

2016 年喀拉海和巴伦支海浮游植物水华的时空变化^①

李海丽^{②*} 柯长青^{③*} 朱庆辉^{**}

(* 南京大学地理与海洋科学学院 南京 210023)

(** 大连海事大学航海学院 大连 116026)

摘 要 利用美国雪冰中心(NSIDC)海冰密集度、NASA Ocean Color 叶绿素 a(Chl-a)和光合有效辐射(PAR)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)海水表面温度(SST)以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的光照时长等数据,分析了 2016 年喀拉海和巴伦支海开阔水域面积月变化特征,以及 Chl-a 浓度和净初级生产力(NPP)的时空变化。计算得出了浮游植物水华发生的时间与长度,探讨了水华与开阔水域面积、Chl-a 浓度、SST、光照时长以及 PAR 的关系。结果表明,2016 年喀拉海和巴伦支海始终存在开阔水域,其变化趋势与北极整体变化趋势一致。Chl-a 浓度与 NPP 变化相似,均在 5 月、7 月和 10 月达到极大值。2016 年浮游植物水华发生了 10 次,共计持续 185 天。浮游植物水华受多种因素共同影响,与开阔水域面积、Chl-a 浓度、SST、PAR 以及光照时长均为正相关关系。Chl-a 与 NPP 几乎是同步关系,SST 和开阔水域面积变化滞后 NPP,而 PAR 和光照时长变化先行 NPP。

关键词 喀拉海和巴伦支海, 开阔水域, 浮游植物水华, 叶绿素 a(Chl-a), 净初级生产力(NPP)

0 引 言

近 40 年来,北极海冰持续减少^[1-3]。1979 - 1996 年北极海冰范围每年减少 $3.4 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[4,5], 1997 - 2006 年每年减少 $7.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[6], 减少速度为 1979 - 1996 年的两倍多。基于 ICESat 激光高度计数据,发现 2004 - 2008 年冬季北极海冰厚度平均减薄 0.68m^[7]。每个季节多年冰平均厚度总体上大于一年冰,冬季尤为明显^[8]。北冰洋西部多年冰区相比东部一年冰区海冰厚度减小更多^[9]。相应的开阔水域面积增加速度加快^[10,11],给浮游植物的生长提供了很好的场所。全球变暖背景下升高的气温和水温、增多的营养物质和光照等都在为浮游植物生长创造了更好的条件^[12,13]。在多因素综合下,致

使近年来浮游植物水华发生时间不断提前^[14]。浮游植物水华是生物界中正常的自然现象^[13-15],每年都会发生,具有季节性的暴发特征。

Arrigo 等^[14]基于 1998 - 2009 年北极净初级生产力(net primary productivity, NPP)的分析得出北极浮游植物水华期达到 107 ± 9.7 天。喀拉海为 114 ± 21.2 天,巴伦支海为 108 ± 21.5 天。2011 年 ICES-CAPE 巡航中,在楚科奇海大陆架 0.8m 到 1.3m 的一年冰下的水层发现了大面积的浮游植物水华^[16]。有研究表明冰上融池的叶绿素浓度很低,对北极总的初级生产力的贡献低于 1%^[17]。但随着北极变暖,2014 年北极第 6 次巡航时,在加拿大海盆浮冰上观测到一个高叶绿素浓度、高生物量的封闭式融池,且发生了水华现象^[18]。Lin 等总结出冰雪上非

① 国家自然科学基金(41371391)和国家重点研发计划(2016YFA0600102)资助项目。

② 女,1993 年生,硕士生;研究方向:遥感及其应用研究;E-mail: lihaili@yahoo.com

③ 通信作者,E-mail: kecq@nju.edu.cn

(收稿日期:2017-10-30)

均匀分布的营养物会在融池形成过程中得以释放,存在一个补充机制。研究表明在过去的 10 年里,随着更多冰上融池的产生,变薄的海冰覆盖加强了光线穿透海冰到达上层水柱的能力,导致冰下的浮游植物也能大量繁殖,冰下水华现象在北极变得更加普遍^[18,19]。基于 SeaWiFS 数据和其他海洋数据,表明 9 月初水华伴随着高叶绿素 a (chlorophyll-a, Chl-a) 浓度和海水表面温度 (sea surface temperature, SST) 的上升^[20]。Signorini 等^[21]发现巴伦支海 5 月主要为硅藻水华,8 月主要为颗石藻水华,光照和营养物是控制水华的主要因素。Druzhkov 等^[22]将喀拉海浮游植物季节性演替过程总结为早春海冰边缘的北极寒带浅海硅藻水华、春末浅海硅藻和自养甲藻水华和秋季浮游植物衰减三个阶段。

我国对于北极浮游植物水华研究目前还比较少,大多集中在近海叶绿素或 NPP 时空变化。喀拉海和巴伦支海位于俄罗斯北部,是北极开阔水域变化最显著的海区之一,NPP 增加剧烈。选择该海区研究浮游植物水华期并分析影响浮游植物水华因

素,有助于了解喀拉海和巴伦支海开阔水域及环境变化现状,对极地浮游植物暴发有深刻的认识,为北极生态质量评估研究提供信息支持。本文以 2016 年为研究年份,基于海冰密集度数据分析开阔水域面积变化,用 SST、Chl-a、光合有效辐射 (photosynthetically active radiation, PAR) 和光照时长等数据分析 2016 年 Chl-a 浓度和 NPP 月变化,判断浮游植物暴发时间与水华期长度,并在此基础上,探讨影响浮游植物水华发生的环境因素。

1 数据和方法

1.1 研究区

本文采用 Cavalieri 和 Parkinson 分区方法^[23,24],研究区域(图 1)是俄罗斯北部的喀拉海和巴伦支海,介于 60N~90N, 10E~110E 之间。该海区主要有两大淡水输入河流,鄂毕河和叶尼塞河,淡水输入超过了北极总淡水输入的 1/3^[25]。且研究区大部分区域平均水深在 -300m~0m 之间,90% 以上的海域位于大陆架上。

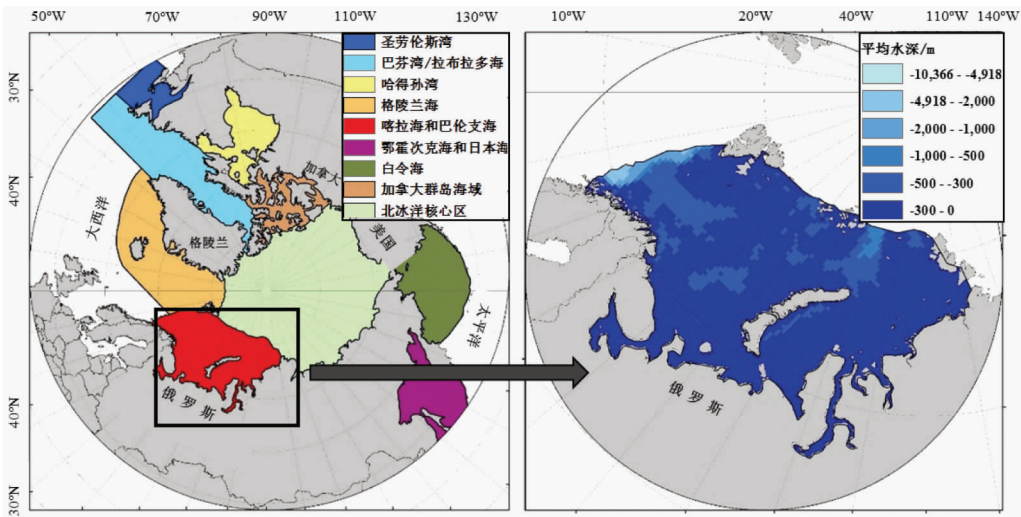


图 1 研究区

1.2 数据

1.2.1 海冰密集度

海冰密集度是指一个海区内海冰面积所占百分比^[26],数据来自美国雪冰数据中心,它提供全世界范围内的海冰、冰川和积雪等数据资料。它由 Nimbus-7 多通道扫描微波辐射计 (Scanning Multichannel Microwave Radiometer, SMMR); DMSP -F8, -F11

和-F13 Special Sensor Microwave/Imagers (SSM/Is); DMSP-F17, DMSP-F18 Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) 获得。

海冰密集度数据是 Near-Real-Time DMSP SS-MIS Daily Polar Gridded Sea Ice Concentrations 产品。选取 2016 年 1 月 1 日至 12 月 31 日北半球每日数据。空间分辨率为 25km × 25km,为 TIF 格式,北极

方位投影。

1.2.2 NPP 输入数据

NPP 由 Chl-a 浓度、SST、光照时长和 PAR 作为模型输入参数计算得到。Chl-a 浓度产品是由 OCX 算法与 CI 算法结合而获得,可在美国 NASA 海洋水色处理中心网站同时获得 Chl-a 浓度和 PAR 数据。本文选择的是 MODIS Aqua III 级日平均遥感数据,时间序列为 2016 年 1 月 1 日至 12 月 31 日,空间分辨率为 $9\text{km} \times 9\text{km}$ 的 Chl-a 浓度和 PAR 数据。

SST 数据来自 NOAA 的 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature V2 (OI . v2 SST) 产品,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。光照时长 (sunshine duration) 数据来自欧洲中期天气预报中心,数据定义为垂直于太阳方向的平面上太阳辐射大于或等于 $120\text{W}/\text{m}^2$ 时所持续的时间长度,单位是 s。4 种模型输入数据均为 NC 格式。

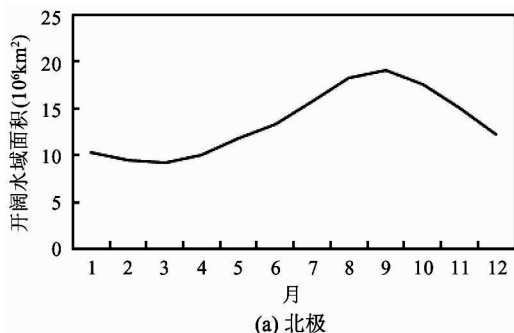
1.3 方法

1.3.1 数据预处理

将转为 TIF 格式的 Chl-a、SST、PAR 和光照时长数据重新投影为北极方位投影,重采样空间分辨率为 $25\text{km} \times 25\text{km}$ 。将得到的 NPP 输入数据以及海冰密集度数据进行裁剪得到喀拉海和巴伦支海的数据。

国际上公认的把海冰密集度为 15% 设为海冰覆盖的判定阈值^[27-29],将海冰密集度大于等于 15% 的栅格面积乘以对应栅格的海冰密集度,累加得到的总面积为海冰面积。基于海冰的定义,将开阔水域面积定义为海冰密集度小于 15% 的每个栅格的面积乘以对应栅格的开阔水域密集度,累加得到开阔水域总面积。

1.3.2 开阔水域面积



以每日开阔水域面积为依据,计算月平均开阔水域面积,按照此流程统计喀拉海和巴伦支海以及整个北极的开阔水域面积。

1.3.3 NPP

采用 VGPM (vertically generalized production model) 模型^[30],该模型在归一化叶绿素浓度、光照周期和光学深度基础上,建立的一种光依赖、垂直深度相关的模型。日净初级生产量计算公式为:

$$\text{Daily_NPP} = 0.66125 \times P_{opt}^B \times \frac{par}{par + 4.1} \times Z_{eu} \times C_{hl} \times dl \quad (1)$$

其中, Z_{eu} 表示真光层深度^[31,32], Daily_NPP 代表从表面到真光层深度的日净初级生产力。 P_{opt}^B 为最大光合作用速率^[33,34], par 为表面光合有效辐照度, C_{hl} 为最大光合作用速率所在深度的 Chl-a 浓度,用表面 Chl-a 浓度代替。 dl 为光照时长。

VGPM 法原式中真光层叶绿素浓度公式是针对中低纬度区域所建立的模型。针对中高纬度区域, Morel 等^[32] 基于中高纬度区域 309 个站点数据模拟得出适合中高纬度区域的真光层叶绿素浓度 C_{TOT} 计算公式:

$$C_{TOT} = 37.9 \times (C_{hl})^{0.548} \quad (2)$$

采用式(2)求得真光层叶绿素浓度后,可求取北极及其附近海冰覆盖区真光层深度 Z_{eu} 。

2 结果

2.1 开阔水域面积变化

3 月北极开阔水域面积从 $9.20 \times 10^6 \text{ km}^2$ 开始增加,9 月开阔水域面积达到最大值,为 $19.09 \times 10^6 \text{ km}^2$ (图 2)。喀拉海和巴伦支海与北极的变化极

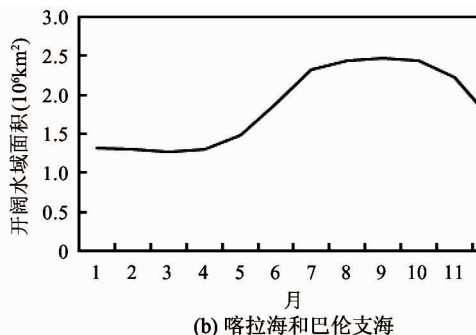
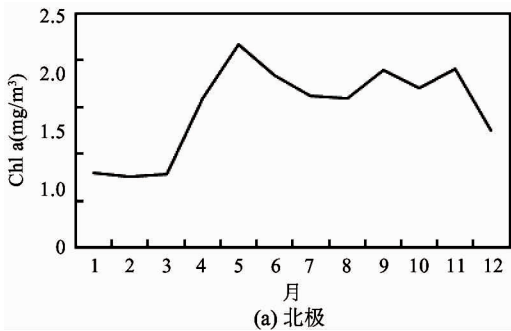


图 2 2016 年北极 (a)、喀拉海和巴伦支海 (b) 开阔水域面积变化

为相似,3 月开阔水域面积达到最小值,为 $1.27 \times 10^6 \text{km}^2$ 。5 月开阔水域面积迅速增加,到 7 月开始增加速度变得非常缓慢,9 月达到最大值,为 $2.47 \times 10^6 \text{km}^2$ 。2016 年喀拉海和巴伦支海平均开阔水域面积为 $1.85 \times 10^6 \text{km}^2$,占北极开阔水域总面积 $13.52 \times 10^6 \text{km}^2$ 的 13.68%,为北极开阔水域面积的增加贡献了 12.1%。



2.2 Chl-a 时空变化

2016 年北极 Chl-a 浓度有 3 个高峰值,分别是 5 月、9 月和 11 月(图 3(a))。5 月 Chl-a 浓度是最高的,为 2.17mg/m^3 ,此时浮游植物生长最为旺盛。喀拉海和巴伦支海与北极 Chl-a 浓度的变化相差很大。5 月有个小高峰,在 9 月陡然上升,到 10 月高达 15.52mg/m^3 (图 3(b))。9 月 Chl-a 浓度快速异常增加反映了浮游植物的爆发性增殖。

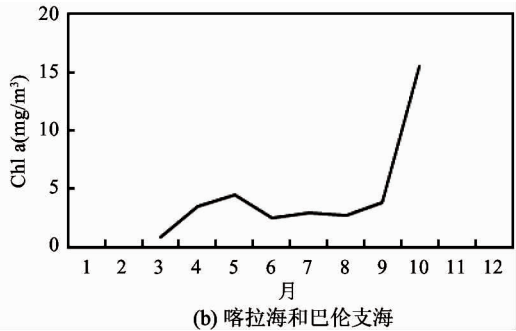


图 3 2016 年北极 (a)、喀拉海和巴伦支海 (b) Chl-a 浓度月变化

1 月北极只有圣劳伦斯湾大部分海区和巴芬湾/拉布拉多海、鄂霍次克海和日本海少部分海区检测到 Chl-a 分布,且浓度低于 2mg/m^3 。其他海区由于 Chl-a 浓度低于检测限度,无法检测到 Chl-a。2 月开始,白令海和格陵兰海开始检测到 Chl-a。3 月起,Chl-a 分布明显变多,由四周(低纬度地区)不断向中心(高纬度地区)蔓延。8 月除了北冰洋核心区没有检测到 Chl-a(北冰洋核心区温度低,大部分被海冰覆盖),其余海区都分布有 Chl-a。9 月开始由高纬向低纬、中央向四周减少。在 Chl-a 变化过程中,高浓度值多出现在喀拉海和巴伦支海以及各海区的边缘大陆架部分(图 4)。

3 月 Chl-a 出现在巴伦支海,4 月巴伦支海中部海域 Chl-a 浓度高于 15mg/m^3 ,5 月达到了 30mg/m^3 ,6 月高值区转移至靠近俄罗斯的海岸带区域,尤其是喀拉海的鄂毕湾等。7 月 Chl-a 分布持续扩大,8 月开始减少,10 月只剩俄罗斯西北部白海海域还存在较高浓度的 Chl-a(图 5)。

2.3 海洋 NPP 变化

北极 NPP 从 2 月开始增加,3 月迅速增加,6 月达到最大值(图 6(a)),为 $973.42 \text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。喀拉海和巴伦支海 3 月 NPP 迅速增加,到 5 月达到最大值 $1088.45 \text{mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。在经历 6 月小幅下降以后,在 7 月又引来一个小高峰。然后迅速下降,9 月开始有小幅上升(图 6(b))。喀拉海和巴伦支海 NPP 如此变化无常,与浮游植物季节性暴发增长有关^[13,14]。

2.4 浮游植物水华时空分布

2.4.1 水华发生频率及时间

在进行 2016 年水华判断前,对本文 NPP 结果与 Arrigo^[35]等的结果进行比较,Arrigo 使用北极常用的 NPP 计算方法得出 2003 – 2012 年总面积上 NPP 年平均为 203.85Tg C/a ,用本文使用的方法得出的结果为 191.79Tg C/a ,由于 Arrigo 等的研究区还包括了部分北冰洋中心区域,因此得到的结果会略大于本文的 NPP 结果。故本文使用 VGPM 方法计算北极 NPP 是可行的,且计算结果是可信的。

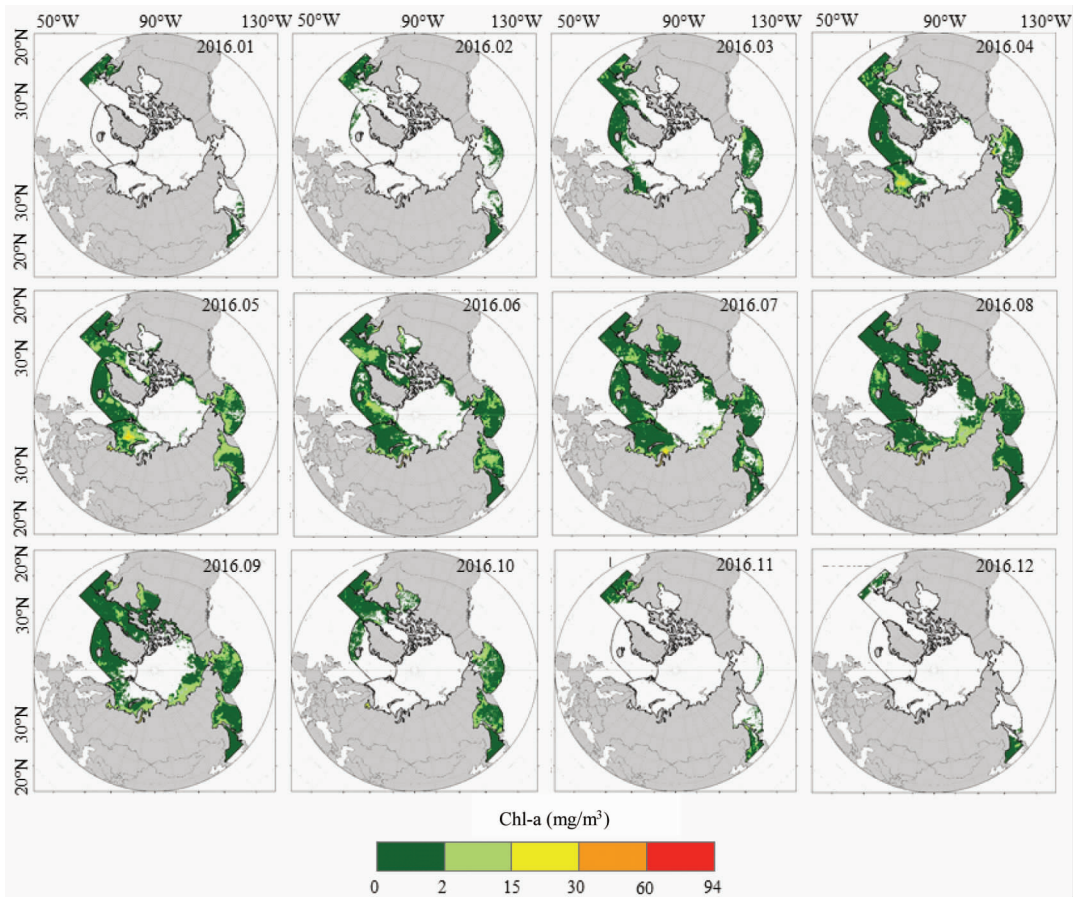


图 4 2016 年北极 Chl-a 空间分布

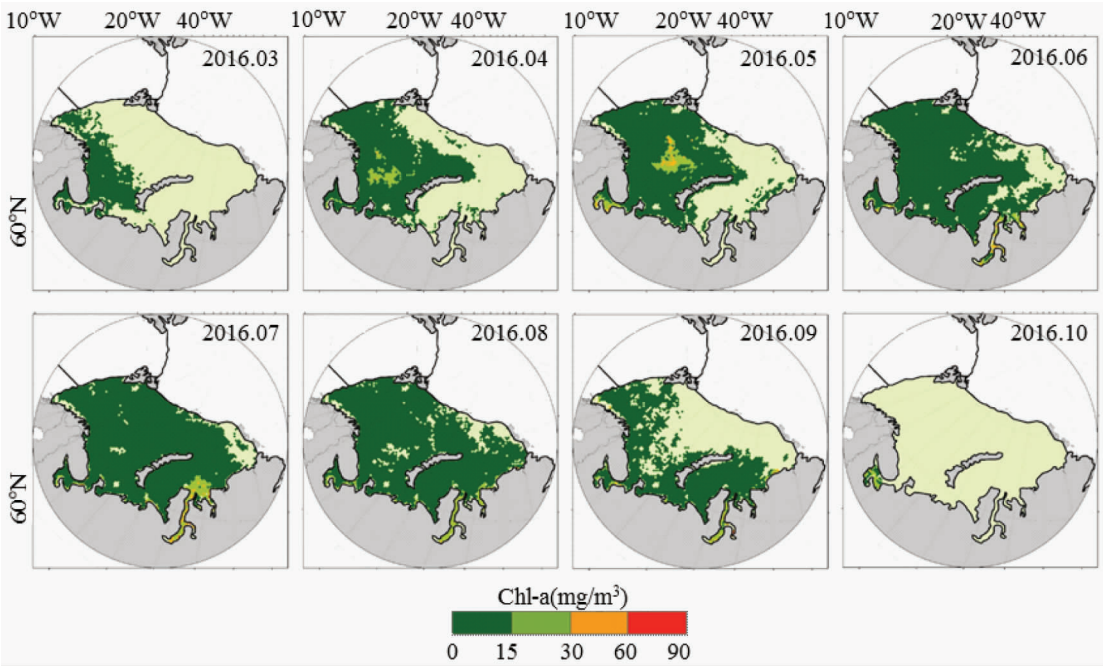


图 5 2016 年喀拉海和巴伦支海 Chl-a 空间分布

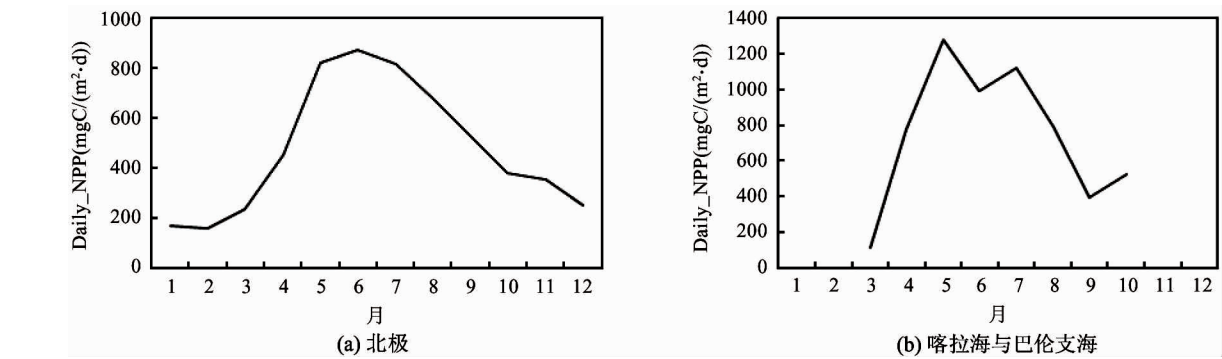


图 6 2016 年北极 (a)、喀拉海与巴伦支海 (b) NPP 变化

浮游植物水华是生物界中浮游植物快速繁殖增长的正常季节性现象。根据 Arrigo^[14] 等对浮游植物水华的定义, NPP 大于 500mg C/(m² · d), 判断为发生浮游植物水华。本文经统计 2016 年喀拉海和巴伦支海浮游植物有 10 个暴发期, 3 月开始有较少面积且时间间断的水华发生, 一共 4 次, 共计 11 天。4 月 9 日起开始连续发生了 164 天的水华, 一直到 9 月 20 日。其后又发生了 5 次短暂性的水华。长度分别为 3 天、2 天、1 天、3 天和 1 天, 到 10 月水华结束, 3 月到 10 月共计 185 天(表 1)。与 Arrigo 等^[14] 得出的 1998 – 2009 年喀拉海和巴伦支海的水华期相比, 增加了 70 多天。说明了 2016 年相比于 1998 – 2009 年, 水华暴发时间提前, 结束时间推迟, 延长了浮游植物的生长期, 导致水华期时间变长。相关研究表明水华暴发的年际变化与海冰消退和出现时间的年际变化存在很大的关系^[10,11, 36,37], 需要进一步分析水华期年际变化的原因。

表 1 喀拉海与巴伦支海水华发生的次数与持续时间			
序号	开始时间	结束时间	持续时间(天)
1	3 月 18 日	3 月 19 日	1
2	3 月 21 日	3 月 22 日	1
3	3 月 24 日	3 月 25 日	1
4	3 月 29 日	4 月 06 日	8
5	4 月 09 日	9 月 20 日	164
6	9 月 21 日	9 月 24 日	3
7	9 月 25 日	9 月 27 日	2
8	9 月 28 日	9 月 29 日	1
9	9 月 30 日	10 月 03 日	3
10	10 月 04 日	10 月 05 日	1

2.4.2 水华空间分布

4 – 9 月是水华发生的高发期。4 月起喀拉海新地岛以西的巴伦支海海域发生大面积且较为连续的水华, 5 月开始水华面积扩大, 向东蔓延, 覆盖了巴伦支海大部分海域。6 月开始水华进一步向东蔓延, 开始向周围变得分散, 新地岛以西的喀拉海也发生了水华。向东蔓延的趋势一直持续到 7 月, 此时水华遍布在深入俄罗斯内陆的水域。8 月开始水华自北向南分布面积减少, 减少的部分集中在巴伦支海海域。9 月仅深入俄罗斯内部的白海、鄂毕湾等边缘海域发生水华。

由于 4 月 9 日 – 9 月 20 日发生了一场持续的水华, 为方便分析, 故将 5 – 8 月的每月水华频率定为 1。4 月共发生了 2 次水华, 9 月发生了 5 次, 得到 4 – 9 月水华频率分布。且图中的 1 表示当月所有天数均发生水华, 0.9 表示当月 90% 的天数发生水华, 同理可得 0.87 的含义。结合图 7 可以得出 4 月水华发生次数较多, 且有 27 天发生水华。5 – 8 月这 4 个月总共发生了一次水华, 每天都有水华分布。9 月水华发生频率最高, 但是每次持续的时间较短, 一个月中 87% 的时间有水华发生。

3 讨论

随着海冰提前消退和结冰延后出现, 浮游植物水华开始时间不断提前, 结束时间不断推后, 水华期持续延长。水华的发生必然带来 NPP 的迅速增加。因此, 分析环境因素对浮游植物水华的影响可间接转化成对 NPP 的影响。喀拉海和巴伦支海常年有开

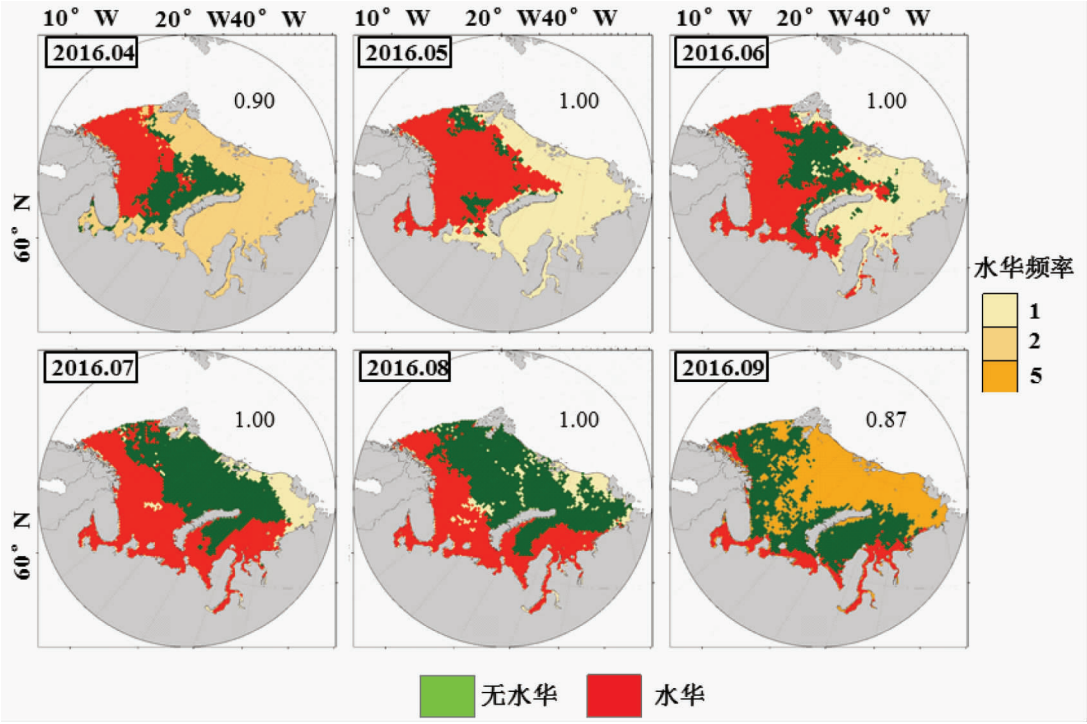


图7 4月-9月水华空间分布及发生频率

阔水域的存在,3月底开始检测出 NPP。随着开阔水域面积进一步增加,NPP 增加,6月开阔水域面积基本达到最大值,此时 NPP 达到最大值,而后波动

减少(图8)。10月,开阔水域面积快速下降,此时基本没有检测到 NPP 存在。开阔水域面积与 NPP 呈显著正相关关系, $p < 0.001$ (0.01 显著性水平)。

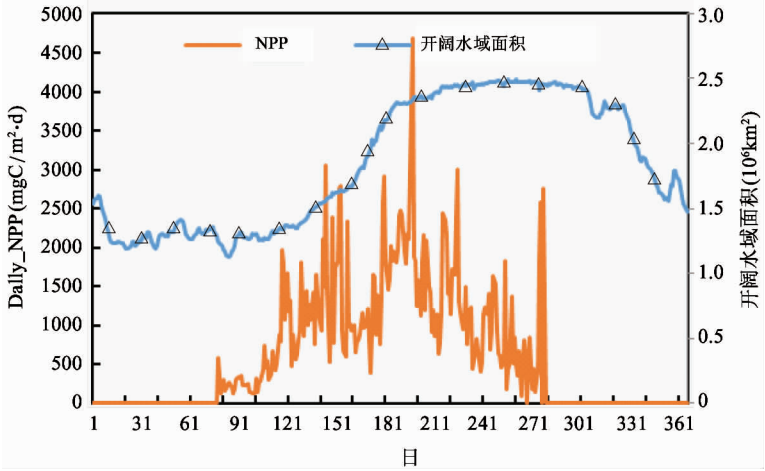


图8 喀拉海和巴伦支海 NPP 与开阔水域面积变化对比

NPP 与 Chl-a 浓度变化趋势最相似,二者显著正相关 ($R = 0.74, p < 0.001$) (图9(a),表2)。Chl-a 在光合作用中起着吸收和传递光能的作用,少部分可以转化光能。Chl-a 浓度高,光合作用强,NPP 也就高。随着 SST 的升高,NPP 波动增加

(图9(b)),在 SST 达到最大值前,NPP 达到最大值,随着 SST 进一步升高,NPP 下降,说明在一定的海温下,SST 会促进 NPP 的产出,但温度过高,反而会抑制 NPP 产出。PAR 扮演植物进行光合作用触发剂的作用,是光合作用的条件,与 NPP 相关系数

达到了 0.77。11 月起虽然还有较强的 PAR (图 9(c)),但是此时,光合作用主要受光照时间等约束。光照时长与 NPP 相关系数为 0.75,光照时间越长,植物光合作用越强(图 9(d))。

对 2016 年喀拉海和巴伦支海影响 NPP 的 5 个参数作滞后相关分析,得到 Chl-a 与 NPP 几乎是同步关系,滞后 NPP 2 天,即当天的 Chl-a 与其前两天的 NPP 的相关系数最高,为 0.74。PAR、光照时长两个因子与 NPP 是先行关系,先行期为 9 天,先行 9

天的相关系数分别为 0.80 和 0.77。SST 和开阔水域面积的变化则均滞后于 NPP 的变化,前者滞后期为 39~41 天,后者为 56~60 天,滞后相关系数为 0.68 和 0.64。这说明了 PAR 和光照时长开始增加的时候,NPP 不会马上增加,有一个反应时间,等到 PAR 和光照时长达到某个阈值时,NPP 开始出现和增加,同时 Chl-a 增加,随着光合作用的增强,SST 升高,导致海冰融化增多,开阔水域面积变大,反过来又会作用于光合作用。

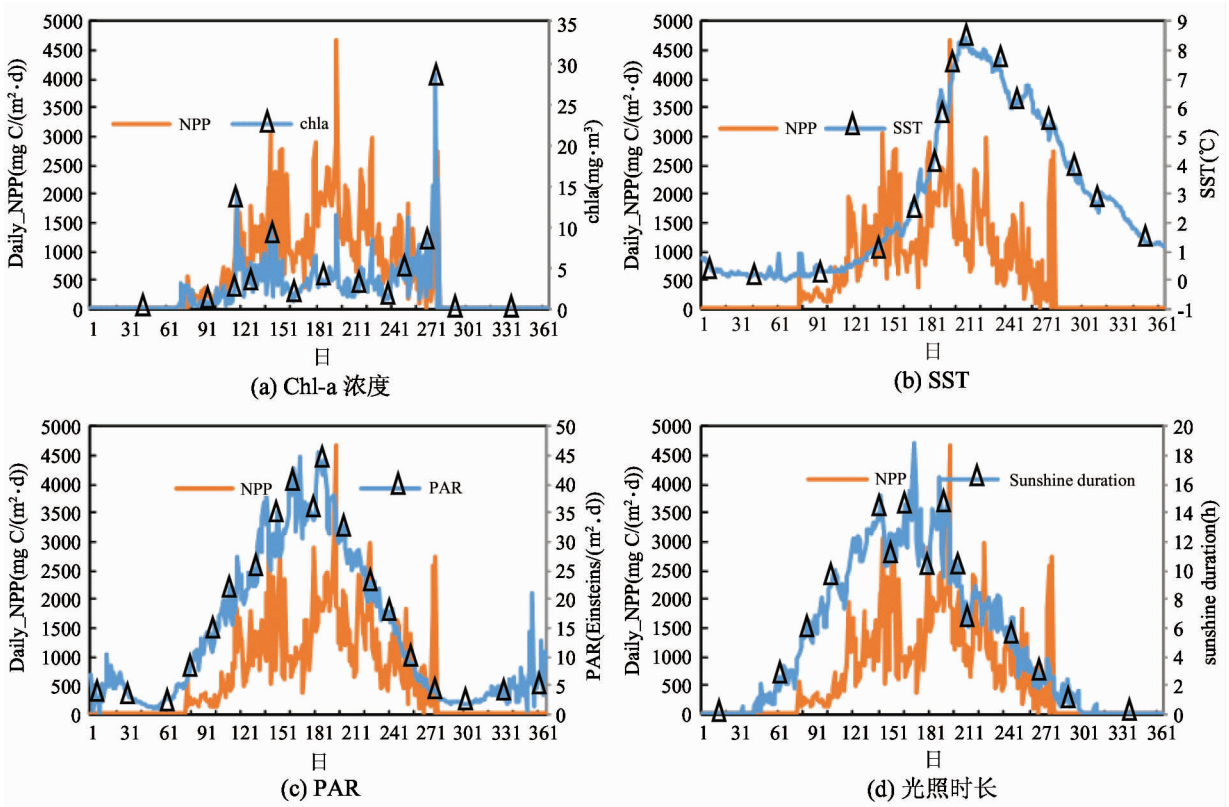


图 9 NPP 与 Chl-a 浓度 (a)、SST (b)、PAR (c) 和光照时长 (d) 日变化

表 2 NPP 与开阔水域面积、Chl-a 浓度、SST、PAR 和光照时长的相关系数

相关系数	开阔水域面积	Chl-a 浓度	SST	PAR	光照时长
NPP	0.31	0.74	0.49	0.77	0.75

注：均通过 0.01 的显著性水平检验。

对北极而言,除了以上分析的因子外,营养盐也是影响浮游植物的主要因素之一。它是海洋浮游植物生长所必需主要成分^[38]。叶尼塞河和鄂毕河径流会带来大量的悬浮和溶解的有机碳和无机碳,带

来附加的营养盐^[39],从而促进浮游植物的光合作用,提高 NPP。1-4 月两条河流的径流量小,在 5 月迅速增加,6 月达到顶峰^[40]。虽然 1-3 月径流小,但该季节其本身营养盐是足够丰富的,但是 NPP

却很少,几乎检测不出来。这主要受控于以光照为主的其他因素的限制。4-9月,光照充足,营养盐虽然在植物大量繁殖过程中被大量吸收,但是由于径流带来的营养盐也在源源不断地进行补充,NPP相对较高,发生了较为频繁的且大范围的水华。9月,水华基本上只分布在鄂毕湾、白海等深入俄罗斯内陆的区域,水深均低于300米,这些区域受陆源影响较大,营养盐较高,因此浮游植物还保持在较高水平。

4 结 论

本文通过分析2016年Chl-a浓度和NPP时空变化,计算浮游植物水华暴发的时间与持续期,进一步探讨开阔水域、NPP的4个输入参数与浮游植物水华的关系,发现喀拉海和巴伦支海是对北极开阔水域面积增加贡献最大的海区之一,贡献了近12.1%。北极Chl-a浓度三个峰值分别出现在5月、9月和11月,白令海、喀拉海和巴伦支海、日本海和鄂霍次克海以及巴芬湾/拉布拉多海都有较多高浓度的Chl-a分布,且多集中在靠近大陆的近岸海域。喀拉海和巴伦支海Chl-a浓度极大值分别出现在5月、7月和10月。起初Chl-a高值出现在喀拉海和巴伦支海中部的新地岛以西海域,然后向边缘大陆架区域扩散,7月高值主要分布在喀拉海的东部,10月高值则出现在白海。

喀拉海和巴伦支海NPP与Chl-a浓度的变化相同。浮游植物会出现季节性的水华,多发生在春夏之季。秋季也会有小的水华发生,这是由于光照条件依然较好,温度下降。3-10月共发生10次水华,共计185天。水华起始于新地岛以西的巴伦支海海域,后向东发展并转移,最后消失在深入大陆内部的白海、鄂毕湾等水域。NPP与Chl-a浓度、SST、PAR、光照时长和开阔水域面积等因素均为显著正相关。Chl-a、SST和开阔水域滞后NPP,Chl-a为2天,几乎为同步关系。SST和开阔水域长达1-2月。PAR和光照时长先行NPP,为9天。喀拉海和巴伦支海陆源有机物主要的来源之一为河流径流,贡献最大的是鄂毕河、叶尼塞河,带来的营养盐是影

响NPP的重要因素之一,但具体的影响机制需要进一步研究分析。

浮游植物是生态系统的生产者,对维持生态系统平衡有巨大贡献。研究其水华的时空分布以及影响因素,为了解北极浮游植物发展现状以及生态质量评估有重要的实际意义,并能够为生态环境治理提供决策支持。随着开阔水域的逐年增加,北极航道的开通,可以加速北极科考的进程,为实地调研的展开提供条件。日后将遥感与野外调查相结合,为北极浮游植物以及生态圈的研究提供更加精确的数据验证。

参考文献

- [1] Cavalieri D J, Parkinson C L, Vinnikov K Y. 30-year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): CRY 4-1
- [2] Kinnard C, Zdanowicz C M, Fisher D A, et al. Climatic analysis of sea-ice variability in the Canadian Arctic from operational charts, 1980-2004[J]. *Annals of Glaciology*, 2006, 44(1): 391-402
- [3] Stroeve J, Holland M M, Meier W, et al. Arctic sea ice decline: Faster than forecast[J]. *Geophysical research letters*, 2007, 34(9): 529-536
- [4] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1999, 104(C9): 20837-20856
- [5] Parkinson C L, Cavalieri D J. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2006[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2008, 113(C7): C07004
- [6] Dong H J, Zou X L. Variations of sea ice in the Antarctic and Arctic from 1997-2006[J]. *Frontiers of earth science*, 2014, 8(3): 385-392
- [7] 裘帛. 北极海冰加速消融[J]. *自然与科技*, 2009(5): 4
- [8] 王蔓蔓, 柯长青, 邵珠德. 基于CryoSat-2卫星测高数据的北极海冰体积估算方法[J]. *海洋学报*, 2017, 39(3): 135-144
- [9] Zygmontowska M, Rampal P, Ivanova N, et al. Uncertainties in Arctic sea ice thickness and volume: new estimates and implications for trends[J]. *The Cryosphere*,

- 2014, 8: 705-720
- [10] Pabi S, Dijken G L V, Arrigo K R. Primary production in the Arctic Ocean, 1998-2006[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(C8): 185-198
- [11] Arrigo K R, Dijken G V, Pabi S. Impact of a shrinking Arctic ice cover on marine primary production[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(19): 116-122
- [12] 孔爱婷, 刘健, 余旭, 等. 北极海冰范围时空变化及其与海温气温间的数值分析[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(6): 797-804
- [13] 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[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 257-265
- [14] Arrigo K R, Dijken G L V. Secular trends in Arctic Ocean net primary production[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C9): 1527-1540
- [15] 布, 斯埃, 宁修仁. 浮游植物水华和赤潮[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 1993(3): 217-224
- [16] Arrigo K R, Swift J H. Massive phytoplankton blooms under Arctic sea ice[J]. *Science*, 2012, 336(6087): 1408
- [17] Sang H L, Stockwell D A, Joo H M, et al. Phytoplankton production from melting ponds on Arctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2012, 117(C4): 4030
- [18] Lin L, He J F, Zhang F, et al. Algal bloom in a melt pond on Canada Basin pack ice[J]. *Polar Record*, 2015, 52(1): 114-117
- [19] Arrigo K R, Perovich D K, Pickart R S, et al. Phytoplankton blooms beneath the sea ice in the Chukchi sea[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2014, 105(7): 1-16
- [20] Tang D L, Kawamura H, Oh I S, et al. Satellite evidence of harmful algal blooms and related oceanographic features in the Bohai Sea during autumn 1998[J]. *Advances in Space Research*, 2006, 37(4): 681-689
- [21] Signorini S R, Mc Clain C R. Environmental factors controlling the Barents Sea spring-summer phytoplankton blooms[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36: L10604
- [22] Druzhkov N V, Makarevich P R, Druzhkova E I. Phytoplankton in the south-western Kara Sea: composition and distribution[J]. *Polar Research*, 2010, 20(1): 95-108
- [23] Cavalieri D J, Parkinson C L. Arctic sea ice variability and trends, 1979-2010[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(4): 881-889
- [24] 邓娟. 北半球海冰变化及其与气候要素的关系: [硕士学位论文][D]. 南京: 南京大学地理与海洋科学学院, 2011. 8-9
- [25] Gebhardt A C, Gaye-Haake B, Unger D, et al. Recent particulate organic carbon and total suspended matter fluxes from the Ob and Yenisei Rivers into the Kara Sea (Siberia)[J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1): 225-245
- [26] Comiso J C, Cavalieri D J, Parkinson C L, et al. Passive microwave algorithms for sea ice concentration: A comparison of two techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, 60(3): 357-384
- [27] Shu Q, Qiao F, Song Z, et al. Sea ice trends in the Antarctic and their relationship to surface air temperature during 1979-2009[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 38(11-12): 1-9
- [28] Worby A P, Comiso J C. Studies of the Antarctic sea ice edge and ice extent from satellite and ship observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(1): 98-111
- [29] 柯长青, 彭海涛, 孙波, 等. 2002 年—2011 年北极海冰时空变化分析[J]. *遥感学报*, 2013, 17(2): 452-466
- [30] Behrenfeld M J, Falkowski P G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration[J]. *Limnology & Oceanography*, 1997, 42(1): 1-20
- [31] Reinart A, Arst H, Erm A, et al. Optical and biological properties of Lake ülemiste, a water reservoir of the city of Tallinn II: Light climate in Lake ülemiste[J]. *Lakes & Reservoirs Research & Management*, 2001, 6(1): 75-84
- [32] Morel A, Berthon J. Surface pigments, algal biomass profiles, and potential production of the euphotic layer: relationships reinvestigated in view of remote-sensing applications[J]. *Limnology & Oceanography*, 1989, 34(8): 1545-1562
- [33] Eppley R W. Temperature and phytoplankton growth in the sea[J]. *Fishery Bulletin- National Oceanic and Atmospheric Administration*, 1972, 70(4): 1063-1085
- [34] 殷燕, 张运林, 时志强, 等. 基于 VGPM 模型和 MODIS 数据估算梅梁湾浮游植物初级生产力[J]. *生态*

- 学报, 2012, 32(11): 3528-3537
- [35] Arrigo K R, Dijken G L V. Continued increases in Arctic Ocean primary production [J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 136:60-70
- [36] Kahru M, Brotas V, Manzanosarabia M, et al. Are phytoplankton blooms occurring earlier in the Arctic [J]. *Global Change Biology*, 2015, 17(4): 1733-1739
- [37] Brown Z W, Arrigo K R. Sea ice impacts on spring bloom dynamics and net primary production in the Eastern Bering Sea [J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2013, 118(1): 43-62
- [38] 王资生. 海水营养盐及其对浮游植物的影响[J]. 盐城工学院学报(自然科学版), 2001, 14(2): 40-43
- [39] Novikhin A. Nutrients in the Kara Sea: distribution, variability, and budgets [C]. In: Proceedings of the Joint Meeting of the European Union of Geosciences (EUG) and the European Geophysical Society (EGS), Nice, France, 2003. 246
- [40] 隋翠娟, 张占海, 刘骥平, 等. 北极河流径流量变化及影响因子分析[J]. 海洋学报, 2008, 30(4): 39-47

The temporal and spatial variation of phytoplankton blooms in Kara and Barents Seas in 2016

Li Haili*, Ke Changqing*, Zhu Qinghui**

(* School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023)

(** Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026)

Abstract

Based on the data of sea ice concentration from the United States National Snow and Ice Data Center (NSIDC), the data of chlorophyll-a (Chl-a) and photosynthetically active radiation (PAR) from the Ocean Color Processing Center of NASA, the data of sea surface temperature (SST) from the National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA) and the sunshine duration data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the monthly variation of the open area in the Kara and Barents Seas, and the temporal and spatial variations of the Chl-a concentration and the net primary productivity (NPP) in the area are analyzed. The time and length of phytoplankton bloom are calculated, and the relationship between the phytoplankton bloom and the open water area, Chl-a concentration, SST, sunshine duration and PAR is discussed. The results indicate that there are always open waters in the Kara and Barents Seas, and the change trend is consistent with the overall trend of the Arctic in 2016. The Chl-a concentration is similar to the NPP, and both reach their maximum in May, July and October. Phytoplankton blooms occurred ten times in 2016, lasting 185 days in total. Phytoplankton blooms are affected by a variety of factors and they are positively related to the area of open water, Chl-a concentration, SST, PAR, and sunshine duration. The relationship between Chl-a and NPP is almost synchronous. The changes of SST and open water area lag behind NPP, while the changes of PAR and sunshine duration are earlier than that of NPP.

Key words: Kara and Barents Seas, open water, phytoplankton bloom, chlorophyll-a (Chl-a), net primary productivity (NPP)