

面向浮游植物类群遥感的HY-1C/D卫星数据应用初探

孙德勇^{1,2,3}, 陈宇航^{1,3}, 刘建强^{2,4}, 王胜强^{1,2,3}, 何宜军^{1,2,3}

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. 江苏省海洋环境监测工程技术研究中心, 南京 210044;

4. 自然资源部国家卫星海洋应用中心, 北京 100081

摘要: 浮游植物是全球初级生产力的重要贡献者, 浮游植物群落结构的变化影响着初级生产力, 进而影响着海洋的物质循环与能量转换, 因此具体量化分析浮游植物各群落结构的生物量对了解浮游植物群落结构变化, 进而了解全球初级生产力极其重要。本文基于2016年与2018年4个渤海航次的实测遥感反射率数据和实测HPLC (High Performance Liquid Chromatography) 浮游植物色素数据, 通过CHEMTAX (CHEMical TAXonomy) 方法将HPLC色素数据转化为相应藻种浓度数据, 其中硅藻、隐藻、蓝藻与绿藻对总叶绿素 a 的占比较大。结合奇异值分解和多元线性回归方法, 构建适用于中国近海硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻浓度的反演模型; 利用留一交叉验证法对模型进行验证, 结果表明: 隐藻、蓝藻和绿藻模型精度较高, 决定系数 R^2 均在0.70及以上, 硅藻 R^2 为0.44 (p 均小于0.001), 硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻浓度反演模型的中值误差ME各为44.81%、45.34%、51.20%和62.80%。随后, 将模型应用于国产HY-1C/D卫星海洋水色扫描仪COCTS (China Ocean Color & Temperature Scanner) 的遥感反射率日产品数据, 获得渤海4个藻种浓度的空间分布特征, 发现与实测浓度的空间分布特征分布一致。进一步分析COCTS与MODIS-Aqua、GOCI-II的藻种浓度反演模型精度, 发现基于COCTS波段的隐藻浓度反演模型精度高于基于MODIS-Aqua、GOCI-II波段模型, 硅藻、蓝藻和绿藻浓度反演模型精度和MODIS-Aqua相近且均高于GOCI-II。在藻种浓度监测的示范性应用上, COCTS效果更好。综上所述, 国产卫星HY-1C/D数据在藻种浓度监测方面具有强大的应用潜力。

关键词: 藻种浓度, CHEMTAX, 奇异值分解, HY-1C/D, 渤海

中图分类号: P2

引用格式: 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

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 [DOI: 10.11834/jrs.20221749]

1 引言

浮游植物广泛分布于海洋水体之中, 是海水生态系统中的初级生产者, 作为食物链的基础, 在生态系统的物质循环和能量流动中发挥着重要作用 (Boyce等, 2010)。同时, 浮游植物类群结构演替是水体环境状况变化的有效反映, 是水生态环境乃至全球气候变化的重要指示 (Behrenfeld

等, 2006; Martinez等, 2009; Stevenson等, 1991)。叶绿素 a 作为绝大多数浮游植物的光合色素, 常用来表示浮游植物生物量, 它能有效量化海洋水体初级生产力水平, 成为衡量海洋生态状况的重要参数 (Behrenfeld等, 2006; Suikkanen等, 2007)。然而随着研究的深入, 单一的叶绿素 a 指标已无法满足对浮游植物进行深入认识的需要, 由此, 开展浮游植物类群结构的鉴定和量化已成为海洋科

收稿日期: 2021-11-22; 预印本: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42176179, 41876203, 42176181, 42106176); 江苏省自然科学基金(编号:BK20211289, BK20210667); 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室开放基金(编号:202102005); 江苏省研究生研究与实践创新(编号:KYCX21_0975)

第一作者简介: 孙德勇, 研究方向为水光学和水色遥感领域的教学和科研工作。E-mail: sundeyong@nuist.edu.cn

通信作者简介: 刘建强, 研究方向为海洋卫星工程建设、海洋遥感应用及规划论证。E-mail: jqliu@mail.nsoas.org.cn

学研究中的一重要基础工作。

针对浮游植物类群结构特征的分析探测,目前水生态学等研究领域的学者们多采用基于原位观测的方式(Li和Dickie, 2001; Zeidner等, 2003)。常规性方法是基于浮游植物类群形态和光学显微技术相结合的分析法(Tomas, 1997; Utermöhl, 1958), 高效液相色谱法(Furuya等, 2003; 王海黎等, 1999; 姚鹏等, 2003), 以及基于藻细胞大小、色素组成、DNA等特征的流式细胞仪法(Balfoort等, 1992; 焦念志和杨燕辉, 1999; 张利华等, 2002)。原位观测可以高精度地获取浮游植物类群结构特征及其生物量(翟红昌等, 2010; Jeffrey和Hallegraeff, 1987; Furuya等, 2003)。然而原位观测费时费力, 观测数据局限于少数的离散点, 无法反映水体在不同时空尺度上的自然连续性, 即无法实现宏观大范围的长时序观测。

随着卫星遥感技术的快速发展, 遥感技术在探测宏观大范围 and 长时序变化的目标对象上, 具有得天独厚的优势(林明森等, 2015)。相关学者在爆发型浮游植物类群的遥感探测分析上, 深入开展了较为丰富的研究工作。例如, 针对中国东海水体的浮游植物爆发, Tao等(2015和2017)开发了一种可以区分探测浮游植物类型(主要指东海原甲藻和硅藻)的半分析算法, 并可有效的用于MODIS和MERIS卫星数据之上; Shutler等(2010)和Moore等(2012)分别通过反射率信号异常和反射率分类器方法, 开发了颗石藻(属于定鞭藻门)爆发的遥感提取算法, 可用于SeaWiFS、MODIS和MERIS卫星数据上对陆架海和极区海域进行监测; Dupouy等(2011)和McKinna等(2011)基于标准反射率技术并结合反射光谱异常和高分辨率NIR波段, 开发了束毛藻(属于蓝藻门)爆发时的遥感识别算法; 同时Hu等(2010a)表明MODIS FAI方法对于遥感判别束毛藻漂浮物具有较大的应用潜能。此外, 学者们在大型绿藻(浒苔)的卫星遥感探测算法、生物量遥感估算、长时序分布规律及影响因素等方面均开展了较深入的研究(He等, 2011; Hu, 2009; Hu等, 2010b和2017; Qi等, 20016和2017)。

然而, 上述遥感算法针对的是浮游植物爆发型水体, 多是面向特定研究区域的单一浮游植物类群, 而未能适用于正常水体的浮游植物类群结

构(即同时存在多种浮游植物)的遥感探测(陈森, 2005; 巩彩兰和樊伟, 2002)。根据Sieburth等(1978)提出的细胞粒径概念模型, 即浮游植物可分为微微型浮游植物($<2\ \mu\text{m}$)、微型浮游植物($2\text{--}20\ \mu\text{m}$)和小型浮游植物($>20\ \mu\text{m}$)3个粒径等级, 由此通过浮游植物粒径等级可以对浮游植物类群结构及功能多样性的细化分解。关于中中国国近海水体的浮游植物粒径等级的遥感探测, 相关学者也做过类似的研究, 例如, Lin等(2014)对南海水域一个冷涡区的浮游植物粒径等级进行了卫星遥感观测研究, 结果表明由于上升流携带了高营养盐, 促进了大颗粒浮游植物细胞的生长, 但仍以微微型浮游植物类群为主导; 姚林杰等(2015)开发了支持向量机模型用于反演浮游植物粒径等级, 并将该模型用于南海数据集获得了较好的反演精度; Sun等(2017)利用静止水色卫星GOCI数据, 对黄渤海水体的浮游植物粒径等级进行了遥感探测研究, 获得了2015年全年的浮游植物粒径等级的时空分布; Sun等(2019)结合SeaWiFS和MODIS数据重建了过去20年(1997年—2017年)渤黄东海水体浮游植物粒径等级的长时序变化, 并与相关环境因子进行了关联分析。

已有研究工作使用的卫星数据多来自国外, 而基于中国国产海洋水色卫星数据开展的浮游植物类群研究则略显不足。近些年来, 中国国产海洋水色遥感卫星取得了重大突破(蒋兴伟等, 2019和2016), 为浮游植物类群遥感探测工作提供了数据基础。作为中国水色遥感卫星系列主要成员, HY-1C/D卫星分别于2018年9月和2020年6月发射成功, 比起第一代海洋水色卫星HY-1A/B, HY-1C/D卫星上搭载的传感器及其性能指标都有明显改进提升, 可以提供观测范围更大、精度和分辨率更高的水色遥感产品, 已经被多次应用于海洋环境要素和相关现象的研究分析(Cai等, 2020; 刘建强等, 2021; 沈亚峰等, 2020; 张可立等, 2019a; 邹亚荣等, 2020), 具有巨大的应用潜力。

为此, 本研究通过野外原位观测、室内分析实验、卫星遥感建模等方法, 结合国产海洋水色卫星数据, 开展针对近海水体浮游植物优势类群的遥感探测研究, 这将为认识近海水体浮游植物类群结构的分布特征及时空演化规律奠定方法论

基础，为利用国产海洋水色卫星数据精细化探测近海水体环境变化做出贡献。

2 数据与方法

2.1 研究区域概况

本文研究区域为渤海海域，约位于37°—41°N、117°—121°E之间，被辽宁省、河北省、天津市和山东省包围，仅在渤海海峡与北黄海相通，是一个半封闭的海域（图1）。渤海受入海河流的影响，营养物质丰富，为浮游植物创造良好的生长条件（刘述锡等，2013；苏纪兰，2005）。

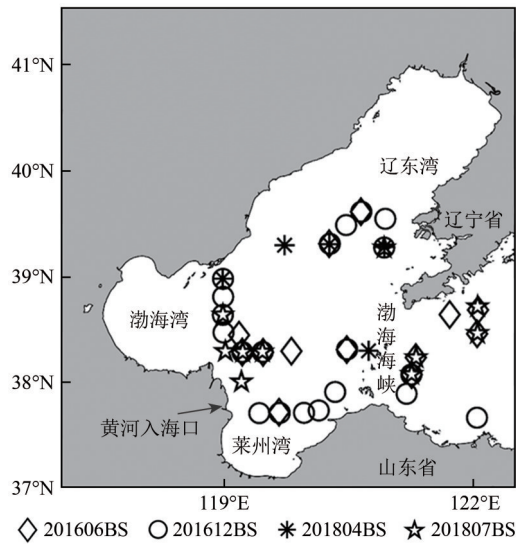


图1 研究区域及航次站点信息
Fig. 1 Map of study area with the different cruise stations

2.2 数据获取与处理

2.2.1 航次实测数据集

本研究所采用的现场实测数据集采集于：2016年6月渤海（201606BS）、2016年12月渤海（201612BS）、2018年4月渤海（201804BS）和2018年7月渤海（201807BS）航次（图1），包含遥感反射率 R_{rs} （Remote Sensing Reflectance）以及浮游植物色素浓度数据，航次数据具体信息如表1所示。

（1）浮游植物色素集及其类群浓度数据集。使用47 mm直径的Whatman GF/F玻璃纤维滤膜过滤采集的海水样本（1500—4000 mL），随后立即将滤膜存储于液氮罐中，用于后续实验室测量。在实验室中，取出滤膜并解冻，滴入5 mL 90%的

HPLC（High Performance Liquid Chromatography）级丙酮溶液进行萃取，并置于超声波振荡器中破碎细胞壁促进色素萃取。通过高效液相色谱法获得色素浓度信息（Van Heukelem和Thomas，2001）。

表1 现场航次及其实验参数信息

Table 1 Details for parameters collected from different cruises in this study

航次时间	调查区域	测量参数	样本数目
2016-06-08—2016-06-18	渤海夏季航次	HPLC、 R_{rs}	12
2016-12-07—2016-12-17	渤海冬季航次	HPLC、 R_{rs}	20
2018-04-08—2018-04-14	渤海春季航次	HPLC、 R_{rs}	6
2018-07-02—2018-07-08	渤海夏季航次	HPLC、 R_{rs}	10

基于色素浓度数据，进行相应的质量控制后（Aiken等，2009），通过CHEMTAX（CHEMical TAXonomy）方法获取浮游植物类群浓度（Furuya等，2003；Liu等，2021；Zhu等，2009）。表2为CHEMTAX方法的色素及其对应的藻种信息（Suzuki等，2005；Zhang等，2018），表3为CHEMTAX方法所使用的初始色素比率矩阵（Liu等，2015；Sun等，2019）。CHEMTAX方法将色素浓度信息计算转化为相应类群浓度信息过程中，随机生成由色素比率矩阵乘以0.60—1.35之间随机数的64个矩阵，经过迭代优化后，选取10个最小均方根误差比率矩阵的平均值作为最终的色素比率矩阵，最终通过此色素比率矩阵计算得到实测类群浓度（Zhang等，2018；Sun等，2021）。

（2）遥感反射率数据集。现场实测 R_{rs} 数据由美国ASD（Analytical Spectral Devices）公司生产的FieldSpec4Hi-ResNG地物光谱仪测量获得。为了准确获取目标地物的遥感反射率，选择白天且光强变化较小的环境进行测量，一般为当地时间7:00—17:00（秋冬季），云量较多时需要等到阳光较强的一段时间或者光场变化不明显时进行测量。在测量之前，将ASD对准标准白板进行光谱仪的校准，测量时，将ASD分别对准灰板、目标地物和天空采集光谱，如此重复测量两次。

将测量得到的光谱数据导入ASD自带处理软件ViweSpecPro中，剔除有明显异常及由外界光场变化影响导致波动的光谱曲线。在忽略太阳耀斑和白帽等外界影响情况下，ASD光谱仪测量的遥感反射率 R_{rs} 为

$$R_{rs}(\lambda) = \frac{L_{sc} - \rho \cdot L_{sky}}{L_p(\lambda) \pi / \rho_p(\lambda)} \tag{1}$$

式中， L_p 为测得的标准板辐亮度； L_{sc} 为测得的海面辐亮度； L_{sky} 为测得的天空辐亮度； ρ_p 为标准板反射率； ρ 为气水界面表面反射率（Lee等，2010；Mobley，1999；唐军武等，2004）。利用ADS测量

的 R_{rs} 分辨率为3 nm，对数据进行重采样后得到的 R_{rs} 分辨率为1 nm。通过剔除异常 R_{rs} ，再经过与色素数据匹配，得到如图2所示48条光谱曲线分布图。

表2 本文中用于CHEMTAX分析的色素及对应的藻种

Table 2 List of phytoplankton pigments used in this study and their taxonomic significance			
色素中文全称	色素英文全称	色素简写	包含色素藻种
墨角藻黄素	Fucoxanthin	Fuco	硅藻,定鞭金藻,甲藻
多甲藻黄素	Peridinin	Peri	甲藻
19'-乙酰基氧化墨角藻黄素	19'-Hexanoyloxyfucoxanthin	19'-hex	定鞭金藻
19'-丁酰基氧化墨角藻黄素	19'-Butanoyloxyfucoxanthin	19'-but	金藻
别藻黄素	Alloxanthin	Allo	隐藻
青绿素	Prasinoxanthin	Pras	青绿藻
新叶黄素	Neoxanthin	Neo	绿藻,青绿藻
紫黄素	Violaxanthin	Viol	绿藻,青绿藻
叶黄素	Lutein	Lut	绿藻,青绿藻
玉米黄素	Zeaxanthin	Zea	蓝藻,绿藻,金藻
叶绿素b	Chlorophyll b	Chlb	绿藻,青绿藻
叶绿素a	Chlorophyll a	Chla	除原核浮游植物外其他藻

表3 本研究中CHEMTAX方法计算应用的初始色素比率矩阵

Table 3 Initial pigment ratio matrices used for methods in this study												
藻种名称	色素											
	Peri	19'-but	Fuco	19'-hex	Neo	Pras	Viol	Allo	Lut	Zea	Chlb	Chla
硅藻	0	0	0.47	0	0	0	0	0	0	0	0	1
青绿藻	0	0	0	0	0.1	0.35	0.11	0	0.02	0	0.8	1
甲藻	1.06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
隐藻	0	0	0	0	0	0	0	0.23	0	0	0	1
绿藻	0	0	0	0	0.08	0	0.06	0	0.14	0.01	0.46	1
蓝藻	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35	0	1
金藻	0	0.37	0.11	0	0	0	0	0	0	0	0	1
定鞭金藻	0	0	0	1.71	0	0	0	0	0	0	0	1

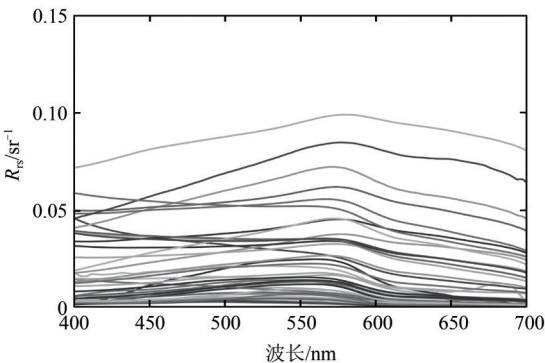


图2 实测 R_{rs} 光谱图

Fig. 2 The R_{rs} spectra in hyperspectral resolution in situ

2.2.2 HY-1C/D卫星数据

HY-1C/D是中国分别于2018年9月和2020年

6月发射的两颗组成上、下午卫星组网的国家海洋水色卫星。卫星搭载着海洋水色扫描仪COCTS（China Ocean Color & Temperature Scanner），可以覆盖渤海、黄海、东海、南海和日本海及海岸带区域等西北太平洋区域。空间分辨率约为1.1 km，幅宽可达2900 km，时间分辨率可达1 d（单星）或0.5 d（双星），并设有6个可见光波段，它们分别是412 nm、443 nm、490 nm、520 nm、565 nm和670 nm。

本研究收集的卫星数据均来自于中国海洋卫星数据服务系统（<https://osdds.nsoas.org.cn>，[2021-11-20]），包括2018年10月1日—2019年12月31日期间COCTS传感器Level-2A级日产品，

即 R_{rs} 日产品数据。

2.2.3 MODIS-Aqua 与 GOCI-II 数据

本研究选取 MODIS-Aqua 传感器与韩国多用途卫星 2B (GK 2B) 的 GOCI-II 传感器, 与 COCTS 传感器在浮游植物类群反演算法应用结果的精度比较。如表 4 所示, MODIS-Aqua 拥有 10 个可见光波段, GOCI-II 的可见光波段数为 8 个。在分辨率上, GOCI-II 的空间分辨率和时间分辨率最高, 分

别为 0.25 km 与 1 天 10 景, 可以实现全天候观测同一区域, 在观测海洋现象上具有强大的优势。COCTS 与 MODIS-Aqua 的空间分辨率相同, 都为 1 km, 但 COCTS 每天可提供 2 景数据, 时间分辨率高于 MODIS-Aqua (1 天 1 景)。在数据量上, MODIS-Aqua 寿命最长 (2002 年发射), 拥有以往的长时序数据, 在研究长时序变化的优势明显, GOCI-II 是 GOCI-I 的延续, 与 HY-1D 同样在 2020 年发射。

表 4 COCTS、MODIS-Aqua 与 GOCI-II 可见光波段设置

Table 4 Settings of COCTS, MODIS-Aqua and GOCI-II in visible band

波段	COCTS			MODIS-Aqua			GOCI-II		
	中心波段/ nm	时间分辨率	空间分辨率/ km	中心波段/ nm	时间分辨率	空间分辨率/ km	中心波段/ nm	时间分辨率	空间分辨率/ km
B1	412	2 景/d	1	412	1 景/d	1	412	10 景/d	0.25
B2	443	2 景/d	1	443	1 景/d	1	443	10 景/d	0.25
B3	490	2 景/d	1	469	1 景/d	1	490	10 景/d	0.25
B4	520	2 景/d	1	488	1 景/d	1	510	10 景/d	0.25
B5	565	2 景/d	1	531	1 景/d	1	555	10 景/d	0.25
B6	670	2 景/d	1	547	1 景/d	1	620	10 景/d	0.25
B7	—	—	—	555	1 景/d	1	660	10 景/d	0.25
B8	—	—	—	645	1 景/d	1	680	10 景/d	0.25
B9	—	—	—	667	1 景/d	1	—	—	—
B10	—	—	—	678	1 景/d	1	—	—	—

收集星 MODIS-Aqua 与 GOCI-II 在渤海海域同与 HY-1C/D 相同时间段内的 R_{rs} 日产品数据, 用于后续对比分析 COCTS 模型应用效能。其中 GOCI-II 数据由韩国国家海事卫星中心下载 (<https://www.khoa.go.kr/>, 2021.11.20), MODIS-Aqua 数据由 NASA OceanColor 处下载 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, [2021-11-20])。

2.3 藻种浓度反演模型开发

利用奇异值分解方法 SVD (Singular Value Decomposition) 提取浮游植物遥感反射率特征, 进而获取浮游植物色素或类群生物量信息。该方法已经被初步应用于色素浓度、类群生物量信息的反演模型构建 (Bracher 等, 2015; Taylor 等, 2013; Xi 等, 2020 和 2021)。本研究基于 SVD 方法, 分解实测 R_{rs} 数据以提取其主要特征信息, 并与实测藻种浓度进行线性拟合, 本研究使用留一交叉验证法进行建模与验证。

将实测 R_{rs} 数据进行归一化处理, 以便获取光

谱形状: 将实测 R_{rs} 数据值与平均实测 R_{rs} 数据值之差除以实测 R_{rs} 数据值的标准差, 归一化处理后的数据记为矩阵 X 。本研究使用 HY-1C/D 卫星 COCTS 传感器的 6 个可见光波段, 分别为 412 nm、443 nm、490 nm、520 nm、565 nm 和 670 nm。矩阵 X 经过式 (2) 进行 SVD 后, 得到协方差矩阵 U 。

$$X = U \Sigma V^T \quad (2)$$

根据式 (2), 将协方差矩阵 U 与 CHEMTAX 方法计算的实测藻种浓度数据进行线性拟合, 如公式 (3) 所示。

$$\log(y_p) = a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_2 + \cdots + a_n u_n \quad (3)$$

式中, y_p 为实测硅藻浓度, a_0 为截距, a_1 、 a_2 、 $\cdots$ 、 a_n 为回归系数, u_1 、 u_2 、 $\cdots$ 、 u_n 为协方差矩阵 U 的列向量, n 为列向量个数。

同样, 将卫星 R_{rs} 数据进行归一化处理根据式 (4) 进行投影, 得到矩阵 U^{sat} 。

$$U^{sat} = X^{sat} \times V \times \Sigma^{-1} \quad (4)$$

式中, X^{sat} 为归一化处理后的 R_{rs} 数据。

根据式 (4) 即可得到卫星反演的藻种浓度 y_p^{sat} , 式中 u_1^{sat} 、 u_2^{sat} 、 $\dots$ 、 u_n^{sat} 为矩阵 U^{sat} 的列向量,

如式 (5) 所示。建模流程如图3所示。

$$\log(y_p^{\text{sat}}) = a_0 + a_1 u_1^{\text{sat}} + a_2 u_2^{\text{sat}} + \dots + a_n u_n^{\text{sat}} \quad (5)$$

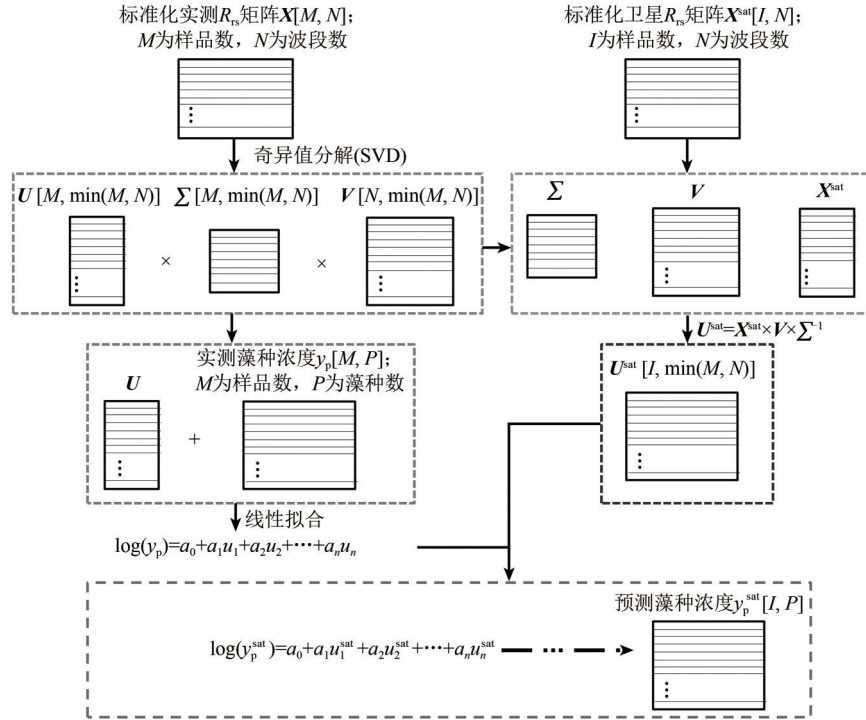


图3 藻种浓度反演模型构建与卫星应用流程

Fig. 3 Schematic flowchart of model development and satellite application

2.4 精度指标

本研究通过决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE)、中值误差 (ME) 和平均绝对百分比误差 (MAPE), 并使用留一交叉验证法来对建模效果进行精度校验, 相应的计算公式如下所示:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (y_{oi} - \bar{y}_o)(y_{pi} - \bar{y}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_{oi} - \bar{y}_o)^2 \sum_{i=1}^N (y_{pi} - \bar{y}_p)^2}} \quad (6)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{oi} - y_{pi})^2} \quad (7)$$

$$\text{ME} = \text{Median} \left| \frac{y_{oi} - y_{pi}}{y_{oi}} \right| \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{y_{oi} - y_{pi}}{y_{oi}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式 (6) — (9) 中, y_{oi} 为第 i 个为实测藻种浓度, y_{pi} 为第 i 个预测藻种浓度, $\bar{y}_p$ 为预测藻种浓度平均值, $\bar{y}_o$ 为实测藻种浓度平均值, N 为建模样品数。

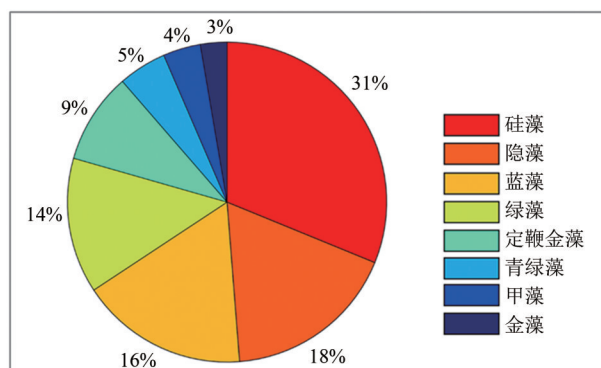
3 结果与分析

3.1 不同浮游植物类群浓度分布特征

基于CHEMTAX方法计算, 通过质量控制后得到渤海区域的不同浮游植物类群浓度。如图4 (a) 所示, 各藻种对总叶绿素 a , 即 TChla (Total Chlorophyll a) 的贡献占比呈现出较大的差异, 其中对 TChla 贡献率较大的硅藻、隐藻、蓝藻与绿藻这4个藻种浓度均呈现出明显的正态分布, 且跨越多个量级, 变异系数 (CV) 均较高。如图4 (b) — 4 (e) 所示, 硅藻拥有最大的平均值, 为 0.34 mg/m^3 (标准差 $\text{SD} = 0.31 \text{ mg/m}^3$), 同时变化范围较大 ($\text{CV} = 92.92\%$), 拥有最高的贡献率, 为 31% 。隐藻和蓝藻的浓度仅次于硅藻, 其平均浓度分别为 0.19 mg/m^3 和 0.09 mg/m^3 , 对 TChla 的贡献率分别为 18% 与 16% , 蓝藻的分布比隐藻分散, 对应的 CV 分别为 174.59% 与 95.90% 。绿藻虽然平均浓度与蓝藻的接近, 但其最大值为 0.54 mg/m^3 , 小于蓝藻

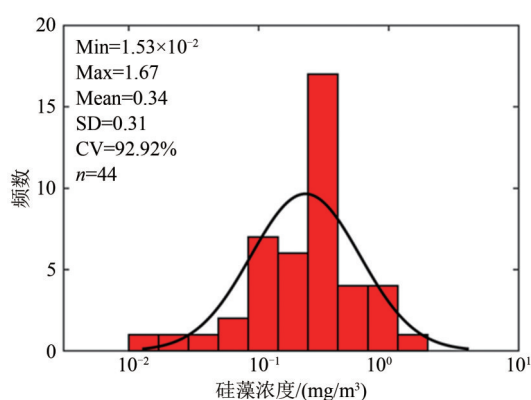
(0.70 mg/m^3), 对 TChla 的贡献为 14%。硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻对 TChla 的贡献比率明显高于其他

藻种, 因此本研究主要针对这 4 种优势藻种, 进行反演模型构建与卫星应用研究。



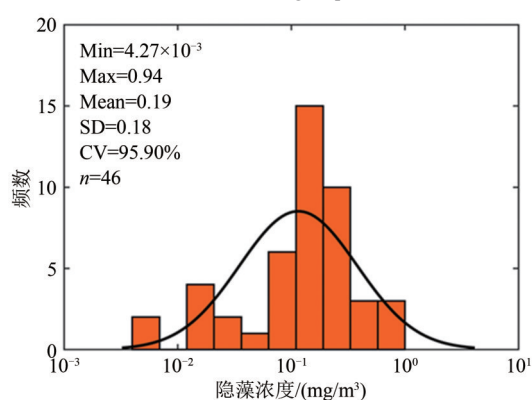
(a) 不同浮游植物类群浓度对 Tchl_a 贡献占比

(a) Characteristics of relative contribution distribution of different taxonomic groups to Tchl_a



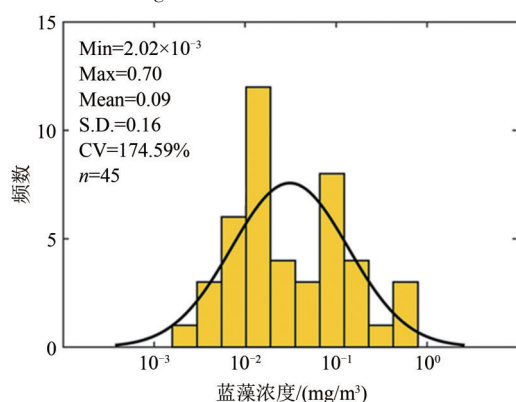
(b) 硅藻浓度频数直方图

(b) Histogram on concentration for diatoms



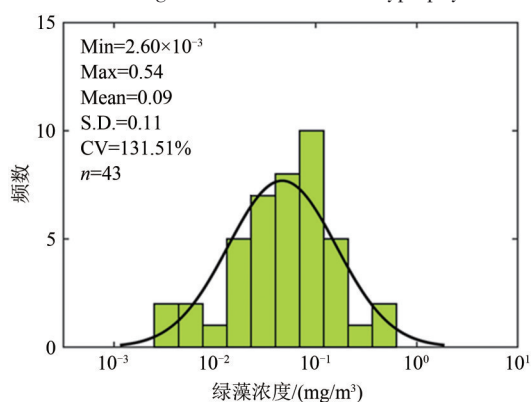
(c) 隐藻浓度频数直方图

(c) Histogram on concentration for cryptophyte



(d) 蓝藻浓度频数直方图

(d) Histogram on concentration for cyanobacteria



(e) 绿藻浓度频数分布直方图

(e) Histogram on concentration for chlorophyte

图 4 不同浮游植物类群浓度对 TChla 贡献占比以及分别为硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻浓度频数分布直方图(图中 Min、Max、Mean、SD 分别代表浓度最小值、最大值、平均值与标准差(mg/m^3); CV 代表浓度的变异系数(%))

Fig. 4 Characteristics of the relative contribution distribution of different taxonomic groups to TChla, and the histograms on concentration for diatoms, cryptophytes, cyanobacteria, chlorophytes obtained by CHEMTAX, and including the index of maximum (Max), minimum (Min), standard deviation (SD) (mg/m^3) and coefficient of variation (CV) (%)

基于夏季与冬季的藻种浓度, 利用空间插值方法, 得到硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻浓度的空间分布特征, 如图 5 所示。其中, 硅藻、隐藻和绿藻在冬季与夏季均具有明显的空间分布特征, 即近

岸浓度较高, 离岸浓度较低, 且均呈现出由近岸向渤海中央方向递减的趋势; 蓝藻则在冬季呈现出近岸与离岸浓度均较低特征, 在夏季的空间分布特征与其他藻种相似。硅藻浓度在整体上最

高(图5(a)和5(e)),其次为隐藻(图5(b)和5(f)),冬季的蓝藻浓度(图5(c))比绿藻浓度(图5(d))低,但夏季(2016年6月和2017年7月渤海航次)的蓝藻浓度(图5(g))比绿藻浓度

(图5(h))高;在时间上,4个夏季的实测藻种浓度(图5(e)、5(f)、5(g)和5(h))整体上都高于冬季(2016年12月渤海航次)的藻种浓度(图5(a)、5(b)、5(c)和5(d))。

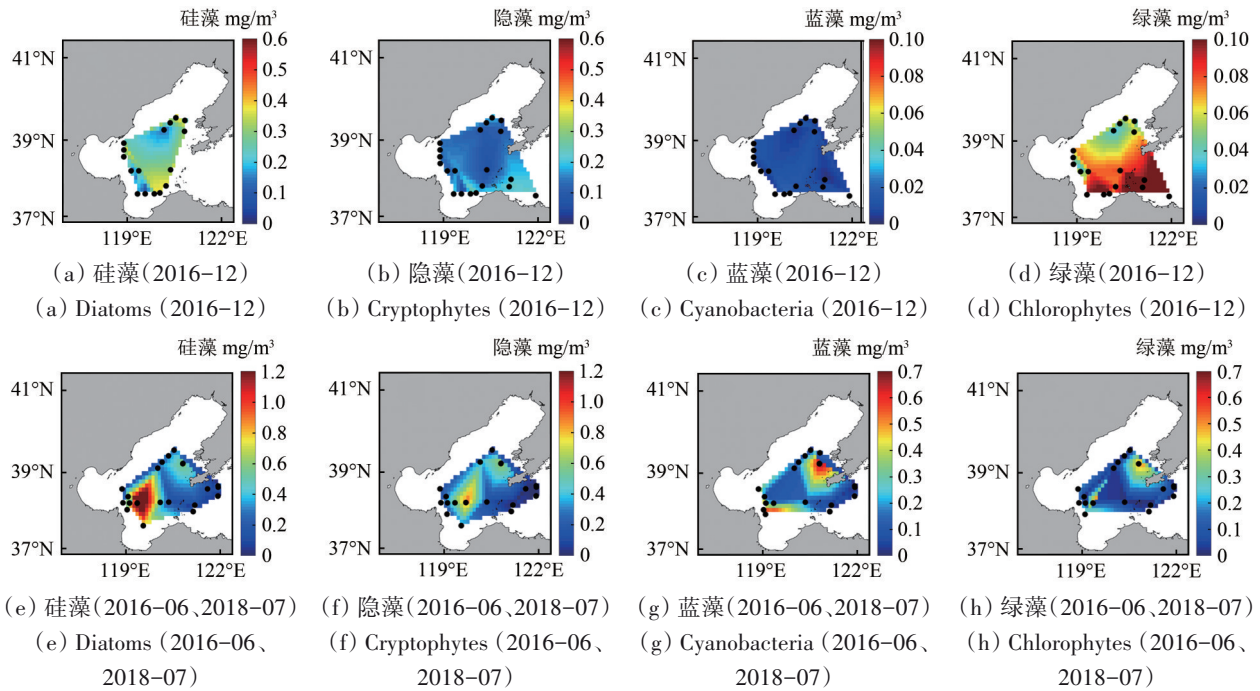


图5 不同航次的实测藻种浓度空间分布图

Fig. 5 The concentration spatial distribution of different taxa and different cruises used in this study

3.2 模型精度校验

基于藻种浓度反演模型,通过留一交叉验证法,得到4个反演藻种浓度与其对应的实测藻种浓度散点图(图6)。图6(b)、6(c)和6(d)分别展示了实测隐藻、蓝藻和绿藻浓度与其各自模型反演的浓度散点对比图。从散点分布来看,4种模型的散点大多集中于中间的1:1线上(见图6的虚线),其中隐藻、蓝藻和绿藻浓度的模型反演值与实测值决定系数较高, R^2 分别为0.70、0.70与0.71($p<0.001$),硅藻浓度反演模型的 R^2 虽然较低($R^2=0.44$, $p<0.001$)(图6(a))。4个藻种模型的反演结果中,硅藻和隐藻的ME可达44.81%和45.34%,而蓝藻和绿藻的ME均在50%以上,但RMSE均在0.20 mg/m³以下,本研究所提出模型的预测精度在一定程度上是可以接受的。

3.3 模型示范应用

HY-1C/D卫星是中国重点研发首个海洋民用业务卫星星座,具有全球海洋水色、海岸带资源与生态环境的有效观测能力,可为海洋环境监测与预报、海洋灾害预警提供服务,因此,我们基

于HY-1C/D开展示范性应用。将4种藻种浓度反演模型分别应用于HY-1C/D卫星数据2018年10月3日10时10分(图7(a)—7(d))、2019年3月13日10时45分(图7(e)—7(h))和2019年8月30日10时50分(图7(i)—7(l))的 R_s 日产品中,获取不同时间的4种藻种浓度分布图。如图7所示,硅藻、隐藻和绿藻在空间上的变化特征明显,均呈现近岸浓度高,随着离岸距离增加而浓度降低的趋势;蓝藻则呈现出近岸浓度较低,远岸浓度较高的现象。整体上,硅藻浓度最高,在辽东湾、莱州湾和渤海湾都呈现出较高浓度,在渤海海峡浓度较低;其次为隐藻;绿藻在整体上浓度比蓝藻较高。在时间上,相较于2018年10月3日,2019年3月13日的硅藻、隐藻和绿藻浓度均有增大,在2019年8月30日又降低的现象;蓝藻与其他藻种相反,2018年10月3日与2019年8月30日的浓度整体上比2019年3月13日低。可以看到,在渤海沿岸区域硅藻、隐藻和绿藻呈现在春、秋季生物量较高,夏季生物量降低的现象,而蓝藻主要变化区域在渤海中心,呈现秋夏高,春季低的特点。

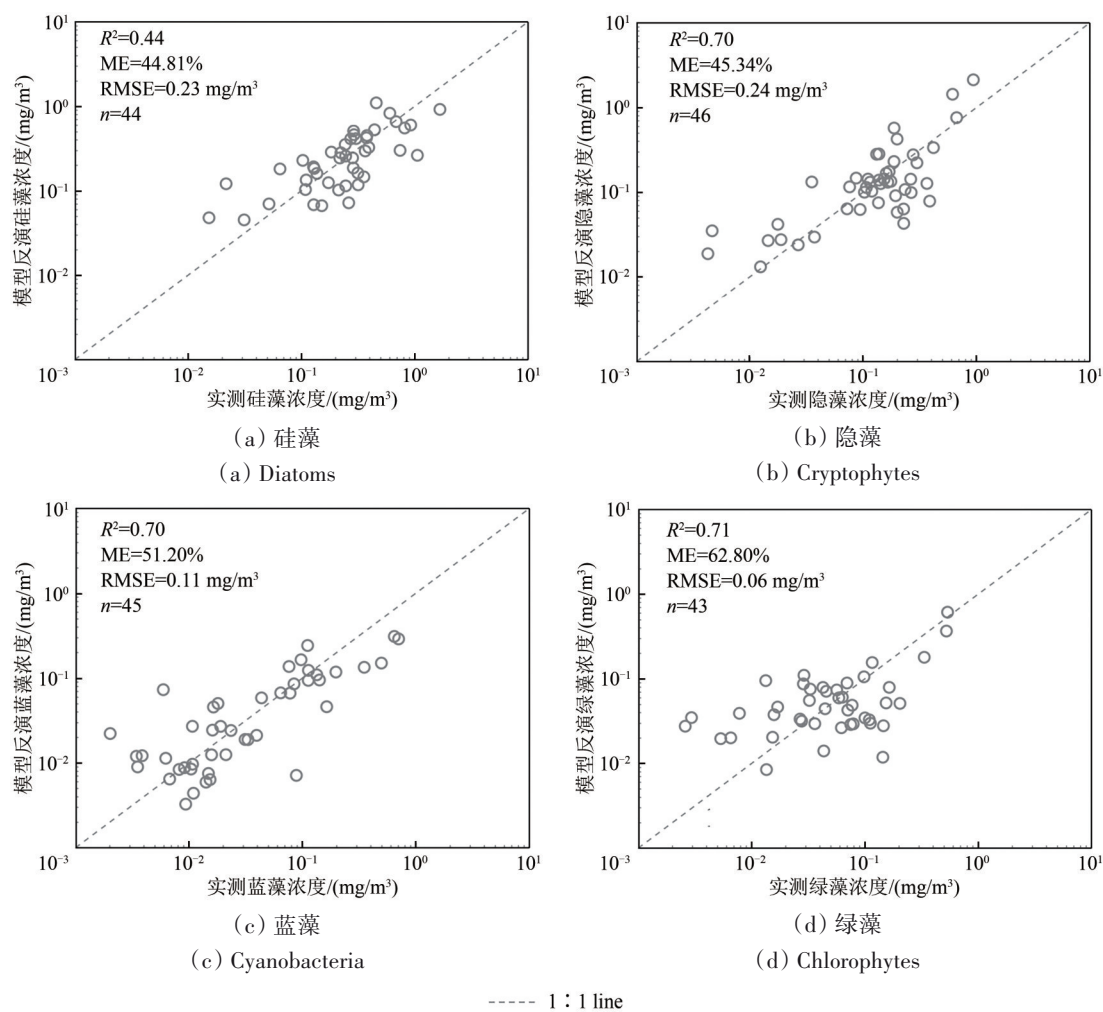
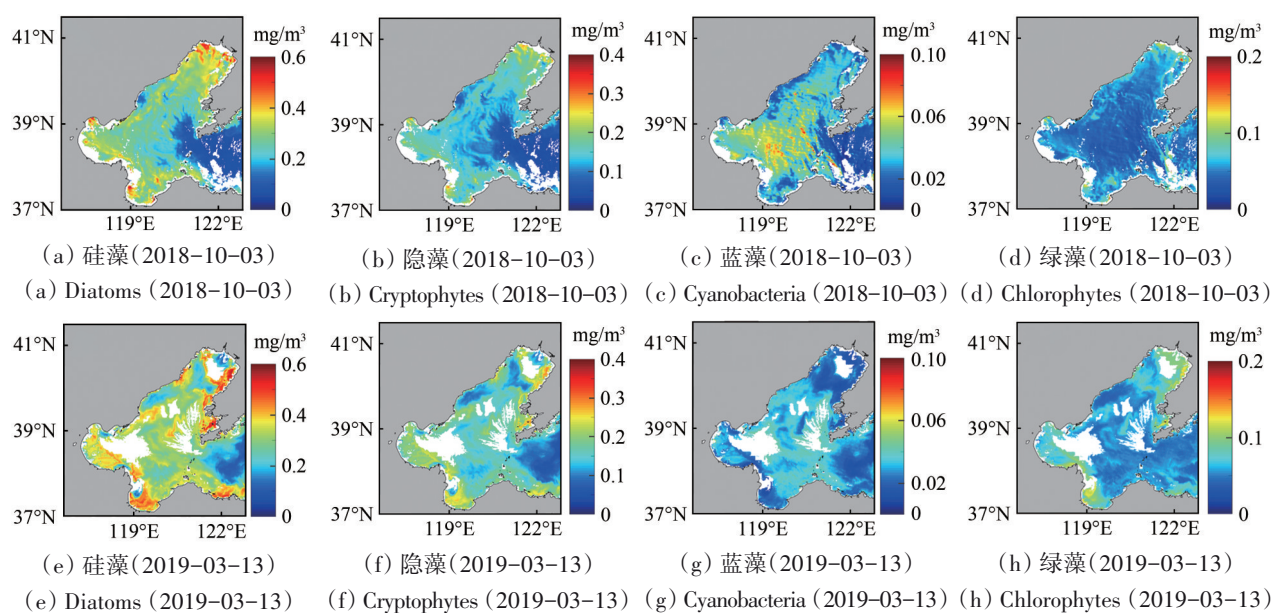


图6 实测藻种浓度与反演藻种浓度之间的散点对比图(图中坐标轴已用log表示)

Fig. 6 Comparisons between the concentrations (showed by log in the figure) of the measured and the inversion part by scatterplots



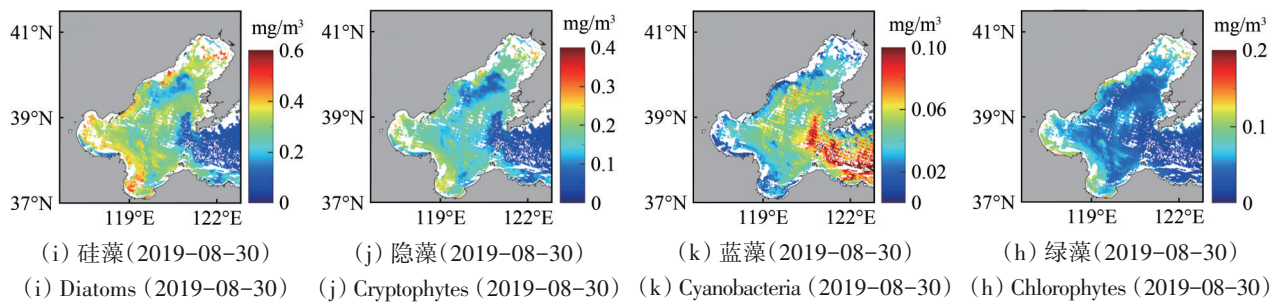


图7 COCTS渤海硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻反演浓度分布图

Fig. 7 The spatial distribution of phytoplankton taxa concentrations in Bohai Sea, retrieved from COCTS daily R_{rs} in diatoms, cryptophytes, cyanobacteria and chlorophytes

在空间尺度上,本研究反演的硅藻、隐藻和绿藻浓度都明显的呈现出近岸高、远岸低的分布特征,与本研究的实测藻种浓度的空间插值分布相近(图5),与前人调查研究结果一致(姜德娟和张华,2018;许士国等,2015;周艳蕾等,2017;邹亚荣,2004)。蓝藻则呈现出离岸浓度较高,近岸浓度较低的特点,与2016年12月实测蓝藻浓度相近,这表明本研究建立的4个藻种浓度反演模型所反演的浓度在空间尺度分布上具有较准确的估计。在空间尺度上,对近岸硅藻、隐藻和绿藻浓度造成一定影响的因素主要是随入海河流输入的营养盐(栾青杉等,2018)。渤海湾等地区大量工业、生活等废水通过入海河流进入近岸海域,导致大量氮、磷营养盐输入近岸海域,浮游植物大量增生,浮游植物生物量较高(金德祥,1991;赵晨英等,2016)。

4 讨论

本研究选取MODIS-Aqua传感器与韩国多用途卫星2B(GK 2B)的GOCI-II传感器与COCTS传感器在浮游植物类群反演算法应用结果的精度比较。基于MODIS-Aqua与GOCI-II波段,分别建立硅藻、隐藻、蓝藻与绿藻浓度反演模型,如图8所示。基于COCTS波段的隐藻浓度反演模型 R^2 (图8(a))、MAPE(图8(b))和RMSE(图8(d))的精度(分别为0.70、73.64%、0.24 mg/m³)均比MODIS-Aqua(分别为0.63、86.57%、0.47 mg/m³)与GOCI-II(分别为0.62、77.33%、0.34 mg/m³)的高。基于COCTS的蓝藻和绿藻浓度反演模型 R^2 、MAPE、ME和RMSE的精度虽然略差于MODIS-Aqua,但其 R^2 与RMSE的精度均好于GOCI-II,其中基于

COCTS的蓝藻模型ME(51.20%)低于GOCI-II(55.96%),但基于COCTS的绿藻的ME(62.80%)高于GOCI-II(56.43%)。三者硅藻浓度反演模型的 R^2 均较低,分别为0.44、0.54与0.44,但MODIS-Aqua的ME和RMSE均比其他两者好,为34.37%与0.21 mg/m³。综上所述,虽然COCTS的波段数量设置上与GOCI-II和MODIS-Aqua的相比较少,但所构建的模型精度整体上优于GOCI-II,略低于MODIS-Aqua,体现出在浮游植物类群卫星遥感反演中COCTS数据同样具有较大潜力。

造成基于COCTS、MODIS-Aqua和GOCI-II传感器波段的反演模型精度各有优劣的原因,可能是由于它们各自独特的波段设置。MODIS-Aqua除了645 nm处的波宽为50 nm(620—670 nm)外,其余波段的波宽均等于或小于20 nm,并且是3种传感器中波段数最丰富的,这可能是导致其模型精度较其他两种传感器高的原因。虽然COCTS和GOCI-II的波宽均为20 nm,但COCTS的波段数少于GOCI-II和MODIS-Aqua的波段数,出现基于COCTS波段的隐藻浓度反演模型较好于基于MODIS-Aqua和GOCI-II的反演模型可能是由于490 nm与670 nm波段对隐藻的特有色素Allo较为敏感(Pan等,2010)。

图9(a)、9(d)和9(g)分别展示的是渤海海域的2021年4月19日13时20分COCTS、2021年4月19日13时45分MODIS-Aqua和2021年4月19日13时15分GOCI-II卫星真彩色图,可以发现3个传感器数据均为渤海海域无云情况,但经过大气校正等处理形成 R_{rs} 产品后,MODIS-Aqua与GOCI-II可能由于过校正现象,使得有效的 R_{rs} 数据较少。如图9(b)、9(c)和9(h)为COCTS在渤海大

部分区域均有数据分布（由于3个传感器各波段有效的 R_{rs} 空间分布情况相同，所以只以413 nm为例进行展示）。GOCI-II 仅在渤海湾与渤海海峡有数据分布，而MODIS-Aqua 整个渤海海域均无有效的数据分布。将所构建的模型分别应用于COCTS、MODIS-Aqua 与GOCI-II 的 R_{rs} 日产品数据，获取藻种浓度空间分布（以绿藻为例）。如图9（c）、9（f）和9（i）为基于COCTS数据能获取的更多的绿藻浓度信息，特别在沿岸和河流入海口等重要区域。

因此，在现有海洋水色卫星数据的基础上，COCTS一定程度上能丰富和弥补近岸水域数据的缺失。同时，COCTS通过星上定标光谱仪进行同平台星上交叉定标，在可见光近红外定标精度达到4.17%，满足国际海洋水色卫星辐射定标要求（绝对准确度为5%）（Hooker等，2000；张可立等，2019b）。COCTS的6个可见光波段处的大气顶总辐亮度的产品指标最大为5.54%，精度较高，为卫星遥感反演产品的准确性和可靠性提供保障。

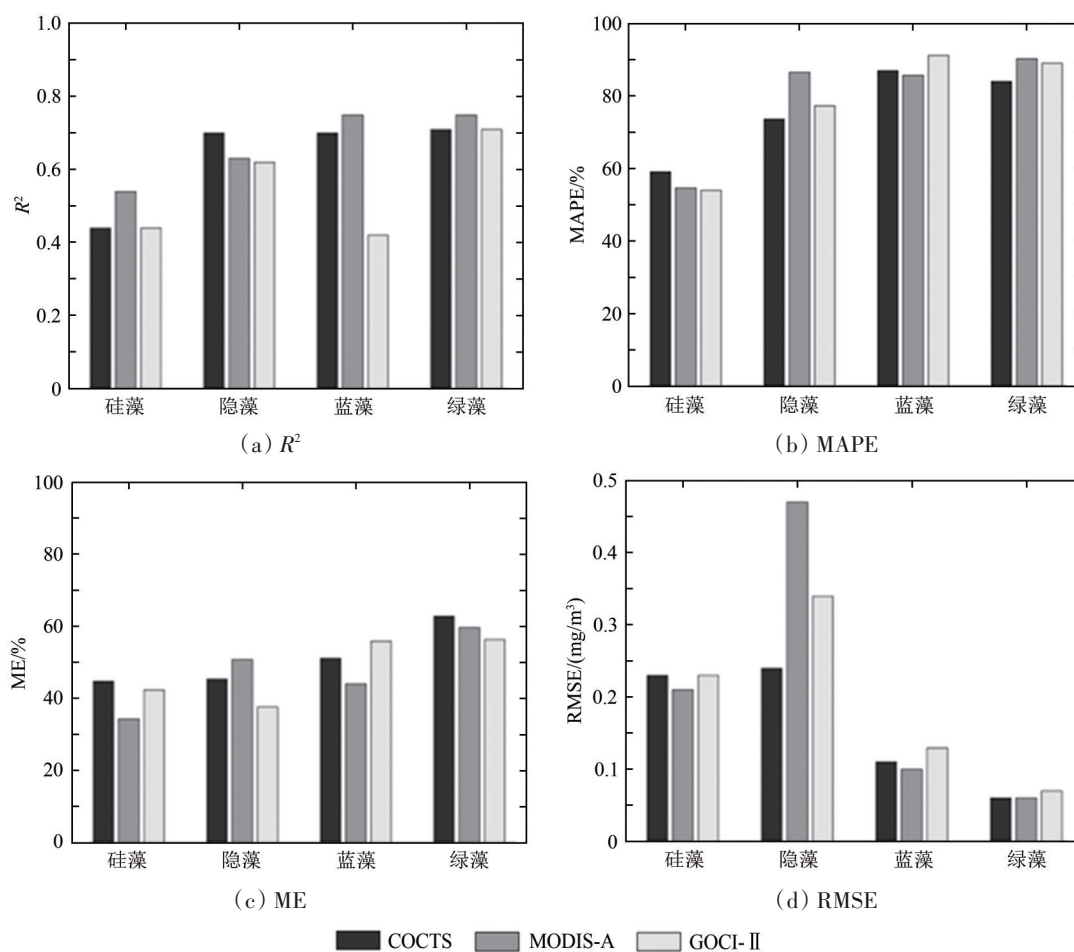


图8 基于COCTS、MODIS-Aqua和GOCI-II波段的硅藻、隐藻、蓝藻和绿藻浓度反演模型的 R^2 、MAPE、ME和RMSE结果
Fig. 8 Model validation accuracy of R^2 , MAPE, ME, RMSE for the relationships between the concentrations of the measured and the inversion part, based on COCTS、MODIS-Aqua and GOCI-II bands

虽然COCTS在藻种浓度应用上效果较好，但藻种浓度的估算精度可能会受到近岸丰富的可溶性有机物CDOM（Chromophoric Dissolvable Organic Matter）影响（Song等，2014；Wen等，2016）。CDOM在412 nm和443 nm处的影响较大（Del Castillo和Coble，2000；Sun等，2011；Xiao等，2018），因此

可能会造成模型应用于COCTS、MODIS-Aqua和GOCI-II数据时对藻种浓度估计的出现误差。MODIS可能还会受其成像几何、空间位置等因素的影响较大，其 R_{rs} 产品之间有所偏差，其中在412 nm处与GOCI-II之间的偏差达到最大（许潇尹，2019）， R_{rs} 的偏差可能会导致在藻种浓度估算时出现误差。

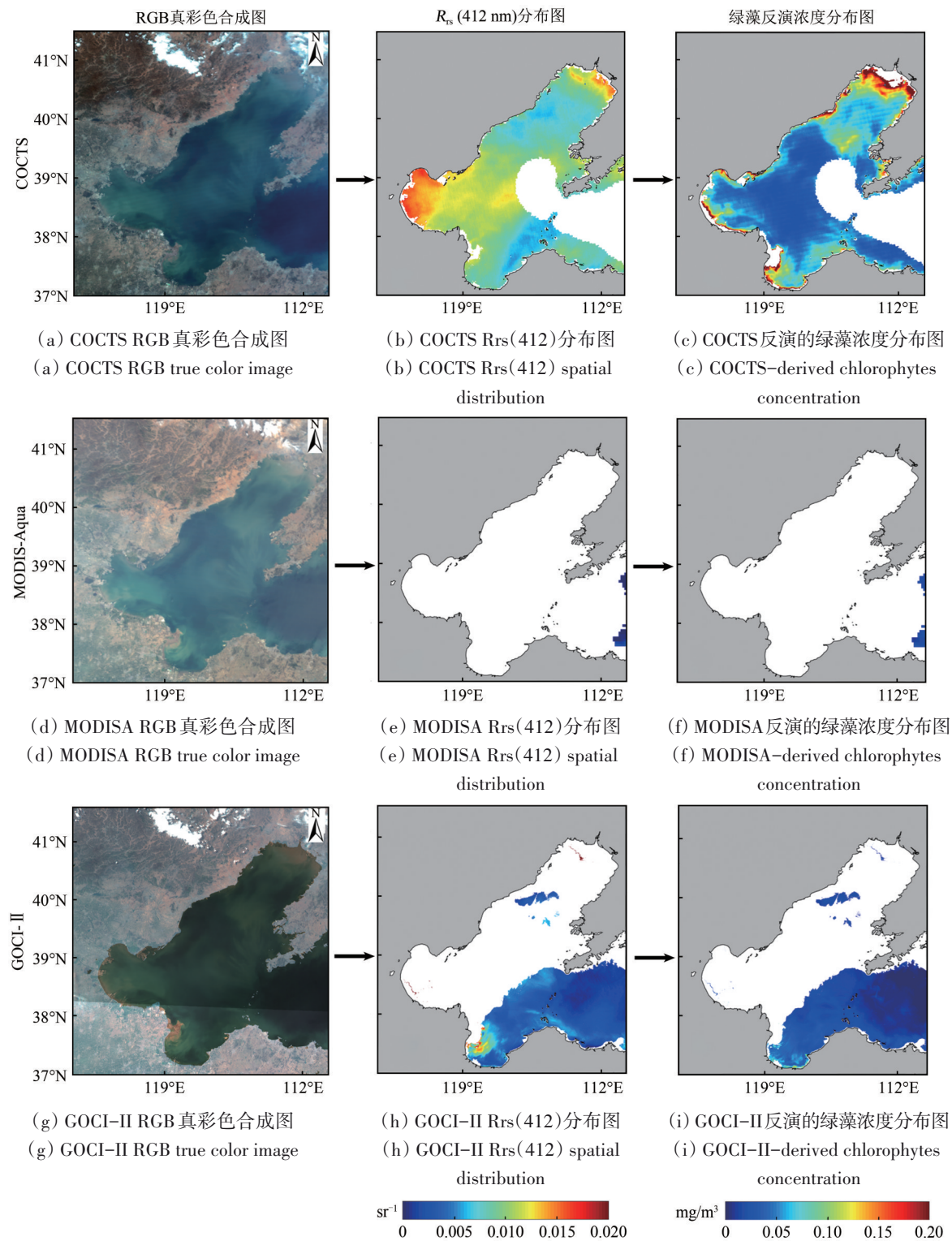


图9 渤海区域各卫星数据源之间比较(2021年4月19日)

Fig. 9 Comparison between satellite data sources (April 19th, 2021) in Bohai Sea

近年来，中国海洋水色卫星发展势头迅猛，其中HY-1C/D是近几年成功发射的海洋水色组网卫星，都搭载着COCTS传感器，每天可以对同一区域观测两次。除了COCTS传感器之外，HY-1C/D卫星还搭载着海岸带成像仪CZI (Coastal Zone

Imager)。CZI虽然只有4个光谱波段，但其50 m的空间分辨率，对于局部精细化观测具有较大优势，同时通过几何拼接后（杨威 等，2021），仍可以实现高分辨率和大范围地观测目标区域。后续浮游植物类群的卫星遥感反演研究工作，应兼顾考虑

COCTS 和 CZI 各自特点, 结合 COCTS 全局宏观观测为主和 CZI 局部精细化观测为辅, 利用二者光谱波段分布特点开发各自的面向多种浮游植物类群浓度的反演模型。基于此, 可以借助所开发模型实现浮游植物类群浓度的遥感反演, 从而实现从相对宏观和重点区域的微观视角探测浮游植物类群浓度变化。这对跟踪浮游植物类群结构变化和监测潜在藻类爆发具有积极的推进作用, 也将使国产海洋水色卫星在海洋浮游植物监测上发挥更大的作用 (杨保华, 2011); 此外, 国产海洋卫星数据在观测海洋环境、状况和现象方面的遥感应用已经越来越多 (陈戈等, 2019; 蒋兴伟等, 2019; 梁超等, 2020; 林明森等, 2019; 刘建强等, 2020), 且均具有不错的效果。但目前卫星资料使用主要以国外卫星资料偏多, 未来仍需加强国产海洋卫星数据开放、数据共享服务系统建设及数据应用推广, 逐步摆脱依赖国外卫星数据的现状, 为拓展国产海洋水色卫星数据应用提供技术支持 (刘建强等, 2012; 潘德炉和白雁, 2008; 文质彬等, 2021)。

5 结 论

本研究旨在探讨 HY-1C/D 卫星在渤海海域浮游植物类群生物量监测中的应用能力。基于 4 个航次的实测数据, 结合奇异值分解方法, 构建适用于渤海海域硅藻、隐藻、蓝藻与绿藻 4 个藻种的浓度反演模型。结果表明, 隐藻、蓝藻、隐藻的模型反演值与其各自实测浓度之间一致性较高, R^2 均可达到 0.70 及以上, 硅藻 R^2 较低 (0.44)。硅藻和隐藻 ME 均小于 50%, 而蓝藻和绿藻 ME 都大于 50%。将该模型分别应用于 HY-1C/D 卫星 COCTS 传感器 R_s 产品数据, 进一步获取渤海硅藻、隐藻、蓝藻与绿藻浓度空间分布趋势: 研究区域内硅藻、隐藻和绿藻的浓度均呈现出近岸高, 离岸低的空间分布特征, 符合以往研究。通过与对比基于 MODIS-Aqua 与 GOCI-II 数据构建的藻种浓度反演模型, 其中基于 COCTS 波段构建的隐藻浓度反模型精度 ($R^2=0.70$ 、MAPE=73.64%) 均比 MODIS-Aqua ($R^2=0.63$ 、MAPE=86.57%) 与 GOCI-II ($R^2=0.62$ 、MAPE=77.33%) 的隐藻浓度反演模型高; 基于 COCTS 波段构建的蓝藻模型的 ME (51.20%) 好于基于 GOCI-II (55.96%) 波段构建的蓝藻模型。整体而言, 本文新建的反演模型精度略低于

MODIS-Aqua, 但略优于 GOCI-II。将基于 COCTS、MODIS-Aqua 与 GOCI-II 构建的模型分别应用于各种卫星数据上, COCTS 数据在沿岸和河流入海口等地方能够获得更多的藻种浓度信息, 卫星应用效果均优于 MODIS-Aqua 和 GOCI-II。后续可进一步考虑兼顾 COCTS 和 CZI 各自的参数设置优势和特点, 分别开发二者的浮游植物类群浓度反演模型, 达到 HY-1C/D COCTS 大范围观测为主, CZI 局部小范围精细化观测为辅助的卫星监测优势。综上所述, 国产 HY-1C/D 卫星在监测藻种浓度反演上具有良好的信息表达能力与应用前景。同时, 本研究也可为 HY-1C/D 在后续服务于沿海海域水体生态环境监测的实用性和可行性提供参考。

志 谢 感谢国家卫星海洋应用中心提供的 HY-1C/D 数据 (<https://osdds.nsoas.org.cn>, 2021-11-20), 感谢 NASA 提供的 MODIS-Aqua 数据 (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>, 2021-11-20), 感谢韩国国家海事卫星中心提供的 GOCI-II 数据 (<https://www.khoa.go.kr/>, 2021-11-20)。

参考文献 (Reference)

- Aiken J, Pradhan Y, Barlow R, Lavender S, Poulton A, Holligan P and Hardman-Mountford N. 2009. Phytoplankton pigments and functional types in the Atlantic Ocean: a decadal assessment, 1995—2005. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56(15): 899-917 [DOI: 10.1016/j.dsr2.2008.09.017]
- Balfoort H W, Snoek J, Smiths J R M, Breedveld L W, Hofstraat J W and Ringelberg J. 1992. Automatic identification of algae: neural network analysis of flow cytometric data. *Journal of Plankton Research*, 14(4): 575-589 [DOI: 10.1093/plankt/14.4.575]
- Behrenfeld M J, O'Malley R T, Siegel D A, McClain C R, Sarmiento J L, Feldman G C, Milligan A J, Falkowski P G, Letelier R M and Boss E S. 2006. Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120): 752-755 [DOI: 10.1038/nature05317]
- Boyce D G, Lewis M R and Worm B. 2010. Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466(7306): 591-596 [DOI: 10.1038/nature09268]
- Bracher A, Taylor M H, Taylor B, Dinter T, Röttgers R and Steinmetz F. 2015. Using empirical orthogonal functions derived from remote-sensing reflectance for the prediction of phytoplankton pigment concentrations. *Ocean Science*, 11(1): 139-158 [DOI: 10.5194/os-11-139-2015]
- Cai L N, Zhou M R, Liu J Q, Tang D L and Zuo J C. 2020. HY-1C observations of the impacts of islands on suspended sediment distribution in Zhoushan coastal waters, China. *Remote Sensing*, 12(11):

- 1766 [DOI: 10.3390/rs12111766]
- Chen G, Yang J, Zhang B T and Ma C Y. 2019. Thoughts and prospects on the new generation of marine science satellites. *Periodical of Ocean University of China*, 49(10): 110-117 (陈戈, 杨杰, 张本涛, 马纯永. 2019. 新一代海洋科学卫星的思考与展望. 中国海洋大学学报, 49(10): 110-117) [DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190226]
- Chen M. 2005. Summarization of Algorithms of Ocean Color Remote Sensing. Qingdao: Ocean University of China (陈森. 2005. 海洋水色卫星遥感算法综述. 青岛: 中国海洋大学) [DOI: 10.7666/d.y828457]
- Del Castillo C E and Coble P G. 2000. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(7/8): 1563-1579 [DOI: 10.1016/S0967-0645(99)00154-X]
- Dupouy C, Benielli-Gary D, Neveux J, Dandonneau Y and Westberry T K. 2011. An algorithm for detecting *Trichodesmium* surface blooms in the South Western Tropical Pacific. *Biogeosciences*, 8(12): 3631-3647 [DOI: 10.5194/bg-8-3631-2011]
- Furuya K, Hayashi M, Yabushita Y and Ishikawa I. 2003. Phytoplankton dynamics in the East China Sea in spring and summer as revealed by HPLC-derived pigment signatures. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(2): 367-387 [DOI: 10.1016/S0967-0645(02)00460-5]
- Gong C L and Fan W. 2002. Algorithms for case 2 waters of remote sensing of ocean color. *Marine Science Bulletin*, 21(2): 77-83 (巩彩兰, 樊伟. 2002. 海洋水色卫星遥感二类水体反演算法的国际研究进展. 海洋通报, 21(2): 77-83) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-6392.2002.02.012]
- He M X, Liu J P, Yu J, Li D Q and Hu C M. 2011. Monitoring green tides in Chinese marginal seas//Morales J, Stuart V, Platt T and Sathyendranath S eds. *Handbook of Satellite Remote Sensing Image Interpretation: Applications for Marine Living Resources Conservation and Management*. Dartmouth: EU PRESPO and IOCCG: 111-124
- Hooker S B, Firestone E R and Lazin G. 2000. Sea WiFS postlaunch technical report series. Volume 8; The SeaBOARR-99 field campaign. *Ceamos CI*, 55(5): 2827-2832 [https://ntrs.nasa.gov/citations/20000024866]
- Hu C M. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 113(10): 2118-2129 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012]
- Hu C M, Cannizzaro J, Carder K L, Muller-Karger F E and Hardy R. 2010a. Remote detection of *Trichodesmium* blooms in optically complex coastal waters: examples with MODIS full-spectral data. *Remote Sensing of Environment*, 114(9): 2048-2058 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.04.011]
- Hu C M, Li D Q, Chen C S, Ge J Z, Muller-Karger F E, Liu J P, Yu F and He M X. 2010b. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C5): C05017 [DOI: 10.1029/2009JC005561]
- Hu L B, Hu C M and He M X. 2017. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea. *Remote Sensing of Environment*, 192: 217-227 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.037]
- Jeffrey S W and Hallegraeff G M. 1987. Phytoplankton pigments, species and light climate in a complex warm-core eddy of the East Australian Current. *Deep Sea Research*, 34(5): 649-673 [DOI: 10.1016/0198-0149(87)90029-X]
- Jiang D J and Zhang H. 2018. Analysis of spatial and temporal characteristics of chlorophyll-a concentration and red tide monitoring in Bohai Sea. *Marine Sciences*, 42(5): 23-31 (姜德娟, 张华. 2018. 渤海叶绿素浓度时空特征分析及其对赤潮的监测. 海洋科学, 42(5): 23-31) [DOI: 10.11759/hyhx20171215001]
- Jiang X W, He X Q, Lin M S, Gong F, Ye X M and Pan D L. 2019. Progresses on ocean satellite remote sensing application in China. *Haiyang Xuebao*, 41(10): 113-124 (蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 龚芳, 叶小敏, 潘德炉. 2019. 中国海洋卫星遥感应用进展. 海洋学报, 41(10): 113-124) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.008]
- Jiang X W, Lin M S and Zhang Y G. 2016. Progress and prospect of Chinese ocean satellites. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1185-1198 (蒋兴伟, 林明森, 张有广. 2016. 中国海洋卫星及应用进展. 遥感学报, 20(5): 1185-1198) [DOI: 10.11834/jrs.20166153]
- Jiao N Z and Yang Y H. 1999. Simultaneous monitoring of autotrophic picoplankton and heterotrophic bacteria. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 30(5): 506-511 (焦念志, 杨燕辉. 1999. 四类海洋超微型浮游生物的同时监测. 海洋与湖沼, 30(5): 506-511)
- Jin D X. 1991. *Marine diatomology*. Xiamen: Xiamen University Press (金德祥. 1991. 海洋硅藻学. 厦门: 厦门大学出版社)
- Lee Z, Ahn Y H, Mobley C and Arnone R. 2010. Removal of surface-reflected light for the measurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform. *Optics Express*, 18(25): 26313-26324 [DOI: 10.1364/OE.18.026313]
- Li W K and Dickie P M. 2001. Monitoring phytoplankton, bacterioplankton, and virioplankton in a coastal inlet (Bedford Basin) by flow cytometry. *Cytometry*, 44(3): 236-246 [DOI: 10.1002/1097-0320(20010701)44:3<236::aid-cyto1116>3.0.co;2-5]
- Liang C, Liu L, Liu J Q, Zou B, Zou Y R and Cui S X. 2020. Extracting mangrove information using MNF transformation based on HY-1C CZI spectral indices reconstruction data. *Haiyang Xuebao*, 42(4): 104-112 (梁超, 刘利, 刘建强, 邹斌, 邹亚荣, 崔松雪. 2020. 基于HY-1C CZI影像光谱指数重构数据MNF变换的红树林提取. 海洋学报, 42(4): 104-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.04.012]
- Lin J F, Cao W X, Wang G F and Hu S B. 2014. Satellite-observed variability of phytoplankton size classes associated with a cold eddy in the South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1): 190-197 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.03.052]
- Lin M S, He X Q, Jia Y J, Bai Y, Ye X M and Gong F. 2019. Advances in marine satellite remote sensing technology in China. *Haiyang Xuebao*, 41(10): 99-112 (林明森, 何贤强, 贾永君, 白雁, 叶小敏, 龚芳. 2019. 中国海洋卫星遥感技术进展. 海洋学报, 41(10): 99-112) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2019.10.007]
- Lin M S, Zhang Y G and Yuan X Z. 2015. The Development course and

- trend of ocean remote sensing satellite. *Haiyang Xuebao*, 37(1): 1-10 (林明森, 张有广, 袁欣哲. 2015. 海洋遥感卫星发展历程与趋势展望. *海洋学报*, 37(1): 1-10) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2015.01.001]
- 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: 102511-102529 [DOI: 10.1016/j.pcean.2021.102511]
- Liu J Q, Jiang X W and Lin M S. 2012. Analysis of problems and countermeasures in the development of Chinese ocean satellite. *Satellite Application*, (2): 54-60 (刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 2012. 中国海洋卫星发展中的问题分析与对策建议. *卫星应用*, (2): 54-60)
- Liu J Q, Zeng T, Liang C, Zou Y R, Ye X M, Ding J, Zou B, Shi L J and GUO M H. 2020. Application of HY-1C in natural disaster monitoring. *Satellite Application*, (6): 26-34 (刘建强, 曾韬, 梁超, 邹亚荣, 叶小敏, 丁静, 邹斌, 石立坚, 郭茂华. 2020. 海洋一号C卫星在自然灾害监测中的应用. *卫星应用*, (6): 26-34) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2020.06.008]
- Liu J Q, Zeng T, Ye X M, Liu J P and Ma X F. 2021. Monitoring of ice crack changes and fracture processes on the Antarctic Brent Ice Shelf by HY-1C/D. *Haiyang Xuebao*, 43(7): 205-206 (刘建强, 曾韬, 叶小敏, 刘金普, 马小峰. 2021. HY-1C/D卫星对南极布伦特冰架冰裂缝变化与断裂过程的监测. *海洋学报*, 43(7): 205-206)
- Liu S X, Fan J F and Wang Z L. 2013. The seasonal changes of phytoplankton community in North Yellow Sea, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 22(7): 1173-1181 (刘述锡, 樊景凤, 王真良. 2013. 北黄海浮游植物群落季节变化. *生态环境学报*, 22(7): 1173-1181) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2013.07.014]
- Liu X, Huang B Q, Huang Q, Wang L, Ni X B, Tang Q S, Sun S, Wei H, Liu S M, Li C L and Sun J. 2015. Seasonal phytoplankton response to physical processes in the southern Yellow Sea. *Journal of Sea Research*, 95: 45-55 [DOI: 10.1016/j.seares.2014.10.017]
- Luan Q S, Kang Y D and Wang J. 2018. Long-term changes in the phytoplankton community in the Bohai Sea (1959—2015). *Progress in Fishery Sciences*, 39(4): 9-18 (栾青杉, 康元德, 王俊. 2018. 渤海浮游植物群落的长期变化(1959—2015). *渔业科学进展*, 39(4): 9-18) [DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180329001]
- Martinez E, Antoine D, D'Ortenzio F and Gentili B. 2009. Climate-driven basin-scale decadal oscillations of oceanic phytoplankton. *Science*, 326(5957): 1253-1256 [DOI: 10.1126/science.1177012]
- McKinna L I W, Furnas M J and Ridd P V. 2011. A simple, binary classification algorithm for the detection of *Trichodesmium* spp. within the Great Barrier Reef using MODIS imagery. *Limnology and Oceanography: Methods*, 9(2): 50-66 [DOI: 10.4319/lom.2011.9.50]
- Mobley C D. 1999. Estimation of the remote-sensing reflectance from above-surface measurements. *Applied Optics*, 38(36): 7442-7455 [DOI: 10.1364/AO.38.007442]
- Moore T S, Dowell M D and Franz B A. 2012. Detection of coccolithophore blooms in ocean color satellite imagery: a generalized approach for use with multiple sensors. *Remote Sensing of Environment*, 117: 249-263 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.001]
- Pan D L and Bai Y. 2008. Advances on the application of ocean color remote sensing engineering in China. *Engineering Sciences*, 10(9): 14-24, 46 (潘德炉, 白雁. 2008. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展. *中国工程科学*, 10(9): 14-24, 46) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2008.09.002]
- Pan X J, Mannino A, Russ M E, Hooker S B and Harding L W. 2010. Remote sensing of phytoplankton pigment distribution in the United States northeast coast. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2403-2416 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.05.015]
- Qi L, Hu C M, Wang M Q, Shang S L and Wilson C. 2017. Floating algae blooms in the East China Sea. *Geophysical Research Letters*, 44(22): 11501-11509 [DOI: 10.1002/2017gl075525]
- Qi L, Hu C M, Xing Q G and Shang S L. 2016. Long-term trend of *Ulvax prolifera* blooms in the western Yellow Sea. *Harmful Algae*, 58: 35-44 [DOI: 10.1016/j.hal.2016.07.004]
- Shen Y F, Liu J Q, Ding J, Jiao J N, Sun S J and Lu Y C. 2020. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 933-944 (沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚. 2020. 海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析. *遥感学报*, 24(8): 933-944) [DOI: 10.11834/jrs.20209475]
- Shutler J D, Grant M G, Miller P I, Rushton E and Anderson K. 2010. Coccolithophore bloom detection in the north east Atlantic using SeaWiFS: algorithm description, application and sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment*, 114(5): 1008-1016 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.12.024]
- Sieburth J M, Smetacek V and Lenz J. 1978. Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions. *Limnology and Oceanography*, 23(6): 1256-1263 [DOI: 10.4319/lo.1978.23.6.1256]
- Song K S, Li L, Tedesco L P, Li S, Hall B E and Du J. 2014. Remote quantification of phycocyanin in potable water sources through an adaptive model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 95: 68-80 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.008]
- Stevenson R J, Peterson C G, Kirschtel D B, King C C and Tuchman N C. 1991. Succession and ecological strategies of benthic diatoms (Bacillariophyceae): density-dependent growth and effects of nutrients and shading. *Journal of Phycology*, 27: 59-69 [DOI: 10.1111/j.0022-3646.1991.00059.x]
- Su J L. 2005. *China Offshore Hydrology*. Beijing: China Ocean Press: 174-181 (苏纪兰. 2005. 中国近海水文. 北京: 海洋出版社: 174-181)
- Suikkanen S, Laamanen M and Huttunen M. 2007. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(3/4): 580-592 [DOI: 10.1016/j.ecss.2006.09.004]
- Sun D Y, Fan J, Wang S Q, Zhang H L, Shen X J, Yuan Y B and He Y J. 2021. Understanding optical absorption associated with phytoplanktonic groups in the marginal seas. *Science of the Total Environment*, 789: 147846-147859 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147846]
- Sun D Y, Huan Y, Qiu Z F, Hu C M, Wang S Q and He Y J. 2017. Re-

- mote-sensing estimation of phytoplankton size classes from GO-CI satellite measurements in Bohai Sea and Yellow Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(10): 8309-8325 [DOI: 10.1002/2017JC013099]
- Sun D Y, Lai W D, Wang S Q, Huan Y, Bilal M, Qiu Z F and He Y J. 2019. Synoptic relationships to estimate phytoplankton communities specific to sizes and species from satellite observations in coastal waters. *Optics Express*, 27(16): A1156-A1172 [DOI: 10.1364/OE.27.0A1156]
- Sun D Y, Li Y M, Wang Q, Lu H, Le C F, Huang C C and Gong S Q. 2011. A neural-network model to retrieve CDOM absorption from *in situ* measured hyperspectral data in an optically complex lake: Lake Taihu case study. *International Journal of Remote Sensing*, 32(14): 4005-4022 [DOI: 10.1080/01431161.2010.481297]
- Suzuki K, Hinuma A, Saito H, Kiyosawa H, Liu H B, Saino T and Tsuda A. 2005. Responses of phytoplankton and heterotrophic bacteria in the northwest subarctic Pacific to *in situ* iron fertilization as estimated by HPLC pigment analysis and flow cytometry. *Progress in Oceanography*, 64(2/4): 167-187 [DOI: 10.1016/j.pocean.2005.02.007]
- Tang J W, Tian G L, Wang X Y, Wang X M and Song Q J. 2004. The methods of water spectra measurement and analysis I: above-water method. *Journal of Remote Sensing*, 8(1): 37-44 (唐军武, 田国良, 汪小勇, 王晓梅, 宋庆君. 2004. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法. *遥感学报*, 8(1): 37-44) [DOI: 10.11834/jrs.20040106]
- Tao B Y, Mao Z H, Lei H, Pan D L, Bai Y, Zhu Q K and Zhang Z L. 2017. A semianalytical MERIS green-red band algorithm for identifying phytoplankton bloom types in the East China Sea. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 122(3): 1772-1788 [DOI: 10.1002/2016JC012368]
- Tao B Y, Mao Z H, Lei H, Pan D L, Shen Y Z, Bai Y, Zhu Q K and Li Z E. 2015. A novel method for discriminating *Prorocentrum donghaiense* from diatom blooms in the East China Sea using MODIS measurements. *Remote Sensing of Environment*, 158: 267-280 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.11.004]
- Taylor B B, Taylor M H, Dinter T and Bracher A. 2013. Estimation of relative phycoerythrin concentrations from hyperspectral underwater radiance measurements—A statistical approach. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(6): 2948-2960 [DOI: 10.1002/jgrc.20201]
- Tomas C R. 1997. *Identifying Marine Phytoplankton*. San Diego: Academic Press: 1-858
- Utermöhl H. 1958. Zur vervollkommnung der quantitativen phytoplankton-methodik. *SIL Communications*, 1953—1996, 9(1): 1-38 [DOI: 10.1080/05384680.1958.11904091]
- Van Heukelem L and Thomas C S. 2001. Computer-assisted high-performance liquid chromatography method development with applications to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. *Journal of Chromatography A*, 910(1): 31-49 [DOI: 10.1016/S0378-4347(00)00603-4]
- Wang H L, Hong H S and Xu L. 1999. Separation and determination of chlorophylls and carotenoids from marine phytoplankton by RP-HPLC. *Marine Sciences*, (4): 6-9 (王海黎, 洪华生, 徐立. 1999. 反相高效液相色谱法分离、测定海洋浮游植物的叶绿素和类胡萝卜素. *海洋科学*, (4): 6-9) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3096.1999.04.003]
- Wen Z B, Wu Y T, Li C and Yin J P. 2021. The current situation and consideration of the application and development of marine satellite data in China. *Journal of Tropical Oceanography*, 40(6): 23-30 (文质彬, 吴园涛, 李琛, 殷建平. 2021. 我国海洋卫星数据应用发展现状与思考. *热带海洋学报*, 40(6): 23-30) [DOI: 10.11978/2020122]
- Wen Z D, Song K S, Zhao Y, Du J and Ma J H. 2016. Influence of environmental factors on spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2): 787-801 [DOI: 10.5194/hess-20-787-2016]
- Xi H Y, Losa S N, Mangin A, Garnesson P, Bretagnon M, Demaria J, Soppa M A, d'Andon O H F and Bracher A. 2021. Global chlorophyll *a* concentrations of phytoplankton functional types with detailed uncertainty assessment using multisensor ocean color and sea surface temperature satellite products. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(5): e2020JC017127 [DOI: 10.1029/2020JC017127]
- Xi H Y, Losa S N, Mangin A, Soppa M A, Garnesson P, Demaria J, Liu Y Y, d'Andon O H F and Bracher A. 2020. Global retrieval of phytoplankton functional types based on empirical orthogonal functions using CMEMS GlobColour merged products and further extension to OLCI data. *Remote Sensing of Environment*, 240: 11704 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111704]
- Xiao C, Sun D Y, Wang S Q, Qiu Z F, Huan Y and Zhang J B. 2018. Long-term changes in colored dissolved organic matter from satellite observations in the Bohai Sea and North Yellow Sea. *Remote Sensing*, 10(5): 688 [DOI: 10.3390/rs10050688]
- Xu S G, Fu Y Z and Kang P P. 2015. Seasonal and interannual variations of Chlorophyll *a* in Bohai Sea. *Marine Environmental Science*, 34(6): 898-903, 924 (许士国, 富砚昭, 康萍萍. 2015. 渤海表层叶绿素 *a* 时空分布及演变特征. *海洋环境科学*, 34(6): 898-903, 924) [DOI: 10.13634/j.cnki.mes.2015.06.016]
- Xu X Y. 2019. *Deviation Analysis on GOCI, VIIRS and MODIS Remote Sensing Reflectance Products in China Offshore Area*. Hangzhou: Hangzhou Normal University (许潇尹. 2019. 中国近海 GOCI、VIIRS 与 MODIS 水色遥感反射率产品偏差分析研究. 杭州: 杭州师范大学)
- Yang B H. 2011. Constructing China's Ocean Satellite System to Enhance the Capability of Ocean Environment and Disaster Monitoring. *Chinese Space Science and Technology*, 31(5): 1-8 (杨保华. 2011. 构建中国海洋卫星体系提升海洋环境与灾害监测能力. *中国空间科学技术*, 31(5): 1-8) [DOI: 10.3780/j.issn.1000-758X.2011.05.001]
- Yang W, Zhou N and Cao J S. 2021. Double-camera geometric stitching of HY-1D coastal zone imager. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 42(4): 99-107 (杨威, 周楠, 曹金山. 2021. “海洋一号”D 卫星海岸带成像仪双相机几何拼接. *航天返回与遥感*,

- 42(4): 99-107 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2021.04.012]
- 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]
- Yao P, Yu Z G and Mi T Z. 2003. The chemotaxonomy of marine phytoplankton. *Marine Environmental Science*, 22(1): 75-80 (姚鹏, 于志刚, 米铁柱. 2003. 海洋浮游藻类的化学分类法. *海洋环境科学*, 22(1): 75-80) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-6336.2003.01.016]
- Zeidner G, Preston C M, Delong E F, Massana R, Post A F, Scanlan D J, Bèjà O. 2003. Molecular diversity among marine picophytoplankton as revealed by psbA analyses. *Environmental Microbiology*, 5(3): 212-6 [doi: 10.1046/j.1462-2920.2003.00403.x. PMID: 12588300]
- Zhai H C, Ning X R, Tang X X and Zhou W L. 2010. Application of HPLC Pigment Analysis in the Study of Phytoplankton Community Structure. *Periodical Of Ocean University Of China*, 40(11): 71-78 (翟红昌, 宁修仁, 唐学玺, 周文礼. HPLC色素分析技术在海洋浮游植物群落结构研究中的应用. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 40(11): 71-78) [DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.2010.11.012]
- Zhang H L, Devred E, Fujiwara A, Qiu Z F and Liu X H. 2018. Estimation of phytoplankton taxonomic groups in the Arctic Ocean using phytoplankton absorption properties: implication for ocean-color remote sensing. *Optics Express*, 26(24): 32280-32301 [DOI: 10.1364/OE.26.032280]
- Zhang K L, Ding Z Y and Gao J. 2019a. Design and application of AIS on HY-1C/D satellite. *Spacecraft Engineering*, 28(5): 26-31 (张可立, 丁振宇, 高杰. 2019a. 海洋一号C/D卫星全球船舶自动识别系统设计与应用. *航天器工程*, 28(5): 26-31) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2019.05.005]
- Zhang K L, Zhang Y C and Ma Y. 2019b. Design of on orbit cross calibration method for HY-1C/D satellite. *Spacecraft Engineering*, 28(2): 24-29 (张可立, 张永超, 马越. 2019b. 海洋一号C/D卫星在轨交叉定标设计. *航天器工程*, 28(2): 24-29) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2019.02.004]
- Zhang L H, Zhang J and Chao M. 2002. Identification of Microphytoplankton populations in seawater by flow cytometry. *Marine Sciences*, 26(3): 60-65 (张利华, 张经, 晁敏. 2002. 流式细胞术对微型浮游植物识别初探. *海洋科学*, 26(3): 60-65) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3096.2002.03.018]
- Zhao C Y, Zang J Y, Liu J, Sun T and Ran X B. 2016. Distribution and budget of nitrogen and phosphorus and their influence on the ecosystem in the Bohai Sea and Yellow Sea. *China Environmental Science*, 36(7): 2115-2127 (赵晨英, 臧家业, 刘军, 孙涛, 冉祥滨. 2016. 黄渤海氮磷营养盐的分布、收支与生态环境效应. *中国环境科学*, 36(7): 2115-2127) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2016.07.032]
- Zhou Y L, Zhang C S, Shi X Y and Su R G. 2017. Distribution characteristics of chlorophyll a and its influencing environmental factors in Bohai Sea and Yellow Sea. *China Environmental Science*, 37(11): 4259-4265 (周艳蕾, 张传松, 石晓勇, 苏荣国. 2017. 黄渤海海水中叶绿素a的分布特征及其环境影响因素. *中国环境科学*, 37(11): 4259-4265) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2017.11.031]
- Zhu Z Y, Ng W M, Liu S M, Zhang J, Chen J C and Wu Y. 2009. Estuarine phytoplankton dynamics and shift of limiting factors: a study in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 84(3): 393-401 [DOI: 10.1016/j.ecss.2009.07.005]
- Zou Y R, Liu J Q, Liang C and Zhu H T. 2020. Monitoring of mangrove growth using HY-1C Satellite CZI data based on remote sensing. *Journal of Marine Sciences*, 38(1): 68-76 (邹亚荣, 刘建强, 梁超, 朱海天. 2020. 基于HY-1C卫星CZI数据的红树林长势遥感监测. *海洋学研究*, 38(1): 68-76) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2020.01.008]
- Zou Y R. 2004. Analysis spatial distribution characteristics for chl a in Bohai Sea. *Remote Sensing Information*, (3): 30-31 (邹亚荣. 2004. 渤海叶绿素a时空分布特征分析. *遥感信息*, (3): 30-31)

Remote sensing estimation of phytoplankton groups using Chinese ocean color satellite data

SUN Deyong^{1,2,3}, CHEN Yuhang^{1,3}, LIU Jianqiang^{2,4}, WANG Shengqiang^{1,2,3}, HE Yijun^{1,2,3}

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. Jiangsu Research Center for ocean Survey Technology, Nanjing 210044, China;

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

Abstract: Phytoplankton is a significant producer of global primary productivity and influences the ocean's biological cycle and energy conversion. Understanding and detecting the phytoplankton biomass is important to grasp the variations in the marine environment. However, observing the changes of phytoplankton taxa remains a great challenge on spatial and temporal scales. Recent developments in ocean color sensors have enabled large-scale and long time-series remote sensing retrieval of phytoplankton biomass. HaiYang-1C and

HaiYang-1D (HY-1C/D) satellites, as the main members of the Chinese ocean color satellite series, can provide ocean color products with a larger observation range, higher accuracy, and resolution, with great application potential.

In this study, we collect *in situ* data, including the pigment concentration with the high-performance liquid chromatography method (HPLC) and remote sensing reflectance (R_{rs}), from four cruises in the Bohai Sea and the Yellow Sea from 2016 to 2018. Then, we obtain eight typical phytoplankton taxa concentrations through CHEMTAX (CHEMical TAXonomy) software based on these pigment data. We found the sum of the relative contributions of diatoms, cryptophytes, cyanobacteria, and chlorophytes to total chlorophyll *a* (TChl*a*) accounted for a large proportion (79%). In addition, the spatial distribution of the CHEMTAX-calculated phytoplankton taxa showed a trend of higher nearshore concentration than offshore by spatial interpolation analysis.

We used the singular value decomposition (SVD) method to construct a link between R_{rs} and phytoplankton concentrations. The matrix U obtained from SVD was used to build four models by multiple linear regression methods, to estimate four phytoplankton taxa concentrations. We carried out validation independently based on the measured and estimated concentrations, and the result showed relatively high consistent between diatoms, cryptophytes, cyanobacteria, and chlorophytes and the measured values (determination coefficients (R^2): 0.44, 0.70, 0.70 and 0.71 ($p < 0.001$); median percent error (ME): 44.81%, 45.34%, 51.20% and 62.80%; Root Mean Squared Error (RMSE): 0.23 mg/m³, 0.24 mg/m³, 0.11 mg/m³ and 0.06 mg/m³, respectively). The established model was further applied to China Ocean Color & Temperature Scanner (COCTS) R_{rs} data on the HY-1C/D L1A to demonstrate the spatial distribution of four major phytoplankton taxa in the Bohai Sea. The satellite results are consistent with previous studies that showed decreasing concentrations from nearshore to offshore.

Finally, this study applies the same modeling approach (SVD) to MODIS and GOCI sensor bands. A comparison of model performance and satellite applications between the three sensors showed that the new model established by COCTS bands outperformed the GOCI-II model and was similar to the MODIS-Aqua model. Also, the satellite application of COCTS is superior to the other two sensors. Generally, this study can provide a methodological foundation for understanding the spatial-temporal evolution of the phytoplankton community in the Bohai Sea. Meanwhile, this study shows the great potential of HY-1C/D in models establishing and phytoplankton community monitoring.

Key words: Phytoplankton taxa concentrations, CHEMTAX, SVD, HY-1C/D, the Bohai Sea

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.42176179, 41876203, 42176181, 42106176); Natural Science Foundation Jiangsu Province, China (No. BK20211289, BK20210667); Open Fund from Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China (No. 202102005); Jiangsu Province Postgraduate Research and Practice Innovation Project (No.KYCX21_0975)