

闽三角海域赤潮发生的时空特征

邹晓梅^{1,2}, 林广发^{1,3}, 陈志彪^{1,2}

(1. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 福建师范大学 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007; 3. 福建省陆地灾害监测评估过程技术研究中心, 福建 福州 350007)

摘要: 赤潮是海洋生态系统异常的重要指标。本文收集 1986~2017 年闽三角海域的赤潮事件, 基于 GIS 技术分析赤潮的时空分布特征。结果表明: 32 年来, 闽三角海域赤潮发生 98 次, 赤潮高发区在厦门西海域、同安湾和泉州湄洲湾海域; 闽三角海域赤潮年际发生次数呈波动变化, 一年中赤潮高发期集中在 5~8 月; 中肋骨条藻、角毛藻及旋链角毛藻是闽三角海域的赤潮优势种, 具有一定的区域分布特征; 有毒赤潮事件发生频率有增加趋势。本文系统性地总结了闽三角海域赤潮时空特征, 为该区域的赤潮风险分析和预防提供依据。

关键词: 赤潮; 时空分布; 地理信息系统; 闽三角海域

中图分类号: X55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)11-0110-08

DOI: 10.11759/hyxx20180920001

赤潮(Harmful Algal Blooms, HABs)是一些海洋微藻、原生动物或细菌在一定环境条件下在水体中爆发性增殖或聚集, 并使海水变色的一种生态异常现象^[1]。赤潮的发生会引起海洋生态过程的异常变化, 对海洋生态环境、渔业、水产养殖业, 甚至人体健康造成危害^[2-3]。因此, 赤潮成为世界沿海国家重视的海洋环境灾害之一, 国内外学者对其进行了大量研究^[4-7]。

我国赤潮研究相比国外较滞后, 近代的赤潮记录从 1933 年开始, 1970 年之前的赤潮记录不连续, 存在数据遗漏问题。随着赤潮事件的发生频率和影响面积增加, 以及国家对赤潮监测工作逐渐系统化, 赤潮记录明显增多, 赤潮发生特征和规律逐渐显现。与 20 世纪我国赤潮发生频次从北到南递增的趋势不同^[8], 进入 21 世纪后, 赤潮灾区中心有北移的趋势^[9]。许多学者虽已针对我国各海区和不同海域赤潮发生的时空分布特征做了研究^[10-13], 但缺少可视化效果。应用 GIS 技术分析可以更直观地了解赤潮发生特征和风险。Wu 等^[14]用核密度估计、最近邻距离分析揭示渤海湾北部近岸和黄河口是渤海湾赤潮频发区, 赤潮在空间分布上呈聚类分布格局; 宋南奇等^[15]分析渤海海域 65 年的赤潮事件, 结果表明赤潮分布范围有由近岸海域向渤海中部扩散的趋势; 刘录三等^[16]发现长江口及其邻近海域的赤潮发生频率有明显上升趋势, 赤潮发生集中在长江口外余山、花鸟山-嵎

山-枸杞、舟山等附近及朱家尖东部海域。

福建省是我国的海洋大省, 由于其特殊的海湾环境、气候条件及沿海海洋环境污染的加剧, 福建省已成为全国赤潮灾害多发省份之一^[17], 其中闽三角海域是福建省赤潮高发区。为减少赤潮对闽三角海域生态的损害, 加强对赤潮的监测与管理, 本文收集闽三角海域自 1986 年有赤潮发生记录以来的赤潮事件, 利用 GIS 技术对其进行时空分析, 以可视化的方法展现和认识闽三角海域赤潮发生的时空分布及其特征, 为该区域的赤潮风险分析和预防提供依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

闽三角城市群是福建乃至中国东部地区最具活力的经济区域之一。随着工农业的迅速发展和人口的城市化, 加之这个地区独特的自然地理环境条件, 尤其厦门是海湾型城市的典型代表, 导致城市近岸海域频繁发生赤潮, 严重危害了生态平衡、渔业生

收稿日期: 2018-09-20; 修回日期: 2018-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502905)

[Foundation: National Key Research and Development Program of China, No.2016YFC0502905]

作者简介: 邹晓梅(1994-), 女, 福建武平人, 硕士研究生, 主要从事自然资源与环境管理研究工作, E-mail: zouxiaomei1023@163.com; 林广发(1970-), 通信作者, 男, 福建上杭人, 副教授, 博士, 主要从事地理信息系统应用研究, GuangfaLin@qq.com

产、滨海旅游甚至人体健康。本研究选取闽三角近岸海域为研究区。其中, 厦门海域包括西海域、同安湾、九龙江口海域、东部海域等, 总面积约 1 288 km², 海岸线全长 234 km。漳州海域面积 1.86 万平方公里, 包括佛昙湾、浮头湾、东山湾、诏安湾、东碇海域, 海岸线蜿蜒曲折, 长达 715 km, 居全省第三位。泉州海域面积 1.136 万平方公里, 拥有海岸线 541 km, 有泉州湾、湄洲湾、深沪湾、围头湾四个港湾。

1.2 数据来源及研究方法

数据来源于两部分, 一是来源于福建省海洋与渔业厅每年发布的《海洋环境状况公报》^[18], 收集了 2000~2017 年闽三角海域发生的赤潮事件; 二是来源于有关闽三角海域赤潮研究的著作与论文^[19-20], 整理了 1986~1999 年的赤潮事件(表 1)。本研究通过对闽三角海域赤潮发生的时空分布进行总结分析, 并利用 ArcGIS10.2 及 Excel 软件对相关数据进行处理。

表 1 闽三角海域赤潮发生事件(1986~2017)

Tab. 1 HAB events in South Fujian Golden Delta waters (1986~2017)

编号	发生海域	发生时间	持续天数/d	赤潮优势种	最大影响面积/km ²	是否有毒
1	泉州东埔码头附近	2017.6.6-6.11	6	链状亚历山大藻	2	无毒
2	漳州港尾、佛昙湾	2017.6.8-6.15	8	链状裸甲藻	40	有毒
3	泉州崇武、西沙湾至高雷山附近海域	2017.6.9-6.14	6	链状裸甲藻	7	有毒
4	厦门同安湾、五缘湾	2017.6.11-6.14	4	旋链角毛藻	15	无毒
5	厦门西海域、同安湾	2017.6.29-7.8	10	中肋骨条藻、尖刺拟菱形藻	30	无毒
.....						
96	厦门西港	1986.5.17		地中海指管藻		无毒
97	厦门宝珠屿	1986.6.18-7.3	17	裸甲藻	80	有毒
98	漳州东山磁窑村	1986.11.25-11.27	3	裸甲藻	1	有毒

2 结果与分析

2.1 赤潮发生时间特征分析

2.1.1 赤潮发生年际特征

据统计, 1986~2017 年闽三角海域有记录赤潮共 98 次, 平均每年发生约 3 次, 累计影响面积约 3 125.5 km², 平均每年影响面积约 104 km²。从图 1 可以看出, 整体上赤潮规模呈现出缩小的趋势, 赤潮每年发生次

数处于波动中, 且在三市发生的次数不均匀。厦门市赤潮发生次数在 2003 年、2005 年、2006 年分别为 7 次、8 次、6 次, 而近几年来赤潮发生次数减少。泉州市自 2012 年连续 6 年共发生 13 次赤潮, 其中有有毒赤潮 4 起; 漳州市赤潮发生次数波动性相对平缓。

近年来赤潮发生次数增加的原因可能与闽三角近岸海域水质变差有关。闽三角地区主要港湾局部海域高密度的网箱养殖、海水养殖废弃物和生活污水

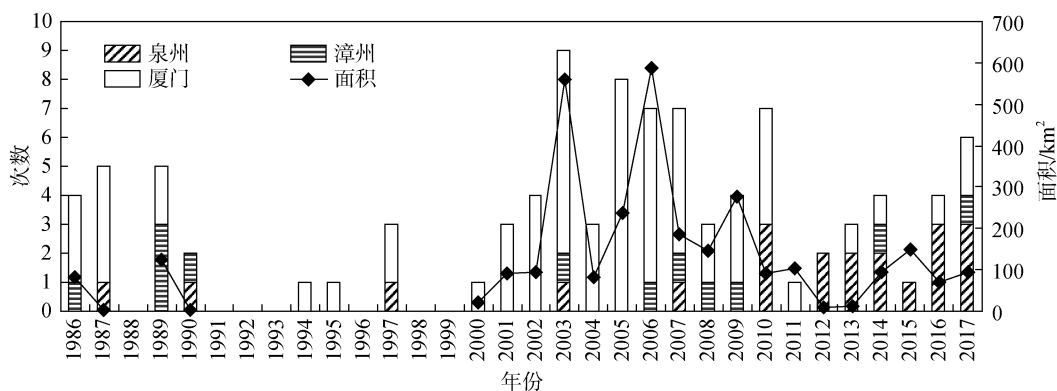


图 1 1986~2017 年闽三角海域赤潮发生次数和面积的年际变化

Fig. 1 The interannual variation of occurrence frequency and area of HABs in South Fujian Golden Delta waters

排放加重了港湾的污染, 水体富营养化程度越来越高, 如厦门港为严重富营养化, 同安湾为重营养, 无机氮、活性磷酸盐含量均超过《海水水质标准》(GB3097-1997)的第四类标准^[18]。而氮磷等营养物质的陆源输入是赤潮发生的基础^[21]。此外, 水文气象条件的变化是赤潮暴发的诱因, 年际气候的变化引起赤潮发生频率的变化, 尤其是暖冬和春季回暖的年份更可能发生较多的赤潮事件^[22]。还有研究认为, 太阳黑子活动和地震、火山活动所产生的电磁波刺激或促使赤潮生物迅速繁殖可能是引起赤潮多发的原因之一^[23]。2003年是太阳第23活动周的高峰年, 这年中国海域共发生119次赤潮^[24], 出现历史最高纪录。闽三角海域于同年发生9次赤潮, 也是该海域历史最高纪录。

2.1.2 赤潮发生月际特征

闽三角海域赤潮发生存在明显的季节规律(图2), 赤潮发生次数和面积的月度变化都呈现出一个从起始到高峰最后衰退的过程。闽三角海域的赤潮1、2月份就有可能发生, 从4月份开始逐渐增多, 其中5月到7月是赤潮的高发期, 之后逐渐回落。由于不同藻类具有不同的温度响应机制, 对温度变化的适应能

力有差异^[25], 例如血红哈卡藻(*Akashiwo sanguinea*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为广温广盐性藻种, 在温度较低的环境下也可生长, 从而形成各月几乎均有赤潮发生。但不同月份的水文气象要素特征不同, 各月赤潮发生频率又各自不同。闽三角海域是受季风控制的亚热带海区, 冬季盛行东北季风, 夏季盛行西南季风。闽三角海域赤潮高发期在5~6月, 占总数的52%, 而5~6月恰好是季风转换期, 说明赤潮发生的频率与季风转换存在一定关系。赤潮生物和营养物质在季风作用下聚集积累, 风力减弱水体稳定性变强, 同时光照变强, 为藻类生长提供充足的能量, 水温升高、生长加快, 降雨增多陆源营养输入增多等因素促进了赤潮暴发^[26-28]。从历年首次发生赤潮的时间来看, 赤潮的初发期以5、6月居多, 占总数的45.8%。但随着温度的升高和富营养化程度加深, 赤潮的初发期有所提前, 甚至在深冬季节1月和初春季节2月就有赤潮发生, 如2007年1月12日厦门同安湾海域发生中肋骨条藻赤潮, 持续时间为11d; 2009年2月5日厦门同安湾海域发生血红哈卡藻藻华, 持续时间长达22d。这可能与冬季暖冬, 海水水温异常增高有关。

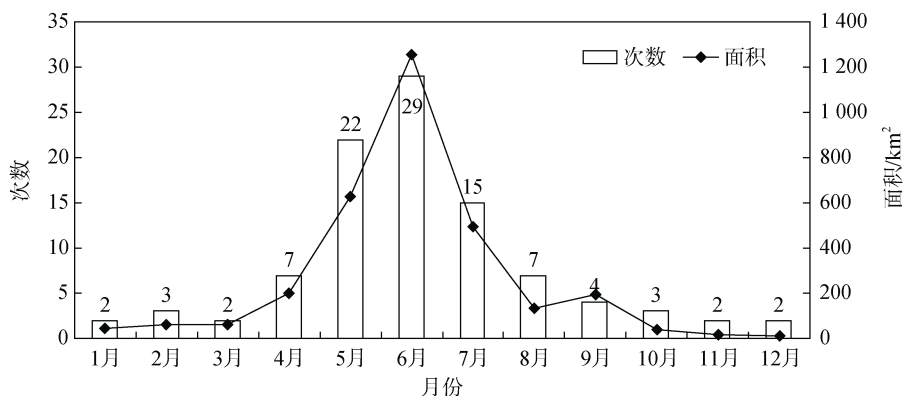


图2 1986~2017年闽三角海域赤潮发生次数和面积的月度变化

Fig. 2 The monthly variation of occurrence frequency and area of HABs in South Fujian Golden Delta waters from 1986 to 2017

2.2 赤潮发生空间分布特征

在空间分布上, 闽三角三个沿海地市发生的赤潮次数及影响的面积不均匀(图3), 赤潮多发生在湾内, 面积较小, 多不足100 km²。其中, 厦门市管辖海域发生赤潮灾害最多, 达65次, 占闽三角海域赤潮灾害总数的66.3%, 累计影响面积达2086.5 km², 约占闽三角海域赤潮灾害影响总面积的66.8%; 其

次是泉州市管辖海域, 共发生21次赤潮灾害, 占闽三角海域赤潮灾害总数的21.4%, 累计影响面积约466 km², 占闽三角海域累计面积的13.3%; 漳州市管辖海域发生赤潮灾害最少, 仅12次, 占闽三角海域赤潮灾害总数的12.3%, 影响面积约573 km², 占闽三角海域累计总面积的18.3%。厦门市西海域、同安湾和泉州市的惠安附近海域是赤潮灾害高发区域。

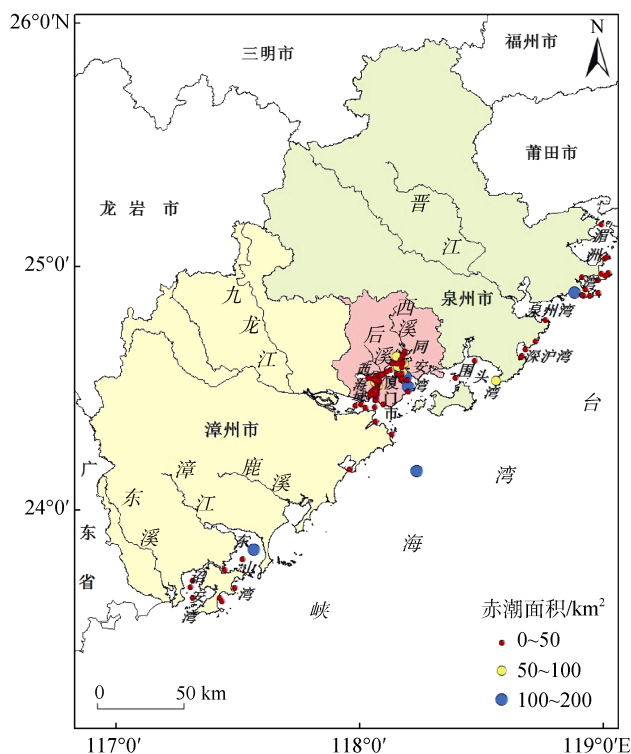


图3 闽三角海域赤潮发生事件分布

Fig.3 Distribution map of HABs in South Fujian Golden Delta waters

2.3 赤潮灾害类型分析

根据赤潮发生的海洋地理单元空间位置、营养物质来源以及水动力条件,将赤潮灾害划分为以下类型:河口型、海湾型、养殖型、上升流型、沿岸流型和外海型六类^[29-30]。闽三角海域海湾大多口小腹大,湾口或湾外有岛屿庇护,如厦门西海域、同安湾、泉州湾、深沪湾、东山湾等。半封闭性质的海湾水流和波浪动力弱,与外海的水体交换周期长,海水交换不畅,海水自净能力差^[31]。这类赤潮属于海湾型赤潮,赤潮发生海域多属于半封闭型海湾。除天然的自然地理环境因素外,海岸工程的建造也是赤潮频发的原因之一。近30年来,厦门西海域发生赤潮次数高达49次,占闽三角海域赤潮事件总次数的50%。厦门岛高崎至集美的高集海堤的建成使厦门西港成为半封闭性内湾,海堤两侧原有的生境和水交换能力改变,污染物不能充分扩散,两侧淤积加剧^[32]。

淡水径流在河口型赤潮的发生过程中起着重要的作用。九龙江是福建省第二大河流,受上游工农业和下游人类活动影响,河流中大量的营养盐和腐殖

质、微量元素注入海水中,氮磷营养盐的输入为赤潮暴发提供了物质基础^[21, 33]。且淡水径流导致河口区水体分层程度增加,使水体更具有潜在的稳定性,利于赤潮的持续发展^[34]。福建省是水产养殖大省,海水养殖业在带来巨大经济效益的同时,也给近岸海湾带来污染。泉州惠安、深沪湾是福建省最主要的牡蛎采苗和养殖区之一,东山湾、诏安湾以鲍鱼和南美白对虾等养殖为主。沿海养殖开发利用过度,造成大量生物性堆积^[35]。泉州湾和围头湾重点发展深水抗风浪网箱,大量的网箱养鱼阻碍了海水运动,使水流速度减弱,残饵和排泄物沉积于海底,造成底质恶化^[36]。养殖型赤潮发生的海域食物链趋向简单化,生态系统进行自我调节和抵御外界扰动的能力减弱,易暴发赤潮。

2.4 赤潮生物分布特征

从闽三角海域在1986~2017年期间的主要赤潮生物(表2)可以看出,在该海域引起赤潮暴发的原因种中,最具优势的是中肋骨条藻,共记录33次,已成为该区域最为显著的赤潮原因种,几乎每年该类赤潮均有发生;其次为角毛藻引发赤潮18次,链状角毛藻11次,裸甲藻7次,夜光藻6次,其他赤潮生物引发的赤潮灾害次数在5次及以下。闽三角海域赤潮优势种处于不断演变当中,且不断发现有新的生物种类引发赤潮。

从主要赤潮藻的发生区域分布图看(图4),中肋骨条藻和角毛藻分布于厦门西海域和同安湾,在其他海域则是零星分布;厦门海域2007年前没有记录到血红哈卡藻赤潮,自2008年第一次在同安湾海域发生血红哈卡藻赤潮以来,连续四年都有该种类赤潮的暴发。赤潮生物分布表现出的特征与其所处的海洋环境以及生物本身的生活习性密切相关。此外,有毒害作用、甚至可能会产生毒素的赤潮生物也纷纷出现,例如米氏凯伦藻产生溶血性毒素(hemolytic toxin);链状裸甲藻和链状亚历山大藻产生麻痹性贝毒(Paralytic Shellfish Poisoning, PSP);尖刺拟菱形藻能产生记忆缺失性贝毒(Amnestic Shellfish Poisoning, ASP),但闽三角海域发生的尖刺拟菱形藻赤潮中未检测到毒素。

3 结论

通过对闽三角海域1986~2017年赤潮事件的收集总结与处理分析,发现该海域发生的98次赤潮

表 2 闽三角海域赤潮生物优势种发生频率

Tab. 2 Frequency of dominant HAB species in South Fujian Golden Delta waters

赤潮生物	次数	赤潮生物	次数	赤潮生物	次数	赤潮生物	次数
中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	33	地中海指管藻 (<i>Dactyliosolen mediterraneus</i>)	4	丹麦细柱藻 (<i>Leptocylindrus danicus</i>)	1	诺氏海链藻 (<i>Thalassiosira nordenskioldi</i>)	1
角毛藻 (<i>Chaetoceros</i> sp.)	18	东海原甲藻 (<i>Prorocentrum donghaiense</i>)	3	细弱海链藻 (<i>Thalassiosira subtilis</i>)	1	具齿原甲藻 (<i>Prorocentrum dentatum</i>)	1
旋链角毛藻 (<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	11	短脚弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	3	海链藻 (<i>Thalassiosira</i> sp.)	1	威氏海链藻 (<i>Thalassiosira weissflogii</i>)	1
裸甲藻* (<i>Gymnodinium</i> sp.)	7	柔弱角毛藻 (<i>Chaetoceros debilis</i>)	3	棕囊藻 (<i>Phaeocystis pouchetii</i>)	1	冰河星杆藻 (<i>Asterionellopsis glacialis</i>)	1
夜光藻 (<i>Noctiluca scintillans</i>)	6	链状裸甲藻* (<i>Gymnodinium catenatum</i>)	2	布氏双尾藻 (<i>Ditylum brightwellii</i>)	1	蓝藻 (<i>Cyanobacteria</i>)	1
血红哈卡藻 (<i>Akshiwo sanguinea</i>)	5	聚生角毛藻 (<i>Chaetoceros socialis</i>)	2	链状亚历山大藻* (<i>Alexandrium catenella</i>)	1	硅藻 (<i>Diatoms</i>)	1
球形棕囊藻 (<i>Phaeocystis globosa</i>)	4	尖刺拟菱形藻** (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	2	塔玛亚历山大藻* (<i>Alexandrium tamarense</i>)	1		
米氏凯伦藻* (<i>Karenia mikimotoi</i>)	4	红色中缢虫 (<i>Mesodiniu rubrum</i>)	2	旋沟藻* (<i>Cochlodinium</i> sp.)	1		

注: 带*为有毒藻种; 带**为有毒藻种, 但在该海域未检测出毒素

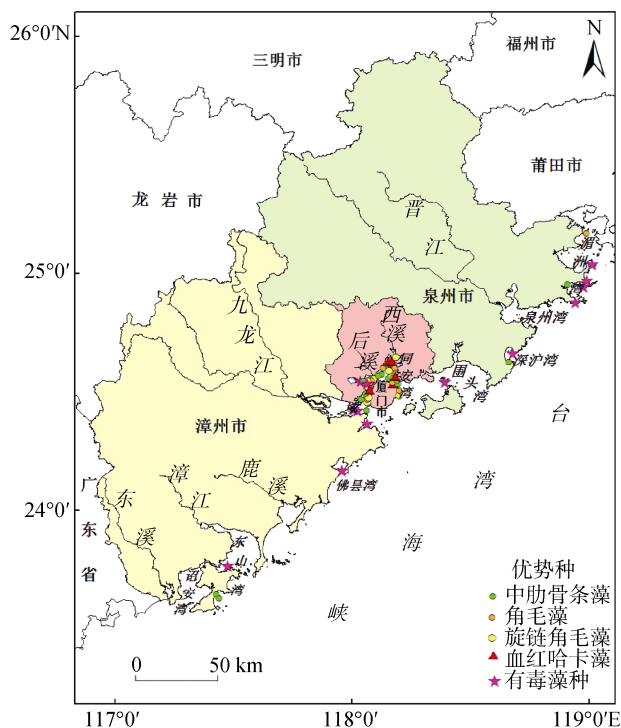


图 4 闽三角海域主要赤潮生物分布

Fig. 4 Distribution map of HABs organisms in South Fujian Golden Delta waters

事件中, 时空分布变化及主要赤潮生物分布都有一定的规律特征。厦门西海域、同安湾、泉州市惠安、石狮附近海域是赤潮多发区, 陆源污染物质、半封闭的环境和养殖业的发展是这些区域赤潮频发的主要原因。赤潮年际发生次数呈波动变化, 5~7 月为赤潮的高发期。闽三角海域引发赤潮的原因种中, 具有明显优势的是中肋骨条藻、角毛藻、旋链角毛藻等, 且在空间分布上呈现一定的规律; 有毒赤潮发生的次数有增加的趋势。

本文从已发生的赤潮事件中总结出一些特征, 但如何有效地进行赤潮防治是更为迫切需要解决的重大问题。评估赤潮灾害风险是下一步需要重点探讨的问题, 以期赤潮灾害减灾防灾提供依据。

参考文献:

- [1] 齐雨藻, 邹景忠, 梁松, 等. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2004, 1-3.
Qi Yuzao, Zou Jingzhong, Liang Song, et al. Red tide in the coast of China sea[M]. Beijing: Science Press, 2004, 1-3.
- [2] 尹伊伟, 王朝晖, 江天久, 等. 海洋赤潮毒素对鱼类的毒害[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 62-65.

- Yin Yiwei, Wang Zhaohui, Jiang Tianjiu, et al. Toxic effects of red tide toxins on fishes[J]. Marine Environmental Science, 2000, 19(4): 62-65.
- [3] Fleming L E, Kirkpatrick B, Backer L C, et al. Review of Florida red tide and human health effects[J]. Harmful Algae, 2011, 10(2): 224-233.
- [4] Anderson D M. Approaches to monitoring, control and management of harmful algal blooms (HABs)[J]. Ocean & Coastal Management, 2009, 52(7): 342-347.
- [5] Choi J K, Min J E, Noh J H, et al. Harmful algal bloom (HAB) in the East Sea identified by the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI)[J]. Harmful Algae, 2014, 39: 295-302.
- [6] 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311-318.
- Huo Wenyi, Yu Zhiming, Zou Jingzhong, et al. Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 311-318.
- [7] 周进, 陈国福, 朱小山, 等. 赤潮过程中“藻-菌”关系研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(2): 269-281.
- Zhou Jin, Chen Guofu, Zhu Xiaoshan, et al. A review of the relationship between algae and bacteria in harmful algal blooms[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(2): 269-281.
- [8] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. 生命科学, 2001, 13(2): 54-59.
- Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan, Zhang Jing. Status of harmful algal blooms and related research activities in China[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 2001, 13(2): 54-59.
- [9] 张青田. 中国海域赤潮发生趋势的年际变化[J]. 中国环境监测, 2013, 29(5): 98-102.
- Zhang Qingtian. Review on the Annual Variation of Red Tides in China Sea[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(5): 98-102.
- [10] Tang Danling, Di Baoping, Wei Guifeng, et al. Spatial, seasonal and species variations of harmful algal blooms in the South Yellow Sea and East China Sea[J]. Hydrobiologia, 2006, 568(1): 245-253.
- [11] 吴瑞贞, 马毅. 近 20 a 南海赤潮的时空分布特征及原因分析[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(1): 32-34.
- Wu Ruizhen, Ma Yi. Analysis on spatial and temporal distribution and cause of red tides over past 20 years in South China Sea[J]. Marine Environmental Science, 2008, 27(1): 30-32.
- [12] 张才学, 龚玉艳, 孙省利. 湛江港湾潜在赤潮生物的时空分布及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2012, 31(7): 1763-1770.
- Zhang Caixue, Gong Yuyan, Sun Xingli. Spatiotemporal distribution and related affecting factors of red tide latent organisms in Zhanjiang Bay, Guangdong Province of South China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(7): 1763-1770.
- [13] 刘霜, 张继民, 张洪亮, 等. 青岛近海赤潮灾害分级与时空分布及赤潮生物的变化[J]. 水生态学杂志, 2014, 35(4): 43-47.
- Liu Shuang, Zhang Jimin, Zhang Hongliang, et al. Spatial-temporal distribution and hazard grading of red tide and variation of red tide species in Qingdao adjacent sea area[J]. Journal of Hydroecology, 2014, 35(4): 43-47.
- [14] Wu Zaixing, Yu Zhiming, Song Xiuxian, et al. The spatial and temporal characteristics of harmful algal blooms in the southwest Bohai sea[J]. Continental Shelf Research, 2013, 59(2): 10-17.
- [15] 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.
- Song Nanqi, Wang Nuo, Wu Nuan, et al. Temporal and spatial distribution of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952~2016 based on GIS[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1142-1148.
- [16] 刘录三, 李子成, 周娟, 等. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. 环境科学, 2011, 32(9): 2497-2504.
- Liu Lusan, Li Zicheng, Zhou Juan, et al. Temporal and spatial distribution of red tide in Yangtze River Estuary and adjacent waters[J]. Environmental Science, 2011, 32(9): 2497-2504.
- [17] 李雪丁. 福建沿海近 10a 赤潮基本特征分析[J]. 环境科学, 2012, 33(7): 2210-2216.
- Li Xueding. Analysis on characteristics of red tide in Fujian coastal waters during the last 10 years[J]. Environmental Science, 2012, 33(7): 2210-2216.
- [18] 福建省海洋与渔业厅. 福建省海洋环境状况公报[R]. 2000-2017.
- Fujian Provincial Department of Ocean and Fisheries. Bulletin of the quality of the marine environment[R]. 2000-2017.
- [19] 国家海洋局第三海洋研究所. 厦门港赤潮调查研究论文集[M]. 北京: 海洋出版社, 1993, 1-162.
- Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration. Collected Papers on Blooms Survey and Study in Xiamen Harbour[M]. Beijing: Ocean Press, 1993, 1-162.
- [20] 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, 373-379.
- Zhao Dongzhi. Occurrence regularity of red tide disaster in typical waters of China[M]. Beijing: Ocean Press, 2010, 373-379.
- [21] 徐宁, 吕颂辉, 段舜山, 等. 营养物质输入对赤潮发生的影响[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 20-24.
- Xu Ning, Lu Songhui, Duan Shunshan, et al. The in-

- fluence of nutrients input on the red tide occurrence[J]. *Marine Environment Science*, 2004, 23(2): 20-24.
- [22] 吴瑞贞. 南海赤潮发生前后阶段水文气象要素演变特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006, 10-13.
Wu Ruizhen. Study on the evolution characteristics of hydro-meteorological elements around the occurrence of red tide in South China Sea[D]. Qingdao: China Ocean University, 2006, 10-13.
- [23] 蔡励勋. 厦门海域赤潮发生规律初探[J]. *福建水产*, 2008(2): 75-79.
Ca Lixun. The discipline of multiple red tide and its relationship with the natural factors in Xiamen Sea area[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2008(2): 75-79.
- [24] 国家海洋局. 2003 年中国海洋灾害公报[R]. 2004.
State Oceanic Administration. China bulletin on marine disasters in 2003[R]. 2004.
- [25] Moisan J R, Moisan T A, Abbott M R. Modelling the effect of temperature on the maximum growth rates of phytoplankton populations[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 153(3): 197-215.
- [26] 蔡榕硕, 陈际龙, 黄荣辉. 我国近海和邻近海的海洋环境对最近全球气候变化的响应[J]. *大气科学*, 2006, 30(5): 1019-1033.
Cai Rongshuo, Chen Jilong, Huang Ronghui. The response of marine environment in the offshore area of China and its adjacent ocean to recent global climate change[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, 30(5): 1019-1033.
- [27] 徐丽丽, 龚茂殉, 徐婷婷, 等. 东亚气候异常与东海赤潮发生频次的关系研究[J]. *海洋预报*, 2013, 30(5): 8-14.
Xu Lili, Gong Maoxun, Xu Tingting, et al. Relationships between the east Asian monsoon anomalous and the red tide occurrence frequency in the East China Sea mental factors in the Beidaihe waters of the Qinhuangdao[J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(5): 8-14.
- [28] Adam A, Mohammad-Noor N, Anton A, et al. Temporal and spatial distribution of harmful algal bloom (HAB) species in coastal waters of Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia[J]. *Harmful Algae*, 2011, 10(5): 495-502.
- [29] 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.
Zhao Dongzhi, Zhao Ling, Zhang Fengshou. Type of formation, distribution and temporal trend of red tides occurred in the China Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(3): 7-11.
- [30] 赵冬至. 我国赤潮灾害分布规律与卫星遥感探测模型[D]. 上海: 华东师范大学, 2004, 7-20.
Zhao Dongzhi. Distribution law of red tide in China and satellite remote sensing detecting model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004, 7-20.
- [31] 秦延文, 孟伟, 郑丙辉, 等. 渤海湾水环境氮、磷营养盐分布特点[J]. *海洋学报*, 2005, 27(2): 172-176.
Qin Yanwen, Meng Wei, Zheng Binghui, et al. Distribution features of nitrogen and phosphorus in aquatic environments of the Bohai Gulf[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 172-176.
- [32] 谢森扬. 近 60 年围填海工程影响下厦门典型海域水龄的时空变化[D]. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所, 2016, 52-58.
Xie Senyang. Land reclamation in nearly 60 years and its impacts on water age of the representative region in Xiamen Bay[D]. Xiamen: Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2016, 52-58.
- [33] 苏颖, 张珞平, 张冉. 九龙江流域营养盐流失的环境风险初步分析[C]//中国环境科学学会学术年会论文集, 2010, 1828-1832.
Su Ying, Zhang Luoping, Zhang Ran. Environmental risk analysis of nutrient loss in Jiulong River Basin[C]//China Environmental Science Society Academic Essays, 2010, 1828-1832.
- [34] 唐峰华, 伍玉梅, 樊伟, 等. 长江口浮游植物分布情况及与径流关系的初步探讨[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(12): 2934-2940.
Tang Fenghua, Wu Yumei, Fan Wei, et al. Preliminary discussion on phytoplankton distribution and its relation to the runoff in the Yangtze River estuary[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(12): 2934-2940.
- [35] 高昊东, 邓忠伟, 孙万龙, 等. 烟台四十里湾赤潮发生与生态环境污染研究[J]. *中国环境监测*, 2011, 27(2): 50-55.
Gao Haodong, Deng Zhongwei, Sun Wanlong, et al. Study on the relationship between ecological environmental pollution and red tide occurring in Sishili Bay, Yantai[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, 27(2): 50-55.
- [36] 唐森铭, 黎可茜. 海水网箱养殖与赤潮关系的研究——香港牛尾海三星湾 1998 年赤潮原因探讨[J]. *海洋学报*, 2003, 25(增刊 2): 202-207.
Tang Senming, Li Keqian. The relationship between fish farming scales and algal blooms at the Sam Sing Bay in Port Shelter, Hong Kong, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(s2): 202-207.

Temporal and spatial characteristics of harmful algal blooms in South Fujian Golden Delta waters

ZOU Xiao-mei^{1, 2}, LIN Guang-fa^{1, 3}, CHEN Zhi-biao^{1, 2}

(1. College of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. Engineering Research Center for Monitoring and Assessing Terrestrial Disaster, Fuzhou 350007, China)

Received: Sep. 20, 2018

Key words: HABs; spatial and temporal distribution; geographic information system; South Fujian Golden Delta Waters

Abstract: Harmful algal blooms (HABs) are an important indicator of marine ecosystem anomalies. This study collected and evaluated the HAB events in the South Fujian Golden Delta waters from 1986 to 2017. The temporal and spatial characteristics of these HAB events were analyzed using the geographic information system (GIS) technique. Results showed that (1) The HAB events occurred 98 times in total, and there were three HAB-prone areas, West Sea and Tong'an Bay in Xiamen and Meizhou Bay in Quanzhou. (2) The interannual frequency of HAB occurrence was fluctuant, and the peak period was from May to August. (3) *Skeletonema costatum*, *Chaetoceros* sp., and *Chaetoceros curvisetus* were the dominant HAB species. The HAB species were geographically distributed, and there was an increase in the frequency of toxic HAB events. This study has systematically summarized the spatial and temporal characteristics of HAB events in the South Fujian Golden Delta waters and provides a reference for risk analysis and prevention of HABs.

(本文编辑: 康亦兼)