

2014年四十里湾一次海洋卡盾藻赤潮发展过程及其成因研究

王文君 (烟台市海洋环境监测预报中心, 山东烟台 264003)

摘要 [目的]研究2014年四十里湾一次海洋卡盾藻赤潮发展过程及其成因。[方法]根据2014年8月7日至9月28日烟台四十里湾海域一次海洋卡盾藻(*Chattonella marina*)赤潮的监测数据,对赤潮生消期间的水文、生物、化学要素进行了分析。[结果]赤潮面积约30 km²,赤潮生物最高密度达2 910 000个/L。该海域充足的氮营养盐,尤其是NH₄-N浓度的突然升高、相对较低的PO₄-P浓度、适宜的盐度和水温等理化环境及低光照、低气压的气象条件是此次赤潮发生的关键因子。[结论]该研究可为今后赤潮暴发防控提供借鉴。

关键词 海洋卡盾藻;四十里湾;赤潮;氮;磷

中图分类号 X834 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)15-0066-07

The Causes and Bloom Process of a Red Tide Species of *Chattonella marina* in Sishili Bay in 2014

WANG Wen-jun (Yantai Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center, Yantai, Shandong 264003)

Abstract [Objective] To study the causes and bloom process of a red tide species of *Chattonella marina* in Sishili Bay in 2014. [Method] According to the investigated data of a red tide caused by *Chattonella marina* in Yantai Sishili Bay from Aug 7 to Sept 28, 2014, the hydrometeorology, biology and chemistry parameters during the harmful algal bloom were analyzed. [Result] The red tide area was about 30 km² and the cell density of red tide algae was up to 2 910 000 cells/L. Adequate nitrogen nutrient, low PO₄-P concentration, low salinity, low light and favorable hydrometeorological conditions provided a good physical and chemical environment for the occurrence of red tide. [Conclusion] The study can provide reference for the prevention and control of *Chattonella marina* outbreaks in the future.

Key words *Chattonella marina*; Sishili Bay; Red tide; Nitrogen; Phosphorus

四十里湾是烟台市重要的港口航运、渔业、旅游水域,地处莱山区,向东为养马岛,向西临近芝罘湾,向北为湾口,水深0~15 m,为耳状半封闭浅水湾,水体交换较差。近年来,受人类活动(陆源排污、海水养殖等)影响,该海域环境质量下降,生态系统结构不稳定,1994—2012年有记录的赤潮灾害共计12次,2002年国家海洋局将四十里湾列为全国重点赤潮监控区之一。2014年8月27日至9月10日,四十里湾近岸海域出现水色异常,现场海水呈红褐色均匀分布,主要分布在养马岛东南部海域至逛荡河入海口临近海域,距岸约3 km,影响面积约30 km²。经鉴定,赤潮原因种是海洋卡盾藻(*Chattonella marina*),属于针胞藻纲(Chattonellales)、卡盾藻属(*Chattonella*),是世界上危害最为严重的有害赤潮原因种之一,在我国台湾、南海大鹏湾和黄海等海域都有过该种赤潮形成的报道,且近年来呈增加趋势,给当地养殖业造成了严重损失,其引发的大规模赤潮在烟台海域尚属首次记录。目前国内对海洋卡盾藻的研究比较有限。笔者通过对四十里湾此次海洋卡盾藻赤潮生消期间的水文气象、生物、化学等进行调查,对比2014年5—10月的监测数据,对赤潮的形成原因进行了分析,以期今后的防治工作提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 样品采集 分别在此次赤潮早期(2014年8月7日)、赤潮发生期(2014年8月28日)、赤潮末期(2014年9月7日)和赤潮结束后(2014年9月28日)进行了4次调查,并选取该次赤潮发生之前的一次水质(2014年7月31日)作为对照。调查站位如图1所示。其中,A₁~A₆站位为四十里湾赤潮监控区常规调查站位;B₁~B₄站位为赤潮发生期间开展应急监测增加的站位。样品的采集按照GB 17378—2007

《海洋监测规范》规定的方法执行^[1]。其中,水质采样:根据站位水深情况,按要求采集所需层次的水样;浮游植物:在赤潮发生区域不使用拖网,只采集表层水样,非赤潮区域用浅海浮游生物网(Ⅲ型)垂直拖网采样。

1.2 分析方法 按GB 17378—2007《海洋监测规范》^[1]规定的方法对水温、盐度、化学需氧量、营养盐、叶绿素-a、浮游生物等样品进行分析:①在调查海域现场测定水温,将采集的海水水样带回实验室分析化验;②使用SYA2-2型盐度计测定盐度;③海水水样用0.45 μm混合纤维素酯微孔滤膜过滤,用TU-1810S型紫外-可见分光光度计进行水质营养盐分析,硝酸盐氮(NO₃-N)采用铈-镉还原法测定,亚硝酸盐氮(HNO₂-N)采用盐酸萘乙二胺分光光度法测定,氨氮(NH₄-N)采用次溴酸盐氧化法测定,活性磷酸盐(PO₄-P)采用磷钼蓝分光光度法测定,活性硅酸盐(SiO₄-Si)采用硅钼蓝法测定,溶解态无机氮C(DIN)=C(NO₃-N)+C(NO₂-N)+C(NH₄-N);④使用碱性高锰酸钾法测定化学需氧量(COD_{Mn});⑤海水水样用0.45 μm混合纤维素酯微孔滤膜过滤后,用90%丙酮溶液萃取滤膜上的叶绿素-a,然后用分光光度法测定;⑥在现场采集浮游植物后,立即添加5%甲醛溶液固定,使用奥林巴斯CKX-41型倒置光学显微镜进行实验室鉴定和计数^[2]。

2 结果与分析

2.1 赤潮生物状况 赤潮早期(2014年8月7日),各调查站位优势种主要为尖刺拟菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*),只有北部湾顶海域(A₆站位附近海域)以旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)为优势种。由表1可知,近岸站位(A₁、A₂、A₃)浮游植物总密度和优势种密度明显较高,A₃站位已经出现了海洋卡盾藻(*Chattonella marina*),与该站位尖刺拟菱形藻细胞数量接近,均为该海域的优势种;2014年8月28日,四十里湾东侧靠近养马岛海域(37°27'52" N,

121°34'30" E)发生了局部赤潮,呈红褐色均匀分布,赤潮面积大约 30 km²。A₃ 和 B₁ 站位浮游植物密度异常高,优势种为海洋卡盾藻,其中 B₁ 站位海洋卡盾藻密度 2 910 000 个/L,已达到赤潮密度(>1 × 10⁶ 个/L)^[2], A₃ 站位海洋卡盾藻密度 983 920 个/L,也接近赤潮密度(>1 × 10⁶ 个/L)^[2],非赤潮海域站位浮游植物密度较 2014 年 8 月 7 日大幅下降,且优势种由体型较小的尖刺拟菱形藻演替为体型较大的塔状冠盖藻和旋链角毛藻;自 2014 年 8 月 28 日之后,海区以东风为

主,在风海流的作用下,赤潮逐渐向西扩散,海洋卡盾藻数量开始下降,面积不断缩小,至赤潮末期(2014 年 9 月 7—10 日),水色异常区域主要分布于逛荡河口至马山寨附近沿岸海域,该海域优势种仍然是海洋卡盾藻,但其藻种密度已低于赤潮基准浓度(>1 × 10⁶ 个/L),2014 年 9 月 10 日后,以中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻为主的小型硅藻开始大量繁殖并逐渐成为优势种,该次赤潮完全消退。

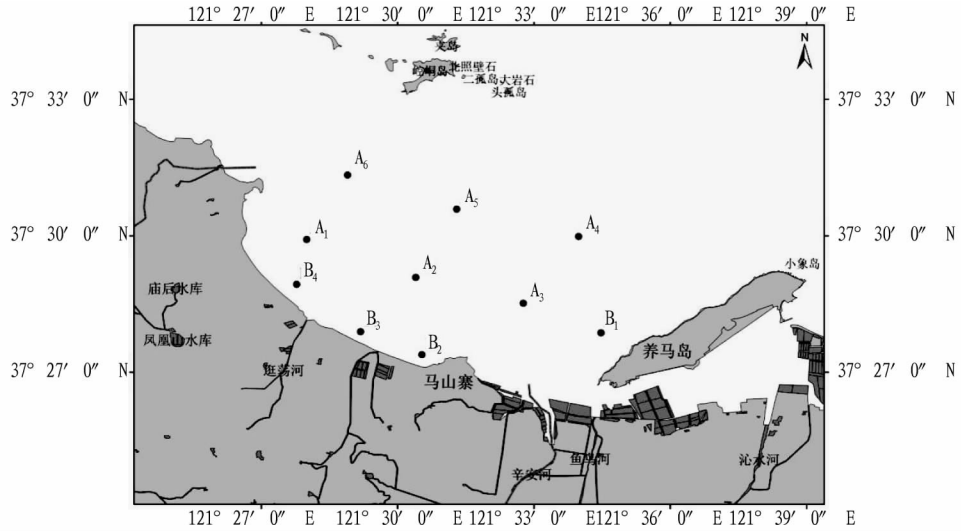


图 1 四十里湾赤潮发生海域调查站位

Fig. 1 Survey sites of the *Chattonella marina* occurrence area in Sishili Bay

表 1 赤潮期间各调查站位浮游植物密度及优势种状况

Table 1 phytoplankton density and dominant species at each survey sites during the red tide

个/L

日期 Date	站位 Sites	优势种 Dominant species	优势种密度 Dominant species density	总浮游植物密度 Total phytoplankton density
2014-08-07	A ₁	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	9 600	15 604
	A ₂	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	8 079	12 012
	A ₃	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	6 717	14 965
		海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	5 700	
	A ₄	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	4 380	7 678
	A ₅	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	2 072	3 149
2014-08-28	A ₆	旋链角毛藻 (<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	13 488	18 804
	A ₁	塔状冠盖藻 (<i>Stephanopyxis turris</i>)	192	881
	A ₂	旋链角毛藻 (<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	450	2 375
	A ₃	海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	98 000	983 920
	A ₄	塔状冠盖藻 (<i>Stephanopyxis turris</i>)	310	1 395
	A ₅	塔状冠盖藻 (<i>Stephanopyxis turris</i>)	477	2 133
2014-09-07	A ₆	旋链角毛藻 (<i>Chaetoceros curvisetus</i>)	416	2 304
	B ₁	海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	2 910 000	2 910 000
	A ₁	短角弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	2 288	5 340
	A ₂	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	422	1 665
	A ₃	短角弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	330	1 162
	A ₄	短角弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	3 029	6 674
2014-09-10	A ₅	短角弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	4 973	9 864
	A ₆	短角弯角藻 (<i>Eucampia zodiacus</i>)	5 794	12 270
	B ₁	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	1 036	2 011
	B ₂	海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	3 000	4 864
	B ₃	海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	5 000	6 772
	B ₄	海洋卡盾藻 (<i>Chattonella marina</i>)	6 500	8 524
2014-09-28	A ₁	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	240	504
	A ₂	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	260	426
	A ₃	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	158	492
	A ₄	尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia pungens</i>)	216	521
	A ₅	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	369	821
	A ₆	中肋骨条藻 (<i>Skeletonema costatum</i>)	396	849

2.2 盐度和水温变化状况 该次赤潮发生前(7月底至8月初),烟台市区连续阴天,光照不充足,天气潮湿闷热,沿海地区以东南风为主,风力不大,海况稳定。

各调查站位在2014年7月31日至9月28日平均水温变化经历了先升高后降低的过程,2014年7月31日至8月28日

水温不断升高,2014年8月28日达到最高点,之后水温逐渐降低(图2a)。2014年7月31日至9月28日各调查站位平均盐度变化较大,其中2014年7月31日至8月28日平均盐度逐渐升高,2014年9月3—5日市区出现连续降雨和大风天气,盐度再次降低,2014年9月7日后盐度有所回升(图2b)。

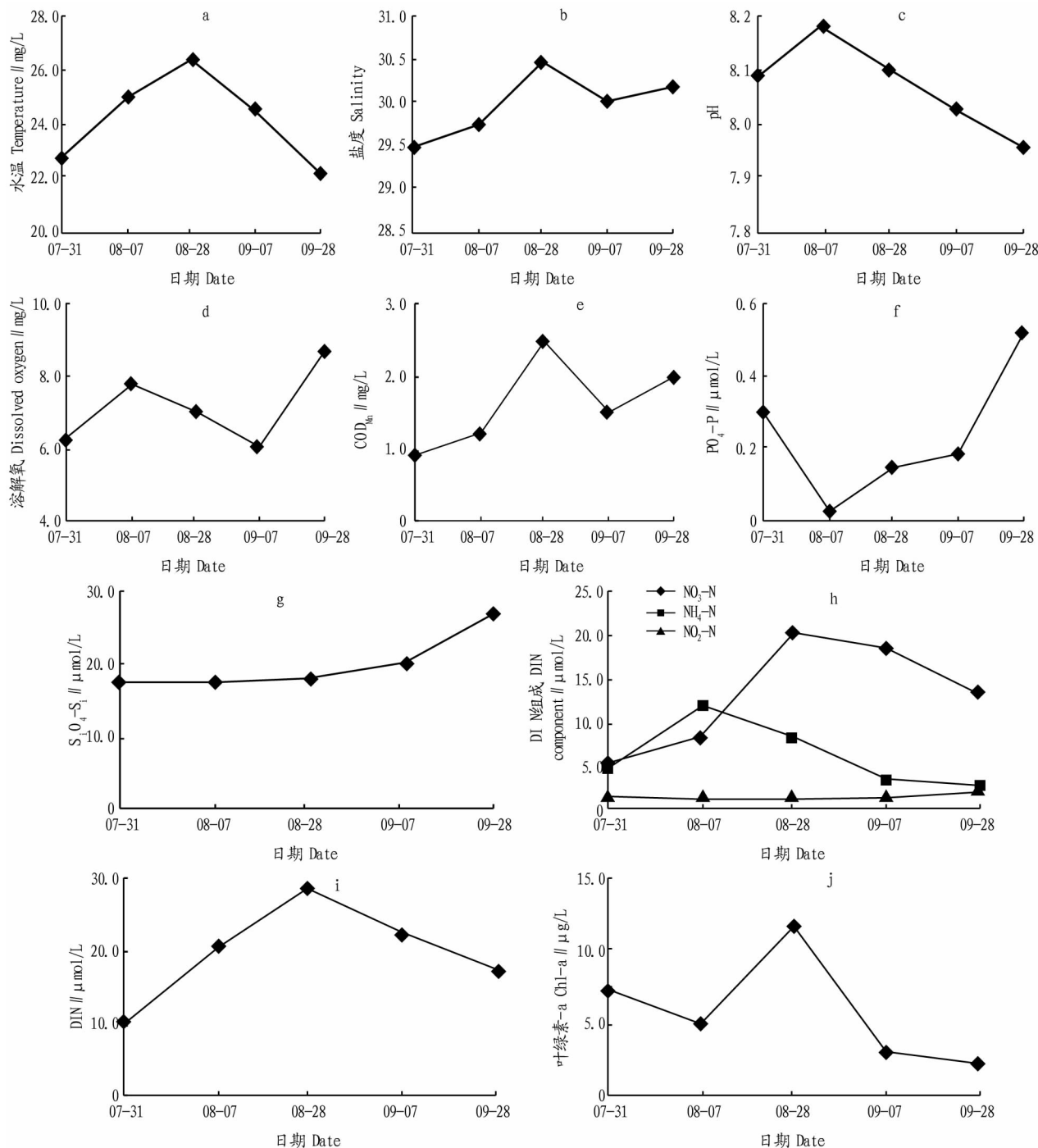


图2 2014年7月31日至9月28日四十里湾海区水质因子变化趋势

Fig. 2 Time series of water quality factors in Sishili Bay during 2014-07-31-09-28

2.3 水质因子变化状况 各监测站位在2014年8月7日至9月28日pH平均值为7.96~8.18(图2c)。溶解氧平均含量为6.11~8.70 mg/L,2014年8月7日至9月7日持续降低;2014年8月28日,在赤潮发生海域溶解氧含量爆发性增

高,A₃ 站位表层溶解氧含量最高,达到14.20 mg/L;2014年9月7日赤潮末期,藻体死亡腐败分解,大量消耗了水体中的溶解氧,监测海域溶解氧平均含量降至全年监测时间段内最低点;2014年9月28日赤潮结束后,溶解氧含量迅速升高

(图 2d)。COD_{Mn} 平均浓度为 1.23 ~ 2.50 mg/L, 2014 年 8 月 28 日赤潮发生期间 COD_{Mn} 平均浓度达到全年监测时间段内最高点, 之后有所下降(图 2e)。PO₄ - P 平均浓度为 0.02 ~ 0.51 μmol/L, 2014 年 7 月 31 日至 8 月 7 日, PO₄ - P 浓度明显降低, 8 月 7 日至 9 月 28 日, PO₄ - P 浓度逐渐升高(图 2f); SiO₄ - Si 平均浓度为 14.30 ~ 22.20 μmol/L, 2014 年 8 月 7 日至 9 月 28 日 SiO₄ - Si 浓度逐渐升高(图 2g)。

该次赤潮中, DIN 的浓度变化, 尤其是 NH₄ - N 和 NO₃ - N 的浓度变化应引起关注。调查海域 DIN 组成上主要以 NO₃ - N 为主, NH₄ - N 次之, NO₂ - N 含量最低, 但是, 2014 年 8 月 7 日, NH₄ - N 浓度在全年监测时段内唯一一次超过了 NO₃ - N 浓度(图 2h)。在时间变化上, 2014 年 7 月 31 日至 8 月 28 日各监测站位 DIN 平均浓度不断升高, 2014 年 8 月 28 日赤潮发生期间, DIN 平均浓度升至全年监测时间段内最大值 28.71 μmol/L, 达到第四类海水质量标准(GB 3097—1997), 至 2014 年 9 月 28 日 DIN 平均浓度降低(图

2i); 2014 年 7 月 31 日至 9 月 28 日 NO₃ - N 和 NH₄ - N 的变化趋势与 DIN 的趋势基本一致, 但是 NH₄ - N 的平均浓度降低趋势比硝酸盐略有提前, 表现为 NH₄ - N 平均浓度自 2014 年 8 月 7 日后处于持续降低趋势, 而 NO₃ - N 平均浓度自 2014 年 8 月 28 日后才开始降低; NO₂ - N 的浓度变化较为平稳, 处于缓慢上升趋势(图 2h)。

在空间变化上, 2014 年 8 月 7 日调查海域的 DIN 浓度范围为 16.43 ~ 23.83 μmol/L, 平均值 20.40 μmol/L, 高值区出现在四十里湾北部湾顶区域; 2014 年 8 月 28 日调查海域的 DIN 浓度范围为 22.53 ~ 36.26 μmol/L, 平均值 28.69 μmol/L, 高值区出现在四十里湾西北部湾顶和养马岛西北部海域; 2014 年 9 月 7 日调查海域的 DIN 浓度范围为 18.73 ~ 28.96 μmol/L, 平均值 22.80 μmol/L, 高值区出现在辛安河入海口附近海域; 2014 年 9 月 28 日调查海域的 DIN 浓度范围为 15.51 ~ 20.08 μmol/L, 平均值 17.45 μmol/L, 高值区出现在辛安河入海口至马山寨附近海域(图 3)。

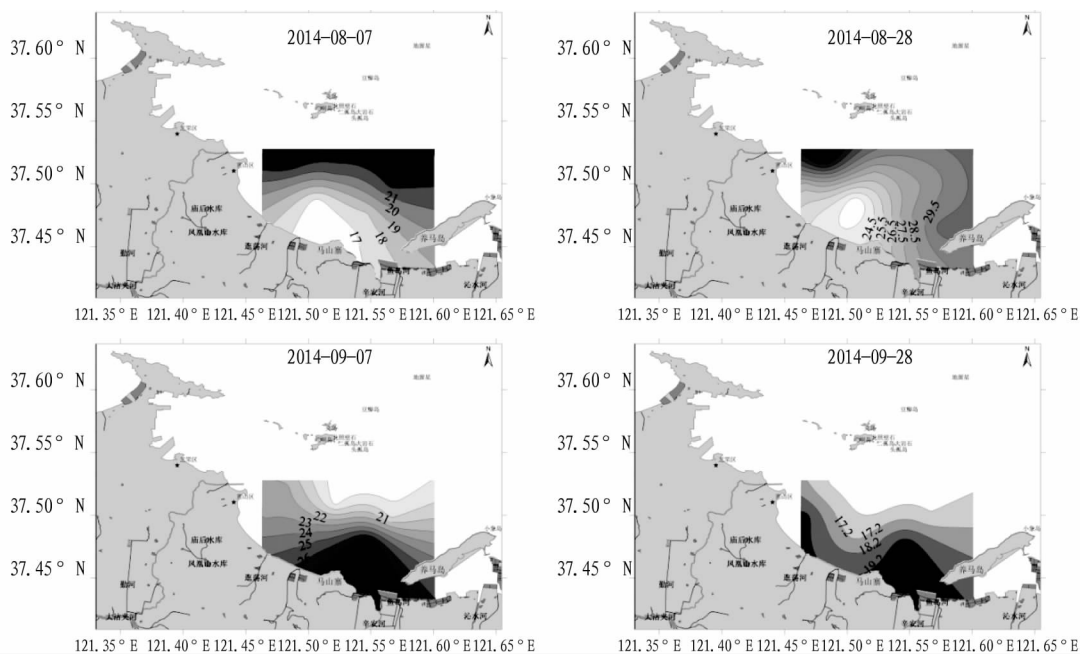


图 3 2014 年 8 月 7 日至 9 月 28 日 DIN 的平面分布(μmol/L)

Fig. 3 Spatial distribution of DIN during 2014-08-07—09-28

NO₃ - N 的空间变化趋势与 DIN 基本一致(图 4), 但是 NH₄ - N 的空间变化趋势与 DIN 和 NO₃ - N 有一定的差异(图 5), 2014 年 8 月 7 日调查海域的 NH₄ - N 浓度为 9.28 ~ 13.61 μmol/L, 平均值 11.68 μmol/L, 高值区出现在养马岛西侧至辛安河入海口附近海域; 2014 年 8 月 28 日调查海域的 NH₄ - N 浓度为 5.56 ~ 10.54 μmol/L, 平均值 8.09 μmol/L, 高值区出现在四十里湾西北部湾顶和养马岛西北部海域, 与同期 DIN 的分布相近, 但是相比 DIN 和 NO₃ - N, NH₄ - N 浓度水平明显下降; 2014 年 9 月 7 日调查海域的 NH₄ - N 浓度为 2.59 ~ 3.84 μmol/L, 平均值 3.18 μmol/L, 高值区移至辛安河入海口至马山寨附近海域和四十里湾西侧海域; 2014 年 9 月 28 日调查海域的 NH₄ - N 浓度进一步降低, 为 2.15 ~ 2.97 μmol/L, 平均值 2.54 μmol/L, 高值区移至四十里湾西

北部湾顶海域。

2014 年 8 月 7 日至 9 月 28 日, 调查海域叶绿素 - a 质量浓度经历了先增高后持续降低的过程(图 2i), 2014 年 8 月 28 日其平均浓度达到了全年监测时间段内最高浓度 11.60 μg/L; 在空间分布上, 2014 年 8 月 7 日叶绿素 - a 高值区位于 A₃ 站位附近海域, 临近辛安河入海口和养马岛西侧区域; 2014 年 8 月 28 日高值区位于养马岛西南侧海域, 也是该次赤潮始发海域; 2014 年 9 月 7 日高值区分布在湾顶西北侧海域, 而在逛荡河口至养马岛西侧湾底沿岸海域, 即该次赤潮波及海域, 随着赤潮的消退, 叶绿素 - a 质量浓度明显下降; 2014 年 9 月 28 日叶绿素 - a 质量浓度进一步下降, 高值区转移至马山寨至辛安河入海口沿岸海域(图 6)。

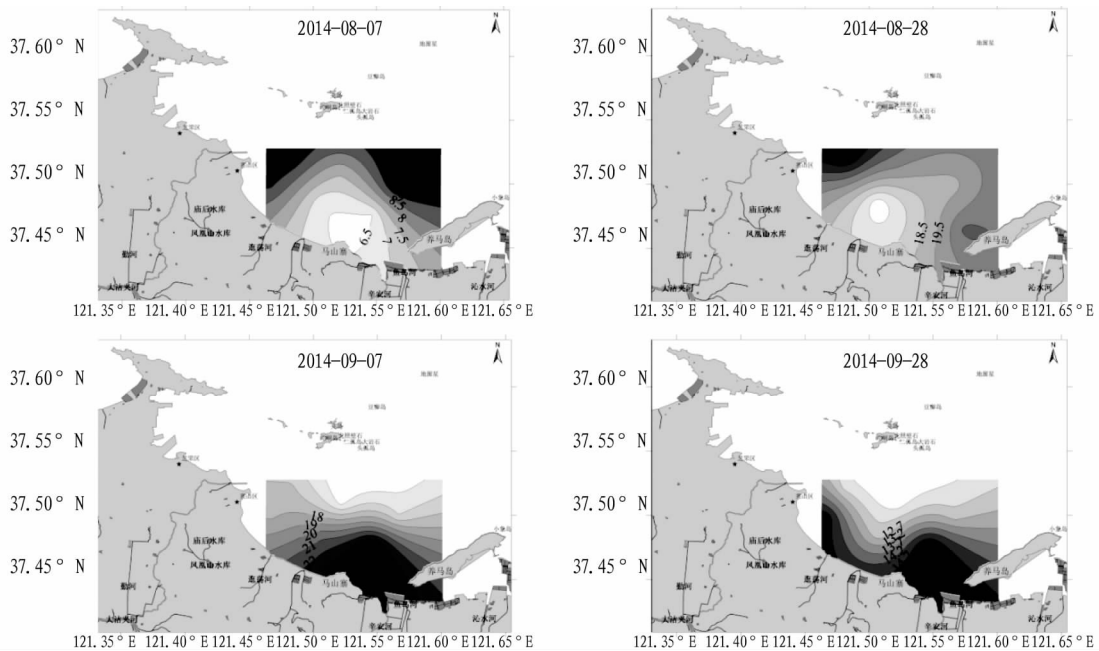


图4 2014年8月7日至9月28日 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平面分布($\mu\text{mol/L}$)

Fig. 4 Spatial distribution of $\text{NO}_3\text{-N}$ during 2014-08-07-09-28

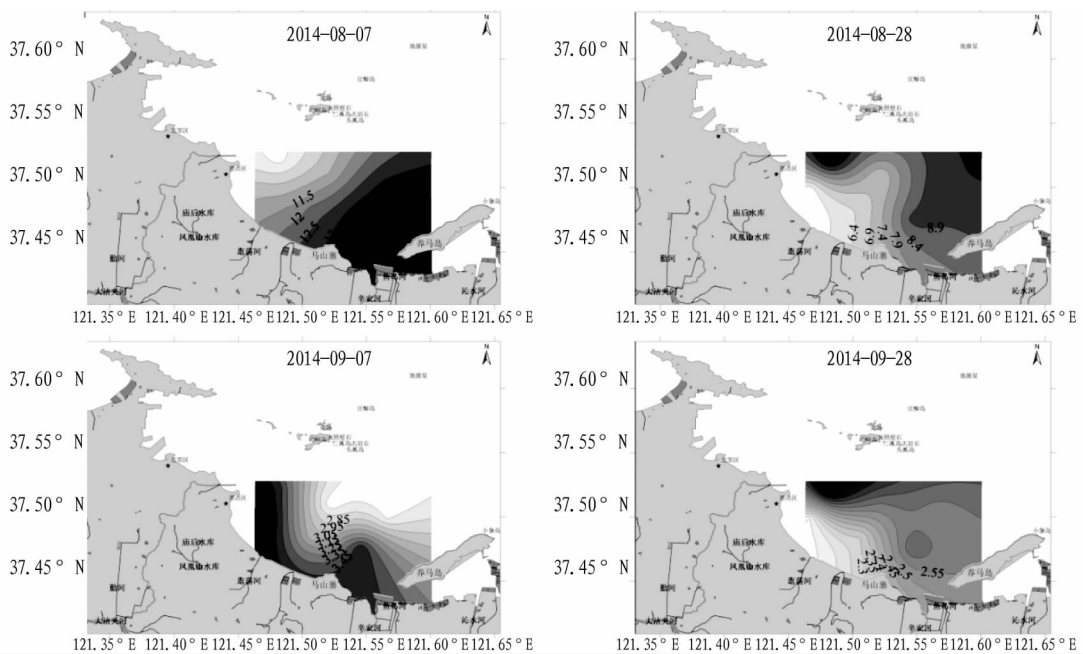


图5 2014年8月7日至9月28日 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的平面分布($\mu\text{mol/L}$)

Fig. 5 Spatial distribution of $\text{NH}_4\text{-N}$ during 2014-08-07-09-28

3 讨论

3.1 赤潮生物来源 海洋卡盾藻是一种沿岸性鞭毛藻类,可以孢囊形式进入强制性休眠期,沉降到海底的沉积物中,遇到适宜条件即可萌发形成游动细胞进入水体。四十里湾位于北温带,冬季水温较低,为 $3\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$,在低温条件下,海洋卡盾藻孢囊进入强制性休眠期。7—8月海区水温升高至 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,适于孢囊萌发并进入繁殖旺盛期,当遇到合适条件时极易形成赤潮。近年来,杨秀兰等^[3]和蒋金杰等^[4]相继在四十里湾的海洋环境调查中发现海洋卡盾藻,这表明四十里湾海域中存在海洋卡盾藻及其孢囊,为赤潮灾害的发生提

供了物种条件。

3.2 水文条件 四十里湾是一个半封闭海湾,水深较浅,湾底平坦,其西部的芝罘湾近岸海域受潮流影响较大,水体交换能力相对较好;该次赤潮发生于四十里湾东南部海域,该区域受到养马岛地形影响,潮流流速较慢,水体交换较差^[5],同时,该海域南侧紧挨辛安河入海口,也是辛安河污水处理厂排海口所在位置,东侧的养马岛周边海域是传统的贝类养殖区,大量养殖中使用的吊养设施阻碍了海流的正常流动,陆源排污和海上养殖活动均容易引起营养物质的聚集现象。

3.3 气象条件 海洋卡盾藻的生长繁殖与气象条件密不可

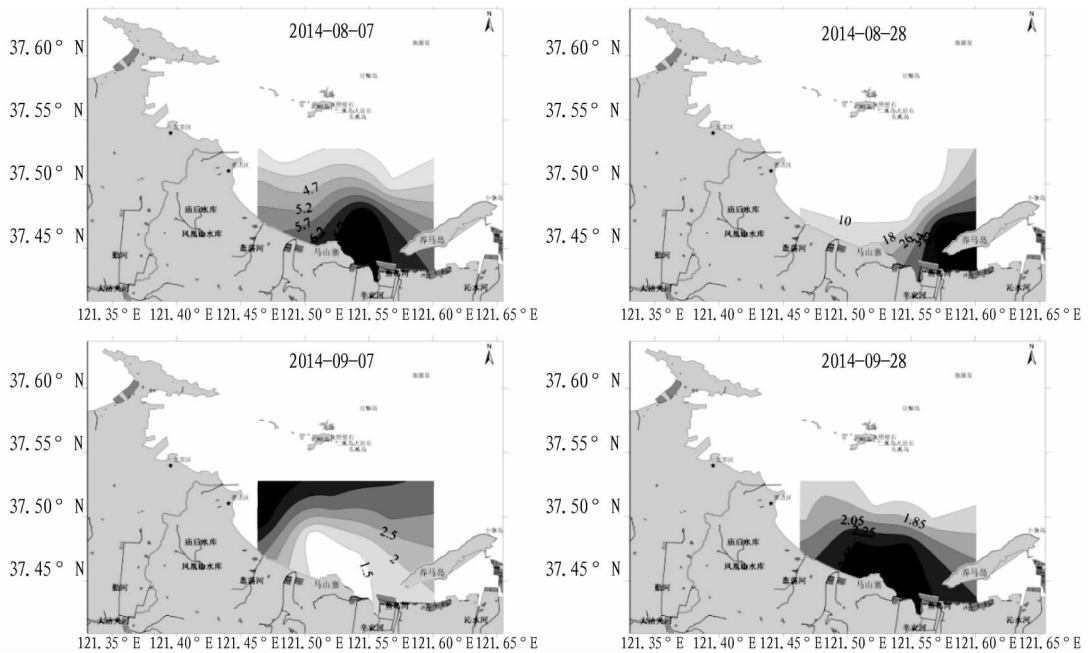


图6 2014年8月7日至9月28日叶绿素-a的平面分布($\mu\text{g/L}$)

Fig. 6 Spatial distribution of Chl-a during 2014-08-07-09-28

分,其密度高峰一般都会处于低光照、低气压的气象条件,其细胞密度与光照强度和气压呈明显负相关^[6]。虽然海洋卡盾藻分裂速度较硅藻慢,但其对低光照条件具有较强的适应能力,光补偿点和光饱和点分别为 30 和 110 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在光强为 42 ~ 63 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,能达到最大生长速率的 50%^[7],即使在黑暗、溶解氧含量较低条件下,卡盾藻也具有较较强的营养吸收能力^[8]。持续阴天和低光照强度抑制了小型硅藻的快速增长,适应低光照条件的卡盾藻进而成为优势种,低气压可以减少水面扰动,有利于卡盾藻大量聚集于水体表层。2014 年 7 月底至 8 月初,烟台市区连续阴天,光照不充足,天气潮湿闷热,气压低,沿海地区以东南风为主,风力不大,海况稳定,非常适宜于海洋卡盾藻的生长和繁殖。

3.4 理化环境因子 海洋卡盾藻最适盐度和水温条件分别为 25 ~ 30 和 25 $^{\circ}\text{C}$ ^[7],赤潮发生前期,海区盐度平均 29.740,水温平均 25.0 $^{\circ}\text{C}$,符合海洋卡盾藻最适生长温盐条件,为海洋卡盾藻暴发性繁殖奠定了基础。随着水温和盐度的逐渐升高,海洋卡盾藻密度达到最大,并最终引发赤潮,这一现象与李涛等^[9]在 2003 年 8 月发生在南海大鹏湾的海洋卡盾藻赤潮的记录基本一致。有研究表明,缺少细胞壁结构的海洋卡盾藻对盐度的变化较为敏感^[3-9],2014 年 9 月 3—5 日,烟台市区连续降雨大风,四十里湾海域盐度突然降低,海洋卡盾藻赤潮遂进入消亡期。

营养盐含量及其比例是影响浮游植物生长和种群竞争的重要因素。2014 年 7 月 31 日至 8 月 28 日,调查海域 DIN 含量持续升高,在 2014 年 8 月 7 日的监测中可以看出, $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量占 DIN 比例在调查时段内首度超过了 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。从营养盐平面分布来看,由于 DIN 中大部分以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 形式存在,调查海区 DIN 的空间分布主要受 $\text{NO}_3\text{-N}$ 分布控制。该研究发现,2014 年 8 月 7—28 日赤潮早期和赤潮期间,四十

里湾 $\text{NH}_4\text{-N}$ 空间分布与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 存在差异,四十里湾 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度水平受陆源排放影响较大,而 $\text{NH}_4\text{-N}$ 是扇贝等养殖生物的主要排泄产物,其浓度分布与扇贝养殖区域的分布、养殖状况及海流状况都有着直接关系^[10]。2014 年 8 月 7 日 $\text{NH}_4\text{-N}$ 高值区与 2014 年 8 月 28 日叶绿素-a 高值区及赤潮发生海域基本重叠,在时间序列上存在因果关系。高密度的贝类养殖主要通过 2 个方面对近岸海域的物质和营养盐循环施加影响,其一是贝类自身排泄部分营养盐,氮排泄中以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 为主,该次赤潮始发区域分布有贝类筏式养殖,且临近养马岛传统贝类养殖区,该区 4—5 月为贝类育苗及暂养期,通常在港池内进行,6 月养成后即进入浅海分苗吊养。高吴东等^[11]研究表明,双壳贝类在该区内生长和代谢旺盛期均在夏秋季节,周毅等^[12]对四十里湾多种经济双壳贝类和养殖中的污损动物的氮、磷排泄进行了测定,在这些动物的氮排泄中,笼式养殖的双壳贝类 $\text{NH}_4\text{-N}$ 排放占总 N 排泄的平均值为 70.8% ~ 80.1%。其二是滤食性贝类的生物沉积作用使养殖水域具备了营养滞留的条件,沉积的有机颗粒被分解为无机物后重新进入水体营养盐循环,蔡立胜等^[13]研究表明,养殖区沉积物中释放进入上覆海水的总 DIN 通量以 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的形式为主, $\text{NO}_3\text{-N}$ 次之, $\text{NO}_2\text{-N}$ 最弱。根据热力学效应,浮游植物利用 DIN 的能力从大到小依次为 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$,因此 $\text{NH}_4\text{-N}$ 存在时会抑制 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的吸收, $\text{NO}_3\text{-N}$ 的存在将抑制 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的吸收^[14],从 2014 年 8 月 7 日赤潮早期至 2014 年 8 月 28 日赤潮鼎盛期间,调查海域 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度呈明显下降趋势,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度则呈现上升趋势,之后才开始下降,这可能与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 被赤潮藻类优先利用有关。因此,海区 DIN 含量的持续升高,尤其是 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量的突然升高,是该次赤潮的重要诱因之一。

该研究发现,2014年5—10月四十里湾海域 $PO_4 - P$ 浓度变化较大,整体上秋季高于春季和夏季。在2014年5—7月 $PO_4 - P$ 浓度基本维持在较低水平,随着夏季到来,水温升高,水文气象条件适宜,浮游植物进入旺盛生长期,大量消耗水体中的营养物质,赤潮暴发期(2014年8月7日), $PO_4 - P$ 浓度下降至2014年5—10月最低点。有研究表明,四十里湾海域呈磷限制潜在富营养化趋势^[15],水体中 $PO_4 - P$ 浓度下降,限制了硅藻的生长繁殖,而在该次赤潮期间, $PO_4 - P$ 浓度不降反升,说明磷对海洋卡盾藻的生长限制作用不甚明显。卡盾藻属于较大型的鞭毛藻类,其生长繁殖速度远低于小型硅藻类,因此在硅藻占据优势地位时,卡盾藻等鞭毛藻类难以与其竞争,但当水体中的营养盐缺乏时,硅藻会逐渐消退,海洋卡盾藻能够利用磷酸盐等磷源,并以正磷酸盐的形式在细胞内加以储存,在外界磷源缺乏的条件下,可利用体内储存的磷源生长和代谢,这有利于其在营养物质缺乏的水体中与硅藻竞争^[16],同时,卡盾藻等鞭毛藻类具有昼夜垂直迁移特性,环境适应性较强,它们可迁移到富含营养的水层吸收养分;乔倩^[17]研究表明,海洋卡盾藻的生长受氮限制,对氮源的竞争能力具有明显的种间优势,因此,在高氮低磷的环境条件下,海洋卡盾藻大量繁殖,最终形成赤潮。刘望鹏等^[18]研究发现,高氮低磷的环境条件有利于海洋卡盾藻溶血毒素的合成,可能增加海洋卡盾藻的产毒性,此时发生的赤潮具有更大的危害性,应引起高度重视。

2014年7月31日至8月28日,调查海域 $SiO_4 - S_i$ 平均浓度变化平稳。2014年9月3—5日,市区经历了降雨和大风天气过程,大风促进水体搅动,加强了营养盐在表底层的交换作用,降雨也增加了陆源营养物质的输入,海区水体中 $SiO_4 - S_i$ 和 $PO_4 - P$ 浓度持续升高,为硅藻的生长繁殖提供了丰富的营养物质,2014年9月7日东南风1级,天气晴朗,光照充足,为小型硅藻的繁殖创造了良好的气象条件,海区海洋卡盾藻数量大幅下降,其密度逐渐低于赤潮基准密度^[2]。中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻这2种小型硅藻开始大量繁殖,取代体型较大的海洋卡盾藻成为优势种,此次海洋卡盾藻赤潮逐渐消退。

3.5 浮游植物优势种演替 赤潮早期调查海域浮游植物优势种主要是尖刺拟菱形藻,赤潮发生期是海洋卡盾藻,赤潮消亡期被中肋骨条藻和尖刺拟菱形藻取代,这一演替过程与宋秀凯等^[9]在2008年乳山海洋卡盾藻赤潮中的报道基本一致,说明在胶东半岛黄海近岸海域海洋卡盾藻赤潮的暴发过程中有一定的演替规律存在。 A_0 站位位于湾顶西北侧海域,其浮游植物优势种的演替变化与其他站位有一定差异,在2014年8月7日主要以旋链角毛藻为主,在2014年8月28日优势种依然是旋链角毛藻,但是数量已经大幅下降,此时其他非赤潮区域的优势种已经演替为塔状冠盖藻;至2014年9月10日和2014年9月28日, A_0 站位的优势种基本与海区主要的优势种取得一致,这可能与 A_0 站位所在区域位于湾顶外围海域有关,该处的理化环境因子在该次赤潮暴发期间与赤潮发生海域有一定的差异,由此表现出了一定的演

替滞后现象。

4 结论

(1)2014年四十里湾近海赤潮的原因种是海洋卡盾藻,由其引发的大规模赤潮在烟台海域尚属首次记录,该次赤潮集中分布于海流不畅的湾底近岸海域,来势凶猛,但持续时间较短。

(2)赤潮发生前,调查海域内 DIN 浓度持续升高,尤其是 $NH_4 - N$ 浓度的突然升高,相对较低的 $PO_4 - P$ 浓度、适宜的水温和盐度等理化环境及低气压、低光照的气象条件是诱导此次赤潮发生的关键因子。

(3)在高氮低磷的环境条件下,海洋卡盾藻合成溶血毒素的能力会加强,可能增加海洋卡盾藻的产毒性,此时发生的赤潮具有更大的危害,应引起高度重视。

(4)赤潮早期、发生期及消退期间,调查海域浮游植物群落经历了尖刺拟菱形藻—海洋卡盾藻群落、海洋卡盾藻—塔状冠盖藻—旋链角毛藻群落、中肋骨条藻—尖刺拟菱形藻群落几个阶段的演替过程。

参考文献

- [1] 国家海洋局. 海洋监测规范:GB 17378—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [2] 国家海洋局. 赤潮监测技术规程:HY17069—2005. [S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [3] 杨秀兰,王育红,刘义豪,等. 关于烟台四十里湾水域出现海洋卡盾藻的分析[J]. 齐鲁渔业,2008,25(2):47-49.
- [4] 蒋金杰,刘东艳,邸宝平,等. 烟台四十里湾浮游植物群落的季节变化及其对环境的指示意义[J]. 海洋学报,2011,33(6):151-164.
- [5] 单志欣,郑振虎,邢红艳,等. 四十里湾养殖水域环境监测及分析[J]. 齐鲁渔业,2001,18(4):37-39.
- [6] 王朝晖,齐雨露,陈菊芳,等. 大亚湾春季卡盾藻种群动态及其赤潮成因分析[J]. 水生生物学报,2006,30(4):394-398.
- [7] NAKAMURA Y, WATANABE M M. Growth characteristics of *Chattonella marina* (Raphidophyceae) Part 1: Effect of temperature, salinity, light intensity and pH on growth[J]. Journal of the oceanographical society of japan, 1983,39:110-114.
- [8] NAKAMURA Y, WATANABE M M. Nutrient and phosphate uptake kinetics of *Chattonella antiqua* in light/dark cycles[J]. Journal of the oceanographical society of japan,1983,39(4):167-170.
- [9] 李涛,刘胜,黄良民,等. 大亚湾一次赤潮生消期间浮游植物群落变化研究[J]. 热带海洋学报,2005,24(3):18-24.
- [10] 赵卫红,焦念志,赵增霞. 烟台四十里湾养殖水域氮的存在形态研究[J]. 海洋与湖沼,2000,31(1):53-59.
- [11] 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.
- [12] 周毅,杨红生,何义朝,等. 四十里湾几种双壳贝类及污损动物的氮、磷排泄及其生态效应[J]. 海洋与湖沼,2002,33(4):424-430.
- [13] 蔡立胜,方建光,董双林. 桑沟湾养殖海区沉积物—海水界面氮、磷营养盐的通量[J]. 海洋水产研究,2004,25(4):57-64.
- [14] DORTCH Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton[J]. Marine ecology progress series,1990,61:183-201.
- [15] 邢红艳,孙珊,马元庆,等. 四十里湾海域营养盐年际变化及影响因素研究[J]. 海洋通报,2013,32(1):53-57.
- [16] KIMURA T, WATANABE M, KOHATA K, et al. Phosphate metabolism during diel vertical migration in the raphidophycean alga, *Chattonella antiqua*[J]. Journal of applied phycology,1999,11(3):301-311.
- [17] 乔倩. 不同氮源对典型赤潮藻类生长的影响[D]. 广州:暨南大学,2016:61-62.
- [18] 刘望鹏,黄娟,杨维东,等. 营养盐对海洋卡盾藻生长与产毒的影响[J]. 生态毒理学报,2010,5(3):394-401.
- [19] 宋秀凯,袁廷柱,孙玉增,等. 山东乳山近海海洋卡盾藻 (*Chattonella marina*) 赤潮发展过程及其成因研究[J]. 海洋与湖沼,2011,42(3):425-430.