

2001—2017年中国近海水域赤潮发生规律及其影响因素

张善发 王茜 关淳雅 沈小雪 李瑞利[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: lirui@pkusz.edu.cn

摘要 通过收集整理2001—2017年相关数据,对我国近海海域赤潮爆发规律及影响因素进行初步探究。结果表明,我国近海海域赤潮发生规律呈先增后减趋势,2001—2005年,近海赤潮面积和频次大幅度增加,2006—2017年则明显减少。2008—2017年,我国发生赤潮608次,引发赤潮的第一优势物种有65种。其中,东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)是引发赤潮次数最多的生物,共计106次。各海区赤潮的影响因素有差异:渤海区赤潮面积变化主要受营养盐和总氮影响,东海区赤潮面积和次数变化与营养盐、总氮、总磷和亚硝态氮显著相关,南海区赤潮面积变化与污染物入海量和COD_{cr}显著正相关($P < 0.05$)。为进一步减少赤潮爆发,提出我国近海海域赤潮防治建议:建设在线监测站点,采取因区制宜的管控措施,加强源头排污管理,完善应急响应体系,进行海洋生态修复。

关键词 赤潮; 爆发规律; 影响因素; 管理对策

Study on the Occurrence Law of Red Tide and Its Influencing Factors in the Offshore Waters of China from 2001 to 2017

ZHANG Shanfa, WANG Qian, GUAN Chunya, SHEN Xiaoxue, LI Ruili[†]

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;
[†] Corresponding author, E-mail: lirui@pkusz.edu.cn

Abstract By collecting and sorting the relevant data from 2001 to 2017, a preliminary study on the rules and influencing factors of red tide outbreaks in offshore areas of China was conducted. The results indicate that the occurrence pattern of red tide in the offshore areas of China increased firstly and then decreased. The area and frequency of red tide in China seas increased significantly from 2001 to 2005, while decreased significantly from 2006 to 2017. From 2008 to 2017, a total of 608 red tides occurred in China, and 65 species were the first dominant species that triggered red tides. *Prorocentrum donghaiense* was the organism that caused the most red tides, 106 times totally. The influencing factors of red tide in each sea area were different: the changes in red tide area in the Bohai Sea were mainly affected by nutrients and total nitrogen; the changes in area and frequency of red tide in East China Sea were significantly affected by nutrients, total nitrogen, total phosphorus, and nitrite nitrogen; the changes in the area of red tide in South China Sea were significantly positively correlated with pollutants entering the sea and COD_{cr} ($P < 0.05$). In order to further reduce red tide outbreaks, several suggestions were proposed for prevention and control of red tide in offshore areas of China: establish online monitoring stations; take control measures based on local conditions; strengthen source pollution management; improve emergency response systems; carry out marine ecological restoration.

Key words red tide; rules of explosion; influencing factors; management countermeasures

21世纪以来,我国沿海地区人类活动日益增强,导致沿海地区赤潮灾害频发^[1-3],已成为海洋地区主要的生态灾害之一^[1]。赤潮是在一定的环境条件下,海洋中的某些浮游微藻、原生动物或细菌等在短时间内突发性链式增殖或高度聚集,从而引起水色变化的灾害性海洋生态异常现象^[4-7]。赤潮会导致鱼类和贝类等海洋生物大量死亡^[8-12],对海洋生态和养殖业造成威胁。此外,有害藻类产生的藻毒素会在鱼类体内积累,通过食物链最终危害到人类的身体健康^[13-14]。20世纪90年代起,我国每年大面积的赤潮爆发已造成数十亿元的经济损失^[5,10]。

我国近海主要分为渤海区、黄海区、东海区和南海区四大海域,沿海区域具有经济发达、人口稠密和污染物排放量大等特点^[1,15],对海洋的生态环境造成较大压力^[16-17]。人类活动排放的废水主要包括工业废水、农业施肥过程中的废水、城市生活污水和水产养殖废水等^[7],其中含高浓度的COD和N、P等营养物质,会通过河流汇入海洋,是近海海域发生富营养化,从而引发赤潮的主要原因^[18]。近年来,我国沿海地区的赤潮问题受到越来越多的关注,相关的初步研究主要涉及部分海区赤潮发生时间,赤潮藻种群组成以及水体营养盐含量特征等方面。就部分海区赤潮发生时间而言,我国东海赤潮在春季和夏季出现明显的峰值特征^[19],华南近海赤潮高发期集中在春季^[20],温州近岸海域的赤潮集中发生在夏季^[21]。就引发赤潮的优势物种而言,广东汕尾周边海域赤潮的主要优势藻种为球形棕囊藻^[22];香港地区周边海域的赤潮藻主要有鞭毛藻和硅藻^[23];东海海域的赤潮藻主要有东海原甲藻^[24]。就水体中营养盐含量特征而言,广东深圳大鹏湾水体中可溶性无机氮和无机磷含量均超过富营养阈值;广东湛江港内水体中可溶性无机氮和无机磷含量长期处于赤潮富营养阈值^[20];位于长江口的嵊泗马鞍列岛周边水体无机氮和有机污染物含量超标,容易引发赤潮^[25];陆地向黄渤海输入氮的持续增加,导致赤潮发生频率和面积显著增加^[26]。因此,氮磷含量不同是造成赤潮种类差异较大的重要因素。为了全面地理解我国沿海赤潮问题,并提出有针对性的防治建议,有必要从时空分布特征、赤潮藻种群组成特征以及水体富营养化特征3个方面系统地探究我国近海主要海域赤潮爆发的规律,并解析其主要影响因素。

本研究通过收集整理海洋环境公报数据,探究21世纪以来我国近海赤潮爆发规律,分析赤潮爆发的相关因素,并提出赤潮防治建议。

1 研究方法

1.1 数据来源

本研究所用数据来源于《中国海洋环境状况公报》(2001—2017)、《北海区海洋环境公报》(2010—2017)、《东海区海洋环境公报》(2010—2017)和《南海区海洋环境状况公报》(2010—2016)。主要指标包括:1)赤潮相关指标(赤潮面积、赤潮次数和赤潮优势物种);2)污染物指标(COD_{cr}、营养盐、污染物入海量、总氮、总磷、氮磷比、亚硝态氮、硝态氮和氨氮);3)富营养化指标(各季节富营养化程度、各季节富营养化面积)。

1.2 数据处理与分析

本文采用Excel软件和SPSS软件对数据进行分析 and 制图,利用皮尔逊相关性分析法分析赤潮面积、赤潮次数分别与COD_{cr}、营养盐、污染物入海量、总氮、总磷、氮磷比、亚硝态氮、硝态氮和氨氮的相关性($P < 0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 近海海域赤潮的时空分布特征

如图1所示,2002—2017年,我国共发生赤潮1177次,涉及海域面积161526 km²。2001—2005年,全国海域范围内发生赤潮的面积大幅度增加,2006—2017年赤潮面积则呈明显减少的趋势。赤潮发生频次也与赤潮面积的变化基本上一致。

由图2可知,2002—2017年,我国东海区、南

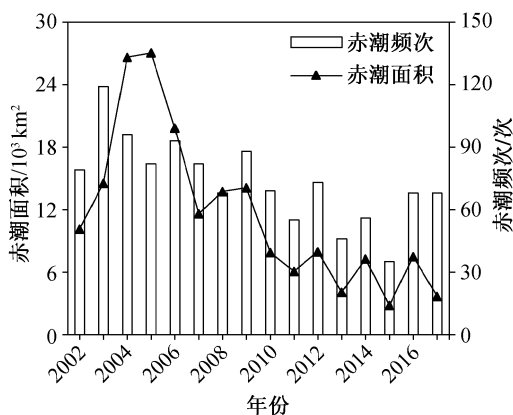


图1 2001—2017年全国赤潮频次和面积
Fig.1 Frequency and area of national red tides from 2001 to 2017

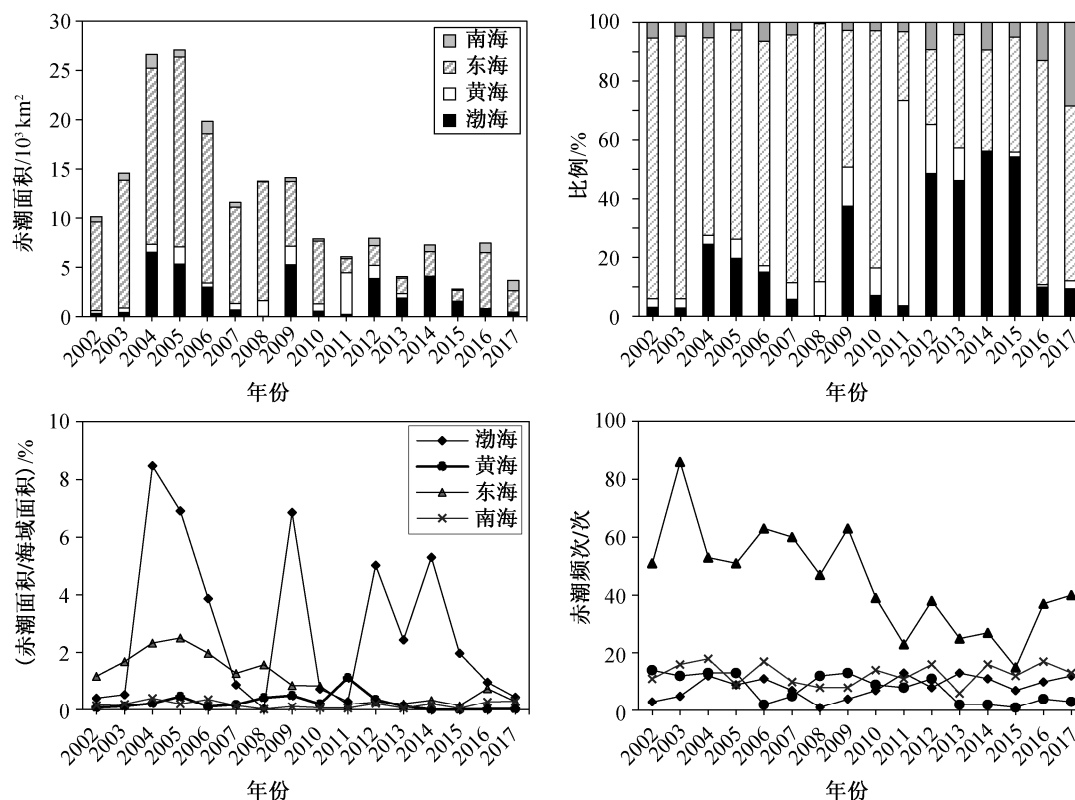


图2 2002—2017年各海区赤潮频次与赤潮面积所占比例

Fig. 2 Proportion of red tide frequency and red tide area in various sea areas from 2002 to 2017

海区、渤海区和黄海区分别发生赤潮 718 次、202 次、133 次和 124 次。东海区发生赤潮的频次远高于渤海区、黄海区和南海区。就时间变化趋势而言，东海区赤潮发生频次呈明显下降趋势，于 2015 年达到最低值，之后又有上升趋势；渤海区和南海区的赤潮频次无明显变化，黄海区的赤潮频次波动地下降。

2002—2017 年，我国赤潮累计影响海域面积为 161526 km^2 ，其中东海区、渤海区、黄海区和南海区分别有 103776 、 34729 、 13302 和 9719 km^2 海域受到影响。东海区每年的赤潮面积呈明显的下降趋势；黄海区的赤潮面积波动地上升；南海区和渤海区的赤潮面积变化无明显规律。

2009—2017 年，渤海区共发生赤潮 85 次，其中在天津海域和秦皇岛海域分别发生 21 次和 39 次。在秦皇岛海域发生的赤潮频次更多，影响的海域范围更广。随着时间的推移，渤海区的赤潮面积明显减少(图 3(a))。秦皇岛地区存在大量的陆源污染，加上港口运输的发展和海岸工程的建设，使得海水富营养化严重，这是该地区赤潮范围广、次数多、

持久性强的主要原因^[27]。

2012—2017 年，黄海区共发生赤潮 24 次，其中在山东海域和大连海域分别发生 9 次和 12 次。在大连海域发生的赤潮频次更多，但在山东海域的赤潮影响范围更广。随着时间的推移，黄海区的赤潮面积明显减少(图 3(b))。大连海上石油的开发及其发达的旅游业和海水养殖会产生大量入海污染物，促进赤潮的发生^[28]。

2011—2017 年，东海区赤潮发生频次和面积均无显著的变化趋势。该海域共累计发生赤潮 212 次，在上海海域、江苏海域、福建海域和浙江海域分别发生 6 次、7 次、56 次和 143 次。除上海海域在 2016 年爆发过两次大面积的赤潮外，浙江海域一直是发生赤潮频次最多和受影响海域面积最广的海域(图 3(c))。上海及浙江沿海地区港口运输业的大力发展，对海洋环境造成威胁^[29]。

2009—2016 年，南海赤潮年发生面积有增加的趋势。该海域共累计发生赤潮 113 次，在广西海域、海南海域和广东海域分别发生 4 次、13 次和 96 次。广东海域是整个南海区发生赤潮频次最多，

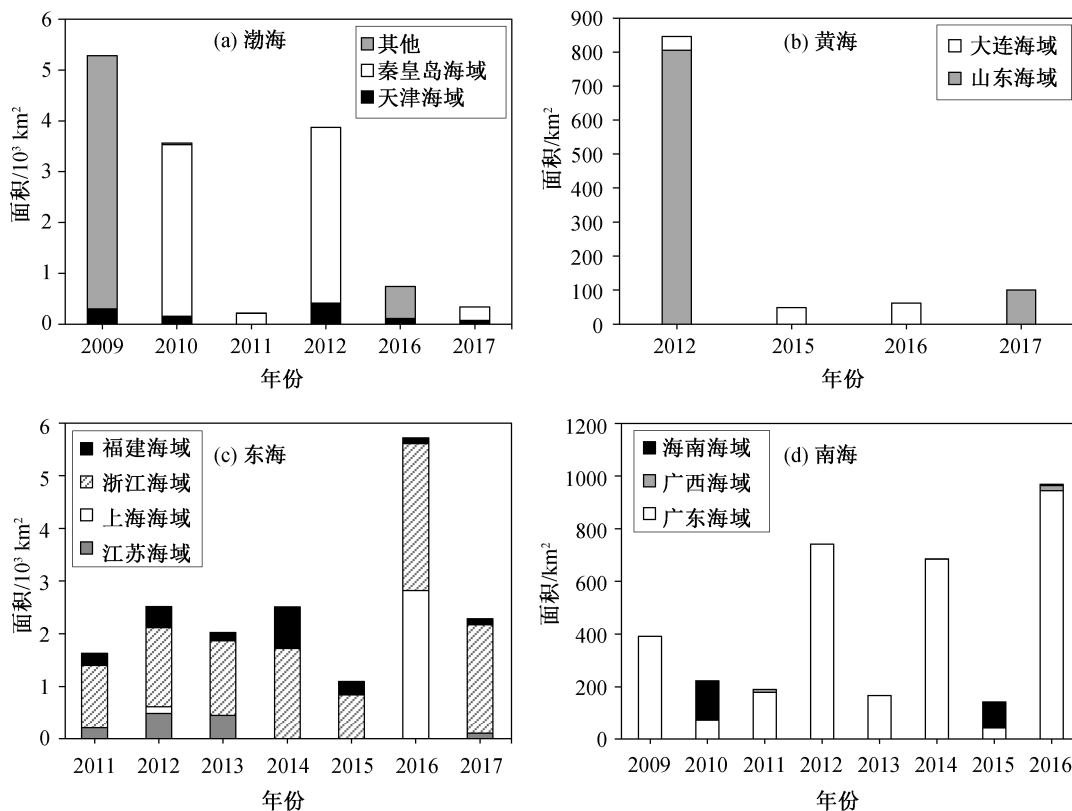


图3 各海区赤潮发生次数与面积统计
Fig. 3 Statistics on the number and area of red tide occurrence in various sea areas

受影响海域面积最广的海域(图3(d))。广东省人口密度大,经济发达,沿海地区大力发展养殖业、运输业和旅游业,入海污染物排放量巨大^[30-31],加上温度适宜,导致赤潮高频次和大面积爆发。

2.2 近海海域引发赤潮的种类分析

2008—2017年,我国发生的608次赤潮中,引发赤潮的第一优势物种有65种(表1)。其中,主要的优势物种有东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)、红色赤潮藻(*Akashiwo sanguinea*)、具齿原甲藻(*Prorocentrum dentatum*)、赤潮异湾藻(*Aeterosigma akashiwo*)、红色中缢虫(*Mesodiniu rubrum*)、锥状施克里普藻(*Scrippsiella trochoidea*)、球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)和多纹膝沟藻(*Gonyaulax polygramma*)。这11种物种共计引发赤潮次数465次,占比76.48%。部分藻类具有生物毒性,可导致鱼类和海洋无脊椎动物死亡,直接造成渔业经济损失。

由表1可知,2010年以前就出现的优势物种有夜光藻、中肋骨条藻、米氏凯伦藻、具齿原甲藻、

赤潮异湾藻和红色中缢虫等。2011年以后出现的新型优势物种有东海原甲藻、红色赤潮藻、锥状施克里普藻、球形棕囊藻和多纹膝沟藻等。东海原甲藻在2011年首次出现后,成为引发赤潮次数最多的生物,共引发106次。浮游植物群落的结构受环境因素控制,例如风速、光、温度、湍流、盐度、养分和生物相互作用等^[32-34],其中营养物质是影响藻类生长发育的重要因素^[35]。有研究表明,磷元素的吸收是东海原甲藻生长发育过程中非常重要的动力学阶段^[36]。随着经济的发展,入海污染物中磷元素的排放量增加是导致东海原甲藻爆发的重要诱因。

2.3 赤潮爆发的影响因素

2.3.1 海水富营养化

2014—2017年,渤海区四季的富营养化海域均以轻度富营养化为主。渤海区富营养化海域在秋季有面积增大的趋势。在春季和夏季有面积明显减少的趋势(图4)。早季(秋冬季)的富营养化面积要高于雨季(春夏季)。由于冬季降温,渤海区部分海域结冰影响检测,所以数据主要集中在春、夏、秋3个季节。

表 1 中国近海引发赤潮生物频次
Table 1 Frequency of red tide organisms in China's offshore waters

赤潮生物物种	统计年份									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
东海原甲藻 <i>Prorocentrum donghaiense</i>			18	13	7	16	23	4	15	10
夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	5	13	12	11	9	13	9	9	20	4
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	10	8	6	7	9	6	2	8	8	4
米氏凯伦藻 <i>Karenia mikimotoi</i>	3	7	4		19	2	4	3	1	12
红色赤潮藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>			1	3	3		4		17	
具齿原甲藻 <i>Prorocentrum dentatum</i>	22	5								
赤潮异湾藻 <i>Aeterosigma akashiwo</i>	2	4	2	2		1	3	2	4	1
红色中缢虫 <i>Mesodinium rubrum</i>	2	2	4	1	1	1			3	6
锥状施克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>			6		4			1	2	6
球形棕囊藻 <i>Phaeocystis globosa</i>			1	2		1	2	3	1	6
多纹膝沟藻 <i>Gonyaulax polygramma</i>			2		1		3	1	4	1
叉角藻 <i>Ceratium trichoceros</i>	2								2	2
链状裸甲藻 <i>Gymnodinium catenatum</i>			1						1	3
双胞胎沟藻 <i>Cochlodinium geminatum</i>				2	2	1				
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>				1	2	1			1	
抑食金秋藻 <i>Aureococcus anophagefferens</i>					2	1	1	1		
卡盾藻属 <i>Chattonella</i>	2	1		1						
血红哈卡藻 <i>Akashiwo sanguinea</i>	2	2								
棕囊藻属 <i>Phaeocystaceae</i>	2	2								
角毛藻属 <i>Chaetoceros</i>	2		2							
圆海链藻 <i>Thalassiosira rotula</i>	1				1				1	1
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>			1						1	2
多环旋沟藻 <i>Cochlodium polykrikoides</i>				1				2	1	
太平洋海链藻 <i>Thalassiosira pacifica</i>									3	1
菱形藻属 <i>Nitzschia</i>									2	2
底刺膝沟藻 <i>Gonyaulax spinifera</i>										4
尖刺菱形藻 <i>Nitzschia pungens</i>	3									
诺氏海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i>	2								1	
旋沟藻属 <i>Cochlodinium</i>		2			1					
裸甲藻 <i>Gymnodinium aerucinosum</i>		1	1	1						
具刺膝沟藻 <i>Gonyaulax spinifera</i>		1			1				1	
海洋卡盾藻 <i>Chattonella marina</i>			1				2			
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudonitzschia pungens</i>			1	1					1	
螺旋环沟藻 <i>Gyrodinium spirale</i>			1	2						
微小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>				1		1			1	
海链藻属 <i>Thalassiosira</i>		2								
柔弱菱形藻 <i>Nitzschia delicatissima</i>		2								
条纹环沟藻 <i>Gyrodinium instriatum</i>		1					1			

续表

赤潮生物物种	统计年份									
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
短角弯角藻 <i>Eucampia zoodiacus</i>				1		1				
古老卡盾藻 <i>Chattonella antique</i>				1					1	
塔玛亚历山大藻 <i>Alexandrium tamarense</i>					1				1	
链状亚历山大藻 <i>Alexandrium catenella</i>									2	
伊姆裸甲藻 <i>Gymnodinium impudicum</i>									1	1
日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>	1									
异甲藻 <i>Heterocapsa circularisquama</i>	1									
反曲原甲藻 <i>Prorocentrum moides</i>	1									
环沟藻属 <i>Gymnodinium</i>	1									
梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>		1								
新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>		1								
强壮前沟藻 <i>Amphidinium carterae</i>		1								
利马原甲藻 <i>Prorocentrum lima</i>			1							
隐藻门 <i>Cryptophyta</i>			1							
短凯伦藻 <i>Karenia brevis</i>				1						
柔弱根管藻 <i>Rhizosolenia delicatula</i>				1						
脆根管藻 <i>Rhizosolenia fragilissima</i>					1					
亚历山大藻属 <i>Alexandrium</i>					1					
暹罗角毛藻 <i>Chaetoceros siamense</i>					1					
大洋角管藻 <i>Cerataulina pelagica</i>						1				
离心列海链藻 <i>Centrifugally stragglers</i>							1			
锥状斯氏藻 <i>Scripsiella trochoidea</i>							1			
针胞藻 <i>Fibrocapsa japonica</i>								1		
浮动弯角藻 <i>Eucampia zodiacus</i>									1	
尖小原甲藻 <i>Prorocentrum minimum</i>									1	
环胺藻属 <i>Azspiracid</i>										1
春膝沟藻 <i>Gonyaulax vertor</i>										1

2014—2017年, 黄海区四季的富营养化海域均以轻度 and 中度富营养化为主。黄海区一年四季富营养化海域面积的变化规律为秋季>春季>夏季>冬季。旱季(秋冬季)的富营养化面积大于雨季(春夏季)。春、夏、秋3个季节富营养化的海域面积均存在下降趋势(图5)。由于冬季降温, 黄海区部分海域结冰影响检测, 所以数据主要集中在春、夏、秋三季。

2014—2017年, 东海区四季的富营养化海域变化规律为春季、夏季和秋季以中度和重度富营养化为主, 冬季以轻度 and 中度富营养化为主。东海区富

营养化海域面积的季节变化规律为冬季>秋季>夏季>春季。旱季(秋冬季)富营养化面积大于雨季(春夏季)。春季和夏季富营养化海域面积在增加, 冬季和秋季富营养化海域面积存在下降趋势(图6)。

2014—2017年, 南海区四季的富营养化海域变化规律为春季以轻度富营养化为主, 夏季以轻度 and 重度富营养化为主, 秋季以轻度 and 中度富营养化为主, 冬季以轻度富营养化为主。南海区一年四季富营养化海域面积的变化规律为春季、夏季和秋季的富营养化海域面积普遍大于冬季。旱季(秋冬季)的富营养化面积小于雨季(春夏季)。春季和秋季的富

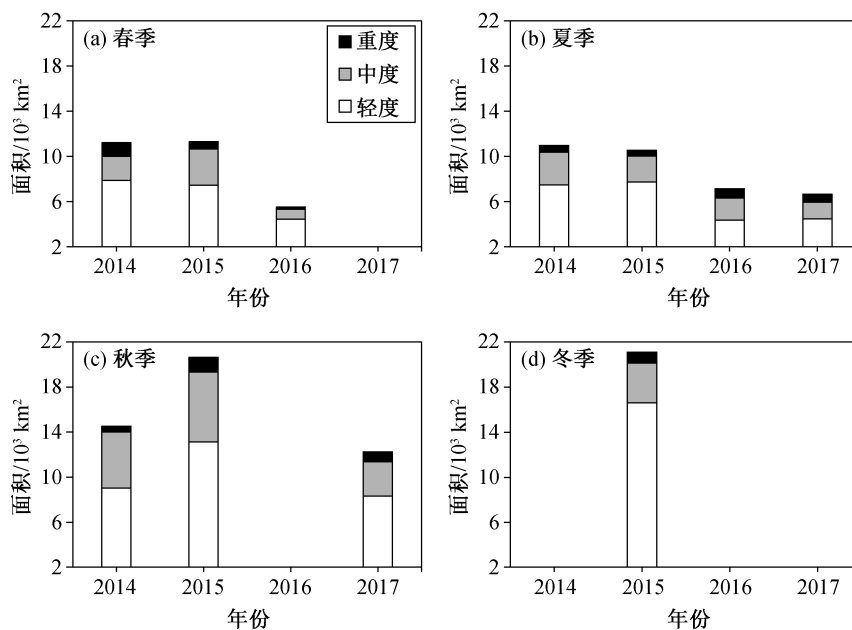


图 4 2014—2017 年渤海区富营养化情况

Fig. 4 Eutrophication in the Bohai Sea from 2014 to 2017

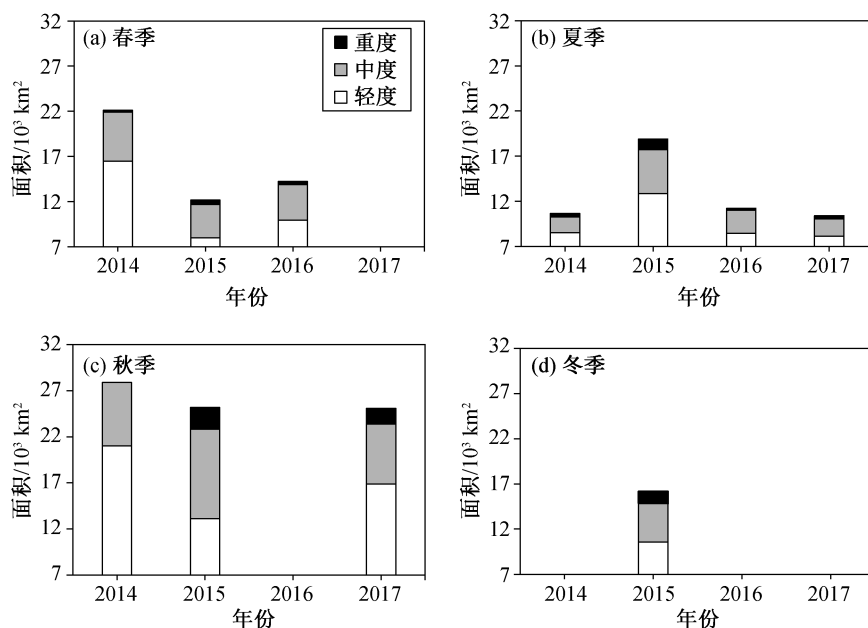


图 5 2014—2017 年黄海区富营养化情况

Fig. 5 Eutrophication in the Yellow Sea from 2014 to 2017

营养化海域面积呈波动性变化, 冬季和春季富营养化海域面积存在下降趋势(图 7)。这与邢素坤等^[37]对涠洲岛赤潮监控区的调查结果基本上一致, 富营养化在 4 月存在高值, 为浮游植物的增殖提供基础条件, 这是近年来涠洲岛多次发生赤潮的原因。南海区春、夏、秋三季的高富营养化海域面积及适宜

的水温也为赤潮爆发提供了先决条件。

2.3.2 入海污染物

2002—2017 年, 四大海域累计排放入海污染物 154002304.3 t, 其中东海区、渤海区、南海区和黄海区分别排放 116106979, 9730585, 27000066.5 和 1164673.8 t。长江、黄海、珠江和大沽河这 4 条河

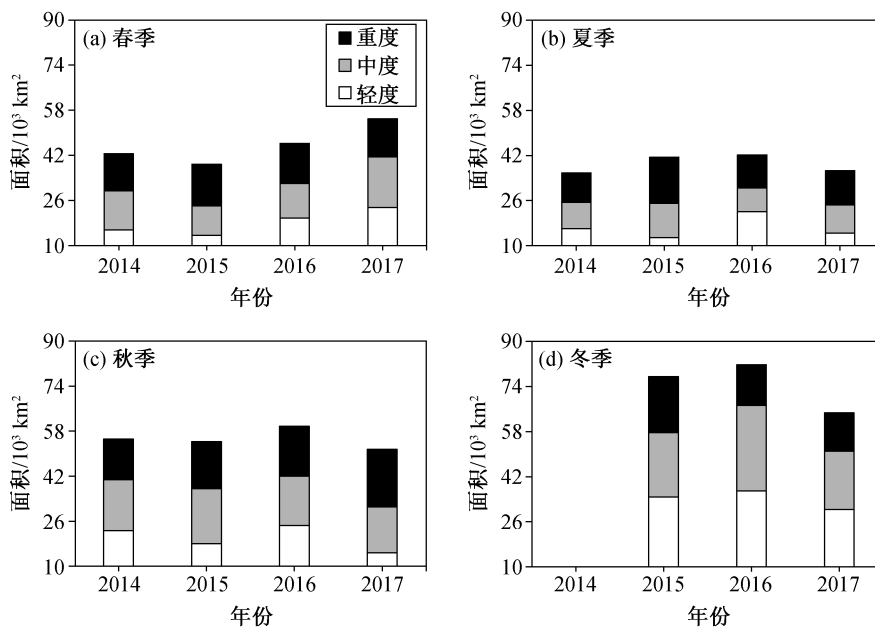


图6 2014—2017年东海区富营养化情况
Fig. 6 Eutrophication in the East China Sea from 2014 to 2017

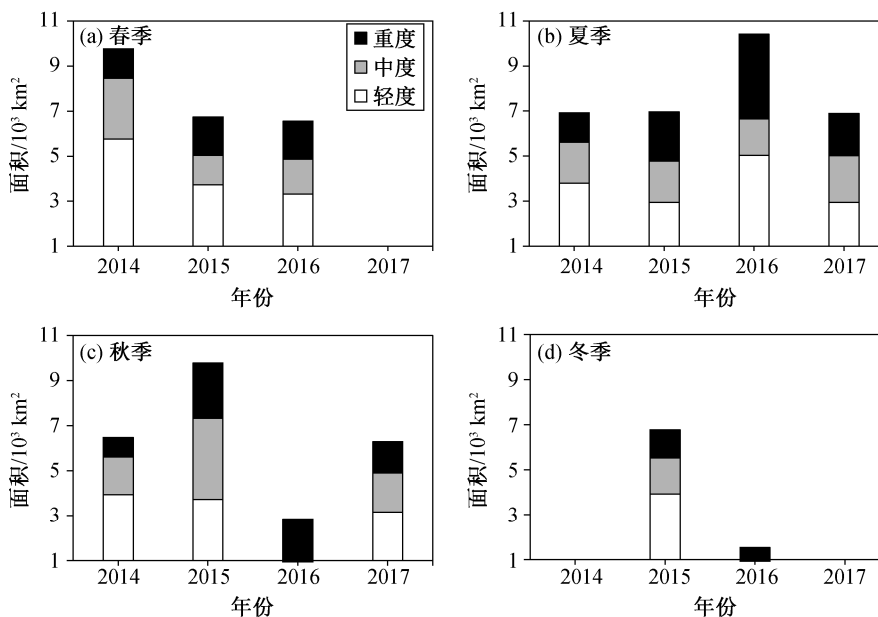


图7 2014—2017年南海区富营养化情况
Fig. 7 Eutrophication in the South China Sea from 2014 to 2017

流累计排放的入海污染物占四大海域排放的入海污染物比例分别为81.20%, 65.91%, 90.15%和20.82%。本研究选择这4条检测时段连续、排污量占比高的河流来分别代表四大海域的污染物入海情况。通过统计发现, 渤海和黄海排放的污染物量在逐年下降, 而东海区和南海区的排污量有增加趋势(图8)。覃仙玲等^[38]对广西附近海域主要入海河流的研究发

现, 入海污染物排放是广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素的主要来源。因此, 可以通过检测各海域的主要河流入海污染物来反映各海域的污染情况。

2.3.3 相关性分析

皮尔逊相关分析结果见表2。2002—2017年, 渤海区赤潮面积变化与营养盐和总氮显著正相关;

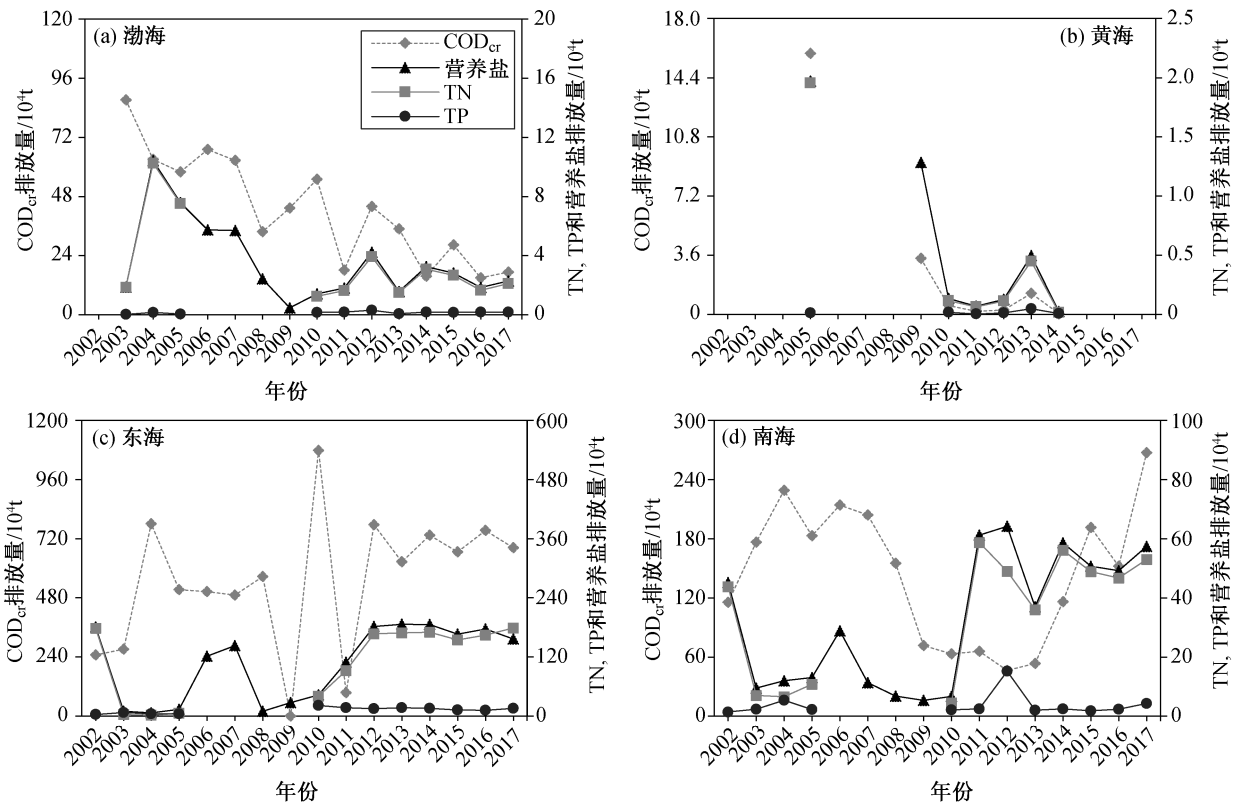


图 8 各个海区主要入海河流污染物排放情况

Fig. 8 Pollutant discharges from major sea rivers in various sea areas

表 2 各海区皮尔逊相关性分析结果

Table 2 Pearson correlation analysis results of various sea areas

影响因素	渤海		黄海		东海		南海	
	赤潮面积	赤潮次数	赤潮面积	赤潮次数	赤潮面积	赤潮次数	赤潮面积	赤潮次数
COD _{cr}	0.213	-0.295	0.095	0.517	-0.084	-0.372	0.578*	0.289
营养盐	0.599*	0.266	0.092	0.590	-0.687**	-0.563*	0.068	0.231
污染物入海量	0.271	-0.247	0.095	0.519	-0.248	-0.484	0.599*	0.364
总氮	0.902**	0.141	0.057	0.509	-0.792**	-0.601*	-0.186	-0.110
总磷	0.107	0.144	-0.460	-0.424	-0.769**	-0.600*	0.316	0.368
氮磷比	0.497	-0.261	0.211	0.612	-0.165	-0.052	-0.417	-0.348
亚硝态氮	0.511	-0.003	-0.191	-0.113	0.872*	0.483	-0.411	-0.089
硝态氮	0.613	-0.444	-0.264	-0.425	0.380	0.295	0.331	0.556
氨氮	0.719	-0.746	-0.338	-0.358	-0.240	0.443	-0.321	0.070

注: **在 0.01 水平(双尾)相关性显著, *在 0.05 水平(双尾)相关性显著。

东海区赤潮面积变化与营养盐、总氮、总磷和亚硝态氮显著相关, 赤潮次数与营养盐、总氮和总磷显著相关; 南海区赤潮面积变化则与污染物入海量和 COD_{cr} 显著正相关($P < 0.05$)。因此, 在不同海区应该采取不同的管理措施来控制赤潮面积。渤海区应优先控制总氮的排放量, 东海区应优先控制总氮和总磷的排放量, 南海区应优先控制 COD_{cr} 的排放

量, 东海区和渤海区在控制总氮和总磷的同时, 也应注意控制氮磷比。

3 赤潮管理对策与建议

为解决赤潮问题, 2009—2017年各海区实施不同的管理政策(表 3)。通过对赤潮爆发特征及其影响因素的分析, 并参考之前的部分政策, 我们提出

表 3 2009—2017 年各海区管理政策
Table 3 Management policies of each sea area from 2009 to 2017

海区	政策	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
北海	加强监管			√	√	√		√	√	√
	风险防控			√		√	√	√		
	技术创新			√		√	√		√	
	生态建设			√	√	√	√	√	√	√
	其他措施	√	√	√	√	√	√	√	√	√
东海	加强监管	√	√		√	√	√	√	√	√
	风险防控								√	√
	技术创新					√	√	√	√	√
	生态建设				√	√	√	√	√	√
	其他措施	√	√	√	√	√	√	√	√	√
南海	加强监管									
	风险防控						√			
	技术创新									
	生态建设					√	√			
	其他措施	√	√	√	√	√	√	√	√	√

说明: 管理政策收集自《中国海洋环境状况公报》(2001—2017)、《北海区海洋环境公报》(2010—2017)、《东海区海洋环境公报》(2010—2017)和《南海区海洋环境状况公报》(2010—2016), 其他措施包括行政优化、加强法规建设、综合整治重污染海域以及开展试点示范区域建设等; 北海区包括渤海区和黄海区中北部。

以下管理建议。

1) 建设在线监测站点。在全海域内建立在线监测站点, 以期做到“联”、“防”、“控”三位一体。将全海域的实时监测数据联网, 方便统一管理, 并且能够对突发事件做出及时应对, 合理调配海洋管理资源。对大数据的分析讨论也有利于深入了解赤潮爆发机制。

2) 因区制宜的管控措施。在各海区应当采取相应的管控措施。林国红等^[39]在对渤海区赤潮发生的主要要素识别研究中发现, 赤潮发生关键的控制要素是水溶性氮、氮磷比和水溶性磷。覃仙玲等^[40]在探究钦州湾表层海水中总溶解态氮磷分布特征时发现, 水溶性氮和水溶性磷是导致该地区球形棕囊藻赤潮爆发的主要因素。本研究对 2001—2017 年我国近海海域污染物排放和赤潮爆发数据进行相关性分析后发现, 渤海区应优先控制总氮的排放量, 东海区应优先控制总氮和总磷的排放量, 南海区应优先控制 COD_{cr} 的排放量, 东海区和渤海区在控制总氮和总磷的同时, 也应注意控制氮磷比。应建立污水处理厂, 在不同地区有针对性地对生活污水进行处理。

3) 加强源头排污管理。水体富营养化是赤潮发生的物质基础, 控制入湾水体污染水平刻不容缓^[41]。本文研究结果表明, 黄河、长江和珠江入海污染物排放量占该海域入海污染物排放总量的 60%~90%。政府应加强控制这 3 条主要河流流域内企业的排污量, 可采取“排污许可证”政策, 对企业每年的排污量进行限制。同时, 加强对沿海地区污染企业的管控, 让企业做到合理排污和达标排放。

4) 完善应急响应体系。建立健全的应急响应特别行动小组, 定期开展海上巡逻, 结合在线监测数据, 及早排查污染物违规排放, 迅速应对海洋突发事故, 将各类损失最小化。

5) 进行海洋生态修复。建立海洋生态湿地公园, 使得企业污水在排入海洋之前能够经过湿地的净化, 污水中的部分氮磷污染物被固定, 从而降低赤潮在近海爆发的几率。此外, 可以在海域中放养濒危海洋生物, 在保护物种多样性的同时净化海水, 为人类提供休闲场所。

4 结论

我国近海海域赤潮面积在 2001—2005 年大幅

度增加,在2006—2017年明显减少,赤潮发生的频次也与赤潮面积的变化基本上一致。各海域的赤潮变化规律与全国赤潮变化规律存在显著差异:东海区赤潮面积和频次呈下降趋势,但在2015年达到最低值之后又有上升趋势;渤海区和南海区的赤潮面积和赤潮频次无明显变化;黄海区的赤潮频次波动式下降,但赤潮面积却在波动式地上涨。

我国近海海域引发赤潮的第一优势物种有65种。其中,东海原甲藻是引发赤潮次数最多的生物,共计106次。其他主要优势物种包括夜光藻、中肋骨条藻、米氏凯伦藻、红色赤潮藻、具齿原甲藻、赤潮异湾藻、红色中缢虫、锥状施克里普藻、球形棕囊藻和多纹膝沟藻等。

各海区的赤潮变化规律分别与污染物入海量、 COD_{cr} 、营养盐、总氮、总磷和亚硝态氮等影响因素显著相关($P < 0.05$),且存在地域差异:渤海区赤潮面积变化与营养盐和总氮的量显著正相关;东海区赤潮面积变化与营养盐、总氮、总磷和亚硝态氮显著相关,赤潮次数变化与营养盐、总氮和总磷显著相关;南海区赤潮面积变化则与污染物入海量和 COD_{cr} 显著正相关。

针对上述现状,我们提出建议:建设在线监测站点,实施因区制宜的管控措施,加强源头排污管理,完善应急响应体系,进行海洋生态修复等。

参考文献

- [1] 李雪丁. 福建沿海近10 a赤潮基本特征分析. 环境科学, 2012, 33(7): 2210–2216
- [2] 窦勇, 高金伟, 时晓婷, 等. 2000—2013年中国南部近海赤潮发生规律及影响因素研究. 水生态学杂志, 2015, 36(3): 31–37
- [3] Hopkins E W. Hazard of “red tides”. New England Journal of Medicine, 1969, 281(1): 52
- [4] 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. 海洋与湖沼, 2017, 48(6): 1178–1186
- [5] 罗金福, 李天深, 蓝文陆. 北部湾海域赤潮演变趋势及防控思路. 环境保护, 2016, 44(20): 40–42
- [6] 石琛, 刘美玲, 王丽坤. 赤潮的产生和对环境的影响. 绿色科技, 2015(11): 210–213
- [7] Qu Dapeng, Yu Huaming, Sun Yuchen, et al. Numerical study on the summertime patches of red tide in the adjacent sea of the Changjiang (Yangtze) River Estuary, China. Marine Pollution Bulletin, 2019, 143:

242–255

- [8] Niu Zhiguang, Xu Weian, Na Jing, et al. How long-term exposure of environmentally relevant antibiotics may stimulate the growth of *Prorocentrum lima*: a probable positive factor for red tides. Environmental Pollution, 2019, 255(Part 1): 113149
- [9] Xiao Xi, Li Chao, Huang Haomin, et al. Inhibition effect of natural flavonoids on red tide alga *Phaeocystis globosa* and its quantitative Structure-Activity relationship. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(23): 23763–23776
- [10] 宋伶俐, 龙华, 余骏, 等. 赤潮对浙江省海洋渔业的危害及防治对策. 中国水产, 2010(5): 14–16
- [11] Wen Shiyong, Song Lili, Long Hua, et al. Nutrient-based method for assessing the hazard degree of red tide: a case study in the Zhejiang coastal waters, East China Sea. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(6): 2671–2678
- [12] 庞景贵, 周军, 康辰香, 等. 赤潮历史记载及其成因与危害. 海洋信息, 2011(4): 16–18
- [13] 齐丛飞. 我国海洋环境管理制度研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009
- [14] Weisberg R W, Liu Y G, Lembke C, et al. The coastal ocean circulation influence on the 2018 West Florida Shelf *K. brevis* red tide bloom. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2019, 124(4): 2501–2512
- [15] 洛昊, 马明辉, 梁斌, 等. 中国近海赤潮基本特征与减灾对策. 海洋通报, 2013, 32(5): 595–600
- [16] 董彬. 渤海污染的现状与对策分析. 生态科学, 2012, 31(5): 596–600
- [17] Amy D, Allan F, Molly N, et al. Red tide. The Science Teacher, 2019, 87(1): 35–41
- [18] Liu Lusan, Zhou Juan, Zheng Binghui, et al. Temporal and spatial distribution of red tide outbreaks in the Yangtze River Estuary and adjacent waters, China. Marine Pollution Bulletin, 2013, 72(1): 213–221
- [19] 郭皓, 丁德文, 林凤翱, 等. 近20 a我国近海赤潮特点与发生规律. 海洋科学进展, 2015, 33(4): 547–558
- [20] 易斌, 陈凯彪, 周俊杰, 等. 2009年至2016年华南近海赤潮分布特征. 海洋湖沼通报, 2018(2): 23–31
- [21] 郜钧璋, 刘亚林, 林义, 等. 近10年温州近岸海域赤潮灾害特征分析. 海洋湖沼通报, 2017(4): 86–90
- [22] 王永生, 黄建平. 海洋资源赤潮发生规律初探. 资源节约与环保, 2014(2): 157–159
- [23] Huang Jiansheng, Liu Hao, Yin Kedong. Effects of meteorological factors on the temporal distribution of

- red tides in Tolo Harbour, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 126: 419–427
- [24] 何烁, 楼琇林, 史爱琴, 等. 东海海域典型赤潮水体反射光谱模拟研究. *海洋与湖沼*, 2019, 50(3): 525–531
- [25] 蒋红, 胡益峰. 2010—2017年嵊泗马鞍列岛保护区海域水质调查与评价. *广东海洋大学学报*, 2020, 40(1): 38–43
- [26] 赵晨英, 臧家业, 刘军, 等. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应. *中国环境科学*, 2016, 36(7): 2115–2127
- [27] 张颖. 秦皇岛近岸海域环境保护对策探索. *产业与科技论坛*, 2014, 13(17): 225–226
- [28] 徐晗, 苏晓寒. 海洋环境污染经济损失评估方法——以大连漏油事件为例. *现代商业*, 2014(2): 279–280
- [29] 张玫. 辽浙广三省海洋产业结构变动及影响因素对比评析. *农村经济与科技*, 2013, 24(11): 182–183
- [30] 谭上进, 朱小山, 周进, 等. 深圳近岸海域环境状况近10a变化趋势. *海洋环境科学*, 2014, 33(1): 154–160
- [31] 肖凯恩. 珠江口东海域营养盐比例及其对藻类的影响. *环境保护科学*, 2012, 38(3): 14–19, 24
- [32] Jaschinski S, Flöder S, Petenati T. Effects of nitrogen concentration on the taxonomic and functional structure of phytoplankton communities in the Western Baltic Sea and implications for the European water framework directive. *Hydrobiologia*, 2015, 745: 201–210
- [33] Davidson K, Gowen R J, Harrison P J, et al. Anthropogenic nutrients and harmful algae in coastal waters. *Environment Management*, 2014, 46: 206–216
- [34] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal bloom and eutrophication: nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 2002, 25: 704–726
- [35] Shen A, Ishizaka J, Yang M, et al. Changes in community structure and photosynthetic activities of total phytoplankton species during the growth, maintenance, and dissipation phases of a *Prorocentrum donghaiense* bloom. *Harmful Algae*, 2019, 82: 35–43
- [36] Jiang J, Shen A, Wang H, et al. Regulation of phosphate uptake kinetics in the bloom-forming *dinoflagellates prorocentrum donghaiense* with emphasis on two-stage dynamic process. *Journal of Theoretical Biology*, 2019, 463: 12–21
- [37] 邢素坤, 李萍, 何志江, 等. 涠洲岛赤潮监控区营养盐变化及其结构特征. *广西科学*, 2019, 26(3): 308–314
- [38] 覃仙玲, 陈波. 广西沿海赤潮多发区高浓度氮磷营养元素来源探讨. *广西科学院学报*, 2018, 34(3): 222–227
- [39] 林国红, 董月茹, 李克强, 等. 赤潮发生关键控制要素识别研究——以渤海为例. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2017, 47(12): 88–96
- [40] 覃仙玲, 陈宪云, 赖俊翔, 等. 钦州湾表层海水中总溶解态氮磷分布特征及季节变化. *海洋环境科学*, 2017, 36(3): 349–353
- [41] 孙金水, Wai O W, 王伟, 等. 深圳湾海域氮磷营养盐变化及富营养化特征. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(6): 960–964