

DOI: 10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20180727.001

苑克磊, 侯查伟, 丁一, 等. 我国黄海浒苔绿潮暴发海域环境因子季节性变化及年际变化分析[J]. 广西科学院学报, 2018, 34(3): 204-209.

YUAN K L, HONG C W, DING Y, et al. Analysis of the seasonal and inter-annual changes of environmental factors in *Enteromorpha prolifera* green tide outbreak in the Yellow Sea[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2018, 34(3): 204-209.

## 我国黄海浒苔绿潮暴发海域环境因子季节性变化及年际变化分析\*

### Analysis of the Seasonal and Inter-annual Changes of Environmental Factors in *Enteromorpha prolifera* Green Tide Outbreak in the Yellow Sea

苑克磊<sup>1</sup>, 侯查伟<sup>2</sup>, 丁一<sup>1</sup>, 宋晓丽<sup>3,4\*\*</sup>

YUAN Kelei<sup>1</sup>, HONG Chawei<sup>2</sup>, DING Yi<sup>1</sup>, SONG Xiaoli<sup>3,4</sup>

(1. 国家海洋局北海预报中心, 山东青岛 266061; 2. 国家海洋局烟台海洋环境监测中心站, 山东烟台 264006; 3. 中国海洋大学, 山东青岛 266003; 4. 国家海洋局北海分局, 山东青岛 266061)

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao, Shandong, 266061, China; 2. Yantai Marine Environment Central Station, State Oceanic Administration, Yantai, Shandong, 264006, China; 3. Ocean University of China, Qingdao, Shandong, 266003, China; 4. North China Sea Bureau, Qingdao, Shandong, 266061, China)

**摘要:**【目的】掌握环境因子与浒苔绿潮之间的相互影响关系, 为绿潮形成机制研究和半岛绿潮灾害防治提供科学资料。【方法】通过整理收集浒苔绿潮暴发重点海域的历史数据和现场调查数据, 系统分析浒苔绿潮暴发期间以及浒苔绿潮暴发前后关键环境因子(温度、盐度、pH 值、溶解氧 DO、无机氮、磷酸盐和叶绿素 a)的季节性变化、年际变化。【结果】南黄海海域表层海水温度 2—8 月份呈上升趋势, 年际变化不大; 盐度季节性和年际变化幅度不大; pH 值 2—8 月份呈现先下降后升高再下降的趋势, 历年来 2 月份呈上升趋势, 8 月份呈下降趋势; DO 浓度 2—8 月份呈现先下降后升高再下降的趋势, 年际变化很小; 无机氮浓度 2—8 月份呈现先上升后下降的趋势, 历年来 2 月份比较稳定, 8 月份呈下降趋势; 磷酸盐季节性变化无规律, 年际变化不大; 浒苔绿潮暴发期间底层海水叶绿素 a 浓度高于表、中层。【结论】表层海水温度、盐度和无机氮都适宜于浒苔的生长, 这是导致浒苔发生发展, 乃至导致绿潮发生的区域环境因素; 浒苔绿潮与 DO、磷酸盐关系不明显; 浒苔暴发导致浮游植物的生长受到极大限制。

**关键词:** 黄海 浒苔绿潮 环境因子 变化

中图分类号: X834 文献标识码: A 文章编号: 1002-7378(2018)03-0204-06

收稿日期: 2017-10-24

作者简介: 苑克磊(1983—), 男, 助理工程师, 主要从事海洋环境灾害监测预警研究, E-mail: 329504348@qq.com.

\* 国家重点研发计划(2017YFC1405306)资助。

\*\* 通信作者: 宋晓丽(1982—), 女, 博士, 主要从事环境地球化学研究, E-mail: songxiaoli@bhj.gov.cn.

**Abstract:**【Objective】The interaction between environmental factors and green tide was mastered to provide scientific data for the study of the formation mechanism of green tide and the prevention of the disaster.【Methods】The historical data and field researches in the outbreak area of

green tide were used in analyzing seasonal and inter-annual changes of key environmental factors(T, salt, pH, DO, DIN,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P and chl<sub>a</sub>) during and before the outbreak of the green tide. **【Results】**In the South Yellow Sea, the temperature was on the rise from February to August, with little inter-annual change. The seasonal and inter-annual changes of the salinity were little. pH showed a tendency to drop first and then rise and then fall from February to August, and showed an upward trend over the years in February and a downward trend in August. DO showed a tendency to drop first and then rise and then fall from February to August, and inter-annual variation of DO was little. DIN showed a tendency to rise first and then fall from February to August, and showed an stable trend over the years in February and a downward trend in August. The seasonal variations of  $\text{PO}_4^{3-}$ -P was irregular, with little inter-annual variation. The concentration of chlorophyll a in the bottom seawater was higher than that in the surface and middle layer during the outbreak of the green tide. **【Conclusion】**The temperature, salinity, and inorganic nitrogen of surface water are all suitable for the growth of *Enteromorpha prolifera*, which are regional environment factors for *Enteromorpha prolifera* occurrence and development, even the occurrence of green tide. The relationship between the turquoise tide and DO and phosphate is not obvious. The growth of phytoplankton is greatly limited by the outbreak of green tide.

**Key words:** the Yellow Sea, *Enteromorpha prolifera* green tide, environmental factors, change

## 0 引言

**【研究意义】**我国黄海海域自 2007 年起,连续暴发大规模浒苔绿潮,给沿海省市带来严重的经济损失,浒苔绿潮已成为我国黄海常见的海洋生态灾害。

**【前人研究进展】**近几年来对黄海海域浒苔生态学的研究很多,目前已基本掌握了水温<sup>[1-2]</sup>、盐度<sup>[3]</sup>、光照<sup>[4]</sup>、营养盐<sup>[5-7]</sup>、pH 值等生态环境因子<sup>[8-11]</sup>对浒苔生长的影响,以及浒苔绿潮发生对生态环境的影响。

**【本研究切入点】**大多数的研究仅限于浒苔绿潮暴发年份的分析,系统地通过大量数据分析浒苔绿潮暴发前后几年环境因子变化的报道较少。本研究通过浒苔绿潮暴发期间黄海海域环境因子数据分析及对比浒苔绿潮暴发前后黄海海域环境因子的变化情况,系统分析浒苔绿潮暴发重点海域关键环境因子(温度、盐度、pH 值、溶解氧 DO、无机氮、磷酸盐和叶绿素 a)的季节性和年际变化。**【拟解决的关键问题】**掌握环境因子与浒苔绿潮之间的相互影响关系,为绿潮形成机制研究和半岛绿潮灾害防治提供科学资料。

## 1 调查站位与方法

### 1.1 调查站位和时间

根据绿潮发生范围,选取 34~36°N, 120~122.5°E 黄海海域作为调查范围,2003—2012 年每年的 2 月、8 月开展海水质量调查,2009 年 2—8 月开展绿潮专项调查。

### 1.2 调查要素和分析方法

调查要素包括温度、盐度、溶解氧(DO)、pH 值、叶绿素 a、磷酸盐、亚硝酸盐、硝酸盐、氨氮。温度采用颠倒温度计法/CTD 法/电极法(GB/T 12763—2007),盐度采用盐度计法/CTD 法(GB/T 12763.4—2007),DO 采用碘量法/电极法(GB/T 12763.4—2007),pH 值采用 pH 计法/CTD 法(GB/T 12763.4—2007),叶绿素 a 采用荧光分光光度法/分光光度法(GB/T 12763.4—2007),磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法(GB/T 12763.4—2007),亚硝酸盐采用盐酸萘乙二胺分光光度法(GB/T 12763.4—2007),硝酸盐采用锌镉还原法或镉柱还原法(GB/T 12763.4—2007),铵盐采用次溴酸盐氧化法(GB/T 12763.4—2007)。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度变化

#### 2.1.1 温度季节性变化

2009 年 2—8 月份调查海域表层海水温度的变化如图 1 所示。受季节性影响,调查期间调查海域表层海水温度呈持续增长的趋势,5 月份的表层海水平均温度约 15℃,南黄海海域开始出现浒苔,6 月和 7 月表层海水平均温度为 21.78~24.64℃,调查海域浒苔数量最多;8 月份表层海水温度超过浒苔生长的最适宜温度,浒苔数量开始减少。由此可见,黄海海域浒苔生长与消亡和海水温度的影响有关。

### 2.1.2 温度年际变化

2月份表层海水平均温度基本在5~8℃,8月份表层海水平均温度基本都在25~28℃。从图2可以看出,历年调查海域表层海水温度存在较小的波动,但总体上处于相同水平,变化不太明显。

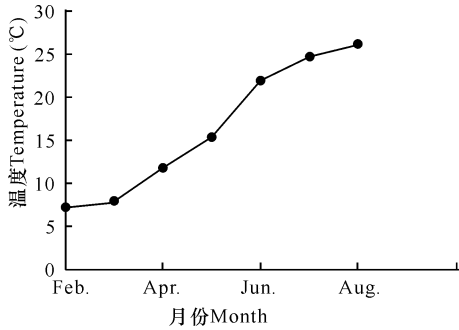


图1 2009年调查海域表层海水温度变化

Fig. 1 The temperature change of surface water in investigation sea area in 2009

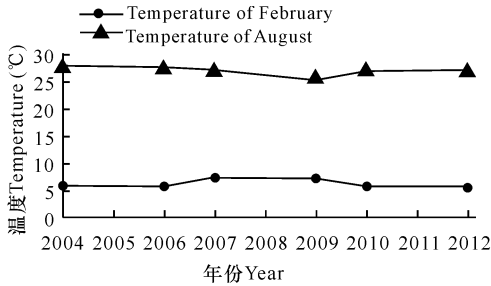


图2 2004—2012年调查海域表层海水温度变化

Fig. 2 The temperature change of surface water in investigation sea area in 2004—2012

## 2.2 盐度变化

### 2.2.1 盐度季节性变化

2009年2—8月份调查海域表层海水盐度的变化如图3所示。受季节性影响,调查期间调查海域表层海水盐度总体上呈现连续下降的趋势,但变化幅度不是很大。

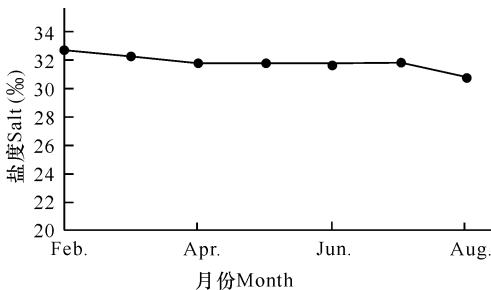


图3 2009年调查海域表层海水盐度变化

Fig. 3 The salinity change of surface water in investigation sea area in 2009

### 2.2.2 盐度年际变化

2003—2012年调查海域表层海水盐度变化情

况如图4所示。2月份和8月份调查海域表层海水盐度的年际变化趋势基本一致,2月份海水盐度平均值基本在31‰~33‰,8月份海水盐度平均值基本在29‰~31‰,年际变化幅度不是很大。

在浒苔绿潮漂浮季节,黄海海域盐度变化为29‰~33‰,适宜浒苔生长,但不是最适宜的条件(最适宜的条件为20.2‰~26.9‰)。浒苔在漂移过程中将会逐渐适应盐度的微小变化,不会对浒苔生长和繁殖产生太大的影响。因此,盐度不是影响黄海海域绿潮快速生长繁殖的最重要因素。

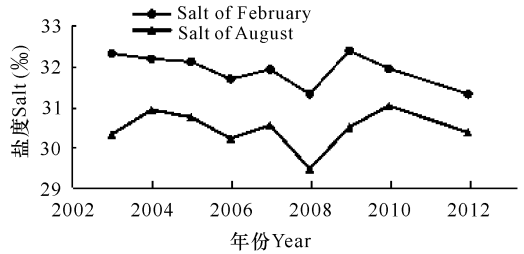


图4 2003—2012年调查海域表层海水盐度变化

Fig. 4 The salinity change of surface water in investigation sea area in 2003—2012

## 2.3 pH值变化

### 2.3.1 pH值季节性变化

2009年2—8月份调查海域表层海水pH值的变化如图5所示。2—4月份调查海域表层海水pH值呈下降趋势,5月份浒苔发生,海水pH值有所升高,6月和7月浒苔暴发,海水pH值持续升高,8月份浒苔消亡,海水pH值下降。原因与藻类的光合作用和新陈代谢过程有关,藻类的光合作用吸收了海水中的 $\text{CO}_2$ ,导致海水中 $\text{CO}_3^{2-}$ 浓度下降,海水的pH值升高。浒苔死亡后,由于藻体的分解,海水的pH值降低。pH值的变化在一定程度上反映浒苔的生长状况。

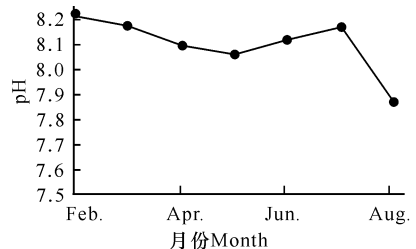


图5 2009年调查海域表层海水pH值变化

Fig. 5 The pH change of surface water in investigation sea area in 2009

### 2.3.2 pH值年际变化

2003—2012年调查海域表层海水pH值变化情况如图6所示。2月份,调查海域表层海水pH

值比较稳定,总体呈上升趋势;8月份,调查海域表层海水 pH 值差异较大,总体呈下降趋势。

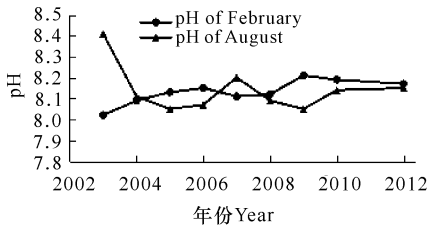


图6 2003—2012年调查海域表层海水 pH 值变化

Fig. 6 The pH change of surface water in investigation sea area in 2003—2012

## 2.4 溶解氧(DO)变化

### 2.4.1 溶解氧(DO)季节性变化

2009年2—8月份调查海域表层海水 DO 浓度的变化如图7所示。2—4月份表层海水 DO 浓度呈下降趋势,5月份 DO 浓度有所升高,6—8月份又呈下降趋势,但始终符合第一类海水水质标准。

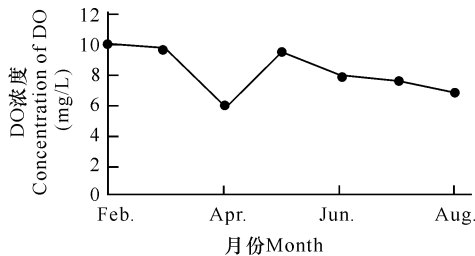


图7 2009年调查海域表层海水 DO 浓度变化

Fig. 7 The DO concentration change of surface water in investigation sea area in 2009

5月份黄海海域开始出现浒苔,海水 DO 浓度升高,8月份浒苔开始消亡,海水 DO 浓度下降。但6月和7月份,浒苔生长旺盛时期,海水 DO 浓度却较5月份刚发生浒苔的时候有所下降,主要是因为5月份和8月份浒苔主要集中在近岸海域,而6月和7月份浒苔主要集中在外海海域,水交换条件好,导致海水 DO 浓度并未因为浒苔的生长而升高。

### 2.4.2 溶解氧(DO)年际变化

2003—2012年调查海域表层海水 DO 浓度的变化情况如图8所示。2月份调查海域表层海水 DO 浓度平均值基本在9~11 mg/L,8月份 DO 浓度平均值基本在6~8 mg/L,年际变化幅度都不是很大,但总体上2月份呈上升趋势,8月份2003—2009年基本处于同一水平,2010年和2012年有所减小。历年来调查海域表层海水的 DO 浓度维持稳定,变化幅度很小,难以看出浒苔暴发与海水 DO 浓度之间的联系。

近岸海域浒苔绿潮与海水 DO 浓度存在一定关系,即浒苔生长会导致水体中 DO 浓度升高,而浒苔

衰亡会导致水体中 DO 浓度降低。但大面调查数据显示浒苔绿潮的暴发与海水中 DO 浓度关系不明显,由此推断,浒苔绿潮与 DO 浓度的相关性只体现在小范围、较为封闭、水交换条件差的水体环境中,比如近岸海域,而在黄海这种开阔的水域环境,由于水交换条件好,浒苔的生长和消亡就不会对 DO 浓度产生太大的影响,因而浒苔绿潮暴发与 DO 浓度之间的关系不是很明显。

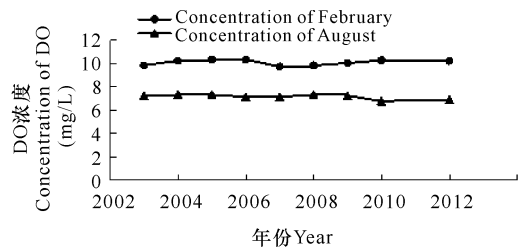


图8 2003—2012年调查海域表层海水 DO 浓度变化

Fig. 8 The DO concentration change of surface water in investigation sea area in 2003—2012

## 2.5 营养盐(氮、磷)变化

### 2.5.1 营养盐(氮、磷)季节性变化

2009年2—8月份调查海域表层海水无机氮浓度的变化如图9所示。2—4月份调查海域表层海水无机氮浓度总体上呈上升过程,4月达到最高值,5月份开始下降,6—8月份趋于稳定,其变化趋势同浒苔绿潮的发生情况相吻合。

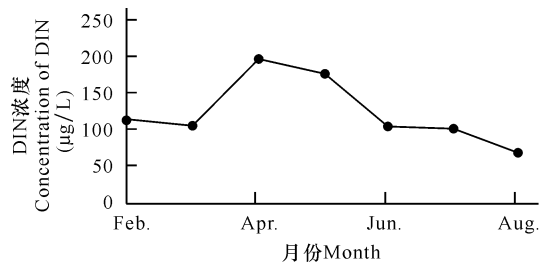


图9 2009年调查海域表层海水无机氮变化

Fig. 9 The DIN concentration change of surface water in investigation sea area in 2009

2—8月份调查海域表层海水活性磷酸盐浓度的变化如图10所示。2009年不同月份间表层海水的活性磷酸盐浓度波动较大,无明显规律。

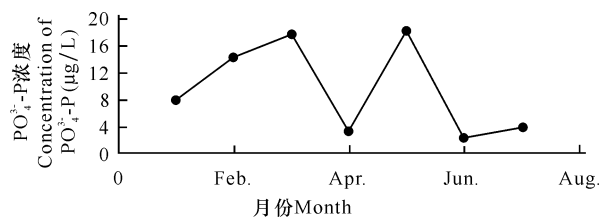


图10 2009年调查海域表层海水活性磷酸盐浓度变化

Fig. 10 The  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  concentration change of surface water in investigation sea area in 2009



### 2.5.2 营养盐(氮、磷)年际变化

将2003—2009年2月、8月调查海域表层海水的无机氮、活性磷酸盐浓度进行比较,结果如图11和图12所示。2006年之后2月份表层海水的无机氮浓度略高于2006年之前;但2006年之后8月份的无机氮浓度却明显低于2006年之前的,这也证明浒苔绿潮暴发大量消耗了海水中的无机氮。

调查海域表层海水的活性磷酸盐浓度相对稳定,历年来变化幅度不是很大,且8月份的活性磷酸盐浓度始终处于很低的水平,从图12中难以看出浒苔绿潮发生发展与活性磷酸盐之间的关系,这主要是由于低浓度的活性磷酸盐对于浒苔的吸收来说形成“磷限制”,导致浒苔绿潮暴发与该海域的活性磷酸盐之间的关系不明显。

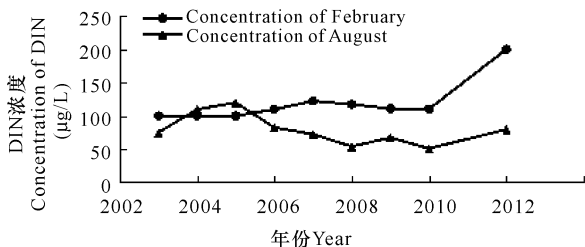


图11 2003—2012年调查海域表层海水无机氮浓度变化

Fig. 11 The DIN concentration change of surface water in investigation sea area in 2003—2012

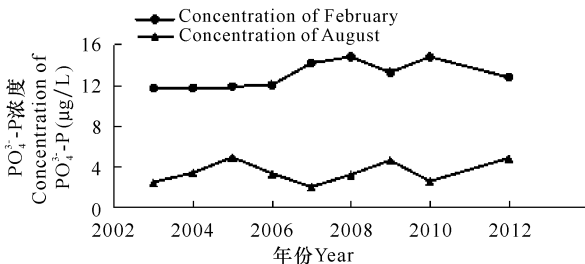


图12 2003—2012年调查海域表层海水活性磷酸盐浓度变化

Fig. 12 The  $PO_4^{3-}-P$  concentration change of surface water in investigation sea area in 2003—2012

## 2.6 叶绿素 a 变化

### 2.6.1 叶绿素 a 季节性变化

2009年2—8月份调查海域表、中、底层海水叶绿素 a 浓度变化情况如图13所示。2月份由于海水垂直混合比较均匀,各层海水中叶绿素 a 浓度相近;3—5月份,随着春季光照加强,表、中层海水中浮游植物开始生长,大量消耗营养盐,而海温跃层的初步形成导致底层海水营养盐无法及时输送至表层,营养盐的缺乏影响了浮游植物生长,出现底层海水叶绿素 a 浓度高于表、中层的现象;5—7月份浒

苔绿潮暴发,营养盐进一步被大量消耗,尤其是6月份,正值浒苔高发期,营养盐消耗更多,且此时为黄海跃层的强盛期,浮游植物的生长受到极大限制,叶绿素 a 浓度进一步降低,底层海水营养盐丰富,水温、光照都适宜浮游植物生长,所以7月份底层海水叶绿素 a 浓度达到峰值;8月份,浒苔或下沉或死亡,部分消耗底层海水营养盐,此时黄海跃层处于衰退期,各层海水营养盐垂直分布较均匀,表层海水由于光照充分,有利于浮游植物的生长,表层海水叶绿素 a 浓度最高。

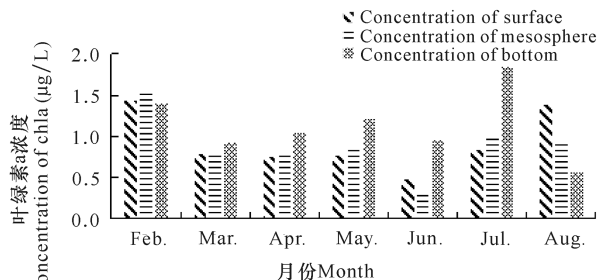


图13 2009年调查海域海水叶绿素 a 浓度变化

Fig. 13 The chl a concentration change of water in investigation sea area in 2009

### 2.6.2 叶绿素 a 年际变化

对比2006—2013年8月份调查海域表、底层海水叶绿素 a 浓度,结果如图14所示。未发生浒苔绿潮的2006年,调查海域8月份表层海水叶绿素 a 浓度与底层海水叶绿素 a 浓度相近,底层稍大于表层,发生浒苔绿潮的2007—2013年,调查海域表层海水叶绿素 a 浓度与底层海水叶绿素 a 浓度年际变化趋势一致,表层的浓度大于底层,这主要是因为8月份部分浒苔下沉,消耗了底层海水营养盐,使得底层海水浮游植物生长受到影响,而表层海水由于光照充分,有利于浮游植物的生长。

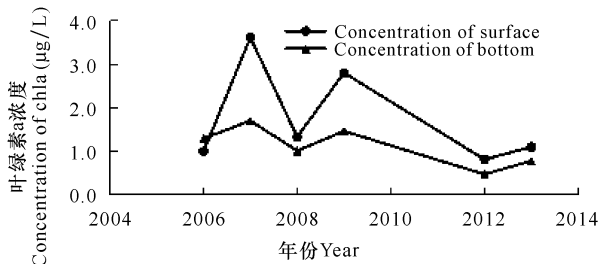


图14 2006—2013年调查海域表、底层海水叶绿素 a 浓度

Fig. 14 The chl a concentration change of surface and bottom water in investigation sea area in 2006—2013

## 3 结论

(1)南黄海海域5~7月表层海水平均温度约为

15~25℃,适宜浒苔生长;8月份水温超过浒苔生长的最适宜温度,浒苔数量开始减少并逐渐消亡。温度是影响浒苔生长与消亡的最重要因素。

(2)盐度适宜于浒苔生长,但其季节性和年际变化幅度不大,浒苔在漂移过程中将会逐渐适应这种微小变化,不会对浒苔生长和繁殖产生太大的影响。盐度不是影响黄海海域浒苔绿潮快速生长繁殖的重要因素。

(3)南黄海海域 pH 值变化于 7.84~8.15,适宜浒苔的生长;浒苔生长导致海水中 pH 值升高,浒苔消亡导致海水中 pH 值降低。浒苔的生长消亡与南黄海海域 pH 值变化和分布具有一致性的对应关系。

(4)在较为开阔的海域,由于水交换条件好,浒苔生长与溶解氧之间的关系不明显。

(5)南黄海海域营养盐状况适宜于浒苔的发生和生长。浒苔绿潮暴发大量消耗了海水中的无机氮。低浓度的磷酸盐对于浒苔的吸收来说形成“磷限制”,导致浒苔绿潮暴发与磷酸盐之间的关系不明显。

(6)浒苔绿潮的暴发大量消耗营养盐,浮游植物的生长受到极大限制,导致浒苔绿潮暴发期间底层海水叶绿素 a 浓度高于表、中层。

#### 参考文献:

- [1] AHN O, PETRELL R, HARRISON P J. Ammonium and nitrate uptake by *Laminaria saccharina* and *Nereocystis luetkeana* originating from a salmon sea cage farm[J]. Journal of Applied Phycology, 1998, 10: 333-340.
- [2] KIM J H, KANG E J, PARK M G, et al. Effects of temperature and irradiance on photosynthesis and growth of a green-tide-forming species (*Ulva linza*) in the Yellow Sea [J]. Journal of Applied Phycology, 2011, 23(3): 421-432.
- [3] FALKOWSKI P G. Enzymology of nitrogen assimilation. Nitrogen in the Marine red algae *Gracilaria tenuistipitata* [J]. Journal of Phycology, 1997, 33: 225-231.
- [4] LOPES P F, OLIVEIRA M C, COLEPICCOLO P. Diurnal fluctuation of nitrate reductase activity in the marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* (Rhodophyta) [J]. Journal of Phycology, 1997, 33(2): 225-231.
- [5] 王翔宇, 吴海一. 浒苔的营养盐吸收及生长特性研究[J]. 广西科学院学报, 2015, 31(4): 243-246, 252.

- WANG X Y, WU H Y. Nutrient uptaking and growth performance of *Ulva prolifera* [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(4): 243-246, 252.
- [6] 庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 等. 围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3398-3404.
- PANG Q T, LI F, LIU X Q, et al. Compare the growth of *Enteromorpha prolifera* under different nutrient conditions [J]. Environmental Science, 2013, 34(9): 3398-3404.
- [7] 吴婷, 田小亭, 刘召辉, 等. 浒苔对不同氮源吸收特性的初步研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(4): 51-54.
- WU T, TIAN X T, LIU Z H, et al. Absorption of different nitrogen species by *Enteromorpha prolifera* [J]. Marine Sciences, 2011, 35(4): 51-54.
- [8] 夏斌, 马绍赛, 崔毅, 等. 黄海绿潮(浒苔)暴发区温盐、溶解氧和营养盐分布特征与绿潮发生的关系[J]. 渔业科学进展, 2009, 30(5): 94-101.
- XIA B, MA S S, CUI Y, et al. Distribution of temperature, salinity dissolved oxygen, nutrients and their relationships with green tide in *Enteromorpha prolifera* outbreak area of the Yellow Sea [J]. Progress in Fishery Sciences, 2009, 30(5): 94-101.
- [9] 何进, 石雅君, 王玉珏, 等. 不同温度与营养盐条件对浒苔 (*Ulva prolifera*) 和肠浒苔 (*Ulva intestinalis*) 的生长影响[J]. 海洋通报, 2013, 32(5): 573-579.
- HE J, SHI Y J, WANG Y J, et al. Impact of temperature and nutrients on the growth of *Ulva prolifera* and *Ulva intestinalis* [J]. Marine Science Bulletin, 2013, 32(5): 573-579.
- [10] 衣立, 张苏平, 殷玉齐. 2009 年黄海绿潮浒苔暴发与漂移的水文气象环境[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(10): 15-23.
- YI L, ZHANG S P, YIN Y Q. Influence of environmental hydro - meteorological conditions to *Enteromorpha prolifera* blooms in Yellow sea, 2009 [J]. Periodical of Ocean University of China, 2010, 40(10): 15-23.
- [11] 李德萍, 马艳, 董海鹰, 等. 日照和降水对青岛近海海域浒苔影响的分析[J]. 海岸工程, 2013, 32(1): 51-59.
- LI D P, MA Y, DONG H Y, et al. Import of sunshine duration and precipitation on *Enteromorpha prolifera* in Qingdao coastal waters [J]. Coastal Engineering, 2013, 32(1): 51-59.