

基于 GIS 的近 30 年长江口及其邻近海域赤潮时空分布特征研究

赵艳民, 秦延文, 张 雷, 乔 飞, 马迎群

(中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 收集了 1990 年—2019 年长江口及其邻近海域(120°30'E~123°30'E, 29°00'N~32°30'N)记载的赤潮事件, 基于 GIS 软件对所有赤潮事件进行整理, 分析了赤潮的时空分布规律, 并绘制长江口及邻近海域赤潮分布图。结果表明: 近 30 年来, 长江口及其邻近海域赤潮经历了先升高后下降的过程, 赤潮次数共计 144 次, 赤潮面积>1 000 km²有 28 次。赤潮发生核心区集中在长江口外、花鸟山-嵎泗列岛、岱山岛-中街山列岛、舟山岛-朱家尖岛海域; 长江口及邻近海域赤潮多发期为 5—8 月, 5、6、7、8 月发生的赤潮次数分别占总数的 28.37%、34.75%、17.78 和 9.29%; 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)是长江口及其邻近海域最常见赤潮肇事种, 发生次数分别为 55 次和 40 次, 占统计总次数的 38.19%和 27.78%, 2000 年以来, 东海原甲藻赤潮发生频率呈上升态势。

关键词: 长江口及邻近海域; 赤潮; 时空分布; 地理信息系统

中图分类号: X145 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2021)12-0039-08

DOI: 10.11759/hyhx20210220001

在一定环境条件下, 海水中浮游藻类、原动物或细菌等爆发性增殖或聚集导致海洋水体变色的生态异常现象被称之为赤潮。由于赤潮生物繁殖大量消耗水域溶氧, 且可能分泌有毒物质, 对海洋生态系统、渔业资源、海产养殖以及人群健康造成严重威胁, 是一种比较常见的海洋灾害^[1]。UHLIG 等^[2]对德国海湾 1968 年—1988 年夜光藻引发的赤潮现象进行了分析研究, 以此来了解赤潮发生规律, 奠定了赤潮研究的基础。中国对赤潮的研究始于 1952 年春汛黄河口外的赤潮调查及 1953 年费鸿年对赤潮成因的分析^[3]。苏纪兰院士^[4]将中国关于赤潮的研究分为 3 个阶段: 认识阶段: 即 1977 年之前, 处于对赤潮事件的简单报道阶段, 综述、报告和论文总计 10 篇左右^[5]; 探索阶段: 1977 年—1989 年, 中国赤潮研究日益得到重视, 60 余篇赤潮生理生态及其成因方面的研究成果在此阶段发表; 发展阶段: 1990 年—2000 年, 国内学者对黄骅近海、大亚湾、大鹏湾等区域赤潮进行了针对性研究^[5], 取得了诸多有效进展。2000 年以后, 遥感技术、数值模型和生物化学等先进技术应用于赤潮的探测、识别及机制分析, 对于赤潮的认识进一步深入^[6]。特别是“中国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”和“中国近海藻华灾害演变”等国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目^[7]对于东海大规模赤潮形成的生物

海洋学、化学海洋学机制进行了较为深入的探讨, 有助于理解近海生态系统在人类活动与全球变化影响下的演变机理和趋势。

长江是中国最大的河流, 也是世界第三大河, 年均径流量高达 9.0×10^{11} m³, 沿江人类生产活动中大量营养盐经由长江径流排放到长江口区域^[8-9], 早在 1933 年费鸿年首次记录了发生在浙江海域的夜光藻和骨条藻赤潮^[10]; 自 20 世纪 70 年代以后, 随着沿江城市经济快速发展, 人类活动加剧, 经由长江输送的无机氮和活性磷酸盐通量上升, 硅酸盐下降^[11], 长江口及邻近海域富营养化问题日益凸显^[12], 有害赤潮发生频率增加, 规模扩大, 成为中国赤潮暴发频率最高的区域之一^[13]。据统计, 长江口及其邻近海域大规模有害藻华连年发生, 影响面积最高可达上万平方米^[7]。

本研究在充分收集长江口及邻近海域浮游植物丰度以及已经记录的赤潮事件的基础上, 利用 GIS 软件对长江口浮游植物丰度以及赤潮发生特

收稿日期: 2021-02-20; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0600904, 2017YFC040470002)
[Foundation: Chinese National Key Programs for Fundamental Research and Development, Nos. 2016YFA0600904, 2017YFC040470002]

作者简介: 赵艳民(1979—), 男, 河北唐山人, 博士, 副研究员, 主要从事水生态环境保护与修复学研究, 电话: 010-84915321, E-mail: zhaoyan@craes.org.cn

点进行的研究,通过绘制近 30 a 长江口及邻近海域赤潮发生图,使赤潮数据可视化,有助于对长江口及邻近海域的赤潮发生特点产生更全面的认识,以期管理部门制定赤潮监控及预防决策提供技术支撑。

1 数据来源及分析方法

本研究的统计数据源包括:国家及相关省市定期发布的相关公报、长江口及其邻近海域关于赤潮的报告与论文,收集的数据资料时间跨度上为 1989 年—2019 年。GIS 技术对空间地理数据具有强大的管理和分析力,能够对复杂的赤潮的原始记录进行数据管理分析^[14]。本研究并借助地理信息系统软件(ArcGIS 10.0)对长江口及邻近海域的赤潮发生的时空分布进行汇总分析。由于 GIS 技术能够有效地分析点数据的特征规律,因此在操作上,将具有一定规模的不规则型赤潮覆盖水面归类为“点”,将赤潮记录信息(位置、面积等)储存在图层文件的属性表中,分析长江口赤潮发生的频率、空间分布、诱发赤潮的物种等信息,并形成可视化图件。

2 长江口及邻近海域赤潮时空分布及特征

2.1 1989 年—2019 赤潮发生时间特征分析

本文关注的海域为长江口及其邻近海域(120°30'E~123°30'E, 29°00'N~32°30'N),范围上主要覆盖长江口、杭州湾以及舟山列岛海域,基于公开资料收集到 1989 年—2019 年长江口及其邻近海域累计发生赤潮 144 次,总体年际变化见图 1。1989 年—2000 年,统计到的长江口及邻近海域赤潮次数 23 次,主要分布于长江口及舟山岛周边的数个点状区域范围,2001 年—2010 年统计到的长江口及邻近海域赤潮数目显著增加,达到 81 次,赤潮分布的区域明显扩大,东经 122°以东的长江口及邻近海域几乎均有赤潮分布。2010 年—2018 年,长江口及邻近海域赤潮次数达到 51 次。

从年内赤潮暴发规律上,长江口及邻近海域赤潮在 2 月—10 月都有发现,但主要集中于 5 月—8 月,其中 5 月和 6 月,发现次数分别为 51 和 43 次,二者占赤潮总记录的 60.65%(图 2)。长江口及邻近海域赤潮多发生在春末夏初,此时海域温度上升,有助于赤潮生物快速繁殖。

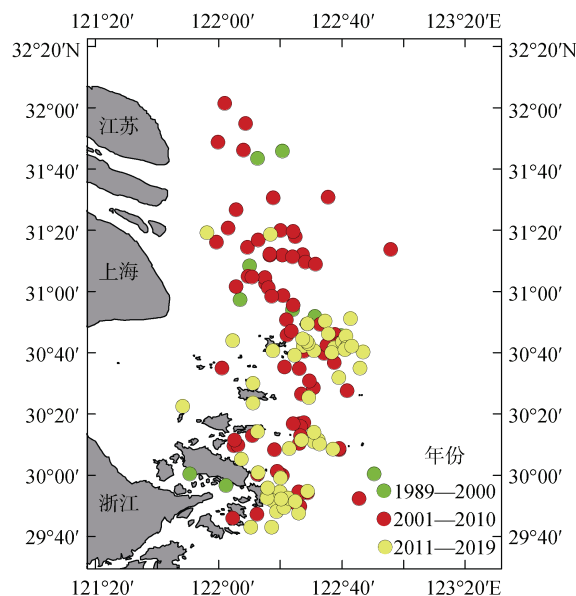


图 1 长江口及其邻近海域赤潮发生年份分析

Fig. 1 Number of red tide occurrences in the Changjiang estuary and adjacent waters in different years

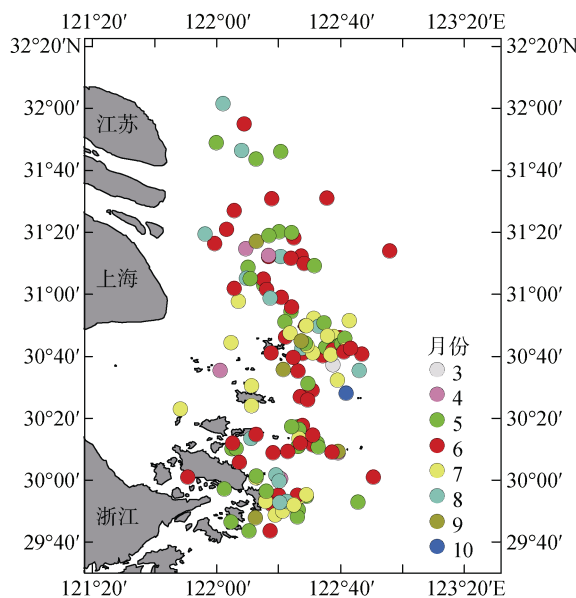


图 2 长江口及其邻近海域赤潮发生月份分析

Fig. 2 Number of red tide occurrences in the Changjiang estuary and adjacent waters in different months

2.2 赤潮发生的空间分布特征分析

在 Arcgis 软件中,采用估计随机变量概率密度的非要素方法——核密度法(KDE)估计近 30 年长江口及邻近海域赤潮发生频率。做法上,在地图上标记赤潮的密度分布,并根据密度分布频率,采用自然间断点分级法将长江口及邻近海域赤潮分为 5 个等级(低、中低、中、中高、高)。空间上,赤潮在长江

口北支启东外海-长江口外海域-嵊泗列岛海域-岱山岛中街山列岛-舟山岛朱家尖岛海域的狭长海域(29°30'N~32°30'N, 121°45'E~123°20'E)均有分布。长江口及邻近海域赤潮暴发高频区域主要包括: (1) 舟山岛、岱山岛以及中街山列岛以东海域; (2) 长江口南支冲淡水区及嵊泗列岛海域(图 3)。

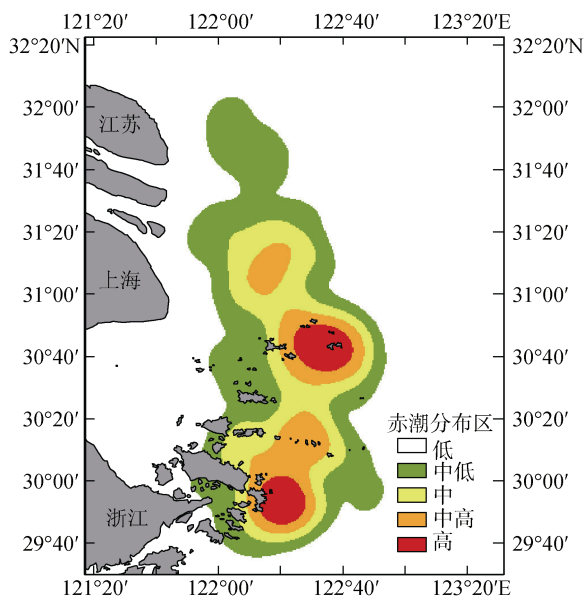


图 3 长江口及邻近海域赤潮发生的频率分布(1989 年—2019 年)

Fig. 3 Frequency of red tides events in the Changjiang estuary and adjacent waters

如图 4 所示, 在收集的长江口及邻近海域暴发赤潮中, 其中 6 次缺乏赤潮暴发面积信息, 占总统计数的 7.23%, 暴发面积在 100 km² 以下的赤潮次数为 17 次, 占总统计数的 20.48%, 面积在 100 km²~500 km² 之间的赤潮暴发次数最多, 达到总统计数的 42.17%, 暴发面积在 500 km²~1 000 km² 之间以及 1 000 km²~3 000 km² 之间的赤潮暴发次数分别为总统计数的 21.92% 和 13.70%, 此外, 长江口外和舟山岛附近海域曾暴发面积超过 3 000 km² 之间的赤潮。

2.3 长江口及邻近海域赤潮物种分析

长江口及邻近海域在 1990 年—2019 年间引发赤潮的浮游植物物种如表 1。长江口及邻近海域中主要的赤潮关键物种包括东海原甲藻、米氏凯伦藻、膝沟藻、中肋骨条藻等。其中东海原甲藻记录 55 次, 占比 38.19%, 中肋骨条藻记录 41 次, 占比 27.78%, 此外未记录赤潮生物种的赤潮记录 14 种, 占比 9.72%。

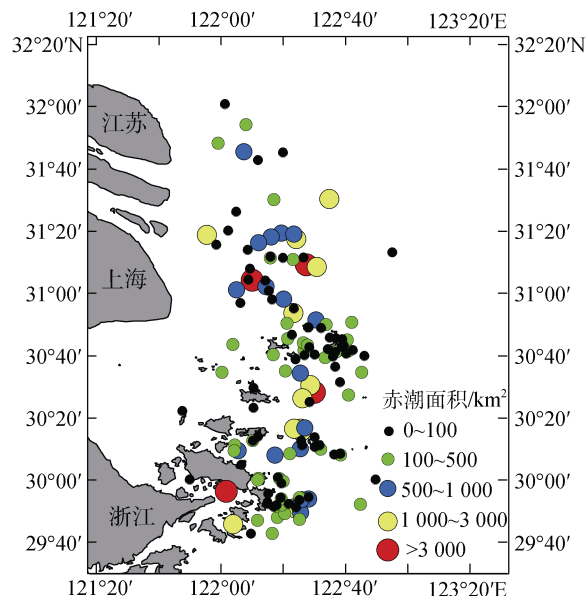


图 4 长江口及邻近海域赤潮暴发面积

Fig. 4 Distribution of red tides in the Changjiang estuary and adjacent waters

2000 年以来, 东海原甲藻引发的赤潮频次明显增加, 已经成为最为显著的赤潮种。从中肋骨条藻和东海原甲藻引发的赤潮的空间分布上, 中肋骨条藻引发的赤潮主要位于长江口北岸、长江口冲淡水区, 东海原甲藻引发的赤潮则多集中于花鸟山-嵊山-枸杞海域及朱家尖以东海域(图 5)。

3 讨论

1989 年渤海黄骅海域发生大面积赤潮后, 中国开始成立专门的海洋赤潮监测小组, 通过现场调查、航空调查和卫星遥感等多种手段进行定期监测, 因此近 30 年赤潮数据较为完整^[14], 近几年, 由于政府机构职能的调整, 可能对赤潮的记录整理产生一定的影响, 但由于中国赤潮监测体系基本建立, 公开发表的数据能够反映赤潮发生的基本情况^[15]。根据收集到公开发表的赤潮记录, 近 30 年长江口及邻近海域赤潮仍处于高发态势, 但该海域赤潮已由硅藻赤潮和异养性的夜光藻(*Noctiluca scintillans*)赤潮为主转为以东海原甲藻、米氏凯伦藻等甲藻赤潮为主。据于仁成等^[16]统计, 20 世纪 80 年代—90 年代, 中肋骨条藻赤潮在暴发赤潮中占比超过 30%, 而原甲藻赤潮所占比例仅有 10% 左右, 根据本研究统计, 1989 年—2019 年东海原甲藻赤潮占比上升至 38.19%, 中肋骨条藻赤潮则降至 27.78%。尽管东海原甲藻没有显著的急性毒性, 但室内模拟实验和野外调查中,

表 1 长江口及邻近海域赤潮生物发生频率/年⁻¹

Tab. 1 Frequency of red tide organisms in the Yangtze River estuary and adjacent waters(ind/year)

年份	扁面 角毛 藻	叉角 藻	东海 原甲 藻	短孢 角毛 藻	短凯 伦藻	高贵 盒型 藻	海链 藻	红色 中缢 虫	菱形 藻	米氏 凯伦 藻	梭角 藻	微型 绿藻	膝沟 藻	旋链 角毛 藻	异甲 藻	中肋 骨条 藻	锥状斯 克里普 藻	不 详
1990																1		
1993																		3
1997																3		
1998						1										1		
2000			1															
2001			1															
2002			2															
2003			5									1			1	4		4
2004			2													3		
2005			5							1						5		
2006			2															
2007	1						1				1					3		4
2008		1	7				1		1					1		5		
2009			1				1				1		1			6		3
2010			3													3	1	
2011			3		1													
2012			2					1		4								
2013			2															
2014			5															
2015																2		
2016	1		7							2						2		
2017			7						2	1			6					
2018																1		
2019				1												2		

注: 扁面角毛藻(*Chaetoceros compressus*); 叉角藻(*Ceratium furca*); 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*); 短孢角毛藻(*Chaetoceros brevis*); 短凯伦藻(*Karenia brevis*); 高贵盒型藻(*Biddulphia*); 海链藻(*Thalassiosira* spp.); 红色中缢虫(*Mesodinium rubrum*); 菱形藻(*Nitzschia* spp.); 米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*); 梭角藻(*Ceratium fusus*); 微型绿藻(*Chlorophyta*); 膝沟藻(*Gonyaulax*); 旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*); 异甲藻(*Heterocapsa circularisquama*); 中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*); 锥状斯克里普藻(*Scrippsiella trochoidea*)

东海原甲藻在赤潮密度下, 能够对黄海、东海的浮游动物关键种中华哲水蚤(*Calanus sinicus*)的产卵率、种群丰度等产生显著的抑制效应, 进而威胁渔业资源^[17-18]。此外, 长江口甲藻赤潮分布区域与长江口南侧低氧区分布状况基本吻合^[19], 赤潮后期藻细胞的分解可能加剧水体缺氧问题。除东海原甲藻外, 米氏凯伦藻作为一种典型的鱼毒性赤潮藻, 分别在 2005、2012、2016 和 2017 年出现, 对水产养殖业造成了严重的经济损失^[20]。

在国家重点基础研究发展计划(“中国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”、“中国近海藻华灾害演变机制与生态安全”)、国家自然科学基金基

金(“长江口海区赤潮形成原因的研究”、“东海近海海域典型赤潮生物对重要营养盐吸收动力学研究”、“赤潮藻类细胞磷库变化特征及其对赤潮生消的指示作用研究”、“东海近海赤潮发生与演变的时空动力学问题研究”)等项目支持下, 中国研究者从生物学、生态学和海洋学角度对于长江口及其邻近海域赤潮的成因进行了较为完善的阐述。首先, 长江口浮游植物的丰度分布与营养盐密切相关^[21]。近 30 a 来, 大量营养盐通过长江径流输送的长江口及邻近海域, 尤其是无机氮的大量输入和溶解硅(DSi)通量大幅降低^[22], 导致长江口及邻近海富营养化水平居高不下, 2004 年—2018 年长江口及邻近海域无机氮和活性磷酸盐浓度总体较高,

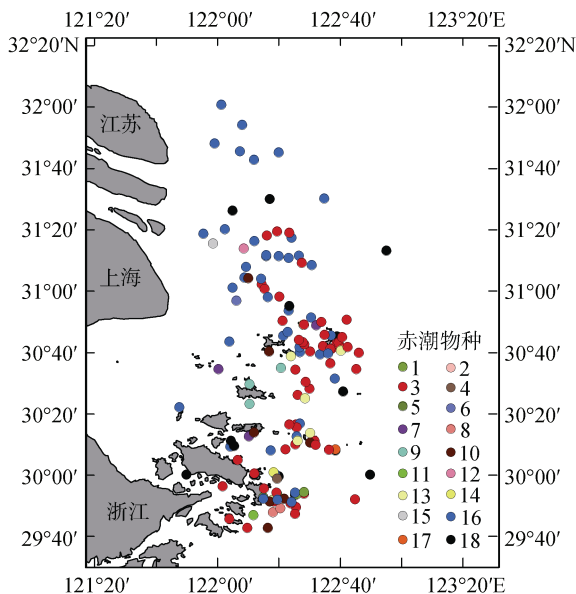


图 5 长江口及邻近海域赤潮生物分布

Fig. 5 Distribution of red tide organisms in the Changjiang estuary and adjacent waters

1. 扁角藻(*Chaetoceros compressus*); 2. 叉角藻(*Ceratium furca*);
3. 东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*); 4. 短孢角毛藻(*Chaetoceros brevis*); 5. 短凯伦藻(*Karenia brevis*); 6. 高贵盒型藻(*Biddulphia*);
7. 海链藻(*Thalassiosira* spp.); 8. 红色中缢虫(*Mesodinium rubrum*);
9. 菱形藻(*Nitzschia* spp.); 10. 米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*); 11. 梭角藻(*Ceratium fusus*); 12. 微型绿藻(*Chlorophyta*); 13. 膝沟藻(*Gonyaulax*);
14. 旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*); 15. 异甲藻(*Heterocapsa circularisquama*); 16. 中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*);
17. 锥状斯克里普藻(*Scrippsiella trochoidea*); 18. 不详

且整体呈现上升趋势,在多数年份内分别高于海水水质标准(GB3097-1997)IV 限值和 III 类限值^[23],为长江口及邻近海域浮游植物优势种从硅藻向甲藻转变提供了物质基础^[24-25]。甲藻对于氮、磷的储存利用能力高于硅藻,高氮硅比条件下,甲藻生长明显优于硅藻,对于暴发甲藻赤潮有利^[26]。其次,温度是赤潮生消过程中重要的影响因子。根据 Shelford 耐受性定律,温度低于藻类最适温度时,藻类生长率随温度升高而增大,温度高于藻类最适温度,藻类生长率则随着温度上升而降低^[27]。近 30 a 间长江口及邻近海域赤潮中,早春(3 月—4 月)温度较低时,中肋骨条藻等硅藻密度迅速上升,甚至形成赤潮^[28-29]。而在 5 月—8 月温度较高时,尤其是 5 月—6 月,水温快速升高,长江口及邻近海域水温稳定在 18.5 °C~23.5 °C 左右^[30],由于此时水温处于东海原甲藻适温范围内(18 °C~28.2 °C)^[31],利于暴发东海原甲藻等甲藻赤潮的暴发。此外,长江口及邻近海域复杂的水文活动也是影响赤潮发生的重要因素。空间上,中肋骨条藻赤潮主要在嵎泗列岛以北 122°E~

123°E 之间的长江口外海域暴发,东海原甲藻赤潮则主要暴发于嵎泗列岛~朱家尖的海域。地理坐标 121°45'E~122°30'E、30°45'N~31°45'N 的区域为长江最大浑浊带的覆盖范围^[32],在该区域长江径流携带的悬沙与潮流扰动产生的再悬浮泥沙在长江口形成透明度在 3 m 以下的浑浊带,浑浊带的消光作用强于营养盐的释放作用,削弱了该水域生态系统对径流过剩营养盐的吸收、同化功能,抑制了初级生产力,导致口门附近海域浮游植物生物量、密度显著低于附近水域^[33]。营养盐被输送至河口外透明度较高的水域才能被充分利用,间接增加了长江口门外海域的营养盐浓度,使得口门外海域形成高透明度、高营养盐含量的赤潮高发区。黑潮分支台湾暖流对长江口及邻近海域甲藻赤潮发生具有重要的调控作用^[16]。春末夏初,来自台湾东北部黑潮次表层水入侵长江口及邻近海域,带来丰富的营养盐、影响该海域的温、盐结构、水体层化、上升流及营养盐组成,有利于促进和维持甲藻的生长,进而影响赤潮分布、动态及危害效应^[34-35]。

4 结论

1) 时间上,1989 年—2019 年长江口及邻近海域赤潮经历了先升高后降低的过程,2000 年—2010 年间赤潮暴发频率最高。在年内分布规律上,5 月—8 月是长江口及邻近海域赤潮高发期,尤其是 5 月和 6 月,这两个月赤潮次数占总记录次数的一半以上。

2) 空间上,长江口及邻近海域赤潮多发区位于长江口外-花鸟山-嵎泗列岛-岱山岛中街山列岛-舟山岛-朱家尖海域的狭长区域内。赤潮暴发规模上通常在 100 km²~500 km² 以内。

3) 长江口及邻近海域常见赤潮物种约有十几种,中肋骨条藻和东海原甲藻是两种最主要的赤潮原因种。中肋骨条藻赤潮主要分布于长江口外,而东海原甲藻赤潮则主要分布于嵎泗列岛至朱家尖一线海域。近年来,长江口温度、营养盐等因素逐渐推动东海原甲藻暴发频率上升,已经成为近 30 a 该海域引发赤潮的第一物种。

参考文献:

- [1] 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 Sciences, 2011, 32(9): 2497-2504.

- [2] UHLIG G, SAHLING G. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population dynamics and red tide phenomena 1968–1988[J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1990, 25(1/2): 101-112.
- [3] 顾新根. 东海赤潮研究概况[J]. 现代渔业信息, 1989, 4(2): 40-43.
GU Xingen. Overview of the red tide research in east China sea[J]. Journal of Modern Fisheries Information, 1989, 4(2): 40-43.
- [4] 苏纪兰. 中国的赤潮研究[J]. 中国科学院院刊, 2001, 16(5): 339-342.
SU Jilan. Harmful algal bloom and its research in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2001, 16(5): 339-342.
- [5] 梁松, 钱宏林. 我国的赤潮研究现状与分析[J]. 海洋信息, 1995, 11: 16-18.
LIANG Song, QIAN Honglin. Research status and analysis of red tide in China[J]. Marine Information, 1995, 11: 16-18.
- [6] 张涛, 苏奋振, 杨晓梅, 等. MODIS 遥感数据提取赤潮信息方法与应用——以珠江口为例[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 244-249.
ZHANG Tao, SU Fenzhen, YANG Xiaomei, et al. A method for detecting red tide information from modis data and its application in Pearl River estuary[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 244-249.
- [7] 周明江, 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” [J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 673-679.
ZHOU Mingjiang, ZHU Mingyuan. Progress of the project “Ecology and Oceanography of harmful algal blooms in China”[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(7): 673-679.
- [8] SHEN Z L, LIU Q. Nutrients in the Changjiang River[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 153(1/2/3/4): 27-44.
- [9] CHAI C, YU Z M, SHEN Z L, et al. Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(16): 4687-4695.
- [10] 中国海洋学会. 中国海洋学学科史[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015: 297.
Chinese Society for Oceanography. History of Chinese oceanography[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2015: 297.
- [11] 刘新成, 沈焕庭, 黄清辉. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 332-340.
LIU Xincheng, SHEN Huanting, HUANG Qinghui. Concentration variation and flux estimation of dissolved inorganic nutrient from the Changjiang river to its estuary[J]. Oceanologica et Limnologia Sinica, 2002, 33(3): 332-340.
- [12] ZHU J R, WANG J H, SHEN H T, et al. Observation and analysis of the diluted water and red tide in the sea off the Changjiang River mouth in middle and late June 2003[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(3): 240-247.
- [13] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. 应用生态学报, 2003, 14(7): 1031-1038.
ZHOU Mingjiang, YAN Tian, ZOU Jingzhong. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River estuary and its adjacent sea[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1031-1038.
- [14] 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[J]. China Environmental Science, 2018, 38(3): 1142-1148.
- [15] 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.
ZHAO Dongzhi. Distribution law of red tide in China and satellite remote sensing detecting model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2004.
- [16] 于仁成, 张清春, 孔凡洲, 等. 长江口及其邻近海域有害藻华的发生情况、危害效应与演变趋势[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1178-1186.
YU Rencheng, ZHANG Qingchun, KONG Fanzhou, et al. Status, impacts and long-term changes of harmful algal blooms in the sea area adjacent to the Changjiang River estuary[J]. Oceanologica et Limnologia Sinica, 2017, 48(6): 1178-1186.
- [17] LIN J N, SONG J J, YAN T, et al. Large-scale dinoflagellate bloom species *Prorocentrum donghaiense* and *Karenia mikimotoi* reduce the survival and reproduction of copepod *Calanus sinicus*[J]. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 2015, 95(6): 1071-1079.
- [18] LIN J N, YAN T, ZHANG Q C. In situ detrimental impacts of *Prorocentrum donghaiense* blooms on zooplankton in the East China Sea[J]. Marine Pollution bulletin, 2014, 88(1-2): 302-310.
- [19] CHEN J Y, PAN D L, LIU M L, et al. Relationships between long-term trend of satellite-derived chlorophylla and hypoxia off the Changjiang estuary[J]. Estuaries and Coasts, 2017, 40(4): 1055-1065.
- [20] 邓华, 管卫兵, 曹振轶, 等. 2012 年福建沿海大规模

- 米氏凯伦藻赤潮暴发的水文气象原因探讨[J]. 海洋学研究, 2016, 34(4): 28-38.
- DENG Hua, GUAN Weibing, CAO Zhenyi, et al. Analysis of hydrological and meteorological factors causing *Karenia mikimotoi* bloom in 2012 along Fujian coast[J]. Journal of Marine Sciences, 2016, 34(4): 28-38.
- [21] 赵艳民, 马迎群, 曹伟, 等. 长江口 2016 年冬季浮游植物类群及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(2): 183-188.
- ZHAO Yanmin, MA Yingqun, CAO Wei, et al. Feature of phytoplankton groups in Yangtze Estuary and its relationship with environmental factors in winter, 2016[J]. Marine Environmental Science, 2020, 39(2): 183-188.
- [22] 李茂田, 程和琴. 近 50 年来长江入海溶解硅通量变化及其影响[J]. 中国环境科学, 2001, 21(3): 193-197.
- LI Maotian, CHENG Heqin. Changes of dissolved silicate flux from the Changjiang River into sea and its influence since late 50 year[J]. China Environmental Science, 2001, 21(3): 193-197.
- [23] 王孝程, 解鹏飞, 李晴, 等. 长江口海域生态环境状况及保护对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(5): 1197-1205.
- WANG Xiaocheng, XIE Pengfei, LI Qing, et al. Ecological environment of the Yangtze estuary and protection countermeasures[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(5): 1197-1205.
- [24] ZHOU M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang(Yangtze) River[J]. Continental Shelf Research, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [25] FU M Z, WANG Z L, PU X M, et al. Changes of nutrient concentrations and N: P: Si ratios and their possible impacts on the Huanghai Sea ecosystem[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 31(4): 101-112.
- [26] 吕颂辉, 李英. 我国东海 4 种赤潮藻的细胞氮磷营养储存能力对比[J]. 过程工程学报, 2006, 6(3): 439-444.
- LV Songhui, LI Ying. Nutritional storage ability of four harmful algae from the East China Sea[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(3): 439-444.
- [27] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 1996: 66-67.
- SHEN Guoying, SHI Bingzhang. Marine ecology[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1996: 66-67.
- [28] YANG S, HAN X R, ZHANG C S, et al. Seasonal changes in phytoplankton biomass and dominant species in the Changjiang River estuary and adjacent seas: general trends based on field survey data 1959-2009[J]. Journal of Ocean University of China, 2014, 13(6): 926-934.
- [29] 李静, 陈长平, 梁君荣, 等. 2010 年春秋长江口南部硅藻种类组成和密度的时空变化[J]. 应用海洋学报, 2015, 34(3): 372-387.
- LI Jing, CHEN Changping, LIANG Junrong, et al. Species composition and diatom seasonal successions in the south of Changjiang estuary and its adjacent waters in spring and autumn of 2010[J]. Journal of Applied Oceanography, 2015, 34(3): 372-387.
- [30] 周晓英, 胡德宝, 王赐震, 等. 长江口海域表层水温的季节、年际变化[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 357-362.
- ZHOU Xiaoying, HU Debao, WANG Cizhen, et al. Seasonal and interannual SST variations in the Changjiang estuary[J]. Periodical of Ocean University of China, 2005, 35(3): 357-362.
- [31] 陈艳拢, 赵冬至, 杨建洪, 等. 赤潮藻类温度生态幅的定量表达模型研究[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 156-161.
- CHEN Yanlong, ZHAO Dongzhi, YANG Jianhong, et al. The quantitative study on ecological amplitude of sea temperature of algae[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 156-161.
- [32] YANG Yunping, LI Yitian, SUN Shaohua, et al. Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River estuary: the trends and cause[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, 24(1): 129-142.
- [33] 叶属峰, 纪焕红, 曹恋, 等. 长江口海域赤潮成因及其防治对策[J]. 海洋科学, 2004, 25(5): 26-32.
- YE Shufeng, JI Huanhong, CAO Lian, et al. Red tides in the Yangtze River estuary and adjacent sea areas: causes and mitigation[J]. Marine Sciences, 2004, 25(5): 26-32.
- [34] KONG F Z, XU Z J, YU R C, et al. Distribution patterns of phytoplankton in the Changjiang River estuary and adjacent waters in spring 2009[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(5): 902-914.
- [35] ZHOU Z X, YU R C, ZHOU M J. Resolving the complex relationship between harmful algal blooms and environmental factors in the coastal waters adjacent to the Changjiang River estuary[J]. Harmful Algae, 2017, 62: 60-72.

Temporal and spatial distribution of red tides in the Changjiang estuary and in adjacent waters from 1989 to 2019

ZHAO Yan-min, QIN Yan-wen, ZHANG Lei, QIAO Fei, MA Ying-qun

(Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Received: Feb. 20, 2021

Key words: Changjiang estuary and adjacent waters; red tide; temporal and spatial distribution; geographic information system

Abstract: Red tide events were collected in the Changjiang estuary and adjacent waters from 1989 to 1990. A geographic information system (GIS) was used to analyze the temporal and spatial distribution of the red tide. Results showed a total count of 144 red tide events. There were 28 red tide events in a covered area larger than 1000 km². Outside the Changjiang estuary, the Huaniaoshan-Shengsi archipelago and Zhoushan-Zhujiajian island were the red tide-prone areas. Most of the red tide events occurred from May to August with a frequency of occurrence of 28.37%, 34.75%, 17.78%, and 9.29% in May, June, July, and August, respectively. *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* were the dominant species of red tides in the Changjiang estuary and the adjacent sea.

(本文编辑: 谭雪静)