

2002年—2022年渤黄东海浮游植物粒径等级月平均遥感数据集

孙德勇^{1,2}, 环宇¹, 王胜强^{1,2}, 李正浩¹, 张海龙^{1,2}, 齐琳³,
刘建强^{2,4}, 何宜军^{1,2}

1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 南京 210044;
2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081;
3. 美国南佛罗里达大学 海洋科学学院, 圣彼德斯堡 33701;
4. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要: 浮游植物是海洋生态环境中不可或缺的一部分, 其粒径等级PSC (Phytoplankton Size Class) 是描述浮游植物在不同地球生物化学循环过程中重要作用的关键参量。黄海、渤海和东海整体位于中国东部, 呈现半封闭特征, PSC现场测量数据集主要来自于近几年开展的航次观测实验, 采样点在空间和时间上分布稀疏不均, 因此需要结合高频次、覆盖范围广的遥感反演技术来填补现场实测数据的不足。本文基于MODIS/Aqua传感器在2002年8月—2022年5月期间的海表遥感反射率产品, 应用Sun等(2019)构建的PSC遥感反演模型, 生产PSC长时序数据集。数据集以Matlab标准格式存储, 共包含238个文件, 便于各软件读取(下载方式: DOI: 10.17632/mjg5s9p4wp.3)。产品精度验证结果显示: 卫星反演与现场测量结果较为一致(小型、微型和微微型浮游植物的平均绝对百分比误差分别为22.9%、11.4%和35.0%)。同时不同海域的空间分布对比验证发现, 优化调整后的叶绿素a反演算法能提高PSC反演模型效果, 使其更贴近于现场测量值。基于本数据集的PSC长时序分布统计结果显示: 近岸海域主要以小型浮游植物富集, 离岸水域主要以微型浮游植物为主。从典型区域的多年月平均曲线来看, 以小型浮游植物为例, 渤海中心和长江口区域都存在春(5月)、夏季(7月)“双峰”特征, 而北黄海区域则呈现春(4月)、秋季(10月)“双峰”特征。同时南黄海和东海离岸海域的春季峰值更显著, 分别位于4月和3月。本数据集有助于精细化分析理解黄海、渤海和东海浮游植物各项生理、生态功能的时空变化规律, 同时又可以作为水体环境监测常规项目, 值得推广使用。

关键词: 卫星遥感数据集, 浮游植物粒径等级, 渤黄东海, MODIS

中图分类号: P733.3/P2

引用格式: 孙德勇, 环宇, 王胜强, 李正浩, 张海龙, 齐琳, 刘建强, 何宜军. 2024. 2002年—2022年渤黄东海浮游植物粒径等级月平均遥感数据集. 遥感学报, 28(6): 1425–1432

Sun D Y, Huan Y, Wang S Q, Li Z H, Zhang H L, Qi L, Liu J Q and He Y J. 2024. Monthly average satellite-estimated dataset of phytoplankton size class in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea during a period of 2002–2022. National Remote Sensing Bulletin, 28(6): 1425–1432 [DOI: 10.11834/jrs.20232248]

1 引言

浮游植物是海洋生态环境中的重要组成部分, 在全球资源贡献、生态系统调节等方面都起到了至关重要的作用 (House 等, 2002; Sabine 等, 2002; 孙德勇 等, 2023, 2022)。研究表明, 不同

粒级结构下的浮游植物在参与生物地球化学过程时往往具有不同表现 (Le Quéré 等, 2005; Nair 等, 2008; Roy 等, 2013)。因此, 研究浮游植物粒径结构对精细理解浮游植物在地球物质能量循环中的重要作用具有积极的推动作用。按照细胞直径大小, 通常将浮游植物分为3种不同的等级

收稿日期: 2022-05-23; 预印本: 2022-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42176179, 42176181, 42106176, 4207060172)

第一作者简介: 孙德勇, 研究方向为海洋水色遥感。E-mail: sundeyong@nuist.edu.cn

通信作者简介: 王胜强, 研究方向为海洋生态遥感。E-mail: shengqiang.wang@nuist.edu.cn

关联数据: DOI: 10.17632/mjg5S9p4wp.3

PSC (Phytoplankton Size Class), 即小型 (Micro, 20—200 μm)、微型 (Nano, 2—20 μm) 和微微型 (Pico, 0.2—2 μm) (Sieburth 等, 1978)。传统的粒径观测方法主要通过仪器直接测量, 如显微镜 (Montagnes 等, 1994)、库尔特计数法 (Ray 等, 2001)、流式细胞仪 (孙书存 等, 2000) 及图像分析仪等 (Waite 等, 1997; Billones 等, 1999)。这类方法观测结果精确性高, 但缺点也非常明显, 如要求实验员技术熟练度高, 同时不易于推广到大范围的实验调查中。

PSC 量化反演研究早期主要开始于国外, 经不断发展完善, 建立了从现场观测到遥感估算的方法理论体系。首先基于现场测量色素集, 通过诊断色素分析法可以计算得到不同粒径等级浮游植物浓度及比例 (Brewin 等, 2010, 2015; Sun 等, 2019; Uitz 等, 2006)。不同学者针对不同海域上的实测数据集, 开发建立了不同的诊断色素权重, 并以此建立了 PSC 遥感反演模型 (Brewin 等, 2010, 2011; Devred 等, 2011; Mouw 和 Yoder, 2010; Roy 等, 2013; Sun 等, 2019)。综合已有 PSC 遥感反演类型, 大致可以分为两大类, (1) 基于叶绿素 a 浓度分解法; (2) 基于光学特性分析法。

第 1 类方法中使用最多的模型统称为三组分模型, 其核心为双组分模型假设, 对于低叶绿素 a (Chla) 浓度下的 Case I 水体有着很高的反演精度 (Brewin 等, 2015)。伴随着三组分模型的大量应用, 其在高 Chla 浓度下的不稳定性逐渐被注意到, 不同学者通过添加环境参数, 或依据 PSC 实际分布特征重新拟合经验关系, 形成了不同的方案, 旨在解决这种不稳定性 (Brewin 等, 2017; Huan 等, 2022; Sun 等, 2019)。第 2 类方法并不依赖 PSC 与 Chla 的关系, 而是利用浮游植物和水体的光学特性反演 PSC, 普适性较好。该类方法主要利用遥感反射率、颗粒物后向散射系数和浮游植物吸收系数等参数, 建立半分析半经验模型, 求解 PSC (Li 等, 2013; Mouw 和 Yoder, 2010; Roy 等, 2013)。

国内 PSC 研究多集中在南海海域 (Lin 等, 2013; Liu 等, 2021; 王桂芬 等, 2005, 2007)。南海海域水体较渤海、东海, 整体更接近或属于 Case I 水体类型, 所以三组分模型能很好地适用于该区域。同时还有利用支持向量机模型反演 PSC 的研究, 也取得了很好的效果 (姚林杰 等, 2015)。而近几年, 对渤海和东海的 PSC 反演研

究逐渐增多, 包括对经典三组分模型的应用 (Sun 等, 2018, 2019b), 以及对其优化改进, 以适用于较浑浊的渤海海水体 (Sun 等, 2019)。综合以上研究发现, 中国近海虽然已有 PSC 遥感反演研究, 但还没有关于 PSC 的数据集发布。因此, 基于 MODIS/Aqua 长时间观测的海量遥感数据, 本研究将构建的 PSC 遥感算法应用于中国渤海、东海海域, 构建了 2002 年—2022 年的月平均浮游植物粒径等级数据集。

2 研究方法或原理

基于覆盖渤海 (Bohai Sea and Yellow Sea)、东海 ECS (East China Sea) 范围的 MODIS/Aqua 遥感影像数据, 本文生产了 2002 年—2022 年渤海、东海月平均 PSC 空间分布数据集, 整体流程如图 1 所示, 具体分为: (1) 首先基于现场航次采集数据集, 对建立的 PSC 遥感反演模型进行验证; (2) 获取长时序 MODIS/Aqua 卫星数据集, 并进行预处理; (3) 生产 PSC 月平均数据集; (4) 分析不同时间尺度上的 PSC 空间分布特征。

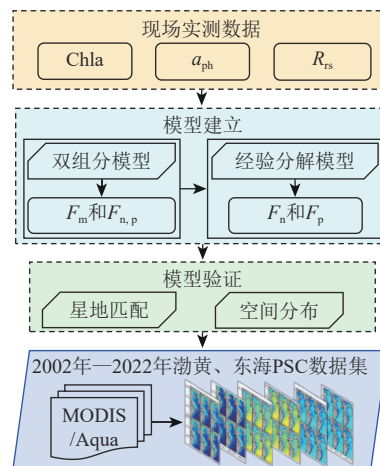


图 1 渤海、东海月平均 PSC 数据集生产流程

Fig. 1 Flow chart for producing the monthly PSC in the Bohai Sea, the Yellow sea, and the East China Sea based on MODIS data

2.1 MODIS 遥感数据获取及预处理

本文中使用的卫星数据集来自于 Aqua 卫星上搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer-radiometer) 得到的海表遥感反射率 R_{rs} (Remote sensing reflectance) 日、月平均产品数据集, 下载自美国国家航空航天局 (NASA) Ocean Color 数据网站 (<https://oceandata.nasa.gov>)

sci.gsfc.nasa.gov/directaccess/MODIS-Aqua/Mapped/Monthly/4km/[2022-05-23])。其中日数据用于验证模型精度, 在该模型完成精度验证之后, 再基于由日平均反射率产品计算得到的月平均反射率数据集, 生产长时间序列数据集。

2.2 PSC反演模型

浮游植物粒径等级反演算法主要参考Sun等(2019)提出的适用于渤黄东海的PSC遥感反演模型。该模型首先通过双组分模型假设, 求解Micro (C_m)、Nano+Pico的叶绿素a浓度 ($C_{n,p}$); 然后通过指数函数再次分离得到Pico (C_p)和Nano的浓度 (C_n)。具体形式如下所示:

$$\begin{aligned} C_{n,p} &= C_m^m (1 - \exp(-S_{n,p}C)) \\ C_p &= aC_{n,p}^b \\ C_n &= C_{n,p} - C_p \\ C_m &= C - C_{n,p} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $C_{n,p}^m$ 指的是 $C_{n,p}$ 随叶绿素a浓度(C)增加时, 能达到的浓度最大值; $S_{n,p}$ 指随 C 增加时 $C_{n,p}$ 的斜率。 a 和 b 为Pico拟合方程系数。通过求解得到 $S_{n,p}=0.591$, $C_{n,p}^m=1.692 \text{ mg m}^{-3}$; $a=0.37$, $b=1.06$ 。随后, 各个粒径等级计算公式如下:

$$\begin{aligned} F_p &= C_p/C \\ F_n &= C_n/C \\ F_m &= C_m/C \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可知, 3个粒径等级占比之和等于1。这里 C 使用的是Sun等(2019)研究中针对近海海域提出的叶绿素a浓度优化模型, 以减轻使用MODIS Chla产品导致的PSC偏高估计现象。方程如下所示:

$$C = 0.965 \exp(-5.931 \log_{10}(R_{rs}(488)/R_{rs}(555))) \quad (3)$$

该三组分模型主要是针对渤黄东海等高叶绿素a浓度海域开发建立的, 经验证具有较好的反演精度(Sun等, 2019)。在面向开阔大洋(低叶绿素a浓度)水体时, 多利用经典三组分模型(如Brewin等, 2015)进行PSC反演。

3 PSC遥感反演结果

3.1 验证数据获取

本文验证数据集主要来自于渤黄东海现场实测数据集, 主要包括2016年夏季BYS航次和2017年春季ECS航次的不同色素浓度数据。首先通过诊断色素分析法得到不同粒径等级比例, 作为PSC模型真值数据集, 其中计算公式参考Brewin等

(2015), 权重系数参考Sun等(2019)。随后, 通过匹配两个航次实测数据集与卫星观测数据集, 得到同一时空下的星地匹配验证数据集。其中, 时间匹配误差为 $\pm 3 \text{ h}$, 取匹配像元周围 3×3 窗口的平均值作为匹配点数据。其中精度评价使用均方根误差RMSE(Root Mean Square Error), 具体参考Sun等(2019)中的细节。

3.2 PSC反演精度评估

由于云遮挡较多, 星地匹配数据集只包含5个样本点, 其最终反演对比精度如图2所示, 可以看出, 3种粒径等级中Nano等级反演效果最为精确(图2中绿色三角标记), Micro、Nano和Pico的RMSE分别为0.10、0.07和0.12。同时因为匹配时间窗口为 $\pm 3 \text{ h}$, 当时间窗口进一步减小时, 其精确性可能会进一步提高。

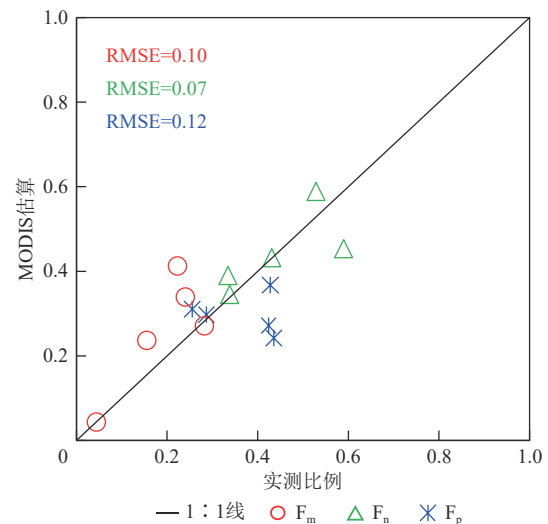


图2 基于时空同步匹配数据集的卫星反演与现场实测PSC对比验证结果(不同颜色代表不同粒径等级, 其中红、绿和蓝分别代表Micro、Nano和Pico粒径等级)

Fig. 2 Validation results of between MODIS inverted and in-situ measured PSC based on the time-space synchronization data (Where red, green, and blue represent for Micro, Nano, and Pico, respectively)

另一方面, 通过对比现场实测PSC分布与MODIS卫星应用结果的空间分布差异, 来验证模型的适用性, 如图3所示(横向总和为1)。从2016年夏季BYS海域PSC对比图可以看出, 在近岸水体及长江口附近海域中, Micro贡献比例占据主导地位(图3(a)), Nano与Pico比例较低。利用MODIS/Aqua的Chla产会导致Micro与Nano呈现偏高估计(图3第2行(a)(b))。而基于校正之后的Chla(式(3)), 得到的PSC更接近于现场实

测结果 (图3第3行), 表明对近岸水体 Chla 算法进行校正的必要性。

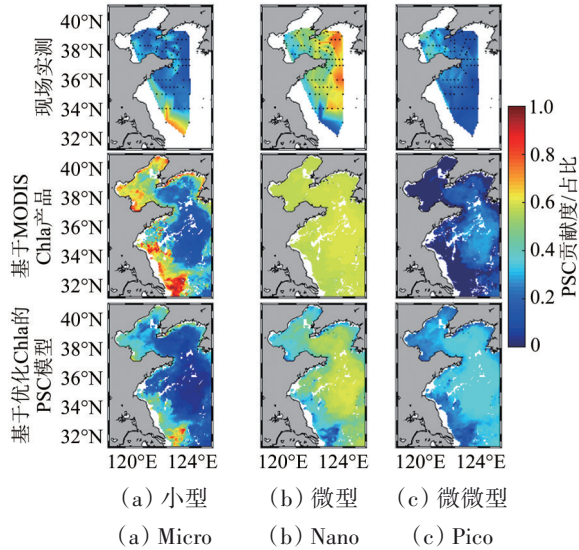


图3 2016年夏季渤海PSC空间分布对比图(第一行中黑色圈点为航次站点)

Fig. 3 Spatial distribution of PSC in the Bohai Sea and Yellow Sea in summer 2016 (The black dots in first line are the location of in-situ samples)

3.3 月平均PSC空间分布数据生产及产品展示

将模型应用到2002年—2022年MODIS/Aqua月平均 R_{rs} 产品上, 首先绘制多年月平均分布结果, 如图4所示, 从左到右分别是Micro (图4(a))、Nano (图4(b))和Pico (图4(c))。高比例Micro分布在渤海、山东半岛沿岸、苏北浅滩、长江口及浙江福建沿岸, 约贡献50%—70%, 最大值出现在长江口附近, 达到0.7。位于苏北浅滩及长江口附近的“暖舌”特征, 在冬、春季向东南方向增长 (图4(a) 1—5月), 在7、8月份收缩到最小规模 (图4(a) 7—8月)。

图4(b) 12幅图为Nano月平均分布图, 其大值区主要集中在南黄海中部还有东海海域, 约为0.6。Nano快速生长于夏秋季节 (图4(b) 6—10月), 在冬、春季逐渐向南收缩至东海海域 (图4(b) 1—5月, 图4(b) 12月)。图4(c) 12幅图为Pico月平均分布图, 与Nano空间分布相比, 两者存在一定的相似性, 但Pico比例较Nano低, 贡献比例约为0.3。

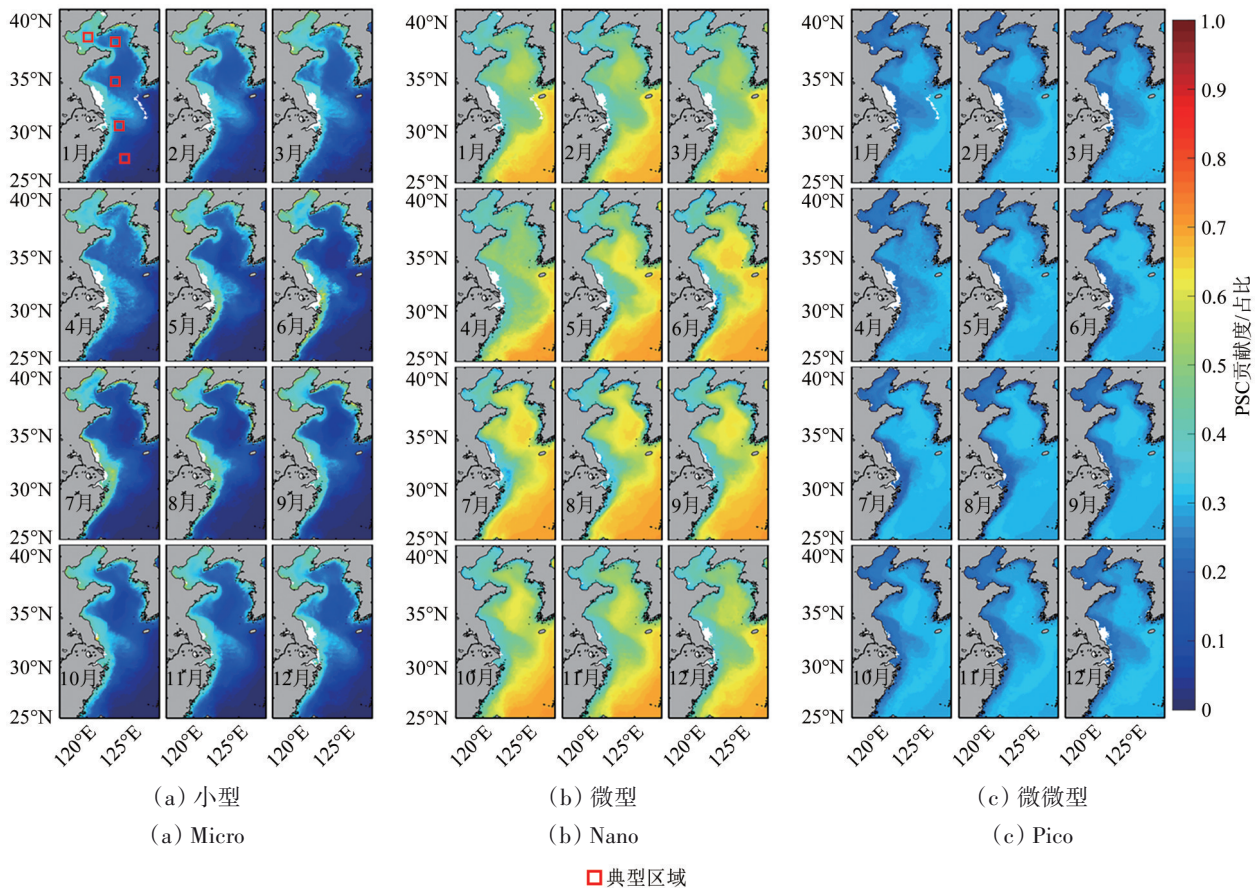


图4 2002年8月—2022年5月渤海东海月平均PSC空间分布图

Fig. 4 Mean monthly spatial distribution of PSC in BYS and ECS from August 2002 to May 2022

3.4 典型区域PSC时间变化

从5个位于不同海域的典型区域(图4(a)中标记的红色方框,分别为渤海、北黄海、南黄海、长江口和东海区域,为方便描述,依次标记为M1—M5)内的多年月平均PSC分布特征来看(图5),在M1和M4区域都存在着春、夏季“双峰”结构,其中M4区域(长江口)最为显著,其峰值位于5月和7月。M1区域(渤海中心)整体波段不显

著,夏季(8月)峰值特征较春季(3月)变化幅度更大。M2区域(北黄海中心)则表现为春、秋季“双峰”特征,时间分别位于4月和10月。

M3区域(南黄海中心)在春季(4月)呈现非常显著的Micro爆发期(图5(a)),与北黄海中心海域类似。M5区域(东海远海)波动不明,主要以Nano为主(图5(b))。

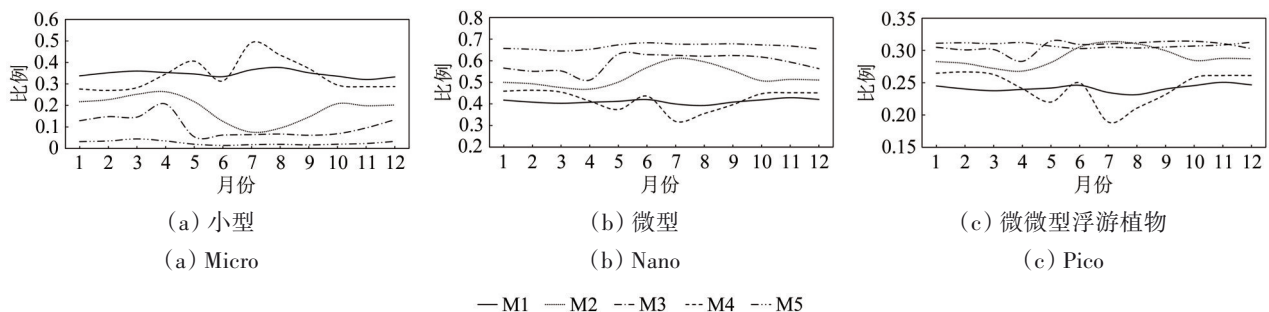


图5 2002年8月—2022年5月期间M1—M5区域PSC月平均变化

Fig. 5 Monthly average distribution of PSC in M1-M5 areas during August 2002 and May 2022

4 数据集存储格式与命名

数据集中月平均PSC占比以及对应的经纬度坐标以Mat格式储存,被掩膜的像元及被剔除的异常像元数值为NaN。数据命名方式为“Ayyyydddyyyyddd_MO_PSC.mat”,其中yyyy为年份,ddd为月份。整个数据集共238个文件,范围为2002年8月—2022年5月,时间段内数据无缺失月份(下载方式:DOI:10.17632/mjg5s9p4wp.3 [2022-05-23]),用户下载后可利用Matlab中load函数直接读取。

5 数据集特点与应用价值

本数据集使用的PSC遥感反演模型,在模型形式上,既应用了在已有研究中被广泛应用的双组分模型假设(Sathyendranath等,2001),又结合了近岸水体PSC分布特征,利用指数模型区分微型与微微型浮游植物。较传统三组分模型更适用于近海浑浊水体。在空间覆盖范围上,数据集包含了中国东部海域(渤海和东海)。另一方面,在时间范围上,包含了2002年—2022年共计近20年238个月的数据,同时月平均尺度既保证了每幅影像上的有效数据量,又包含了季节变化的特征。基于该数据集,可开展不同海域、不同时空尺度上的PSC分布差异性研究,以及与其他环

境变量或生态参数的关联性分析,具有非常好的应用前景与价值。

6 结论

本文基于MODIS/Aqua传感器生成的遥感反射率月产品,通过PSC遥感反演模型以及Chla重构模型,生产得到渤海东海海域PSC月平均数据集,通过掌握不同时空下的PSC变化特征,以期精细化描述不同粒径结构下的浮游植物在地球生物化学过程中的关键作用。同时对PSC反演模型的精度评估,进一步表明了模型的适用性,其空间验证结果表明,对模型输入Chla的精确估算是影响PSC反演精度的重要因素,从而说明了对Chla进行验证建模的必要性。从统计得到的典型海域多年月平均分布来看,不同海域之间PSC的时间变化存在显著的差异性,具体表现在春季峰值出现的具体月份,以及第二峰值出现的时间。这种差异性可能受到局部海域环境条件(如海温,光照),水质(如营养盐,悬浮颗粒物)差异影响,后续研究将继续分析探讨这方面的内容。

志 谢 航次调查实验得到国家基金委共享航次的支持,在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- Billones R G, Tackx M L M, Flachier A T, Zhu L and Daro M H. 1999. Image analysis as a tool for measuring particulate matter concentrations and gut content, body size, and clearance rates of estuarine copepods: validation and application. *Journal of Marine Systems*, 22(2/3): 179-194 [DOI: 10.1016/S0924-7963(99)00040-8]
- Brewin R J W, Ciavatta S, Sathyendranath S, Jackson T, Tilstone G, Curran K, Airs R L, Cummings D, Brotas V, Organelli E, Dall'Olmo G and Raitos D E. 2017. Uncertainty in ocean-color estimates of chlorophyll for phytoplankton groups. *Frontiers in Marine Science*, 4: 104 [DOI: 10.3389/fmars.2017.00104]
- Brewin R J W, Devred E, Sathyendranath S, Lavender S J and Hardman-Mountford N J. 2011. Model of phytoplankton absorption based on three size classes. *Applied Optics*, 50(22): 4535-4549 [DOI: 10.1364/AO.50.004535]
- Brewin R J W, Sathyendranath S, Hirata T, Lavender S J, Barciela R M and Hardman-Mountford N J. 2010. A three-component model of phytoplankton size class for the Atlantic Ocean. *Ecological Modelling*, 221(11): 1472-1483 [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.02.014]
- Brewin R J W, Sathyendranath S, Jackson T, Barlow R, Brotas V, Airs R and Lamont T. 2015. Influence of light in the mixed-layer on the parameters of a three-component model of phytoplankton size class. *Remote Sensing of Environment*, 168: 437-450 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.07.004]
- Devred E, Sathyendranath S, Stuart V and Platt T. 2011. A three component classification of phytoplankton absorption spectra: application to ocean-color data. *Remote Sensing of Environment*, 115(9): 2255-2266 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.025]
- House J I, Prentice I C and Le Quéré C. 2002. Maximum impacts of future reforestation or deforestation on atmospheric CO₂. *Global Change Biology*, 8(11): 1047-1052 [DOI: 10.1046/j.1365-2486.2002.00536.x]
- Huan Y, Sun D Y, Wang S Q, Zhang H L, Li Z H and He Y J. 2022. Phytoplankton size classes in the global ocean at different bathymetric depths. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4206411 [DOI: 10.1109/tgrs.2022.3153477]
- Le Quéré C, Harrison S P, Prentice I C, Buitenhuis E T, Aumont O, Bopp L, Claustre H, Da Cunha L C, Geider R, Giraud X, Klaas C, Kohfeld K E, Legendre L, Manizza M, Platt T, Rivkin R B, Sathyendranath S, Uitz J, Watson A J and Wolf-Gladrow D. 2005. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Global Change Biology*, 11(11): 2016-2040 [DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.1004.x]
- Li Z C, Li L, Song K S and Cassar N. 2013. Estimation of phytoplankton size fractions based on spectral features of remote sensing ocean color data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(3): 1445-1458 [DOI: 10.1002/jgrc.20137]
- Lin J F, Cao W X, Zhou W, Hu S B, Wang G F, Sun Z H, Xu Z T and Song Q J. 2013. A bio-optical inversion model to retrieve absorption contributions and phytoplankton size structure from total minus water spectral absorption using genetic algorithm. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 31(5): 970-978 [DOI: 10.1007/s00343-013-2330-9]
- Liu H R, Liu X, Xiao W P, Laws E A and Huang B Q. 2021. Spatial and temporal variations of satellite-derived phytoplankton size classes using a three-component model bridged with temperature in Marginal Seas of the Western Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 191: 102511 [DOI: 10.1016/j.pocean.2021.102511]
- Montagnes D J S, Berges J A, Harrison P J and Taylor F R J. 1994. Estimating carbon, nitrogen, protein, and chlorophyll a from volume in marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography*, 39(5): 1044-1060 [DOI: 10.4319/lo.1994.39.5.1044]
- Mouw C B and Yoder J A. 2010. Optical determination of phytoplankton size composition from global SeaWiFS imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12): C12018 [DOI: 10.1029/2010jc006337]
- Nair A, Sathyendranath S, Platt T, Morales J, Stuart V, Forget M H, Devred E and Bouman H. 2008. Remote sensing of phytoplankton functional types. *Remote Sensing of Environment*, 112(8): 3366-3375 [DOI: 10.1016/j.rse.2008.01.021]
- Ray S, Berec L, Straškraba M and Jørgensen S E. 2001. Optimization of exergy and implications of body sizes of phytoplankton and zooplankton in an aquatic ecosystem model. *Ecological Modelling*, 140(3): 219-234 [DOI: 10.1016/S0304-3800(01)00322-2]
- Roy S, Sathyendranath S, Bouman H and Platt T. 2013. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 139: 185-197 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.004]
- Sabine C L, Key R M, Feely R A and Greeley D. 2002. Inorganic carbon in the Indian ocean: distribution and dissolution processes. *Global Biogeochemical Cycles*, 16(4): 1067 [DOI: 10.1029/2002gb001869]
- Sathyendranath S, Cota G, Stuart V, Maass H and Platt T. 2001. Remote sensing of phytoplankton pigments: a comparison of empirical and theoretical approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 22(2/3): 249-273 [DOI: 10.1080/014311601449925]
- Sieburth J M, Smetacek V and Lenz J. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their rela-

- tionship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23(6): 1256-1263 [DOI: 10.4319/lo.1978.23.6.1256]
- Sun D Y, Chen Y H, Liu J Q, Wang S Q and He Y J. 2023. Remote sensing estimation of phytoplankton groups using Chinese ocean Color satellite data. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(1): 128-145 (孙德勇, 陈宇航, 刘建强, 王胜强, 何宜军. 2023. 面向浮游植物类群遥感的HY-1C/D卫星数据应用初探. *遥感学报*, 27(1): 128-145) [DOI: 10.11834/jrs.20221749]
- Sun D Y, Huan Y, Wang S Q, Qiu Z F, Ling Z B, Mao Z H and He Y J. 2019. Remote sensing of spatial and temporal patterns of phytoplankton assemblages in the Bohai Sea, Yellow Sea, and east China sea. *Water Research*, 157: 119-133 [DOI: 10.1016/j.watres.2019.03.081]
- Sun D Y, Li Z H, Wang S Q, Huan Y, Zhang H L, Qi L, Liu J Q and He Y J. 2024. Monthly average remote sensing dataset of phytoplankton pigment concentrations in the Bohai sea, Yellow sea and east China sea during 1998-2020. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(4): 1101-1111 (孙德勇, 李正浩, 王胜强, 环宇, 张海龙, 齐琳, 刘建强, 何宜军. 2022. 1998年—2020年渤海、黄海和东海月平均典型浮游植物色素浓度遥感数据集. *遥感学报*, 28(4): 1101-1111 [DOI: 10.11834/jrs.20222244]
- Sun S C, Lu J J and Zhang L H. 2000. Applications of flow cytometer in ecological studies of nano- and pico-phytoplankton. *Chinese Journal of Ecology*, 19(1): 72-78 (孙书存, 陆健健, 张利华. 2000. 流式细胞仪在微型浮游植物生态学中的应用. *生态学杂志*, 19(1): 72-78)
- Sun X R, Shen F, Liu D Y, Bellerby R G J, Liu Y Y and Tang R G. 2018. In situ and satellite observations of phytoplankton size classes in the entire continental shelf sea, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(5): 3523-3544 [DOI: 10.1029/2017jc013651]
- Uitz J, Claustre H, Morel A and Hooker S B. 2006. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: an assessment based on surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(C8): C08005 [DOI: 10.1029/2005jc003207]
- Waite A, Gallager S and Dam H G. 1997. New measurements of phytoplankton aggregation in a flocculator using videography and image analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 155: 77-88 [DOI: 10.3354/meps155077]
- Wang G F, Cao W X, Xu D Z, Liu S and Zhang J L. 2005. Variations in specific absorption coefficients of phytoplankton in northern south China sea. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(5): 1-10 (王桂芬, 曹文熙, 许大志, 刘胜, 张建新. 2005. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化. *热带海洋学报*, 24(5): 1-10) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-5470.2005.05.001]
- Wang G F, Cao W X, Xu D Z and Yang Y Z. 2007. Effects of size structure and pigment composition of algal population on phytoplankton absorption coefficients in the south China sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 29(1): 38-48 (王桂芬, 曹文熙, 许大志, 杨跃忠. 2007. 南海北部藻类粒级结构及色素成分对浮游植物吸收系数的影响. *海洋学报*, 29(1): 38-48) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2007.01.006]
- Yao L J, Cao W X, Wang G F, Xu Z T, Hu S B, Zhou W and Li C. 2015. A support vector machine model to estimate phytoplankton size classes. *Journal of Tropical Oceanography*, 34(4): 37-47 (姚林杰, 曹文熙, 王桂芬, 许占堂, 胡水波, 周雯, 李彩. 2015. 基于支持向量机模型反演浮游植物粒级结构. *热带海洋学报*, 34(4): 37-47) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-5470.2015.04.005]

Monthly average satellite-estimated dataset of phytoplankton size class in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea during a period of 2002—2022

SUN Deyong^{1,2}, HUAN Yu¹, WANG Shengqiang^{1,2}, LI Zhenghao¹, ZHANG Hailong^{1,2}, QI Lin³, LIU Jianqiang^{2,4}, HE Yijun^{1,2}

1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;

2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

3. College of Marine Science, University of South Florida, St. Petersburg, FL 33701, USA;

4. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China

Abstract: Phytoplankton are indispensable part of the marine ecological environment, and their size class PSC (Phytoplankton Size Class) is a key parameter to describe the vital role of phytoplankton in different geobiochemical cycles. The Yellow Sea, the Bohai Sea and the East China Sea are located in the eastern part of China as a whole, shown as semi-closed characteristics. The PSC field measurement is mainly dependent on the in situ cruise observation experiments carried out in recent years. The sampling points are sparse and uneven in space and

time. Therefore, it is necessary to use high Remote sensing inversion technology with a wide range of frequency and coverage to fill the insufficiency of field measured data.

Based on the sea surface remote sensing reflectance products of MODIS/Aqua sensors from 2002-08 to 2022-05, this paper applies the PSC remote sensing inversion model constructed by Sun et al. (2019) to produce PSC long-term data set. The data set is stored in the standard format of Matlab and contains 238 files in total, which are easy to read by each software (DOI: 10.17632/mjg5s9p4wp.3). The product accuracy verification results show that the satellite inversion and the field measurement results are relatively consistent (the average absolute percentage error is 22.9%, 11.4%, and 35.0% for micro, nano, and picophytoplankton, respectively). At the same time, the comparison of spatial distribution in different sea areas shows that the PSC inversion after reconstructing the chlorophyll a concentration is closer to the field measured value.

The statistical results of the long-term distribution of PSCs based on this dataset show that the coastal waters are mainly enriched by microphytoplankton, while the offshore waters are primarily dominated by nanophytoplankton. Judging from the multi-year monthly averaged PSCs in five specific areas, taking microphytoplankton as an example, there are “double peaks” in spring (May) and summer (July) in the center of the Bohai Sea and the mouth of the Yangtze River, while the North Yellow Sea area presents a spring (April), autumn (October) peak feature. Meanwhile, the spring peaks in the offshore waters of the South Yellow Sea and the East China Sea are more significant in April and March, respectively.

This dataset is helpful for fine-grained analysis and understanding of the temporal and spatial variation of phytoplankton in the Yellow Sea, the Bohai Sea, and the East China Sea. It can also be used as a routine project for water environment monitoring and is worthy of popularization.

Key words: remote sensing dataset, phytoplankton size class, Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea, MODIS

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42176179, 42176181, 42106176, 4207060172)