

2000-2016年渤海赤潮发生规律及影响因素研究

窦勇, 尚金沛, 邵蓬, 高金伟, 贾旭颖, 周文礼

(天津农学院水产学院 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津 300384)

摘要:探究渤海赤潮发生规律和影响因素, 能为预报与防治赤潮灾害提供科学依据。利用历史统计数据和相关性分析方法, 以2000-2016年渤海发生的赤潮事件为对象, 研究了赤潮发生的时空动态、赤潮生物的生态演替以及与温度、营养盐、地理水文要素和厄尔尼诺-南方涛动事件(ENSO)的关联。结果表明: (1) 时间尺度上, 每年5-8月是赤潮高发期, 2-4月和11月赤潮发生频次较低; (2) 空间分布上, 赤潮集中发生在河北秦皇岛-唐山-辽宁绥中近岸、辽宁营口鲅鱼圈附近以及渤海湾近岸海域; (3) 共检出赤潮生物40种, 包括甲藻18种、硅藻18种、金藻2种、褐胞藻1种, 另外还有原生动物1种, 其中甲藻门的夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)和亚历山大藻(*Alexandrium* sp.), 金藻门的球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)以及硅藻门的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、海链藻(*Thalassiosira* sp.)和角毛藻(*Chaetoceros* sp.)是渤海爆发频次较高的赤潮优势种, 海区赤潮生物存在明显的生态演替现象; (4) 温度和营养盐结构对赤潮爆发及其优势种演替起到关键作用, 高通量的陆源污染物与弱化的水动力相互叠加为诱发赤潮提供了条件, 而厄尔尼诺效应强度与赤潮发生面积呈显著正相关($P < 0.05$)。

关键词: 渤海; 赤潮; 时空动态; 生态演替; 影响因素

中图分类号: Q178.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-3075(2020)06-0141-08

赤潮是海洋中某些浮游藻类、原生动物以及微生物在特定的环境条件下爆发性增殖并聚集而引起的一种使海水变色的生态异常现象, 赤潮的发生对海洋生态环境、近海水产养殖甚至人类生命健康都会产生严重的负面影响(Wang & Wu, 2009; 刘录三等, 2011; 李雪丁, 2012; 刘霜等, 2014)。赤潮爆发与水体富营养化、水动力弱化以及气候异常等密切相关, 而随着社会经济的高速发展和厄尔尼诺-南方涛动事件(ENSO)的影响, 赤潮灾害发生频率和造成的损失总体呈上升趋势。因此, 早在1990年国际上就将赤潮列为世界近海三大污染问题之一(Anderson, 1997)。

渤海是我国北方半封闭性内海, 环渤海区域是我国经济发展最活跃的地区之一, 沿岸人口稠密、陆源排污通量很大, 给近岸海域施加了极大的资源环

境压力, 加之渤海水动力条件偏弱, 近年来赤潮灾害频发, 给水产养殖、近海旅游等海洋经济业态造成了很大损失。目前, 有学者通过现有数据探索渤海海区在一定时间内赤潮事件的发生规律, 宋南奇等(2018)借助地理信息系统(GIS)技术分析了渤海有记录以来的赤潮数据, 以可视化的方法展示了赤潮发生的时空分布特征, 并对其危害程度进行了定量评估; 吴在兴(2013)利用核密度分析方法对渤海西南部赤潮事件进行了空间化表达, 并据此对易发赤潮的区域和频次进行了预测; 还有学者对赤潮事件中的优势种进行研究, 分析赤潮生物的种类组成和生态演替, 翟伟康等(2016)研究了河北省近海连续16a的赤潮优势种变化, 发现赤潮生物逐渐由甲藻门向金藻门演替; 宋伦等(2018)以高通量测序方法为手段, 鉴定出辽东湾产毒微藻29种, 其中赤潮原因种达19种; 此外, 通过室内试验和数值模拟, 研究了赤潮生物群落结构、生物量与环境因子的关联, 模拟赤潮爆发的条件, 李志林等(2017)利用实验生态学方法研究了有机氮源尿素对中肋骨条藻和米氏凯伦藻生长的影响; 王艳等(2007)采用正交试验探索了氮、磷、铁、微量元素及维生素等营养因子对球形棕囊藻两个株系生长的作用; 匡翠萍等(2016)基于FBM粒子追踪法建立和验证赤潮迁移扩散模型, 模拟了秦皇岛海域潮流和风生流, 分析了风生流对赤

收稿日期: 2019-02-12

基金项目: 天津市水产产业技术体系创新团队项目(ITFRS2017005); 天津市优秀科技特派员支持项目(18ZXBFNC00170); 天津市水产生态及养殖重点实验室开放基金项目(TJAE201805)。

作者简介: 窦勇, 1985年生, 男, 博士, 讲师, 研究方向为海洋生态学和生态毒理学。E-mail: douyonghero@163.com

通信作者: 周文礼, 1969年生, 男, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学和渔业资源研究。E-mail: saz0908@126.com

潮迁移扩散的作用;对赤潮预警与治理方法也有相关的研究,暨卫东等(2005)通过毒理学实验提出了塔玛亚历山大藻产麻痹性贝毒的藻密度预警值;江天久等(2006)依据我国赤潮发生的特点,初步制定了我国赤潮的分级分类及预警色划分标准;贺青等(2008)基于微型围隔实验探讨了浮游植物多样性与表观增氧量的关系及其在赤潮预警和评价中的应用。在赤潮治理方面,有学者提出了使用不同方式对黏土改性进而絮凝和消除赤潮生物的策略(曹西华等,2004;王修林等,2006;吴萍和俞志明,2007);还有学者通过其他生物的克生效应对赤潮生物进行抑制甚至杀灭(孙颖颖等,2010;王洪亮等,2010);程超等(2016)采用强电离放电协同气液混溶技术制备羟基自由基,可以有效地杀灭赤潮异弯藻、塔玛亚历山大藻和中肋骨条藻。这几个方向虽然都已经取得了一定进展,但结果相对孤立,缺乏系统性和综合性。

本文以2000-2016年渤海赤潮事件为对象,研究了赤潮发生的时空动态、赤潮生物的生态演替与海洋环境因子、地理水文要素以及全球气候变化的关联,以期能够较为全面揭示渤海赤潮发生的规律和影响因素,为预报与防治赤潮灾害提供依据。

1 基础数据

基础数据包括渤海沿岸辽宁省、河北省、天津市和山东省的赤潮发生资料,来源于历年中国海洋环境质量公报、灾害公报、北海区海洋环境质量公报以及4省市的相关公报;数据集包括2000-2016年渤海赤潮发生的起止时间、发生区域、最大发生面积、赤潮生物优势种、造成经济损失与否及损失大小等信息,渤海主要河流携带入海污染物通量以及海区气象和水文资料。目前科学家普遍使用南方涛动指

数(Southern Oscillation Index, SOI)来判断厄尔尼诺现象的活跃程度,本研究SOI数据来源于澳大利亚国家气象局网站(<http://www.bom.gov.au>)。

2 结果与分析

2.1 赤潮的时间变化特征

2000-2016年渤海海域共发生赤潮165次,累计发生面积达40 248 km²,17年间赤潮发生次数和面积波动较大(图1)。2008年发生次数最少,仅为1次,而2001年发生20次,达到历年之最;赤潮发生面积最小的为2008年,仅为30 km²;而峰值年份在2004年,全年赤潮累积发生达6 520 km²,覆盖面积达到渤海总面积的8.44%。通过年度累计赤潮发生面积可见,1~100 km²的有1次,100~500 km²的3次,500~1 000 km²的2次,超过1 000 km²的11次。研究时段内,渤海海域单次赤潮的爆发规模大多较小,面积在100 km²以下的赤潮有128次,占总发生次数的77.57%;100~500 km²有19次,占比11.51%;500~1 000 km²有7次,占4.24%;而高于1 000 km²的有11次,占总次数的6.67%,发生面积大于1 000 km²的赤潮事件详见表1。

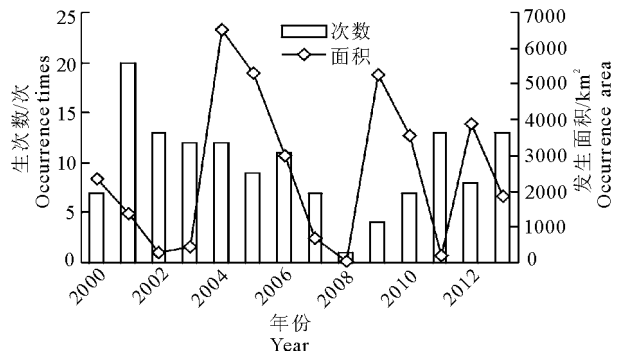


图1 2000-2016年渤海赤潮发生次数与发生面积
Fig.1 Occurrence frequency and area of red tides in Bohai Sea from 2000 to 2016

表1 2000-2016年渤海发生面积大于1 000 km²的赤潮事件

Tab.1 Red tide events with an area over 1 000 km² occurring in Bohai Sea from 2000 to 2016

时间	发生海域	赤潮生物	发生面积/km ²
2014.5.15-2014.8.7	河北秦皇岛滦河口至辽宁绥中六股河口近岸海域	抑食金球藻	2000
2013.5.25-2013.8.31	河北秦皇岛-辽宁绥中附近海域	抑食金球藻	1450
2012.6.8-2012.8.20	河北唐山港-秦皇岛-辽宁绥中附近海域	抑食金球藻	3400
2010.6.24-2010.7.12	河北秦皇岛-辽宁绥中沿岸海域	微微型浮游生物	3350
2009.5.31-2009.6.13	渤海湾附近海域	赤潮异弯藻	4460
2006.10.22-2006.11.5	河北黄骅附近海域	球形棕囊藻	1600
2005.6.2-2006.6.10	渤海湾海域	裸甲藻、棕囊藻	3000
2005.6.16-2005.6.18	辽宁营口鲅鱼圈附近海域	夜光藻	2000
2004.6.11	黄河口以北海域	球形棕囊藻	1850
2004.6.12	天津塘沽附近海域至渤海湾中东部和北部海域	米氏凯伦藻	3200
2000.7.23	渤海湾中部海域	夜光藻	1040

2000 - 2016 年, 渤海赤潮在 2 - 11 月均有发生, 但主要集中在 5 - 8 月爆发, 这可能与此时段水温较高、适合赤潮生物生长有密切关系, 这 4 个月累积发生赤潮 106 次, 占总记录的 64.24%, 其中 6 月发生次数最多, 达 39 次; 而 2 月、3 月、4 月和 11 月发生次数最少, 仅各为 1 次(图 2)。对 2011 - 2016 年渤海海表均温和赤潮发生次数的逐月数据进行 Pearson 相关性分析(图 3), 结果显示, 赤潮爆发次数与水温呈极显著正相关($r=0.445, P<0.01$)。

2.2 赤潮的空间分布特征

渤海赤潮事件的空间分布较为集中, 河北秦皇岛-唐山-辽宁绥中近岸、辽宁营口鲅鱼圈附近海域以及渤海湾是赤潮发生频次较高的区域, 其中尤以秦皇岛新开河口、唐山京唐港、辽宁绥中芷锚湾和天

津港为赤潮易发区; 另外, 河北黄骅和曹妃甸近岸海域、滦河口、山东长岛县和滨州市近岸也是多次爆发赤潮灾害的区域。

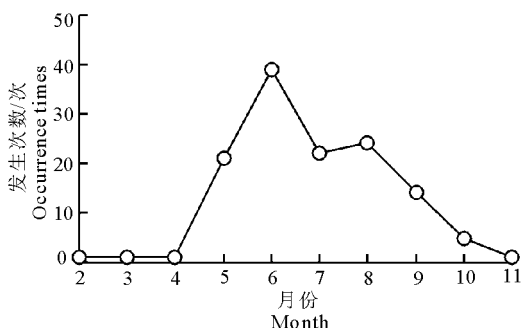


图 2 渤海赤潮发生次数的月度分布

Fig.2 Monthly distribution of occurrence frequency of red tides in Bohai Sea from 2000 to 2016

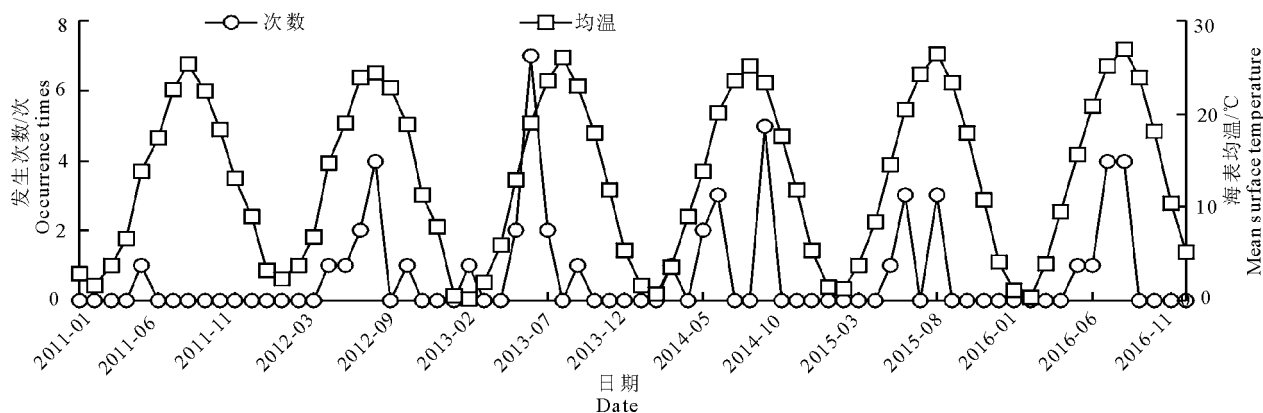


图 3 2011 - 2016 年渤海表面平均温度和赤潮发生次数的逐月变化

Fig.3 Monthly fluctuation of mean sea surface temperature and occurrence frequency of red tide in Bohai Sea from 2011 to 2016

2.3 赤潮生物种类

由于在同一次赤潮事件中可能同时存在多个优势种, 因此本研究分开计算, 以某种赤潮生物出现的次数来进行统计。在 2000 - 2016 年发生的赤潮事件中, 共检出赤潮生物 40 种, 包括甲藻 18 种、硅藻 18 种、金藻 2 种、褐胞藻 1 种, 另有原生动物 1 种。在有记录的赤潮事件中, 甲藻累计出现 88 次, 硅藻出现 39 次, 金藻出现 16 次, 褐胞藻出现 4 次, 隶属原生动物的红色中缢虫出现 8 次。甲藻门的夜光藻是渤海出现频次最高、危害最大的赤潮生物, 累积发生达 52 次, 在大部分年份均有爆发; 金藻门的球形棕囊藻和硅藻门的中肋骨条藻也是渤海重要的赤潮优势种, 在评价时段内分别出现 12 次和 10 次; 另外, 甲藻门的裸甲藻(*Gymnodinium* sp.) 和亚历山大藻(*Alexandrium* sp.), 硅藻门的海链藻(*Thalassiosira* sp.) 和角毛藻(*Chaetoceros* sp.) 也是渤海爆发频次较高的赤潮优势种(表 2)。

值得注意的是, 在 40 种赤潮生物中, 有 13 种为潜在产毒微藻, 分别是产麻痹性贝毒(PSP)的伊姆裸甲藻、链状裸甲藻, 产腹泻性贝毒(DSP)的微小原甲藻, 产溶血毒素(Hemolysin)的多纹膝沟藻、米氏凯伦藻、球形棕囊藻、赤潮异弯藻、海洋褐胞藻和血红哈卡藻, 产虾夷毒素(YTX)的具刺膝沟藻, 产记忆缺失性贝毒(ASP)的尖刺拟菱形藻和柔弱拟菱形藻, 产胞外多糖(EPS)的抑食金球藻。

渤海赤潮生物优势种存在明显的生态演替现象, 2000 - 2003 年夜光藻和硅藻门微藻占绝对优势, 2004 - 2007 年逐渐演替为球形棕囊藻和甲藻门微藻, 而 2012 - 2016 年夜光藻、中肋骨条藻和抑食金球藻成为优势种。

2.4 南方涛动指数(SOI)

厄尔尼诺-南方涛动(合称 ENSO 循环)是全球尺度的气候震荡事件, 其中厄尔尼诺主要指示赤道东太平洋海表温度(SST)异常升高, 而南方涛动主

表 2 2000 - 2016 年渤海赤潮生物发生频次

Tab.2 Frequency of red tide organisms in Bohai Sea from 2000 to 2016

赤 潮 生 物	统 计 年 份																
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
球形棕囊藻 <i>Phaeocystis globosa</i>				1	7	3	1										
抑食金球藻 <i>Aureococcus anophagefferens</i>													1	1	1	1	
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>			1			2		1	1			1	2		2		
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	1	7	5	8		2	1		1	5		2	9	5	2	4	
海洋褐胞藻 <i>Chattonella marina</i>			1	1											1		1
链状裸甲藻 <i>Gymnodinium catenatum</i>								1									
哈曼褐多沟藻 <i>Pheopol ykrikos harmannii</i>						1											
血红哈卡藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>						1											
盘绕旋沟藻 <i>Cochlodinium polykrikoides</i>										1							
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>		2						1									
聚生角毛藻 <i>Chaetoceros socialis</i>		1															
尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>						1							1				
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>										2							
诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskildi</i>												1	1				
窄面角毛藻 <i>Chaetoceros paradoxus</i>												1					
大洋角管藻 <i>Cerataulina pelagica</i>												1					
暹罗角毛藻 <i>Chaetoceros amense</i>												1					
米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>					2											2	
塔玛亚历山大藻 <i>Alexandrium tamarense</i>							1										1
太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacirica</i>																	2
链状亚历山大藻 <i>Alexandrium catenella</i>																	2
锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>															1		1
伊姆裸甲藻 <i>Gymnodinium impudicum</i>																	1
离心列海链藻 <i>Thalassiosira excentricus</i>															1		
多纹膝沟藻 <i>Gonyaulax polygramma</i>												1		1	1	1	
赤潮异弯藻 <i>Heterosigma akashiwo</i>					1	1		1								1	2
红色中缢虫 <i>Mesodinium rubrum</i>		5									1		1				1
海洋原甲藻 <i>Prorocentrum micans</i>												1					
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>		1										1			1	1	
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.			2														
多甲藻 <i>Peridinium perardiiforme</i>		1															
曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.		1															
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.		1															
无纹环沟藻 <i>Gyrodinium instriatum</i>										1							
短角弯角藻 <i>Eucampia zoodiacus</i>													1				
微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>						1								1	1		
柔弱拟菱形藻 <i>Pseudonitzschia delicatissima</i>								1				1	1				
叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>									1						2		1
朱吉直链藻 <i>Melosira juergensi</i>														1			
具刺膝沟藻 <i>Gonyaulax spinifera</i>														1			

要描述热带东太平洋和热带印度洋海区气压场的反向变化,二者之间存在着紧密联系,ENSO 循环通过调制大尺度海-气相互作用对全球大气环流和海洋温盐循环施加影响。目前国际上普遍使用南方涛动指数(SOI)来判断厄尔尼诺现象的活跃程度。

通过对 2000 年 1 月至 2016 年 12 月的逐月 SOI 与月度赤潮发生面积进行 Pearson 相关性分析,发现 SOI 和赤潮面积呈显著负相关 ($r = -0.419, P < 0.05$),即 SOI 越低、厄尔尼诺效应越强、赤潮发生面积越大(图 4)。

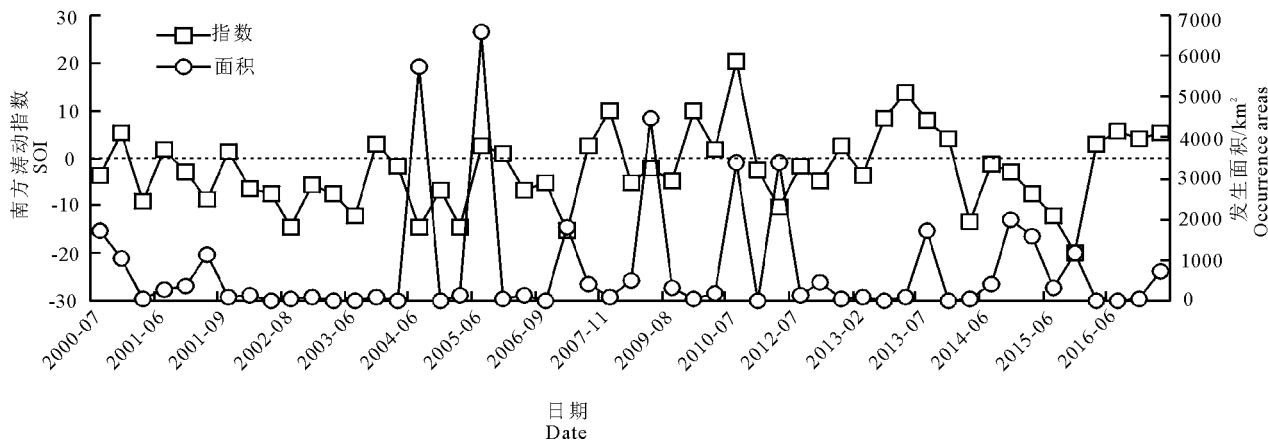


图 4 2000 - 2016 年南方涛动指数与赤潮发生面积的逐月变化

Fig.4 Monthly fluctuation of the Southern Oscillation Index (SOI) and occurrence area of red tide from 2000 to 2016

2.5 污染物入海通量

渤海沿岸经济发达,人口密度大,每年都有大量陆源污染物尤其是氮磷营养盐和 COD 排海,造成水体高度富营养化,为植物性赤潮爆发提供了物质基础(图 5)。

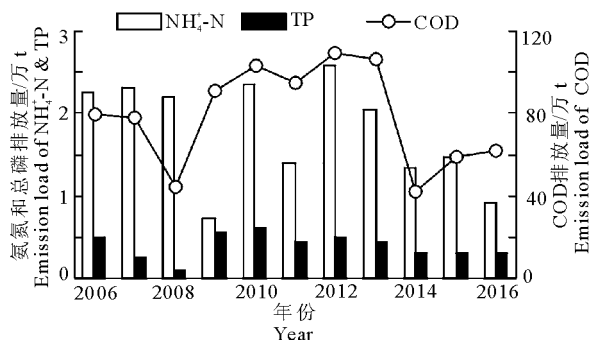


图 5 2006 - 2016 年渤海主要污染物入海通量

Fig.5 Flux of major pollutants into Bohai Sea from 2000 to 2016

3 讨论

3.1 温度和营养盐对赤潮爆发及优势种演替影响

温度是一切酶促反应的限制性因子,水温变化直接影响着浮游生物的生长代谢。有研究证实,每种浮游藻类都有其温度生态幅,在达到最适温度前细胞的生长率会随温度升高而增大,因此温度被看做影响海洋浮游植物现存量和群落结构最重要的环境要素,它可以在不同时空尺度上调控赤潮爆发及优势种的生态演替(陈艳拢等,2009)。丁光茂和张树峰(2018)发现 22~25℃ 是米氏凯伦藻赤潮爆发的最适温度;郝艳菊和唐丹玲(2010)指出温度是大亚湾海域 1982 - 2004 年浮游植物群落结构变化的主导因素;而杨清良和林更铭(2007)研究认为温度

可以直接影响不同赤潮生物的聚群结构。本研究发现,温度是影响渤海赤潮发生季节差异的决定性因子,赤潮在水温较高的 5 - 8 月发生最为频繁,而在 2 - 4 月和 11 月的发生频次极低,在低温的 1 月和 12 月甚至没有记录。赤潮优势种的出现频次也因其生态习性的差异直接受到温度制约,作为渤海重要的赤潮生物球形棕囊藻和多纹膝沟藻,由于其偏好在低温环境下生长,使得棕囊藻和膝沟藻赤潮绝大多数发生于水温相对较低的 10 月,而夜光藻因其较强的适温性在多数月份均有爆发。

营养盐是浮游植物生长必需的生源要素,也是植物性赤潮爆发必不可少的条件(Fu et al, 2012; 郭术津等, 2014),海水中氮磷营养盐的浓度与比例能显著影响浮游植物群落结构和初级生产力的季节变化,也会调控浮游植物类群中硅藻与甲藻的细胞密度比,笔者早期的研究也验证了这一点(窦勇等, 2011; 窦勇, 2012)。有证据表明,甲藻对氮磷的储存能力明显高于硅藻,且高氮磷比或高氮硅比条件下甲藻对硅藻具有明显的竞争优势(吕颂辉和李英, 2006)。胡章喜等(2008)研究结果证实,当 N : P 介于 0~100 : 1 时,3 种赤潮微藻的生长速率与营养盐浓度的关联度大于氮磷比,其中东海原甲藻和球形棕囊藻在贫磷条件下的生长速率显著低于富磷条件,而尖刺拟菱形藻在贫磷条件下可保持较高的生长速率;另外,有学者认为营养盐的形态和比例会对赤潮微藻的产毒过程造成影响(Glibert et al, 2013);高春蕾等(2017)发现,相较于温度,营养盐限制对网状原甲藻产生虾夷扇贝毒素(YTXs)的影响更为显著。另据排海营养盐相对含量计算水体氮磷比,发现氮磷比呈逐年下降趋势,水体逐渐由磷限制

转变为氮限制,甲藻的竞争优势不断削弱,造就了赤潮生物由甲藻占绝对优势向甲藻、硅藻、金藻共存的生态演替过程。

3.2 地理环境和水文条件对赤潮爆发的影响

渤海是我国北方的半封闭型内海,水深较浅,表层流速和潮差较小,潮致余流作用较弱,与外海的水体交换能力差,污染物不易扩散(穆迪,2011)。秦皇岛新开河口、唐山京唐港、辽宁绥中芷锚湾和天津港等赤潮高发区,都是环渤海重要的城市和港口,每年有大量的污染物随地面径流入海,同时为了防风避浪修建了大量构筑物,进一步削弱了水动力,降低了污染物的净化能力,因此高通量的陆源污染物和弱化的水动力条件相互叠加,在其它环境条件适宜的时候很容易诱发赤潮灾害。

河北黄骅和曹妃甸近岸由于进行了高强度的围填海活动,岸线多被裁弯取直,水体扩散条件进一步恶化,所以也成为赤潮频发的区域。山东省长岛县是我国著名的海岛县,位于黄渤海交汇处,由32个岛屿、66个明礁以及8700 km²的海域组成。这些海岛距大陆较近,易受陆源污染物影响,而且区域内海水养殖业发达,养殖污染严重,因此在环境条件适宜时也极易爆发赤潮。

3.3 全球气候事件对赤潮爆发的影响

一般来说,持续出现SOI低值对应着较强的厄尔尼诺现象,而较高的SOI则意味着拉尼娜现象的出现(冯士箝等,1999)。ENSO循环通过扰动夏季西南季风和冬季东北季风的转换影响渤海海水表面温度、降水、环流,使区域气候和水文特征发生变化,进而改变赤潮的爆发条件。

本研究发现SOI和赤潮发生面积呈显著负相关,即SOI越低、厄尔尼诺效应越强、赤潮发生面积越大,这与其他学者得出的结论不一致(何春良和杨红,2009;杨红和何春良,2009),这有可能是因为本研究使用SOI的逐月数据、而其他学者使用SOI的年度数据所致。目前,对于ENSO事件与海洋赤潮的关联研究才刚刚起步,而且大多局限在统计分析角度,关联背后耦合的物理机制一直未得到圆满解释。因此,今后的研究方向应聚焦于探索ENSO事件对赤潮爆发的作用机理。

4 结论

(1)在时间尺度上,渤海赤潮高发期为5-8月,2-4月和11月发生频次较低。在空间分布上,赤潮集中发生在河北秦皇岛-唐山-辽宁绥中近岸、辽

宁营口鲅鱼圈附近以及渤海湾近岸海域,尤以秦皇岛新开河口、唐山京唐港、辽宁绥中芷锚湾和天津港的爆发频次最高。

(2)共检出赤潮生物40种,包括甲藻18种、硅藻18种、金藻2种、褐胞藻1种以及1种原生动物,其中甲藻门的夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)和亚历山大藻(*Alexandrium* sp.),金藻门的球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)以及硅藻门的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、海链藻(*Thalassiosira* sp.)和角毛藻(*Chaetoceros* sp.)是渤海赤潮爆发频次较高的优势种。

(3)渤海赤潮生物存在着明显的生态演替现象,2000-2003年夜光藻和硅藻门微藻占绝对优势,2004-2007年逐渐演替为球形棕囊藻和甲藻门微藻,而2012-2016年夜光藻、中肋骨条藻和抑食金球藻成为优势种。

(4)温度和营养盐结构对赤潮爆发及其优势种演替起到关键作用,高通量的陆源污染物与弱化的水动力相互叠加为诱发赤潮提供了条件,而厄尔尼诺效应强度与赤潮发生面积呈显著正相关。

参考文献

- 曹西华,宋秀贤,俞志明,2004. 改性粘土去除赤潮生物及其对养殖生物的影响[J]. 环境科学,25(5):148-152.
- 陈艳艳,赵冬至,杨建洪,等,2009. 赤潮藻类温度生态幅的定量表达模型研究[J]. 海洋学报,31(5):156-161.
- 程超,白敏冬,郑琪琳,等,2016. 羟基自由基杀灭压载水中有毒赤潮物种的生物有效性研究[J]. 海洋学报,38(2):131-137.
- 丁光茂,张树峰,2018. 2012年三沙湾米氏凯伦藻赤潮的生态特征及成因分析[J]. 海洋学报,40(6):104-112.
- 窦勇,唐学玺,杨震,等,2011. 山东近海黄海段营养盐结构对初级生产力的影响研究[J]. 海洋环境科学,30(2):177-181.
- 窦勇,2012. 基于RS、GIS的调查资料的青岛市海岸带生态系统健康综合评价[D]. 青岛:中国海洋大学.
- 冯士箝,李凤岐,李少菁,1999. 海洋科学导论[M]. 北京:高等教育出版社.
- 高春蕾,孙萍,贾智慧,等,2017. 温度和营养盐限制对网状原角藻生长与产毒的影响[J]. 生态学报,37(12):4217-4226.
- 郭木津,李彦超,张翠霞,等,2014. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析[J]. 海洋通报,33(1):95-105.
- 何春良,杨红,2009. 我国海域赤潮时空分布及其与厄尔尼诺

- 的关系[J]. 上海海洋大学学报, 18(2): 206-211.
- 郝彦菊, 唐丹玲, 2010. 大亚湾浮游植物群落结构变化及其对水温上升的响应[J]. 生态环境学报, 19(8): 1794-1800.
- 贺青, 许昆灿, 吴省三, 等, 2008. 浮游植物多样性与表观增氧量的关系及其在赤潮预警中的应用[J]. 海洋学报, 30(2): 111-116.
- 胡章喜, 徐宁, 李爱芬, 等, 2008. 氮磷比率对 3 种典型赤潮藻生长的影响[J]. 水生生物学报, 32(4): 482-487.
- 暨卫东, 周秋麟, 霍文冕, 等, 2005. 赤潮多发区塔玛亚历山大藻的麻痹性贝毒预警值研究[J]. 海洋学报, 27(5): 131-136.
- 江天久, 佟蒙蒙, 齐雨藻, 2006. 赤潮的分类分级标准及预警色设置[J]. 生态学报, 26(6): 2035-2040.
- 匡翠萍, 谢华浪, 苏平, 等, 2016. 基于 FBM 法追踪秦皇岛海域赤潮迁移扩散[J]. 中国环境科学, 36(8): 2505-2515.
- 李雪丁, 2012. 福建沿海近 10a 赤潮基本特征分析[J]. 环境科学, 33(7): 2210-2216.
- 李志林, 周艳蕾, 王雪景, 等, 2017. 尿素对中肋骨条藻与米氏凯伦藻生长的影响[J]. 生态学报, 37(9): 3193-3200.
- 刘录三, 李子成, 周娟, 等, 2011. 长江口及其邻近海域赤潮时空分布研究[J]. 环境科学, 32(9): 2497-2504.
- 刘霜, 张继民, 张洪亮, 等, 2014. 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, 35(4): 43-47.
- 吕颂辉, 李英, 2006. 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, 6(3): 439-444.
- 穆迪, 2011. 渤海湾营养盐对浮游生态动力学特性影响研究[D]. 天津: 天津大学.
- 宋伦, 吴景, 李楠, 等, 2018. 辽东湾毒害微藻潜在风险分布及环境关联[J]. 中国环境科学, 38(8): 3049-3059.
- 宋南奇, 王诺, 吴暖, 等, 2018. 基于 GIS 的我国渤海 1952-2016 年赤潮时空分布[J]. 中国环境科学, 38(3): 1142-1148.
- 孙颖颖, 刘筱潇, 王长海, 2010. 浒苔提取物对 4 种赤潮微藻生长的抑制作用[J]. 环境科学, 31(6): 1662-1669.
- 王洪亮, 俞志明, 宋秀贤, 等, 2010. 改性小麦秸秆去除赤潮异弯藻的实验研究[J]. 环境科学, 31(2): 296-300.
- 王修林, 李雁宾, 龚良玉, 等, 2006. Gemini1231 双季铵盐选择性抑制赤潮生物生长的实验[J]. 环境科学, 27(5): 862-868.
- 王艳, 齐雨藻, 李韶山, 2007. 球形棕囊藻生长的营养需求研究[J]. 水生生物学报, 31(1): 24-29.
- 吴萍, 俞志明, 2007. 有机改性黏土对赤潮藻絮凝沉降的动力学研究[J]. 环境科学, 28(7): 1518-1523.
- 吴在兴, 2013. 我国典型海域富营养化特征、评价方法及其应用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所.
- 杨红, 何春良, 2009. 我国海域赤潮发生与海温及厄尔尼诺的相关分析[J]. 海洋湖沼通报, (2): 1-6.
- 杨清良, 林更铭, 2007. 厦门海域浮游植物夏季赤潮期间分布变异的多元分析[J]. 生态学报, 27(2): 465-476.
- 翟伟康, 许自舟, 张健, 2016. 河北省近岸海域赤潮灾害特征分析[J]. 海洋环境科学, 35(2): 243-251.
- Anderson D M, 1997. Turning back the harmful red tide[J]. Nature, 388: 513-514.
- Fu M Z, Wang Z L, Pu X M, et al, 2012. Changes of nutrient concentrations and N:P:Si ratios and their possible impacts on the Huanghai Sea ecosystem[J]. Acta Oceanol Sin, 31(4): 101-112.
- Glibert P M, Kana T M, Brown K, 2013. From limitation to excess: the consequences of substrate excess and stoichiometry for phytoplankton physiology, trophodynamics and biogeochemistry, and the implications for modeling[J]. Journal of Marine Systems, 125(9): 14-28.
- Wang J H, Wu J Y, 2009. Occurrence and potential risks of harmful algal blooms in the East China Sea[J]. Science of the Total Environment, 407(13): 4012-4021.

(责任编辑 万月华)

Frequency of Red Tides in Bohai Sea and the Influence of Environmental Factors (2000 – 2016)

DOU Yong, SHANG Jin-pei, SHAO Peng, GAO Jin-wei, JIA Xu-ying, ZHOU Wen-li

(Tianjin Key Lab for Aquaculture Ecology and Cultivation, Fisheries College of Tianjin Agriculture University, Tianjin 300384, P.R.China)

Abstract: The coastal region of Bohai Sea is a high incidence area for red tides. Frequent red tide occurrences threaten aquaculture and offshore tourism and caused great losses to the marine economy. In this study, we analyzed the spatial-temporal dynamics and ecological succession of the species responsible for red tides in Bohai Sea from 2000 to 2016 using historical statistics on red tides collected in Liaoning, Hebei and Shandong Provinces and Tianjin City. Correlations of red tides with temperature, nutrient levels, geographical and hydrological factors and the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) were also analyzed. The objectives were to reveal the regularity and influencing factors for red tides in Bohai Sea, and provide a basis for forecasting and preventing red tide disasters. There were four primary findings: (1) The peak period for red tides was May to August, and the frequency was relatively low from February to April and in November; (2) Red tides occurred most frequently in the offshore areas of Qinhuangdao-Tangshan-Suizhong, Bayuquan and Bohai Bay; (3) 40 organisms were associated with the Bohai Sea red tides, including 18 species of Dinoflagellate, 18 species of Diatom, 2 species of Chrysophyte and 1 species of Protozoa. *Noctiluca scintillans*, *Gymnodinium* sp., *Alexandrium* sp., *Phaeocystis globosa*, *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira* sp. and *Chaetoceros* sp. were the most dominant red tide species, and the ecological succession of red tide organisms was obvious; (4) Temperature and nutrient dynamics were crucial to red tide outbreaks and seasonal succession of red tide species. High pollutant loading, combined with low hydrodynamic forces were found to favor red tide outbreaks and there was a significant positive correlation between El Niño intensity and the areal extent of red tides ($P < 0.05$).

Key words: Bohai Sea; red tide; spatial-temporal dynamics; seasonal succession; influencing factors