

DOI: 10.5846/stxb201610202145

党晓岩, 伍玉梅, 樊伟, 纪世建, 杨胜龙. 基于遥感数据的东海浮游植物生物量时空变化研究. 生态学报, 2017, 37(23): 8039-8047.

Dang X Y, Wu Y M, Fan W, Ji S J, Yang S L. Temporal and spatial variation in phytoplankton biomass based on remote sensing data in the East China Sea. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 8039-8047.

基于遥感数据的东海浮游植物生物量时空变化研究

党晓岩^{1,2}, 伍玉梅^{1,*}, 樊伟¹, 纪世建^{1,2}, 杨胜龙¹

1 农业部东海与远洋渔业资源开发利用重点实验室, 上海 200090

2 上海海洋大学, 上海 201306

摘要: 基于地理位置、纬度和生态特征的不同在东海选取了 9 个面积相同的子区域, 采用 1997—2015 年由 SeaWiFS (Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor) 和 MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) 传感器获得的叶绿素 a 浓度资料, 对我国东海浮游植物生物量的时空变化和藻华现象进行了分析。通过高斯曲线模型拟合, 得到了藻华爆发的起始时间、峰值时间、结束时间及持续时间。研究表明东海浮游植物生物量在空间上的分布规律为: 外海浮游植物生物量小于近岸; 长江口和台州列岛海域的浮游植物生物量较大, 近黄海水域的两个区域次之, 较小的位于南麂列岛海域和台湾海峡, 越靠近南部海域浮游植物生物量越低。藻华发生的规律为: 以南麂列岛为分界线, 由高纬度到低纬度, 浮游植物到达藻华发生峰值的时间持续推后, 爆发持续时间增长。

关键词: 东海; 浮游植物; 藻华; 时空变化; 高斯模型

Temporal and spatial variation in phytoplankton biomass based on remote sensing data in the East China Sea

DANG Xiaoyan^{1,2}, WU Yumei^{1,*}, FAN Wei¹, JI Shijian^{1,2}, YANG Shenglong¹

1 Key Laboratory of East China Sea & Oceanic Fishery Resources Exploitation and Utilization, Ministry of Agriculture, P. R. China (East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences), Shanghai 200090, China

2 College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: The rich natural resources that occur in the East China Sea (ECS) provide great economic benefits to the associated coastal districts; therefore, research on the water quality in this region is of great significance. As biological indicators of water quality, information regarding temporal and spatial distributions of phytoplankton biomass and growth cycles, as well as modifications caused by climate change is important for understanding the ecology of the ECS. Many researchers have been concerned about the characteristics of phytoplankton blooms in the North Atlantic Ocean; however, there are few relevant studies in this region. The present study occurred during a period of phytoplankton bloom in the ECS and provides a significant reference value for an ecologically representative area. The present study selected nine regions with the same area at different geographical locations, latitudes, and ecological characteristics, and applied chlorophyll a (Chl-a) data from Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer to analyze the spatial-temporal variation of phytoplankton biomass and phytoplankton bloom phenomenon in the ECS during 1997—2015. The Gauss curve model was adopted by fitting the data collected to obtain the time of bloom initiation, bloom peak, bloom completion, and bloom duration in the ECS. The Gauss curve fitting model was applicable to conform to the Gaussian distribution of the data. To test whether the dataset accorded with a normal distribution (Gaussian distribution), the study

基金项目: 农业部渔业遥感科学观测实验站开放课题 (OFSOESFRS201501); 上海市自然科学基金项目 (15ZR1450000)

收稿日期: 2016-10-20; 网络出版日期: 2017-08-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wym_07@163.com

applied the Kolmogorov-Smirnov test. The single-peak moving Gaussian model was applied to fit the spring and summer algal bloom outbreaks and define the phytoplankton blooms at the beginning and end of the marker for Chl-a concentration to reach a peak of 20%. The research demonstrated the distribution pattern at the spatial scale, with phytoplankton biomass in the open sea being lower than that in the offshore area. The areas with maximum biomass were the seas of the Yangtze River estuary, the Taizhou region, and the two areas closest to the Yellow Sea. The areas with minimum biomass were the seas of the Nanji Islands and Taiwan Strait. Therefore, the closer the phytoplankton was to the South China Sea, the lower was the biomass. Algal blooms occurred in the Yangtze River estuary from June to September and in the Yangtze River estuary in May and from July to August. Phytoplankton blooms at Taizhou Island occurred during May and July. The algae in the eastern part of the ECS occurred from November and December to January and February in the following year. Phytoplankton blooms at Nanji Islands concentrated during February and March, and the ECS algae in the northern areas between May and June. The biomass of phytoplankton in the northern outer seas was low and algae were mostly present in March and April. In general, the two sections of the research region, which were divided by the Nanji Islands, demonstrated the same regularity, the time taken for phytoplankton to reach peak biomass was prolonged, and the duration of the phytoplankton blooms increased from high latitudes to low latitudes.

Key Words: East China Sea; phytoplankton biomass; phytoplankton bloom; temporal and spatial variation; Gauss model

浮游植物常作为某一水域水质的指示生物,某一水域的水质与其浮游植物的丰度、群落组成是密不可分的,浮游植物锐减或过度繁殖都预示着水质的变化^[1]。研究浮游植物生物量的时空分布及其生长周期,探索其随气候变化而做出的反应,对掌握整个东海生态变化的趋势非常关键。实地采点取样等传统浮游植物监测手段,具有受限条件多,工作量大,收益小等缺点。随着遥感技术的发展,水色卫星能够获得水体表面的属性参数(如水温、光照、叶绿素 a 浓度),为浮游植物的研究提供了大范围、实时的数据。因为所有浮游植物中均含有叶绿素 a,所以国内外学者多借用叶绿素 a(chlorophyll a, Chl-a)浓度来表征浮游植物生物量^[2-3]。

藻华(又称水华)研究是浮游植物生物量研究领域中的一个主要内容,它指的是浮游植物生物量的季节性变化^[4],是一种正常的生物现象,具有整体性和一般性,与大家熟知的“赤潮”不同。科学家将有害藻华称为“赤潮”,是异常的,由某些特定的有毒或无毒浮游植物种类在一定条件下爆发性增殖或高度聚集引起的水体变色现象,对生态系统造成不同程度的危害^[5],具有个体性和特殊性,赤潮发生区的叶绿素 a 浓度与邻近非赤潮区差别巨大。对于浮游植物生物量时空变化以及藻华的研究,国内外已经开展了一些工作^[6-20],已有研究虽然表明了东海浮游植物分布具有明显的分区特征,但未在长江口、南麂列岛等这样有代表性的生态区域给予明确浮游植物时空变化的描述。目前藻华发生时间的研究大部分集中于北大西洋^[11],对于北太平洋的研究鲜有报道。

本文采用 SeaWiFS 和 MODIS 传感器在 1997—2015 年获得的东海 Chl-a 浓度资料,根据地理位置和生态特征选取 9 个子区域进行浮游植物生物量时空变化的研究,并进一步利用高斯曲线模型拟合得到藻华发生的起始时间、峰值时间、结束时间和持续时间。以期填补东海藻华发生时间的研究空白,为东海生态特征代表性区域浮游植物生物量变化提供参考。

1 数据与方法

1.1 研究区域与数据

研究区域为我国东海,即 116°—130°E, 23°—35°N 之间的海域。基于东海浮游植物的分布具有明显的分区性这一特征^[6-7],本研究根据地理位置、纬度差别和生态特征的不同在东海选取了 9 个面积相同的小区域(后面统一称为子区域)(图 1),每个子区域包含像元 6×6 个,面积约为 2916 km²。传感器获取的 Chl-a 浓度在东海沿岸无数据,故子区域 1、3、4、6、7、8 和 9 位于近岸海域,所选位置均与岸边有一定距离(表 1)。这样

的位置分布既可以避免沿岸由于人类活动导致的悬浮物、黄色物质剧增而影响 Chl-a 浓度数据质量,又涵盖东海近海区域几大具有重要作用的代表性区域。

采用 1997 年 9 月 21 日到 2015 年 12 月 31 日的水色遥感传感器获得的 Chl-a 浓度数据进行分析,其中 1997—2007 年的数据为 SeaWiFS 提供,2008—2015 年为 Aqua MODIS 提供,SeaWiFS 和 MODIS 数据均下载自 Ocean Color 网(<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/>)。两颗传感器提供的均为 3 级产品数据,分别采用 OC₃ 和 OC₄ 生物光学算法来反演 Chl-a 浓度^[21],单位:mg/m³,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 9 km×9 km。伍玉梅等^[6]在研究中验证了 SeaWiFS 卫星获得的 Chl-a 与实测值比较接近,周正和万茜婷^[22]验证了 MODIS 数据在反映二类水体状况中具有可行性,并且本文研究的重点为东海不同区域浮游植物生物量的相对变化和藻华的时空变化,因此该数据精度满足本研究要求。

表 1 子区域的特征

Table 1 Features of subregions

区域编号 Area number	中心点纬度 Center latitude/N	中心点经度 Center longitude/E	地理特征 Geographical features
1	34°27'30"	120°47'30"	靠近黄海,群带鱼 8—10 月份这一带海域索饵
2	33°32'30"	123°7'30"	东海外海区域(与近海作对比)
3	33°7'47"	121°17'30"	夏秋季节鱼类生殖洄游的通道
4	31°7'30"	122°17'30"	位于长江口,是多种生物周年性洄游的必经通道,生物量较其他海域高
5	30°52'30"	123°22'30"	长江口外海区域(与近海作对比)
6	28°47'30"	122°7'30"	位于台州列岛海域,低盐水系与高盐水系交汇区,海洋生物种类丰富
7	27°12'30"	121°17'30"	位于南麂列岛海域,贝类和藻类数量占中国海洋贝藻类总数的 20% 以上
8	25°27'30"	120°17'30"	靠近福建省,近岸流夏季向北流动,冬季向南流动
9	24°0'0"	118°47'30"	靠近南海,位于台湾海峡,黑潮经由此处向北运动

1.2 数据处理及方法

SeaWiFS 是海洋水色卫星,而 MODIS 是搭载在 Aqua 卫星上的传感器。采用两颗星上的数据进行连续分析时存在一致性的问题。为了验证数据的一致性,随机选取了两年数据(2007、2010 年)进行比较,这两年的 Chl-a 浓度资料对比差值的平均值为:0.02(2007 年),1.122(2010 年),方差为:-0.082(2007 年),2.45(2010 年),表明:这两个传感器的数据具有一致性,能够一起用于开展长时间变化研究。

对多年东海叶绿素遥感资料分析,发现:该海域的 Chl-a 浓度大部分低于 10 mg/m³,极少数处于 10—20 mg/m³,个别浓度高达 90 mg/m³。为去除异常气候造成的影响,根据相关文献^[23-24]得到浮游植物发生藻华时的 Chl-a 浓度值,将 Chl-a 范围设置为 0—10 mg/m³,大于 10 mg/m³ 的浓度值作为异常值,研究中不做考虑。此外,在卫星探测过程中受到云、水汽等影响造成研究样点数值的缺失^[25],考虑到本研究是完全基于卫星数据开展的的分析工作,为保证数据的精确度,故未进行数据的插值。

然后,对 9 个区域的 Chl-a 浓度平均值进行 Kolmogorov-Smirnov(简称 K-S)检验。K-S 检验的目的在于判断数据集是否符合正态分布,正态分布即高斯分布,通过 K-S 检验是进行高斯曲线拟合的前提。K-S 检验原理为:

原假设: $H_0: F_{(x)} = F_{0(x)}$;

检验统计量:求出经验分布函数 $F_{n(x)}$ 和统计量 D_n , $D_n = \max |F_{n(x)} - F_{0(x)}|$,其中规定: $F_n(x_{(n+1)}) = 1$;

对于给定的检验水平 α 和样本容量 n ,得出临界值 $D_{n,1-\alpha}$,使得 $P(D_n \leq D_{n,1-\alpha}) = 1-\alpha$;

判断:若 $D_n \leq D_{n,1-\alpha}$,则接受原假设;否则拒绝原假设。

最后,对符合高斯分布的数据进行高斯曲线拟合模型。藻华爆发一般为一年两次:春季和秋季,春季藻华

的强度要高于秋季藻华的强度^[3],为了准确描述藻华的爆发时间特征,采用移动高斯模型拟合浮游植物爆发的时间规律^[26-27]。此移动高斯模型为单峰,用于拟合春夏季藻华爆发,公式为:

$$B(t) = B_0 + \beta t + a \exp[-(t - t_m)^2 / (2\sigma^2)] \quad (1)$$

式中 B_0 为 Chl-a 平均值(单位: mg/m^3), 参数 β 表示春季浮游植物藻华之后 Chl-a 浓度的增加或者减少(单位: mg/m^3), a 为爆发的振幅(单位: mg/m^3), σ 为峰值的宽度(单位: d), 即爆发时长, t_m 为浮游植物藻华达到峰值的时间(单位: d)。爆发时的 Chl-a 浓度定义为 $B(t) - (B_0 + \beta t)$ 达到峰值浓度的某个百分比, 这里根据经验设置为 20%, 即 $B(t) - (B_0 + \beta t) / a = 0.2$ 。则式(1)转化为

$$0.2 = \exp[-(t - t_m)^2 / (2\sigma^2)] \quad (2)$$

将式(2)中 t 定义为浮游植物藻华开始的时间, 即 t_i (单位: d), 则

$$t_i = t_m - (-2\log 0.2)^{1/2} \sigma = t_m - 1.79\sigma \quad (3)$$

浮游植物藻华开始到结束的过程为浮游植物藻华的延续时间, 即 t_d (单位: d), 结束的标志为 Chl-a 浓度达到峰值的 20%, 则

$$t_d = 2(t_m - t_i) = 3.59\sigma \quad (4)$$

2 结果与分析

2.1 1997—2015 年浮游植物生物量变化情况

将 1997—2015 年的 Chl-a 浓度数据进行处理, 得到东海近 19 年逐年的 Chl-a 浓度值(图 2)。结果显示: 1997—2000、2002、2004—2007 年的 Chl-a 浓度高的天数比较多, 浓度值基本都大于 $2 \text{ mg}/\text{m}^3$, 分布无明显规律性。2001、2003、2008—2015 年 Chl-a 浓度整体偏低, 在 5—6 月(120—180 d)浓度稍高($4\text{--}5 \text{ mg}/\text{m}^3$), 其余浓度都不高($<2.5 \text{ mg}/\text{m}^3$)。东海区域藻华一般发生在 5、6 月份^[28], 此时对应的 Chl-a 浓度高。查阅近年的气候状况, ENSO 暖事件爆发年份为 1997—1998、2002、2004、2006、2009 年, 其中 1997—1998 年为最强暖事件, ENSO 冷事件爆发年份为 1999—2000、2007、2010 年^[29-30]。对应图 2, 在 ENSO 发生年份, 浮游植物的爆发并不遵循 5、6 月份爆发的自然规律, 而是呈现与气候相对应的异常爆发, 这种异常体现在 Chl-a 浓度在时间上的无规律性。因此, 在进行浮游植物分布时空变化分析以及藻华发生规律的研究上选择了受 ENSO 影响小的年份(2001、2003、2004、2008、2010—2015 年)进行分析。

2.2 浮游植物时空变化特征

东海 Chl-a 浓度的分布存在显著差异, 近岸的 Chl-a 浓度大, 远离岸边的相对小, 为更好的表现 Chl-a 浓度的分布情况, 根据实际的浓度选择两种图例来表示。子区域 2、8、9 浓度范围为 $0\text{--}5 \text{ mg}/\text{m}^3$, 其余区域浓度范围为 $0\text{--}10 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。表明子区域 2、8、9 的 Chl-a 浓度远远低于其余区域。图 3 中显示 9 个子区域的 Chl-a 浓度分布由大到小为: 子区域 4、6 的浓度最大, 子区域 1、3 浓度稍大, 子区域 7 的次小, 子区域 8、9 的最小。

子区域 1 中大部分 Chl-a 浓度小于 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$, 高值较少, 出现在 2013、2014 年。子区域 2 远离岸边, 整体浓度偏低, 在 1—4 月份(1—120 d)的 Chl-a 浓度($2.5\text{--}5 \text{ mg}/\text{m}^3$)显著高于 5—12 月份(120—365 d)的浓度($<2 \text{ mg}/\text{m}^3$)。子区域 3 与 1 的 Chl-a 浓度分布相似, 但整体浓度高于区域 1。子区域 4 位于长江口, 因位置靠

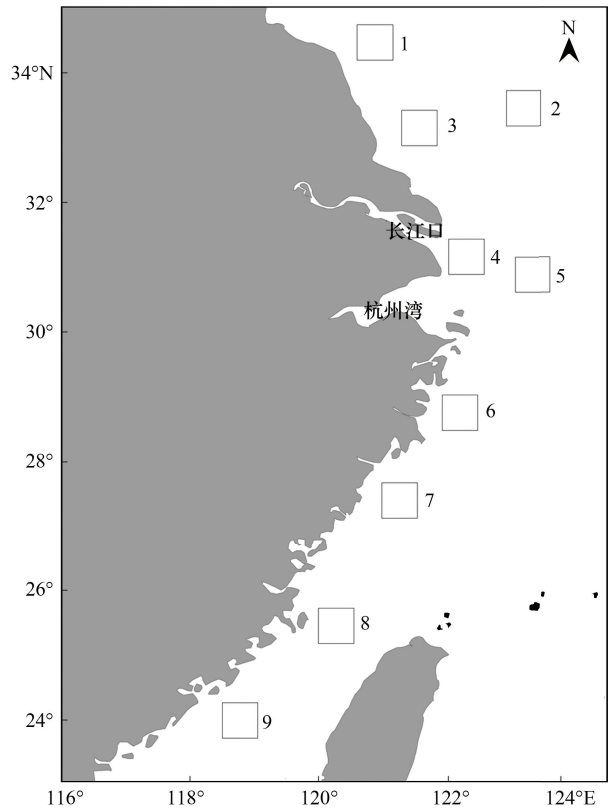


图 1 子区域的分布

Fig.1 Distribution of subregions

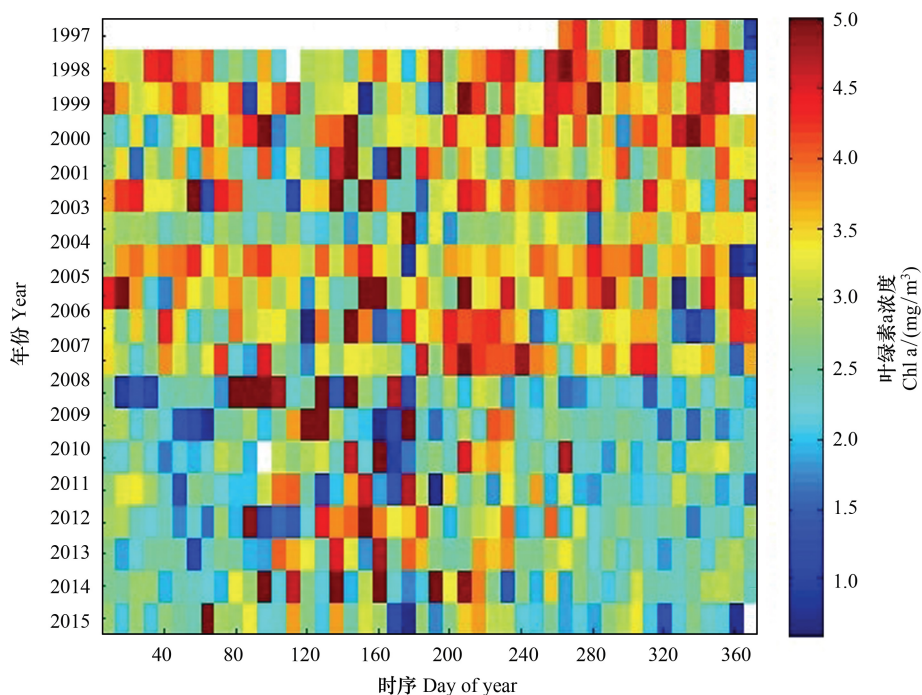


图2 东海 Chl-a 浓度在 1997—2015 年间的变化

Fig.2 Variation of Chl-a concentration in the East China Sea from 1997 to 2015

以 8 天为周期,颜色由蓝到红的变化代表 Chl-a 浓度的增加,蓝色代表最小值,红色代表最大值,白色为空缺数值,单位为 mg/m^3

近岸边,受到近岸高浓度悬浮物的影响造成数据缺失,10 年的浓度峰值均集中于后半年,位于 5—8 月份(160—240 d)之间。子区域 5 虽远离近岸,但距离显著小于子区域 2,又处于终年浓度较高的长江口附近^[6],所以整体浓度高于子区域 2,小于子区域 4。子区域 5 有明显的两个 Chl-a 爆发高值时期,分别是 5 月份和 8 月份(120—160 d,200—240 d)。子区域 6 位于台州列岛海域,Chl-a 浓度峰值集中于 5—7 月份(120—216 d)。子区域 7 位于南麂列岛海域,峰值时间集中于 4—5 月份(80—160 d),其余时间 Chl-a 的浓度基本不超过 $5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。子区域 8、9 位于台湾海峡,浓度都不高,子区域 9 Chl-a 浓度的特点为冬季高于其他 3 季,大部分时间浓度低于 $2 \text{ mg}/\text{m}^3$,浮游植物爆发时的浓度为 $3.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 左右。子区域 8 两次峰值的时间为:4—5 月份和 11—12 月份(80—160 d,280—360 d),位于区域 7、9 之间,峰值时间与相邻区域有重合,浓度范围更接近于子区域 9,基本都低于 $2.5 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。

2.3 藻华爆发时间的拟合

为了准确确定藻华发生的开始时间、峰值时间、结束时间以及持续时间,采取高斯曲线对 Chl-a 浓度数据集进行拟合。首先,将 9 个子区域的 Chl-a 浓度数据集进行 K-S 检验,它们均通过 K-S 检验,符合正态分布,满足高斯曲线拟合的要求。然后进行高斯曲线拟合,基于藻华发生的时间选择^[26],采用 3—10 月份(64—288 d)的 Chl-a 浓度数据,藻华强度选取高斯方程中峰值 Chl-a 浓度的 20%作为评估指标,得到了高斯曲线拟合结果(图 4),获得了曲线参数以及藻华开始时间(bloom initiate, b_i)、峰值时间(bloom maximum, b_m)、结束时间(bloom termination, b_t)、爆发区间(bloom duration, b_d)(表 2)。

图 4 的拟合结果和表 1 的各项曲线参数表明:拟合精度 R^2 最低为 0.402(子区域 1),其余都超过 0.5,精度最高为 0.97(子区域 2)。子区域 1 整体浓度较高。子区域 2、3 拟合的曲线走势相似:峰值前浓度高,峰值后浓度低。藻华持续时间基本相同,仅相差两天。但弯曲程度与峰值的位置不同,峰值出现时间相差 21d。子区域 4、5 曲线的走势也相似,藻华持续时间相差 4d,峰值的位置相差 19d。子区域 6、7 峰值前浓度低,峰值后浓度高,即藻华发生后浮游植物生物量变大。子区域 8 峰值前浓度高,峰值后浓度低,即藻华发生后浮游植物生物量变小。子区域 9 在年初、年末浓度增加。

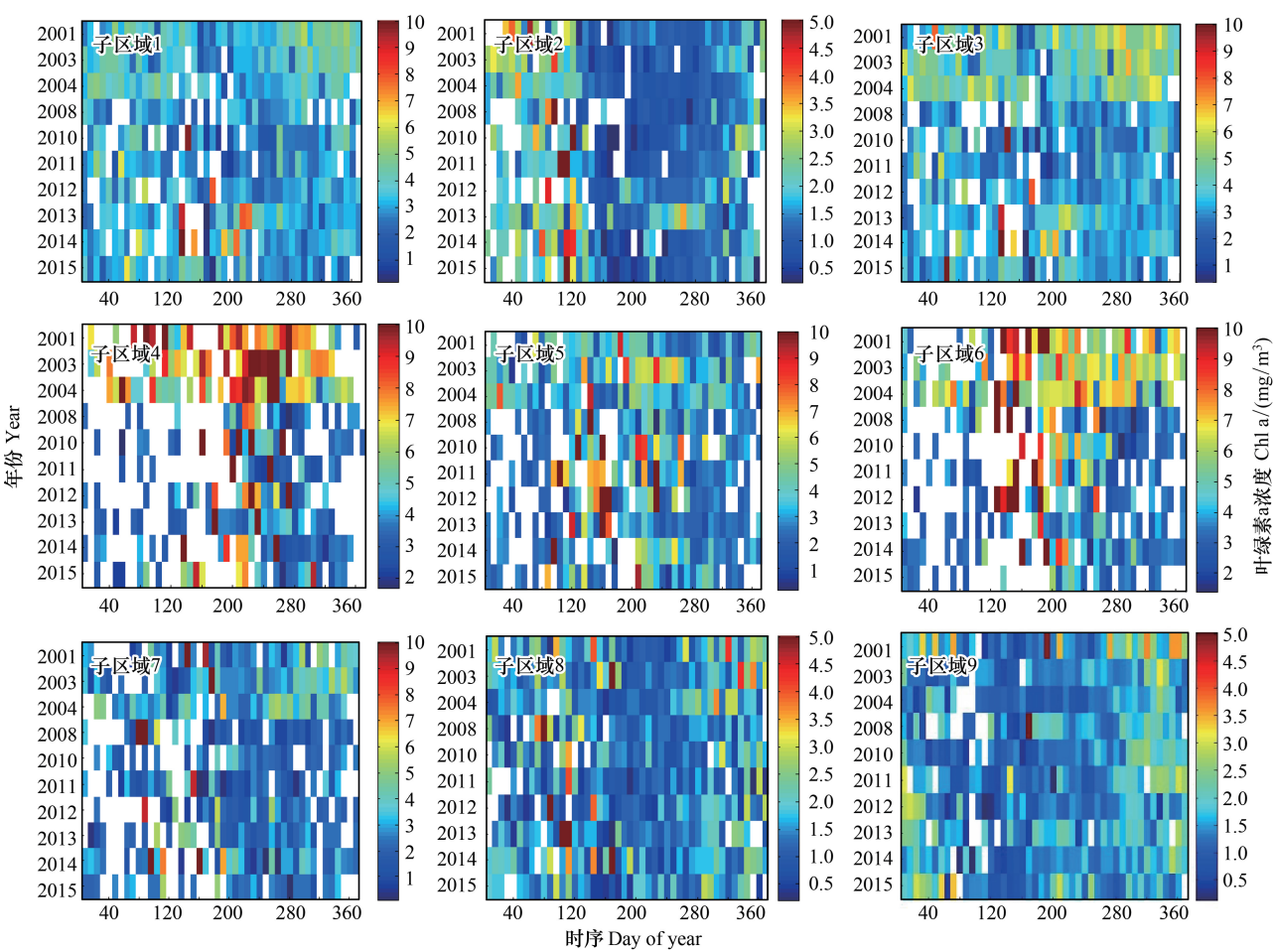


图3 9个子区域 Chl-a 浓度的分布情况

Fig.3 Distribution of Chl-a concentration in the nine subregions

根据实际的 Chl-a 浓度,选择两种图例来表现 Chl-a 浓度值差异;子区域 2、8、9 浓度范围为 0—5 mg/m^3 ,其余子区域浓度范围为 0—10 mg/m^3

表2 高斯拟合参数及对应的子区域藻华发生时间

Table 2 Gaussian fitting parameters and the bloom time of the corresponding subregions

子区域 Area	参数 Parameter				爆发时间 Times of bloom			
	a	t	σ	R^2	b_i/d	b_m/d	b_t/d	b_d/d
1	2.48	139.3	5.993	0.402	128	139	150	22
2	1.269	119.9	12.45	0.9752	98	120	142	44
3	2.095	141.5	12.8	0.5738	118	141	164	46
4	2.754	149.2	13.42	0.6373	125	149	173	48
5	2.264	130.4	14.33	0.6492	104	130	156	52
6	3.666	153.4	26.45	0.8058	106	153	200	94
7	1.819	92.38	16.04	0.5066	63	92	121	58
8	1.114	109.2	6.909	0.6092	96	109	121	26
9	0.7082	199.2	22.23	0.8023	159	199	239	80

b_i 表示藻华开始时间(bloom initiate), b_m 表示达到峰值时间(bloom maximum), b_t 表示藻华结束时间(bloom termination), b_d 表示藻华持续时间(bloom duration)

根据表2藻华发生时间画出箱线图(图5),9个子区域除去2、5,其余子区域所处位置是按照纬度排列的。从高纬度到低纬度,子区域1、3、4、6的藻华爆发到达峰值时间不断延后,爆发持续时间也逐渐增大。在

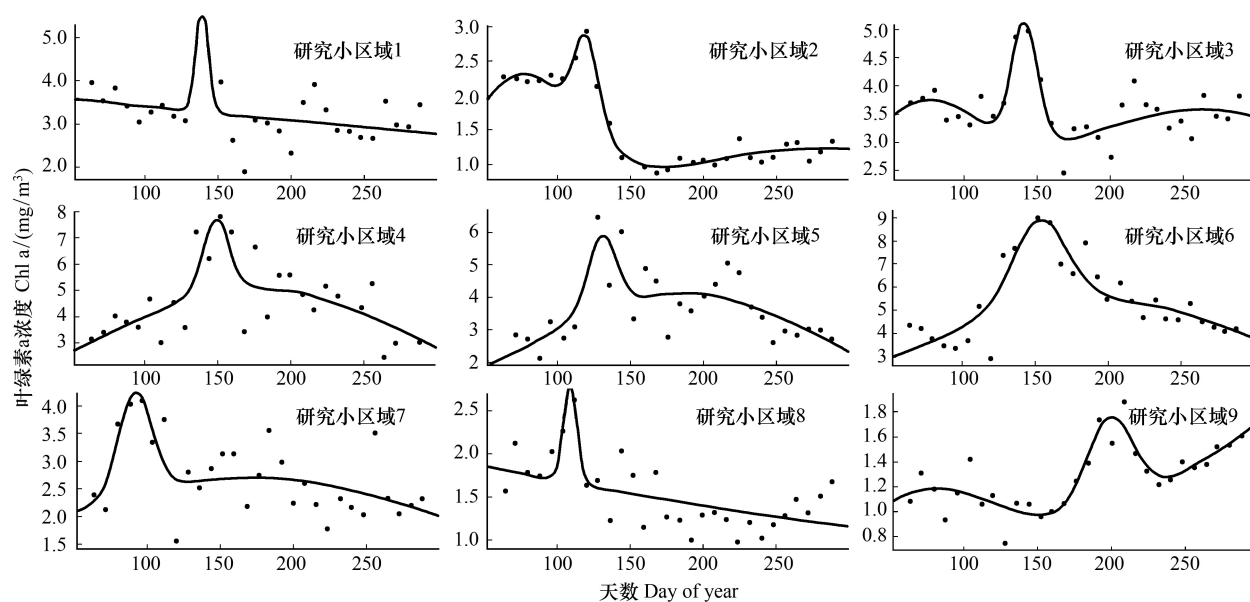


图4 9个子区域的高斯曲线拟合结果

Fig.4 Results of Gaussian fitting in the nine subregions

子区域7的位置发生变化,爆发峰值及爆发持续时间均变小,之后子区域7、8、9的爆发时间又呈现持续延后的趋势。

3 讨论

3.1 浮游植物分布时空变化

东海浮游植物生物量时空分布情况与前人研究结果具有一致性。伍玉梅等^[6]根据经纬度及离岸的远近程度,采用1997—2007年SeaWiFS数据将东海分为5个区域,表征浮游植物生物量的叶绿素a在东海北部月均值最高,南部近海和台湾海峡次之,东海北部和南部外海最小。郑小慎等^[7]依据地理位置、水深和生态特征将黄、东海分为5个区域,利用水色卫星数据分析得到浮游植物生物量由高到低为:黄、东海近岸较高,然后是北黄海中部和南黄海中部,东海陆架最低。且证实了东海近岸生物量高于陆架区。本文利于1997—2015年的卫星数据研究结果也表明东海近海区域的长江口和台州列岛一带海域的浮游植物生物量比较高。

3.2 浮游植物藻华发生的影响因素

浮游植物的生长主要受温度、光照和营养盐的影响,东海海域海表温度季节变化比较显著,最高值基本在25℃左右,最低值则是由北向南逐渐升高,基本在0—10℃^[11]。东海在夏季盛行南风,冬季盛行西北风,夏季南风的盛行有利于浙江沿岸上升流的形成。郑小慎等^[7]分析了浮游植物生物量与水温、风速和有效光合辐射的相关分析,得到浮游植物生长的变化受海面风速的影响较大。

东海是西太平洋最大的陆架边缘海^[31],冲淡水带入大量陆源营养物质,东海近海富营养化程度和范围逐年加剧^[32]。冲淡水与外海水或台湾暖流交汇而形成的羽状峰或辐聚带,为浮游植物生长提供了有利条件^[33]。近岸海域水体混合均匀、营养盐丰富,有利于浮游植物生长。故长江口和杭州湾藻华爆发剧烈,关键

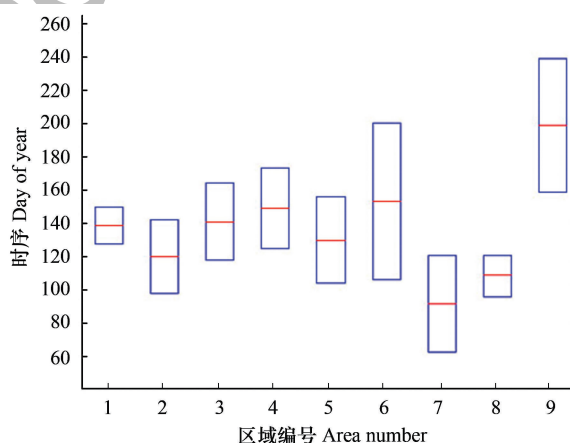


图5 子区域浮游植物藻华时间对照

Fig.5 Bloom time of phytoplankton in subregions

箱型图的下端横线对应浮游植物藻华开始时间,上端横线对应藻华结束时间,中间红色横线对应达到峰值时间

物理海洋过程如锋面、辐聚带和上升流等被认为是影响该海域温度盐度和营养盐等理化环境的重要因素,进而影响浮游植物的生长和演替^[11]。南麂列岛以南区域,尤其台湾海峡海域,具有明显的南海藻华爆发的特征,南海的叶绿素 a 浓度特点^[34]为:叶绿素 a 浓度普遍比较低,冬季是平均浓度最大的季节,春季普遍低值,夏季比春季更低,秋季开始增长,到冬季达到全年最大值。

4 结论

本研究结合长时间序列的卫星数据分析了东海浮游植物的时空分布特征,利用高斯曲线模型拟合得到了藻华发生的开始时间、峰值时间、停止时间和持续时间,得到以下一些研究结果。

东海浮游植物生物量的时空规律:近海的子区域 4、6 浮游植物生物量最高,位于长江口海域的子区域 4 藻华发生在 6—9 月份,位于台州列岛海域的子区域 6 藻华发生在 5—7 月份。靠近台湾海峡海域的子区域 8、9 浮游植物生物量浓度最低,子区域 8 两次藻华发生的时间分别是 2—3 月份和 10—12 月份,子区域 9 藻华发生的时间为 11、12 月到次年 1、2 月份。位于南麂列岛海域的子区域 7,地理位置在台州列岛海域和台湾海峡之间,此处海域的浮游植物生物量低于台州列岛海域,高于台湾海峡,浮游植物藻华集中在 2—3 月份。靠近黄海海域的区域 1、3 浮游植物生物量低于区域 4、6,高于区域 8、9,藻华发生时间均为 5—6 月份。远离近海的两个子区域为 2 和 5,子区域 5 处在长江口不远处的外海,浮游植物生物量不低,两个藻华爆发区间且爆发时间相隔不远:5 月份和 7—8 月份;子区域 2 浮游植物生物量较低,藻华多发生在 3—4 月份。

浮游植物藻华发生的时空规律:台州列岛海域浮游植物藻华达到峰值时间最早,近南海海域达到峰值时间最晚,这两个区域浮游植物藻华的持续时间较长;近黄海海域和台湾海峡浮游植物藻华持续时间较短;长江口及近黄海海域,近岸与远海区域浮游植物藻华到达峰值的时间相距天数、藻华现象的持续时间基本一致;近海浮游植物藻华在纬度上呈现一定的规律性,从高纬度到低纬度,浮游植物藻华峰值发生的时间不断延后,爆发持续时间逐渐增长。

参考文献 (References):

- [1] 段洪涛,张柏,刘殿伟,张渊智,宋开山,王宗明. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 α 响应关系研究. 红外与毫米波学报, 2006, 25 (5): 355-359.
- [2] 朱明远,毛兴华,吕瑞华,孙明华. 黄淮海区的叶绿素 α 和初级生产力. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 38-51.
- [3] Foukal N P, Thomas A C. Biogeography and phenology of satellite-measured phytoplankton seasonality in the California Current. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2014, 92: 11-25.
- [4] 宋洪军,季如宝,王宗灵. 近海浮游植物水华动力学和生物气候学研究综述. 地球科学进展, 2011, 26(3): 257-265.
- [5] 冯士筌. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [6] 伍玉梅,徐兆礼,崔雪森,樊伟. 1997-2007 年东海叶绿素 a 质量浓度的时空变化分析. 环境科学研究, 2008, 21(6): 137-142.
- [7] 郑小慎,魏皓,王玉衡. 基于水色遥感的黄、东海叶绿素 a 浓度季节和年际变化特征分析. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 649-654.
- [8] Henson S A, Thomas A C. Interannual variability in timing of bloom initiation in the California current system. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2007, 112(C8): C08007.
- [9] Racault M F, Le Quééré C, Buitenhuis E, Sathyendranath S, Platt T. Phytoplankton phenology in the global ocean. Ecological Indicators, 2012, 14 (1): 152-163.
- [10] Platt T, Sathyendranath S. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing. Remote Sensing of Environment, 2008, 112 (8): 3426-3436.
- [11] 陈小燕. 基于遥感的长时间序列浮游植物的多尺度变化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [12] Siegel D A, Doney S C, Yoder J A. The North Atlantic Spring Phytoplankton Bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis. Science, 2002, 296 (5568): 730-733.
- [13] Chiba S, Aita M N, Tadokoro K, Saino T, Sugisaki H, Nakata K. From climate regime shifts to lower-trophic level phenology: Synthesis of recent progress in retrospective studies of the western North Pacific. Progress in Oceanography, 2008, 77(2-3): 112-126.
- [14] Kahru M, Brotas V, Manzano-Sarabia M, Mitchell B G. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic? Global Change Biology, 2011, 17(4): 1733-1739.

- [15] Edwards M, Richardson A J. Impact of climate change on marine pelagic phenology and trophic mismatch. *Nature*, 2004, 430(7002): 881-884.
- [16] Sapiano M R P, Brown C W, Uz S S, Vargas M. Establishing a global climatology of marine phytoplankton phenological characteristics. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C8): C08026.
- [17] Platt T, White G N, Zhai L, Sathyendranath S, Roy S. The phenology of phytoplankton blooms: Ecosystem indicators from remote sensing. *Ecological Modelling*, 2009, 220(21): 3057-3069.
- [18] Song H J, Ji R B, Stock C, Wang Z L. Phenology of phytoplankton blooms in the Nova Scotian Shelf-Gulf of Maine region: remote sensing and modeling analysis. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(11): 1485-1499.
- [19] Zhai L, Platt T, Tang C, Sathyendranath S, Walls R H. Phytoplankton phenology on the Scotian Shelf. *ICES Journal of Marine Science*, 2011, 68(4): 781-791.
- [20] McCullagh P, Nelder J A. Models for continuous data with constant variance. *Monographs on Statistics & Applied Probability*, 1989.
- [21] O'Reilly J E, Maritorena S, Mitchell B G, Siegel D A, Carder K L, Garver S A, Kahru M, McClain C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C11): 24937-24953.
- [22] 周正, 万茜婷. MODIS 数据东湖叶绿素 a 遥感反演研究. *测绘通报*, 2014, (10): 82-85.
- [23] 张春桂, 曾银东, 张星, 潘卫华, 林晶. 海洋叶绿素 a 浓度反演及其在赤潮监测中的应用. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 821-831.
- [24] Wolanin A, Rozanov V V, Dinter T, Noël S, Vountas M, Burrows J P, Bracher A. Global retrieval of marine and terrestrial chlorophyll fluorescence at its red peak using hyperspectral top of atmosphere radiance measurements: Feasibility study and first results. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 166: 243-261.
- [25] 刘良明. 卫星海洋遥感导论. 武汉: 武汉大学出版社, 2005.
- [26] Zhai L, Gudmundsson K, Miller P, Peng W J, Guðfinnsson H, Debes H, Hátún H, White G H, Walls R H, Sathyendranath S, Platt T. Phytoplankton phenology and production around Iceland and Faroes. *Continental Shelf Research*, 2012, 37: 15-25.
- [27] Platt T, Sathyendranath S. Oceanic primary production: estimation by remote sensing at local and regional scales. *Science*, 1988, 241(4873): 1613-1620.
- [28] 沙慧敏, 李小恕, 杨文波, 李继龙. 用 MODIS 遥感数据反演东海海表温度、叶绿素 a 浓度年际变化的研究. *大连水产学院学报*, 2009, 24(2): 151-156.
- [29] 任福民, 袁媛, 孙丞虎, 曹璐. 近 30 年 ENSO 研究进展回顾. *气象科技进展*, 2012, 2(3): 17-24.
- [30] 许武成, 王文, 马劲松, 徐邓耀. 1951-2007 年的 ENSO 事件及其特征值. *自然灾害学报*, 2009, 18(4): 18-24.
- [31] Gong G C, Wen Y H, Wang B W, Liu G J. Seasonal variation of chlorophyll a concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(6-7): 1219-1236.
- [32] Chai C, Yu Z M, Song X X, Cao X H. The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) estuary and the adjacent East China Sea, China. *Hydrobiologia*, 2006, 563(1): 313-328.
- [33] 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. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1031-1038.
- [34] 林丽茹, 赵辉. 南海海域浮游植物叶绿素与海表温度季节变化特征分析. *海洋学研究*, 2012, 30(4): 46-54.