

中国近海近20年来分粒级浮游植物初级生产力时空特征 遥感分析

蔡福晟¹, 王胜强^{1,2}, 郎姝燕³, 贾永君³,
孙德勇¹, 张海龙¹

(1.南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2.自然资源部海岸带开发与保护重点实验室, 江苏 南京 210024; 3.国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

摘要:本研究基于近 20 年 (2002—2022 年) 的卫星遥感数据, 估算了中国近海分粒径等级 (粒级) 浮游植物净初级生产力 (net primary productivity, NPP), 分析了其时空特征及其影响因素。结果表明: 中国近海总 NPP 和分粒级 NPP 均呈近岸高、外海低的特征, 近岸总 NPP 由小型浮游植物 NPP (NPP_{micro}) 主导, 外海由微型 (NPP_{nano}) 和微微型浮游植物 NPP (NPP_{pico}) 贡献, NPP_{pico} 贡献更多。在时间上, 渤海、长江口等近岸海域总 NPP 和分粒级 NPP 均在夏季出现峰值, 而黄海中部和东海外海峰值出现在春季, 近 20 年总 NPP 和分粒级 NPP 变化趋势较为稳定。总 NPP 和 NPP_{micro} 与漫衰减系数呈正相关, 与海面风速呈负相关, 与海表温度在东海呈负相关, 在其他区域呈正相关。 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 均与漫衰减系数呈负相关, 在东海中部海表温度也呈负向驱动。

关键词:分粒级初级生产力; 近 20 年时空变化; 中国近海; MODIS 遥感数据

中图分类号:X87 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2025)02-0294-10

Remote sensing of spatiotemporal variations of size-fractionated primary productivity in the Chinese coastal area over the past two decades

CAI Fusheng¹, WANG Shengqiang^{1,2}, LANG Shuyan³, JIA Yongjun³,
SUN Deyong¹, ZHANG Hailong¹

(1.School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2.Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210024, China; 3.National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

Abstract: This study estimated size-fractionated phytoplankton's net primary productivity (NPP) in the Chinese coastal area using satellite data over the past two decades (2002—2022). Subsequently, we analyzed their spatiotemporal variations and identified driving factors. The results indicate that both total NPP and size-fractionated NPP exhibit higher values in coastal areas compared to offshore regions. Coastal total NPP was dominated by micro-phytoplankton NPP (NPP_{micro}), whereas offshore regions are primarily characterized by contributions from nano- (NPP_{nano}) and pico-phytoplankton NPP (NPP_{pico}), particularly NPP_{pico} . Seasonal patterns show peak values for total NPP and size-fractionated NPP in coastal regions like the Bohai Sea and the

收稿日期:2023-11-01, 修订日期:2023-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(42176181, 42176179, 42106176); 江苏省基础研究计划(自然科学基金)项目(BK20211289, BK20210667); 自然资源部海岸带开发与保护重点实验室开放基金项目(2021CZEPK02)

作者简介:蔡福晟(1998—), 男, 辽宁本溪人, 硕士, 主要从事海洋遥感应用研究, E-mail: zwhy13291272197@outlook.com

通信作者:王胜强, 男, 教授, 主要从事海洋光学和水色遥感方面的研究, E-mail: shengqiang.wang@nuist.edu.cn

Yangtze River estuary during summer, while the central Yellow Sea and the offshore East China Sea exhibit peak values in spring. Long-term trends in total *NPP* and size-fractionated *NPP* remain generally stable over the past two decades. Correlation analyses show positive associations between total *NPP* and *NPP*_{micro} with the diffuse attenuation coefficient, along with negative correlations with sea surface wind speed. Sea surface temperature (SST) exhibits negative effects on total *NPP* and *NPP*_{micro} in the offshore of the East China Sea but demonstrates positive effects in other regions. Conversely, *NPP*_{nano} and *NPP*_{pico} display negative correlations with the diffuse attenuation coefficient, and SST also exerts negative driving effects in the offshore of the East China Sea.

Key words: size-fractionated primary productivity; spatial-temporal variations; Chinese coastal area; MODIS data

海洋净初级生产力(net primary productivity, *NPP*)是浮游植物通过光合作用制造有机物的速率,在全球碳通量变化中占有重要地位。浮游植物通过光合作用将海水中数量巨大的二氧化碳转化为颗粒有机碳,在相当程度上可以控制海—气界面二氧化碳的交换,对全球气候具有调控作用^[1]。此外,浮游植物初级生产是海洋食物链的源头,为海洋生态系统提供了物质基础,是海洋物质循环和能量流动的关键环节,可从根本上影响海洋生态系统和诸多生物地球化学过程^[2]。

种群多样性是浮游植物的典型特征,不同类群的浮游植物具有不同的初级生产过程,对海洋生态系统的结构和功能产生不同的影响^[3]。因此,单一的总初级生产力无法深入地认识海洋生态系统以及其生物地球化学过程。通常情况下,浮游植物按粒径大小被分为三个等级:小型浮游生物(micro-phytoplankton, >20 μm),主要包括硅藻和甲藻;微型浮游植物(nano-phytoplankton, 2~20 μm),主要由定鞭藻、金藻、隐藻和绿藻组成;微微型浮游植物(pico-phytoplankton, <2 μm),主要包括蓝藻类^[4]。不同粒径等级(以下简称为“粒级”)的浮游植物对环境变化的响应存在差异,且有明显不同的生理过程及生态功能,如营养物质利用效率^[5]、光吸收特性^[6]、光合作用效率^[5]、细胞沉降速率^[7]和被摄食几率等^[8]。例如,小型浮游植物是新初级生产力和碳沉降输出的主要贡献者,而微型和微微型浮游植物主要循环于真光层的微食物环,对碳沉降输出贡献较小^[7]。因此,分粒级浮游植物的初级生产力信息对海洋生态系统物质循环、能流结构和食物网等的深入认知具有十分重要的意义。

传统的分粒级 *NPP* 观测方法多采用现场调查与实验室分析法^[9]。然而,这些方法往往费时、费力,无法大范围地获取分粒级 *NPP* 数据。而卫星遥感手段不仅可以实现长期大面积同步观测,而且获取的数据量大,综合性强,在时效性和经济性方面都有明显的优势^[10]。因此,针对分粒级 *NPP*, Uitz 等^[5] 基于 P-E 曲线的海洋初级生产力模型,利用现场数据建立了分粒级浮游植物的光合参数量化模型,实现了对分粒级 *NPP* 的估算。Brewin 等^[11] 在 2017 年对该模式做了进一步改进完善。此外, Tao 等^[12] 利用卫星信息估算的浮游植物吸收系数,结合 Uitz 等^[5] 的分粒级浮游植物光合参数,估算了全球海洋分粒级 *NPP*。上述模型被多位研究者应用于不同海域获取分析了分粒级 *NPP* 的信息^[13-14]。

近海是与人类活动最为密切相关的区域,往往是最富有初级生产的区域。针对我国近海,已有学者们展开过 *NPP* 的卫星遥感研究^[15-18],而对于分粒级 *NPP*,国内在现场调查分析方面开展一定的工作^[19-22],对其遥感估算相对较少^[23-24]。本文利用中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)近20年(2002—2022年)来的卫星遥感数据,估算获取中国近海(渤海、黄海、东海)的总 *NPP* 和分粒级 *NPP*,分析揭示其时空分布变化特征,并探究其海洋环境影响因素。

1 材料与方法

1.1 研究区域

本文研究区域为中国近海,主要包括渤海、黄海和东海三个主要海区。该海域洋流汇聚,水

文环境复杂,是重要的碳汇区域之一。渤、黄海中部海域是典型的半封闭边缘海,与陆源物质交换频繁,特别是渤海海域是典型的富有初级生产的区域;东海受长江径流携带的大量淡水影响,在长江口及毗邻海域营养盐往往较高,能够促进浮游植物初级生产过程,而东海中东部海域接近开阔大洋,其营养盐相对较低,浮游植物含量相对较少。因此,本文选取了渤海中部、黄海中部、长江口和东海中部四个子区域作为典型区域,以重点分析分粒级 NPP 的时间变化特征及其影响因素。

1.2 分粒级浮游植物初级生产力估算模式

本文采用了 Uitz 等^[5] 的分粒级 NPP 遥感模式来估算中国近海的分粒级 NPP ,该模型可表示为:

$$NPP_{\text{micro}} = \int_{t=0}^D \int_{z=0}^{1.5Z_{\text{eu}}} \times B_{\text{micro}}(z) \times P_{\text{max,micro}}^B(z) \times \left(1 - \exp \left(- \frac{\alpha_{\text{micro}}^B(z) I(z,t)}{P_{\text{max,micro}}^B(z)} \right) \right) dz dt \quad (1)$$

$$NPP_{\text{nano}} = \int_{t=0}^D \int_{z=0}^{1.5Z_{\text{eu}}} \times B_{\text{nano}}(z) \times P_{\text{max,nano}}^B(z) \times \left(1 - \exp \left(- \frac{\alpha_{\text{nano}}^B(z) I(z,t)}{P_{\text{max,nano}}^B(z)} \right) \right) dz dt \quad (2)$$

$$NPP_{\text{pico}} = \int_{t=0}^D \int_{z=0}^{1.5Z_{\text{eu}}} \times B_{\text{pico}}(z) \times P_{\text{max,pico}}^B(z) \times \left(1 - \exp \left(- \frac{\alpha_{\text{pico}}^B(z) I(z,t)}{P_{\text{max,pico}}^B(z)} \right) \right) dz dt \quad (3)$$

$$NPP = NPP_{\text{micro}} + NPP_{\text{nano}} + NPP_{\text{pico}} \quad (4)$$

式中: NPP 表示总初级生产力; NPP_{micro} 表示小型浮游植物的初级生产力; NPP_{nano} 表示微型浮游植物的初级生产力; NPP_{pico} 表示微微型浮游植物的初级生产力; D 表示日照时长; Z_{eu} 表示真光层深度; $B_{\text{micro}}(z)$ 表示深度 z 处的小型浮游植物叶绿素浓度; $B_{\text{nano}}(z)$ 表示深度 z 处的微型浮游植物叶绿素浓度; $B_{\text{pico}}(z)$ 表示深度 z 处的微微型浮游植物叶绿素浓度; $P_{\text{max,micro}}^B(z)$ 、 $P_{\text{max,nano}}^B(z)$ 和 $P_{\text{max,pico}}^B(z)$ 分别表示深度 z 处小型、微型、微微型浮游植物叶绿素浓度标准化初级生产力的最大值; $\alpha_{\text{micro}}^B(z)$ 、 $\alpha_{\text{nano}}^B(z)$ 和 $\alpha_{\text{pico}}^B(z)$ 分别表示深度 z 处小型、微型、微微型浮游植物叶绿素浓度的光饱和曲线斜率; $I(z,t)$ 表示深度 z 处 t 时的

光合有效辐射。

针对分粒级 NPP 估算模式中的各个参数,本研究分别采用以下方法计算:对于真光层深度 Z_{eu} ,利用 Wang 等^[25] 针对中国近海提出的基于 443 nm 和 660 nm 遥感反射率比的反演模型计算得到,该模型可表示为:

$$Z_{\text{eu}} = 10^{(0.724 + 1.604 \log_{10} x - 1.33 \log_{10}^2 x + 0.435 \log_{10}^3 x)} \quad (5)$$

式中: x 表示 443 nm 和 660 nm 的遥感反射率比。该模型是基于渤海、黄海和东海的大量实测数据建立的,验证结果表明模型的反演均方根误差与平均绝对百分误差分别为 4.42 m 和 17.9%,因此在本文研究区域具有良好的适用性。

对于 $B_{\text{micro}}(z)$ 、 $B_{\text{nano}}(z)$ 和 $B_{\text{pico}}(z)$,首先利用 Huan 等^[26] 分粒级叶绿素遥感反演模型计算得到表层的 B_{micro} 、 B_{nano} 和 B_{pico} ,模型的基本形式如公式(6)所示。Huan 等^[26] 结合我国近海(渤海、黄海和东海)与全球其他海域的实测数据,利用水深对近岸海域(水深 < 50 m)与开阔大洋进行了划分,然后针对不同水深海域分别建立了一组模型参数。Huan 等^[26] 研究表明,该模型在中国近海及毗邻大洋海域均具有良好的适用性。

$$\begin{aligned} B_{\text{nano,pico}} &= B_{\text{nano,pico}}^m [1 - \exp(-S_{1,2} B)] \\ B_{\text{pico}} &= B_{\text{p}}^m [1 - \exp(-S_1 B)] \\ B_{\text{nano}} &= B_{\text{nano,pico}} - B_{\text{pico}} \\ B_{\text{micro}} &= B - B_{\text{nano,pico}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: B 表示表层总叶绿素浓度; B_{micro} 、 B_{nano} 和 B_{pico} 分别表示表层小型、微型、微微型浮游植物叶绿素浓度; $B_{\text{nano,pico}}$ 表示表层微型和微微型浮游植物叶绿素浓度的总和; $B_{\text{nano,pico}}^m$ 和 B_{pico}^m 分别表示对应粒级浮游植物叶绿素浓度的最大值; $S_{1,2}$ 和 S_1 分别表示对应粒级浮游植物叶绿素浓度随总叶绿素浓度增长而增幅的曲线斜率,模型的以上参数详见 Huan 等^[26] 的研究。然后,利用 Brewin 等^[4] 的叶绿素浓度垂向分布模型推算出不同深度的分粒级叶绿素浓度 $B_{\text{micro}}(z)$ 、 $B_{\text{nano}}(z)$ 和 $B_{\text{pico}}(z)$ 。该垂向分布模型针对不同水体垂向结构,采用了不同类型的数学模型对叶绿素浓度垂向分布进行量化估算,具体为:层化水体叶绿素垂向分布采用高斯分布函数进行量化估算,混合均匀水体采用均匀分布函数量化估算,模型的具体参数详见 Brewin 等^[4] 的

研究。

对 $P_{\max, \text{micro}}^B(z)$ 、 $P_{\max, \text{nano}}^B(z)$ 、 $P_{\max, \text{pico}}^B(z)$ 、 $\alpha_{\text{micro}}^B(z)$ 、 $\alpha_{\text{nano}}^B(z)$ 和 $\alpha_{\text{pico}}^B(z)$, 通过 Uitz 等^[5] 基于现场数据建立的量化模型计算。该模型是目前仅有的结合全球现场实测数据建立的分粒级光合参数模型, 其已在多个不同海域开展应用^[13], 并被证明具有良好的适用性。该模型可表示为:

$$\begin{aligned} P_{m,i}^B &= P_{m,i}^{Bs} \exp(-S_i^P \zeta) \\ \alpha_i^B &= \alpha_i^{Bs} \exp(-S_i^a \zeta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: i 表示小型(micro)、微型(nano)和微微型(pico)浮游植物; $P_{m,i}^B$ 表示3种粒级浮游植物光饱和曲线的同化值; α_i^B 表示3种粒级浮游植物归一化初级生产曲线的初始斜率; ζ 表示无量纲深度; $P_{m,i}^{Bs}$ 表示3种粒级浮游植物在海表面处的光饱和曲线同化值; 对于小型、微型和微微型浮游植物其值分别为4.26、2.94和3.75; α_i^{Bs} 表示3种粒级浮游植物归一化初级生产曲线初始斜率, 对于小型、微型和微微型浮游植物其值分别为0.032、0.026和0.007; S_i^P 表示 $P_{m,i}^{Bs}$ 随 ζ 的变化率, 对于小型、微型和微微型浮游植物其值分别为0.37、0.78和2.16; S_i^a 表示 α_i^{Bs} 随 ζ 的变化率, 对于小型、微型和微微型浮游植物其值分别为0.08、-0.67和-1.26。

对于日照时长 D , 根据 Forsythe 等^[27] 的模型, 由纬度与年日计算所得, 该模型被广泛应用于各领域全球日照时长的估算。对于 $I(z, t)$, 本文采用 Brewin 等^[11] 的方法由海表面光合有效辐射 (Photosynthetically available radiation, PAR) 计算所得, 该模型可表示为:

$$I(z, t) = I(0, t) \exp[K(z)z] \quad (8)$$

式中: $I(0, t)$ 表示海表面处 t 时的 PAR; $K(z)$ 表示深度 z 处的水体漫衰减系数。

需要指出的是, 现场分粒级 NPP 测量时需在现场对浮游植物进行培养, 将培养水样利用不同孔径滤膜 (20 μm 、2 μm 和 0.7 μm) 进行过滤, 然后在实验室测量分析得到各个粒级 NPP 。整个实验过程, 尤其是分粒级过滤所需的水样较多, 操作复杂, 使分粒级 NPP 实测数据较少, 这限制了目前对本文分粒级 NPP 反演结果的直接

验证。然而, 为验证本文的 NPP 遥感估算结果, 本研究使用在东海海域多年实测的总 NPP 数据对反演的分粒级 NPP 之和 (总 NPP) 进行了间接验证。结果发现, 本文反演的分粒级 NPP 之和与现场实测值具有较好的一致性, 其平均绝对百分比误差与均方根误差分别为 14.6% 和 167.1 $\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 间接表明本文反演结果具有较好的可靠性。在未来航次调查工作中, 仍需开展分粒级 NPP 的测量实验, 以逐步积累实测数据进一步对分粒级 NPP 估算结果进行直接验证。

1.3 数据资料来源

从 NASA 海洋水色数据官方网站 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) 下载获取了 MODIS 传感器 L3 级月产品, 包括叶绿素 a 浓度、443 nm 和 660 nm 波段遥感反射率、海表面光合有效辐射 PAR 数据, 用于计算分粒级 NPP , 空间分辨率为 4 $\text{km} \times 4 \text{ km}$ 。此外, 在计算分粒级叶绿素浓度及其垂向分布时, 需要使用海洋水深数据和混合层深度数据。对于水深数据, 本研究使用了 ETOPO1 的海底地形深度数据^[28], 其空间分辨率为 1 弧分; 混合层深度数据则来自美国国家海洋和大气管理局发布的混合层深度月产品 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/>)^[29], 其空间分辨率为 9 $\text{km} \times 9 \text{ km}$ 。

为探究分粒级 NPP 的海洋环境影响因素, 本文选取了水体漫衰减系数、海表面温度 (Sea surface temperature, SST) 和海面风速三个参数进行了分析。为此, 从 NASA 海洋水色数据官方网站获取了 MODIS 传感器 490 nm 波段水体漫衰减系数和 SST 的月平均产品, 其空间分辨率为 4 $\text{km} \times 4 \text{ km}$; 海面风速月平均产品则从 <https://www.remss.com/> 网站获得, 其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。以上所有卫星遥感数据的时间跨度为 2002 年 7 月至 2022 年 12 月, 空间范围统一为 $117^\circ\text{E} - 131^\circ\text{E}$, $23^\circ\text{N} - 42^\circ\text{N}$, 并重采样至 4 $\text{km} \times 4 \text{ km}$ 空间分辨率。

2 结果与讨论

2.1 中国近海分粒级浮游植物初级生产力空间分布特征

针对每个月, 将近 20 年的月尺度估算结果

进行年平均,得到了中国近海总 NPP 和分粒级 NPP 的逐月空间分布。结果显示:整体上不同月中国近海的总 NPP 均呈近岸高、外海低的特征,但不同季节近岸和外海之间的差异呈不同的特点。渤海和其他近岸海域水体的总 NPP 常年处于高值,而黑潮及毗邻大洋海域总 NPP 常年处于低值;相比之下,黄海中部和东海陆架区的总 NPP 呈明显的季节变化特征,在春季出现高值,而其他季节处于较低水平,这也使这两个区域的总 NPP 与渤海和近岸海域的总 NPP 差异在春季达到最小,而在其他季节较大,特别在夏季差异达到最大。

根据公式(1)~公式(3)计算分粒级 NPP 并探究其逐月空间分布特征,小型浮游植物 $NPP(NPP_{micro})$ 的逐月空间分布特征与总 NPP 的分布特征类似,大多数月均呈近岸高、外海低的特征,但这种空间分布差异在春季非常小,尤其在3月和4月几乎难以看出差异;另外,在黑潮及毗邻大洋区域,可能由于春季浮游植物藻华, NPP_{micro} 值在4月明显高于其他月。相比之下,微型浮游植物 $NPP(NPP_{nano})$ 和微微型浮游植物 $NPP(NPP_{pico})$ 的逐月空间分布特征较为一致,但明显不同于总 NPP 和 NPP_{micro} 的空间分布特征。整体上, NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 在近岸和外海海域(陆架区)的差异较小,在春季和夏季均较高,而在冬季均处于最低水平。然而,本研究也发现 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 在黑潮及毗邻海域分布存在一定差异。对于 NPP_{nano} 而言,其在黑潮及毗邻海域常年较低,与近岸和陆架区的值存在明显的差异分界,这种差异在春季相对较小而在夏季最大。相比之下, NPP_{pico} 在黑潮及毗邻海域常年呈现与近岸和陆架区类似的分布,甚至在冬季,黑潮及毗邻海域 NPP_{pico} 略高于黄海中部和部分东海陆架区。

本文进一步计算了3种粒级初级生产力 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 对总 NPP 的贡献比例。结果表明,在整个渤海、黄海以及东海近岸 NPP_{micro} 的贡献比例最高, NPP_{nano} 的贡献比例次之,而 NPP_{pico} 的贡献比例最低,这表明这些区域的总 NPP 主要由小型浮游植物(硅藻和甲藻类)贡献。在渤海和其他近岸海域, NPP_{micro} 几乎常

年占绝对主导,贡献比例高达0.8,这可能与渤海和其他近岸海域水体营养盐往往丰富,而硅藻和甲藻类在富营养水体具有竞争优势有关。在黄海中部和东海部分海域,各个粒级浮游植物对总 NPP 的贡献呈现一定的季节变化特征, NPP_{micro} 的贡献比在春季最高,冬季次之,夏、秋季相对较低。春季 NPP_{micro} 的贡献比偏高可能与春季藻华导致的小型浮游植物(硅藻类)大量生长有关。相比之下,这些区域的 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 春、冬季贡献比很低,在夏、秋季则呈现一定贡献比(0.2~0.3)。

2.2 中国近海分粒级浮游植物初级生产力时间分布特征

选取渤海中部、黄海中部、长江口和东海中部作为典型子区域量化分析总 NPP 和分粒级 NPP 的时间变化特征,结果如图1和图2所示。渤海中部和长江口区域的总 NPP 和分粒级 NPP 具有明显且相似的时间变化特征,在晚春及夏季均呈现高值,峰值多出现在夏季,总 NPP 在这两个区域的最大值分别为 $2187.4 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1979.8 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, NPP_{micro} 最大值分别为 $1836.4 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $1356.8 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; NPP_{nano} 最大值分别为 $253.8 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $221.3 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, NPP_{pico} 最大值分别为 $168.3 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $185.0 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,总 NPP 和分粒级 NPP 的最小值均出现在冬季。从组成贡献来看,这两个区域的总 NPP 组成常年较为稳定,主要由小型浮游植物贡献,渤海中部的 NPP_{micro} 贡献比例常年维持在0.8左右,长江口区域的 NPP_{micro} 贡献比例常年维持在0.72,相比之下,微型浮游植物的贡献则少了很多,渤海中部和长江口区域的 NPP_{nano} 贡献比分别为0.11和0.12,而微微型浮游植物的贡献最低,两个区域的贡献常年仅分别为0.07和0.09。

黄海中部和东海中部的总 NPP 和分粒级 NPP 时间变化特征较为类似。两个区域的总 NPP 和分粒级 NPP 在春季(3月或4月)都出现峰值,而在其他季节维持在较低水平。特别是黄海中部的春季(4月)峰值非常显著,总 NPP 、 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 的最大值分别为 $1451.1 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $1150.8 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $176.8 \text{ mgC}/$

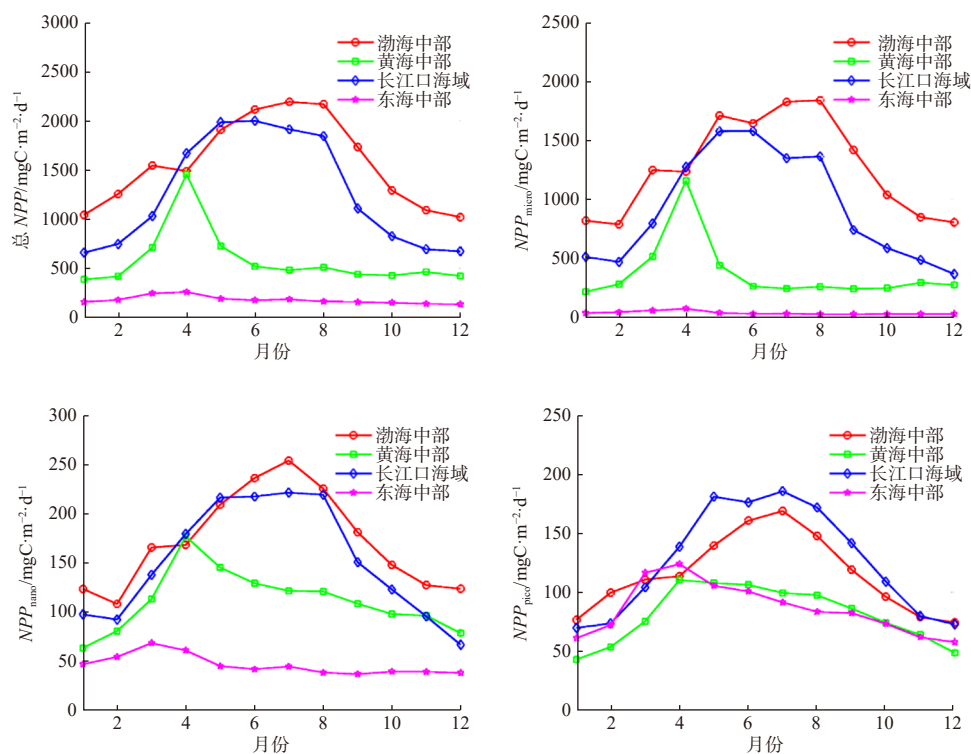


图1 中国近海典型子区域的总 NPP 、 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 的时间变化特征

Fig. 1 Temporal variations of total NPP , NPP_{micro} , NPP_{nano} and NPP_{pico} in four typical sub-regions in the Chinese coastal area

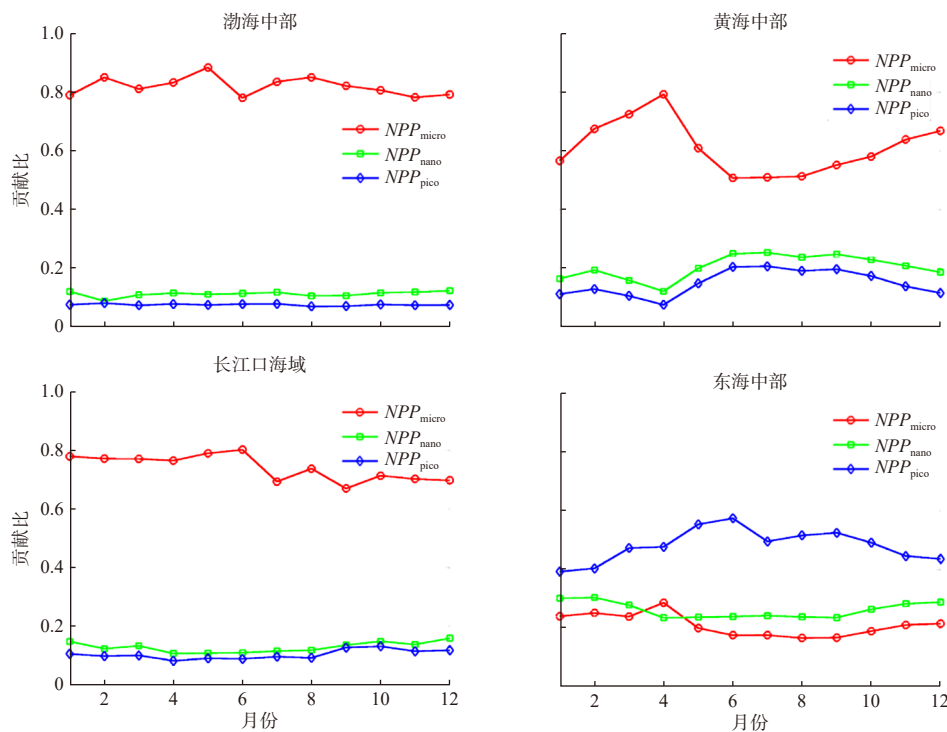


图2 中国近海典型子区域的 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 对总 NPP 贡献比例时间变化特征

Fig. 2 Temporal variations of contribution fraction of NPP_{micro} , NPP_{nano} and NPP_{pico} to total NPP in four typical sub-regions in the Chinese coastal area.

($\text{m}^2 \cdot \text{d}$) 和 $110.3 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 约为最低值的 5 倍。相比之下, 东海中部总 NPP 和分粒级 NPP 在春季虽然也都出现了峰值, 但其峰值明显低于黄海中部, 峰值仅约为最小值的 2 倍。就组成贡献而言, 两个区域的总 NPP 粒级组成都具有明显季节变化特征, 但也存在一定差异。黄海中部总 NPP 常年仍由小型浮游植物主导, 特别在 4 月峰值时 NPP_{micro} 的贡献在 12 个月中达到最大值 (高达 0.79), 而微型和微微型浮游植物的贡献比例则出现 12 个月中的最低值, 两者贡献之和仅为 0.21, 这表明总 NPP 峰值主要是由小型浮游植物 (硅藻和甲藻类) 贡献的。相反, 在东海中部, 总 NPP 常年主要由微微型浮游植物 (蓝藻类) 主导, 在夏季贡献比最高, 最高贡献比例出现在 6 月 (0.57), 在冬季贡献比例最低 (0.39); 小型浮游植物在春季藻华时段 (4 月) 的贡献比例达到最大 (0.29), 其他月则为 0.2, 微型浮游植物的贡献比例则常年较为稳定 (0.26)。

本文计算了近 20 年来各个典型子区域的总 NPP 和分粒级 NPP 的距平, 并拟合了线性方程以探究其近 20 年来的变化趋势 (图 3)。整体上, 各个子区域的总 NPP 和分粒级 NPP 变化趋势较为稳定, 但也呈现一定的上升或下降趋势。其中, 渤海中部的变化相对较大, 总 NPP 和 NPP_{micro} 均呈下降趋势, 但 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 的水平保持稳定, 表明该区域的总 NPP 下降主要是由小型浮游植物初级生产降低引起的。黄海中部和长江口的总 NPP 都呈现一定的升高趋势, 黄海中部的总 NPP 升高趋势可归因于微型和微微型浮游植物, 因为该区域的 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 呈现一定升高区域; 而在长江口, NPP_{micro} 和 NPP_{nano} 呈现较小的上升趋势, 而 NPP_{pico} 呈现略微下降趋势, 表明长江口总 NPP 的上升主要归因于小型和微型浮游植物初级生产力的升高。东海中部海域的总 NPP 近 20 年来无明显变化趋势, 但 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 略有下降而

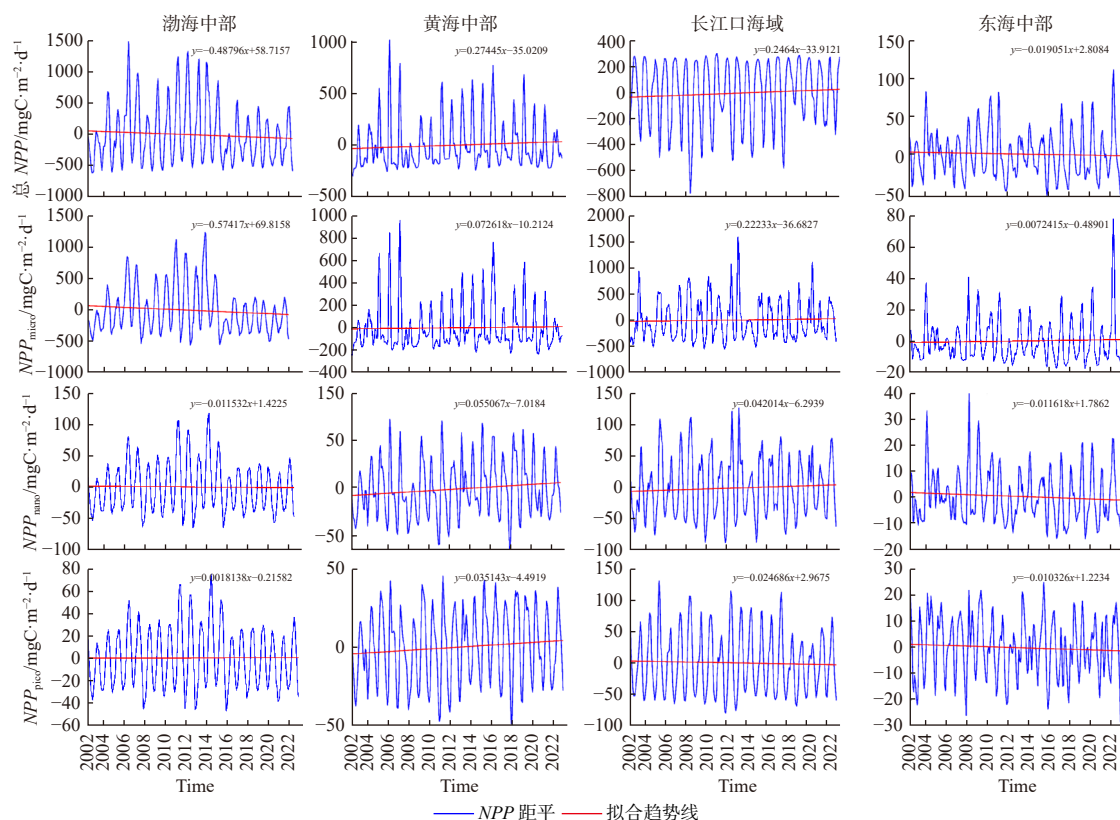


图 3 中国近海典型子区域的总 NPP 、 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 近 20 年来变化趋势

Fig. 3 Long-term variation trends of total NPP , NPP_{micro} , NPP_{nano} and NPP_{pico} in four typical sub-regions in the Chinese coastal area in the past two decades.

NPP_{micro} 略有上升, 这表明虽然该区域的总 NPP 保持在稳定水平, 但其粒级结构存在一定的变化。

2.3 中国近海分粒级浮游植物初级生产力影响因素分析

浮游植物初级生产过程受控于水下光照、海水温度、营养盐、水体稳定状态等多个环境因素。本文选取了现有卫星遥感可获取的3种环境影响因子, 包括水下光衰减系数 $K_d(490)$ 、海表温度 SST 和海面风速, 以探究环境要素对总 NPP 和分粒级 NPP 的影响。在近20年来的逐月数据基础上, 针对各个子区域分别计算了总 NPP 和分粒级 NPP 与3种环境因子的相关系数, 结果如图4所示。可以看出: 在四个子区域中, 总 NPP 与 $K_d(490)$ 都呈显著正相关, 相关系数大于0.65。对于小型浮游植物, NPP_{micro} 除在

长江口海域与 $K_d(490)$ 相关性偏低, 在其他海域与 $K_d(490)$ 都具有较高的正相关性。相反, 对于微型和微微型浮游植物, 四个子区域的 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 则与 $K_d(490)$ 呈负相关。在渤海、黄海和长江口海域, 总 NPP 与 SST 呈正相关性, 其中在渤海海域相关性高达约0.7; 相反, 东海海域总 NPP 则与 SST 呈一定的负相关。类似地, NPP_{micro} 在渤、黄海和长江口海域与 SST 具有较高的正相关性, 而在东海海域也呈负相关。对于微型和微微型浮游植物, NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 在渤海和长江口与 SST 具有较好的正相关性, 而在东海海域呈负相关, 在黄海海域二者几乎无相关性。海面风速与总 NPP 和 NPP_{micro} 在所有子区域均呈负相关, NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 在长江口与海面风速有一定正相关性, 在其他区域相关性则不高。

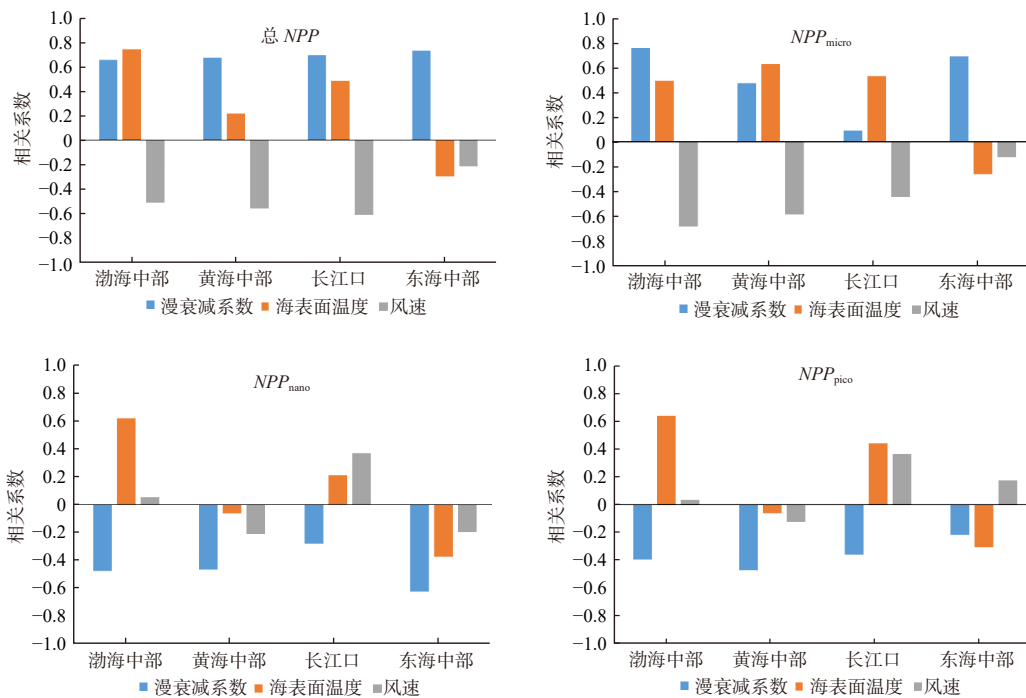


图4 中国近海典型子区域的总 NPP 、 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 与漫衰减系数、海表温度以及海面风速的相关关系

Fig. 4 Correlation coefficients of total NPP , NPP_{micro} , NPP_{nano} and NPP_{pico} with $K_d(490)$, SST and wind speed in four typical sub-regions in the Chinese coastal area

对于以上所述的初级生产力和环境要素之间的相关关系, 可能的主要原因如下: 在小型浮游植物主导的近岸海域, 受河流注入或水体混合引起的底层颗粒物再悬浮影响, 水体往往较为浑浊, 具有较高的 $K_d(490)$ ^[30], 同时河流注入以及底层物质再悬浮过程也可带来丰富的营养盐^[31], 富

营养化水体有利于小型浮游植物(硅藻或甲藻类)竞争生长, 导致 NPP_{micro} 增高, 进而与 $K_d(490)$ 呈现正相关性。河流淡水注入往往在夏季达到最大^[32], 而夏季海表温度 SST 达到最大, 这可能使得 NPP_{micro} 与 SST 在近岸海域呈现正相关关系。此外, 在近岸海域, NPP_{micro} 与海面风速呈

现很强的负相关性,受季风的影响,高海面风速多发生在温度较低的冬季,高海面风速容易引起水体强烈混合,而低温、不稳定水体环境不利于浮游植物生长^[33],这可能使得 NPP_{micro} 降低,因而与海面风速呈现负相关性。

在 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 主导的外海海域,在 SST 较高的夏季,水体常呈层化状态,阻碍了底层颗粒物和营养盐的向上输送,使得上层水体清澈且营养贫乏^[34],清澈水体的 $K_d(490)$ 较低,但寡营养也限制了浮游植物生长,使 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 在夏季相对较低,造成了 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 与 $K_d(490)$ 和 SST 均呈负相关的特点。而当 SST 降低,水体层化被打破,逐渐呈现混合状态,在混合作用下将底层颗粒物和一定的营养盐输送至上表层^[34],这使得 $K_d(490)$ 增大,而在适宜的温度下,上涌的营养盐可刺激浮游植物生长,使得 NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 增大,在春季达到峰值。需要指出的是,虽然本文探究了分粒级 NPP 的环境影响因素,但浮游植物初级生产过程的影响因素多且复杂,针对其环境影响调控机制还需结合更多数据资料(特别是营养盐参数)开展进一步的分析研究。

3 结论

(1) 中国近海总 NPP 和分粒级 NPP 均呈近岸高、外海低的特点,特别是总 NPP 和小型浮游植物 NPP_{micro} ; 近岸水体总 NPP 主要由 NPP_{micro} 贡献,微型浮游植物 NPP_{nano} 和微微型浮游植物 NPP_{pico} 的贡献很少。

(2) 近岸水体总 NPP 和分粒级 NPP 在夏季达到最大值,而外海水体总 NPP 和分粒级 NPP 峰值主要出现在春季;近二十年来,总 NPP 变化趋势整体上较为稳定,但在渤海中部略有下降趋势,主要由 NPP_{micro} 下降引起;长江口和黄海中部的总 NPP 略有上升趋势,可分别归因于 NPP_{micro} 、 NPP_{nano} 的上升和 NPP_{nano} 、 NPP_{pico} 的上升。

(3) 不同区域的总 NPP 和分粒级 NPP 呈现不同的环境因子影响特征,整体上 NPP_{micro} 与 $K_d(490)$ 呈正相关,与海面风速呈负相关,除东海中部海域外在其他区域与海表温度呈正相关;

NPP_{nano} 和 NPP_{pico} 均与漫衰减系数呈负相关,在东海中部与海表温度也呈现负相关性。

参考文献:

- [1] SIEGEL D A, BUESSELER K O, BEHRENFELD M J, et al. Prediction of the export and fate of global ocean net primary production: the EXPORTS science plan[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3: 22.
- [2] FALKOWSKI P G, WOODHEAD A D. Primary productivity and biogeochemical cycles in the sea[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [3] NAIR A, SATHYENDRANATH S, PLATT T, et al. Remote sensing of phytoplankton functional types[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(8): 3366-3375.
- [4] BREWIN R J W, SATHYENDRANATH S, HIRATA T, et al. A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(11): 1472-1483.
- [5] UITZ J, HUOT Y, BRUYANT F, et al. Relating phytoplankton photophysiological properties to community structure on large scales[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, 53(2): 614-630.
- [6] WANG G Q, CAO W X, WANG G F, et al. Phytoplankton size class derived from phytoplankton absorption and chlorophyll-a concentrations in the northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2013, 31(4): 750-761.
- [7] GUIDI L, STEMMANN L, JACKSON G A, et al. Effects of phytoplankton community on production, size, and export of large aggregates: a world-ocean analysis[J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54(6): 1951-1963.
- [8] FINKEL Z V, BEARDALL J, FLYNN K J, et al. Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry[J]. *Journal of Plankton Research*, 2010, 32(1): 119-137.
- [9] TILSTONE G H, FIGUEIRAS F G, LORENZO L M, et al. Phytoplankton composition, photosynthesis and primary production during different hydrographic conditions at the Northwest Iberian upwelling system[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2003, 252: 89-104.
- [10] LEE Z, MARRA J, PERRY M J, et al. Estimating oceanic primary productivity from ocean color remote sensing: a strategic assessment[J]. *Journal of Marine Systems*, 2015, 149: 50-59.
- [11] BREWIN R J W, TILSTONE G H, JACKSON T, et al. Modelling size-fractionated primary production in the Atlantic Ocean from remote sensing[J]. *Progress in Oceanography*, 2017, 158: 130-149.

- [12] TAO Z, WANG Y, MA S, et al. A phytoplankton class-specific marine primary productivity model using MODIS data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(12): 5519-5528.
- [13] UITZ J, CLAUSTRE H, GRIFFITHS F B, et al. A phytoplankton class-specific primary production model applied to the Kerguelen Islands region (Southern Ocean)[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2009, 56(4): 541-560.
- [14] UITZ J, CLAUSTRE H, GENTILI B, et al. Phytoplankton class-specific primary production in the world's oceans: seasonal and interannual variability from satellite observations[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(3): GB3016.
- [15] 官文江, 何贤强, 潘德炉, 等. 渤、黄、东海海洋初级生产力的遥感估算[J]. *水产学报*, 2005, 29(3): 367-372.
- [16] 郝 铨. 中国近海叶绿素和初级生产力的时空分布特征和环境调控机制研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [17] 李晓玺, 袁金国, 刘夏菁, 等. 基于MODIS数据的渤海净初级生产力时空变化[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 785-793.
- [18] 杨曦光. 黄海叶绿素及初级生产力的遥感估算[J]. 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2013.
- [19] 黄邦钦, 洪华生, 柯 林, 等. 珠江口分粒级叶绿素a和初级生产力研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 180-186.
- [20] 傅明珠, 王宗灵, 李 艳, 等. 胶州湾浮游植物初级生产力粒级结构及固碳能力研究[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 357-366.
- [21] 刘浩然. 台湾海峡分粒级浮游植物光合参数的调控机制研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [22] 曾祥茜, 乐凤凤, 周文礼, 等. 2009年冬季南海北部浮游植物粒度分级生物量和初级生产力[J]. *海洋学研究*, 2017, 35(3): 67-78.
- [23] 赵红五一, 周 雯, 曾 凯, 等. 基于浮游植物吸收系数和光合有效辐射的南海区域性分粒级初级生产力算法初探[J]. *热带海洋学报*, 2023, 42(1): 43-55.
- [24] DENG L, ZHOU W, XU J, et al. Estimation of vertical size-fractionated phytoplankton primary production in the northern South China Sea[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 135: 108546.
- [25] WANG S Q, LV J, NIE J W, et al. Dynamics of euphotic zone depth in the Bohai Sea and Yellow Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 142270.
- [26] HUAN Y, SUN D Y, WANG S Q, et al. Phytoplankton size classes of global oceans under different bathymetric depths[J]. ESS Open Archive, 2021.
- [27] FORSYTHE W C, RYKIEL E J, STAHL R S, et al. A model comparison for daylength as a function of latitude and day of year[J]. *Ecological Modelling*, 1995, 80(1): 87-95.
- [28] AMANTE C, EAKINS B W. ETOPO1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis[R]. Boulder, Colorado: NOAA, 2009.
- [29] DE BOYER MONTÉGUT C, MADEC G, FISCHER A S, et al. Mixed layer depth over the global ocean: an examination of profile data and a profile-based climatology[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2004, 109(C12): C12003.
- [30] AUSTIN R W, PETZOLD T J. The determination of the diffuse attenuation coefficient of sea water using the Coastal Zone Color Scanner[M]//GOWER J F R. *Oceanography from Space*. Boston: Springer, 1981: 239-256.
- [31] DOMINGUES R B, ANSELMO T P, BARBOSA A B, et al. Nutrient limitation of phytoplankton growth in the freshwater tidal zone of a turbid, Mediterranean estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 91(2): 282-297.
- [32] RIEGMAN R, NOORDELOOS A A M. Size-fractionated uptake of nitrogenous nutrients and carbon by phytoplankton in the North Sea during summer 1994[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1998, 173: 95-106.
- [33] DICKSON R R, KELLY P M, COLEBROOK J M, et al. North winds and production in the eastern North Atlantic[J]. *Journal of Plankton Research*, 1988, 10(1): 151-169.
- [34] TILSTONE G, SMYTH T, POULTON A, et al. Measured and remotely sensed estimates of primary production in the Atlantic Ocean from 1998 to 2005[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2009, 56(15): 918-930.

(本文编辑: 曲丽梅)