>		1	2014
22	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.		1	2001
甲藻门				
23	甲藻类 <i>Dinophyceae</i>		1	1989
24	链状亚历山大藻 <i>Alexandrium catenella</i>	PSP	2	2016
25	叉角藻(叉状角藻) <i>Ceratium furca</i>		9	1998、1999、2008、2014、2016、2017

续表 2

序号	赤潮生物名称	毒性	引发赤潮次数	引发赤潮年份
26	多环旋沟藻 <i>Cochlodinium polykrikoides</i>	*	2	2014、2015、2016
27	倒卵形鳍藻(倒椭圆形鳍藻、佛氏翅甲藻) <i>Dinophysis fortii</i>	DSP	1	1999
28	裸甲藻 <i>Gymnodinium</i> sp.	*?	1	2005
29	血红哈卡藻(红色裸甲藻、红色赤潮藻) <i>Akashiwo sanguinea</i>	*?	1	2016
30	链状裸甲藻 <i>Gymnodinium catenatum</i>	PSP	1	2016
31	伊姆裸甲藻 <i>Gymnodinium impudicum</i>	*?	2	2016、2017
32	米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>	*	6	2004、2005、2014、2018
33	灰白下沟藻 <i>Katodinium glaucum</i>		1	2004
34	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>		16	1989、1999、2001、2002、2003、2006、 2009、2010、2013
35	哈曼褐多沟藻 <i>Pheopolykrikos hartmannii</i>		1	2005
36	利玛原甲藻 <i>Prorocentrum lima</i>	DSP	1	2004
37	海洋原甲藻(闪光原甲藻) <i>Prorocentrummicans</i>		2	1999、2014
38	微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>	*	3	1977、2002、2005
39	锥状斯克里普藻(锥状斯氏藻) <i>Scripsiellatrochoidea</i>		2	2016、2018
40	膝沟藻 <i>Gonyaulacales</i> sp.		1	1998
41	多甲藻 <i>Peridiniaceae</i> sp.		1	2001
着色鞭毛藻门				
42	海洋卡盾藻 <i>Chattonella marina</i>	*	5	2003、2004、2006
43	赤潮异弯藻 <i>Heterosigmaakashiwo</i>	*	4	2004、2006、2009
44	球形棕囊藻 <i>Phaeocystisglobosa</i>		7	2004、2005、2006、2007
45	金藻 <i>Prymnesiophyceae</i> sp.		1	1990
蓝藻门				
46	抑食金球藻 <i>Aureococcusanophagefferens</i>		1	2012
47	束毛藻 <i>Trichodesmium</i> sp.		1	1992
原生动物门				
48	红色中缢虫 <i>Mesodinium rubrum</i>		6	2004、2009、2013、2017

注: 1.混合型赤潮重复算入引发赤潮次数; 2. “*” 为含有某种毒素的赤潮生物种; 3. “?” 为怀疑含有毒素的赤潮生物种; 4.ASP为含有失忆性贝毒的赤潮生物种; 5.DSP为含有腹泻性贝毒的赤潮生物种; 6.PSP为含有麻痹性贝毒素的赤潮生物种; 7.毒性资料来自《赤潮监测规程 HY/T 069—2005》

不同种类生物引发的赤潮在渤海湾的分布有明显差别。甲藻门赤潮较为均匀地出现在渤海湾各处; 硅藻门和着色鞭毛藻门赤潮主要出现在渤海湾西部, 即天津市和沧州市近岸海域; 原生动物门赤潮主要出现在渤海湾的西部和南部; 蓝藻门的抑食金球藻赤潮则集中在渤海湾北部的分界线——大清河口附近海域。抑食金球藻赤潮自 2009 年起连续 4 年在秦皇岛近岸海域暴发; 其暴发条件较为苛刻——适宜水温为 20 °C ~ 27.5 °C, 且盐度要大于 28, 有机氮浓度较高^[18],

对于渤海湾来说, 属于外源性赤潮(图 5)。

2.3 赤潮的空间分布特征

将 1977—2018 年渤海湾赤潮信息表, 搜索带宽参数导入 QGIS 软件热图(核密度估计)计算模块中, Kernel 函数选择常用的四次多项式核函数, 计算出渤海湾赤潮密度(图 6)。

在渤海湾中, 以天津市北部的汉沽大神堂近岸海域赤潮出现最为频繁, 其次为天津市与河北省南部交界的大港—黄骅近岸海域和天津市天津港近岸海域。

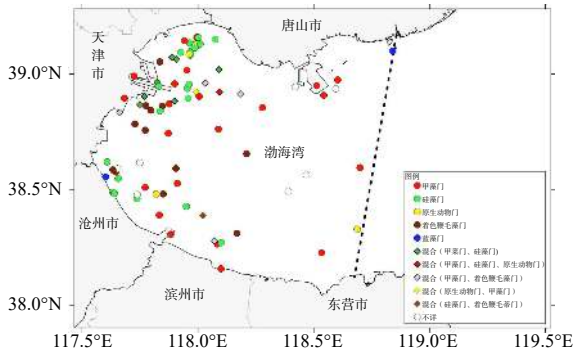


图 5 渤海湾赤潮生物分布

Fig. 5 Distribution of red tide organisms in the Bohai Bay

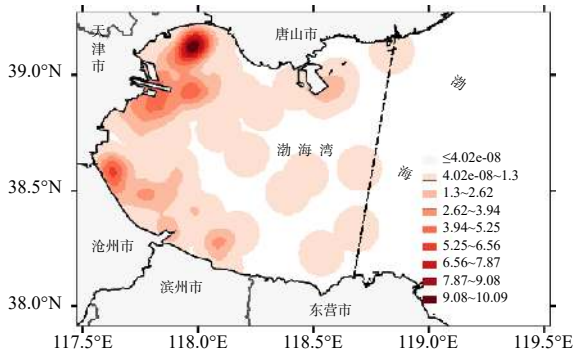


图 6 渤海湾赤潮热图

Fig. 6 Heat map of red tide in the Bohai Bay

2.4 赤潮的时间特征

渤海湾第一次有记录的赤潮是 1977 年 8 月在天津大沽口近岸海域暴发的微小原甲藻 (*Prorocentrum minimum*) 赤潮。此后的 11 年未有赤潮报道, 至 1989 年 8 月渤海湾内又暴发了大规模的甲藻类赤潮, 之后几乎年年有赤潮暴发。2004 年, 渤海湾内暴发的赤潮最多, 为 8 次。1990—1999 年, 年均均为 1.6 次; 2000—2009 年, 年均均为 4.5 次; 2010—2018 年, 年均均为 2.7 次(图 7)。21 世纪的前 10 年中, 渤海湾赤潮出现最为频繁, 之后赤潮发生频率明显下降, 与中国沿海赤潮数量在 21 世纪初期显著减少的趋势^[19] 基本一致。

1977—2018 年渤海湾赤潮累积持续总天数约为 1029 d。将赤潮累积天数按照月份进行统计, 可以看出渤海湾赤潮主要的暴发月份为 8 月、9 月以及 6 月、7 月和 10 月, 在 3 月、4 月、5 月以及 11 月也偶有暴发, 而 12 月至来年 2 月尚无赤潮暴发报道。渤海湾赤潮高发于夏、秋两季之交, 多发于夏初和晚秋, 偶发于春季和秋末, 冬季未暴发赤潮(图 8)。

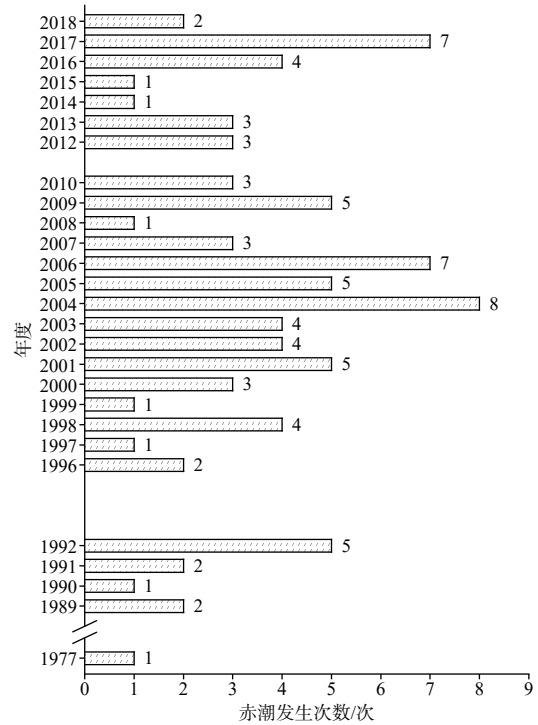


图 7 渤海湾年度赤潮次数(1977—2018 年)

Fig. 7 Interannual variations of red tide in the Bohai Bay during 1977 to 2018

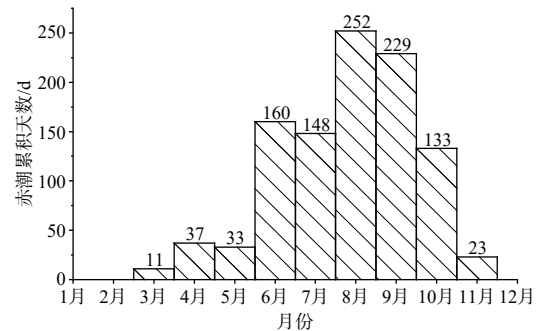


图 8 渤海湾不同月份赤潮累积持续天数统计(1977—2018 年)

Fig. 8 Statistics of accumulated days of red tide in different months in the Bohai Bay during 1977 to 2018

赤潮发生、发展、消亡的持续时间短则 1~2 d, 长则数月。将渤海湾赤潮暴发次数按照持续时间进行统计, 渤海湾中赤潮持续时间一般较短。5 d 以下的赤潮次数占 47.7%, 5 d(含)至 10 d 的占 17.0%, 10 d(含)至 30 d 的占 25.0%, 30 d(含)以上的占 8.0%, 持续时间不详的占 2.3%(图 9)。渤海湾内发现持续时间最长的赤潮为 2012 年 6—8 月在渤海湾北部(河北唐山至辽宁绥中)暴发的抑食金球藻赤潮, 持续时间约 74 d; 其次为

1989年8—10月在渤海西部和南部沿海(河北省、天津市、山东省近岸海域)暴发的甲藻类赤潮,持续时间为71 d。

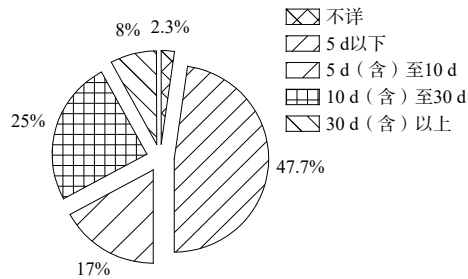


图9 渤海湾不同持续时间赤潮比例(1977—2018年)

Fig. 9 The variation of different red tide duration in the Bohai Bay during 1977 to 2018

3 结论

(1)渤海湾赤潮规模一般较小,面积在 1000 km^2 以下的小规模赤潮占78.4%。2012年后赤潮年度累积规模迅速缩小。

(2)引发渤海湾赤潮的生物分属5个门,共48种(含未定名种),以甲藻门和硅藻门生物为主,主要是夜光藻、中肋骨条藻、叉角藻、球形棕囊藻、米氏凯伦藻和红色中缢虫,其中米氏凯伦藻为有毒种。不同物种引发的赤潮具有显著的海域分布特征:甲藻门赤潮在渤海湾各处均有暴发;硅藻门(含带有硅藻门的混合型赤潮)和着色鞭毛藻门赤潮主要暴发在渤海湾的西部,原生动物门赤潮主要暴发在渤海湾的西部和南部;蓝藻门的抑食金球藻赤潮暴发在渤海湾北部。

(3)赤潮高发区为渤海湾西北部近岸海域,其次为渤海湾的西南部和西部近岸海域。

(4)渤海湾赤潮暴发频率在2010年后显著降低。其季节特征非常明显,高发于8月至9月的夏、秋两季之交,多发于6月和7月夏初以及10月的晚秋,偶发于3月—5月的春季和11月的秋末,12月至来年2月的冬季未发现赤潮。赤潮发生发展消亡的持续时间一般较短,5 d以下的赤潮次数占47.7%。

参考文献:

- [1] HY/T 069—2005, 赤潮监测技术规程[S].
- [2] 张有份. 海洋赤潮知识100问[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [3] 安鑫龙, 么强, 潘娟. 河北省沿海赤潮[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [4] 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.
- [5] 徐家声. 近海与虾池赤潮[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [6] 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.
- [7] 华泽爱. 赤潮灾害[M]. 北京: 海洋出版社, 1994.
- [8] XIE Z X, YAN J. Kernel density estimation of traffic accidents in a network space[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2008, 32(5): 396-406.
- [9] XIE Z X, YAN J. Detecting traffic accident clusters with network kernel density estimation and local spatial statistics: an integrated approach[J]. *Journal of Transport Geography*, 2013, 31: 64-71.
- [10] HASHIMOTO S, YOSHIKI S, SAEKI R, et al. Development and application of traffic accident density estimation models using kernel density estimation[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2016, 3(3): 262-270.
- [11] SONG N Q, WANG N, LU Y, et al. Temporal and spatial characteristics of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952—2014[J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 122: 77-84.
- [12] 宋南奇, 王诺, 吴暖, 等. 基于GIS的我国渤海1952—2016年赤潮时空分布[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1142-1148.
- [13] 张桂铭, 朱阿兴, 杨胜天, 等. 基于核密度估计的动物生境适宜度制图方法[J]. *生态学报*, 2013, 33(23): 7590-7600.
- [14] 闫庆武, 卞正富, 赵华. 人口密度空间化的一种方法[J]. *地理与地理信息科学*, 2005, 21(5): 45-48.
- [15] 卢敏, 杨柳, 王金茵, 等. 基于核密度估计的点群密度制图应用研究[J]. *测绘工程*, 2017, 26(4): 70-74, 80.
- [16] MCCLOUD N, PARMETER C F. Determining the number of effective parameters in kernel density estimation[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2020, 143: 106843.
- [17] KUTER S, USUL N, KUTER N. Bandwidth determination for kernel density analysis of wildfire events at forest sub-district scale[J]. *Ecological Modelling*, 2011, 222(17): 3033-3040.
- [18] 宋广军, 宋伦, 王年斌, 等. 褐潮研究现状[J]. *河北渔业*, 2014, (9): 61-66.
- [19] ZENG J, YIN B L, WANG Y T, et al. Significantly decreasing harmful algal blooms in China seas in the early 21st century[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 139: 270-274.