

海洋浮游植物粒径等级遥感研究现状与展望*

Research Status and Prospect of Remote Sensing of Phytoplankton Size Classes in Marine Waters

丘中锋,孙德勇**,王胜强,何宜军

QIU Zhongfeng, SUN Deyong, WANG Shengqiang, HE Yijun

(南京信息工程大学海洋科学学院,江苏南京 210044)

(School of Marine Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu, 210044, China)

摘要:海洋水体中浮游植物粒径等级的差异能反映其功能类型的不同,浮游植物粒径等级的探测对水生生态系统中浮游植物功能多样性及浮游植物生物地球化学功能的研究具有极其重要的意义。本文综述当前浮游植物粒径等级的遥感探测算法,阐述各算法的步骤过程及其特点,并分析了优缺点。基于此,针对我国近海及海岸带水体,提出海洋浮游植物粒径等级(phytoplankton size classes, PSCs)遥感研究今后需要开展的工作。

关键词:浮游植物粒径等级 遥感算法 海洋水体

中图分类号:P73 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)06-0492-07

Abstract: The difference of phytoplankton size classes (PSCs) in marine waters reflects phytoplankton function diversity, of which the study is of significance for understanding the structure of phytoplankton community, and revealing biogeochemical processes of water ecosystem. This article reviews current researches on remote sensing algorithms of PSCs in marine waters. The processes of existing remote sensing algorithms are addressed in detail, and their advantages and disadvantages are also analyzed, based on which, several important aspects of research work are proposed for developing remote sensing algorithms suitable for coastal waters of China.

Key words: phytoplankton size classes (PSCs), remote sensing algorithm, marine waters

0 引言

水生生态系统中的自养生物库由多种类型的浮游植物组成,就其生物地球化学作用而言,这些浮游植

物彼此之间呈现出功能性差异^[1-3]。例如,颗石藻是水体中钙元素的主要控制者,可进行钙化作用;硅藻主导硅元素的变化,可用以揭示硅循环过程^[4],同时贡献全球约20%的碳固定^[5];束毛藻(富含蓝细菌)和原核生物是水体中固氮作用的重要贡献者;蓝藻(如原绿球藻、聚球藻等)和微小真核生物是水体中无机物质的重要摄取者,改变和影响无机物质的含量;鞭毛藻是水体中化学成分DMS(二甲基硫)的主要制造者^[6]。由此,学术界提出“浮游植物功能类型”的概念,用以描述浮游植物的不同生物地球化学功能^[1-2]。

不同功能类型的浮游植物往往呈现出差异明显的粒径大小分布^[2-3,7-8],例如,由于高的表面积与体积比,小颗粒浮游植物在营养盐含量相对有限的水体中

收稿日期:2016-09-25

作者简介:丘中锋(1979—),男,博士,教授,主要从事物理海洋、海洋遥感等方面的研究。

*国家自然科学基金项目(41276186,41576172,41506200),江苏省自然科学基金项目(BK20151526, BK20150914),江苏省高校自然科学基金项目(15KJB170015)和江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目资助。

**通信作者:孙德勇(1984—),男,博士,副教授,主要从事水光学、水环境遥感等方面的研究, E-mail: sundayong1984@163.com。

更能高效的吸收营养盐,所以它更易主导贫营养水体,同时它的沉降速率要慢于大颗粒浮游植物;而大颗粒浮游植物更易在富营养的水体中出现,且是碳输出到深水层的主要贡献者^[2]。因此,科研工作者常利用所谓的“浮游植物粒径等级(Phytoplankton Size Class, PSC)”对水生态系统中浮游植物功能多样性进行研究。根据 Sieburth 等^[9]提出的细胞粒径概念模型,浮游植物粒径等级可分为微微型浮游植物($<2\ \mu\text{m}$)、微型浮游植物($2\sim 20\ \mu\text{m}$)和小型浮游植物($>20\ \mu\text{m}$)3类。通常情况下,微微型浮游植物主要包括蓝藻(如原绿球藻、聚球藻等)和微小真核生物;而微型浮游植物包括绿藻、隐藻、定鞭藻、金藻等,小型浮游植物则主要是硅藻、鞭毛藻等^[6]。本文分析了我国近海及海岸带水体浮游植物种群结构特征,并综述当前浮游植物粒径等级的遥感探测算法,由此,提出我国近海及海岸带水体今后需要开展的研究工作。

1 我国近海及海岸带水体浮游植物种群结构特征

就我国近海及海岸带水体而言,学者们对浮游植物种群结构及分布特征开展过大量的研究。周然^[10]根据 2004 年—2007 年的调查数据和以往资料分析了渤海湾的天津港海域浮游植物种群结构,发现该海域共出现 7 门 126 种浮游植物,以硅藻和甲藻为主要优势藻,且出现绿藻。肖凯恩^[11]对珠江口海域的浮游植物生长和种群结构进行调查分析,发现浮游植物生长与海水中营养盐含量及比例有关,含量丰富的氮、磷、硅是硅藻成为该海域浮游植物优势种群的主要原因。方涛等^[12]通过对长江口及毗邻海域进行现场过滤培养,发现该海域浮游植物优势种多为硅藻和绿藻。宋伦等^[13]于 2005 年 7~9 月对辽东湾海域水体的浮游植物种群进行调查,共鉴定出 56 种以上的浮游植物,其中以硅藻和甲藻为主要优势藻。陈纪新等^[14]通过高效液相色谱法获取了东海和南海北部典型断面浮游植物的光合色素组成,进而分析了浮游植物种群结构,指出东海断面浮游植物群落受海水层化的影响,上层以蓝藻为优势藻,下层则以硅藻为优势。孙军等^[15]对渤海中部和渤海海峡及邻近海域的浮游植物群落结构进行了调查研究,结果表明浮游植物群落主要由硅藻($61.5\%\sim 92.1\%$)和甲藻($2.9\%\sim 38.4\%$)组成,也有蓝藻、绿藻和硅鞭藻,且出现明显的季节和周年变化。王海黎等^[16]对台湾海峡特征光合色素的分布及其对浮游植物种群结构的作用进行了研究,指出夏季台湾海峡浮游植物的优势种群为蓝藻,约占 48.78%。王俊等^[17]报道了 1992

广西科学 2016 年 12 月 第 23 卷第 6 期

年—1993 年渤海生态基础调查的研究结果,资料分析表明,渤海浮游植物出现共 70 种,其中硅藻所占比例最高,甲藻次之,且浮游植物数量分布出现明显的季节变化,在 2 月和 10 月出现数量峰值。与此同时,研究者们对一些河口海域也进行了调查分析,结果表明常见的浮游植物优势种群有硅藻、蓝藻、甲藻、绿藻等,在悬沙含量不高的河口海湾如胶州湾、大亚湾和台湾海峡甲藻是仅次于硅藻的优势种^[18-20],但在悬沙含量较高的长江口海域绿藻和蓝藻则取代了甲藻成为次优势藻^[21-22]。

综上所述,我国近海及海岸带水体浮游植物的种群结构及分布特征在很大程度上呈现出复杂性特征,主要表现:(1)虽然硅藻、甲藻、绿藻和蓝藻通常是水体中浮游植物的优势藻,但哪些藻为绝对优势藻以及各自的数值比重,在不同水体之间存在较大差异;(2)针对同一水体,浮游植物的优势藻及其数值比重存在时序上的演替,如存在年份、季节、甚至月份上的无序变化。我国近海及海岸带水体浮游植物常见的优势藻,即硅藻、甲藻、绿藻和蓝藻,分别处于小型、微型和微微型的不同浮游植物粒径等级之中^[2,6,23-24],这为利用浮游植物粒径等级的探测而研究浮游植物种群结构提供了契机。

2 浮游植物粒径等级遥感探测的研究现状

通过遥感手段,学者们对水体浮游植物粒径等级的探测进行过相关的研究,查阅主要代表性的研究成果可概括出以下 6 种算法。

2.1 基于叶绿素 a 浓度分解的算法(算法 1)

Brewin 等^[25]针对大西洋水体,将水体叶绿素 a 浓度分解成微微型、微型和小型 3 类浮游植物的贡献,建立了浓度分解的关系模型,并通过实测数据集和非线性最小二乘法拟合获得浓度分解模型中的参数;从而利用卫星数据反演的水体总叶绿素 a 浓度,可分别推算微微型、微型和小型浮游植物的叶绿素 a 浓度,进而通过计算每类的浓度贡献比例,就可得到大西洋水体的浮游植物粒径等级的空间分布。Bro-tas 等^[6]利用同样的方法,对东大西洋富营养化水体的浮游植物粒径等级进行探测,验证了该方法的有效性。

2.2 基于叶绿素 a 和诊断色素之间关系的算法(算法 2)

Aiken 等^[24]针对 Benguela 南部水域,建立了各诊断色素浓度与叶绿素 a 浓度之间的经验关系,通过 MERIS 数据对水体叶绿素 a 浓度进行反演,结合之前建立的经验关系推算出各诊断色素浓度,进而可计

算得到浮游植物粒径等级的比例因子。Uitz 等^[26]利用 SeaWiFS 遥感数据反演开阔大洋水体的表层叶绿素 a 浓度,再由此推算水体真光层的叶绿素 a 浓度,通过建立水体真光层的叶绿素 a 浓度与各诊断色素浓度之间的经验关系,得到各诊断色素浓度。由于通过各诊断色素及相应权重可量化表达微微型、微型和小型浮游植物的分布比重,所以该方法可实现对开阔大洋水体浮游植物粒径等级的探测。

2.3 基于浮游植物吸收分解的算法(算法 3)

Mouw 等^[27]根据不同大小类别的浮游植物会呈现出不同的吸收系数光谱这个特性,将水体浮游植物比吸收通过比例因子分解成微微型植物的贡献和小型浮游植物的贡献,并通过执行一个前向光学模型查找表,实现卫星影像数据反演比例因子,达到对浮游植物粒径等级探测的目的。Ciotti 等^[28]同样将浮游植物吸收分解成两部分,通过反演比例因子,实现对巴西大陆架海域水体浮游植物粒径等级的探测。Devred 等^[29]针对开阔大洋水体,将浮游植物吸收分解成两部分,通过构建的双组分吸收模型反演浮游植物吸收系数,进而实现对不同浮游植物粒径等级的探测。

2.4 基于光谱特征的算法(算法 4)

Hirata 等^[30]利用 443 nm 和 510 nm 波长的浮游植物吸收系数构建光谱响应因子,用于描述浮游植物粒径等级。该因子与吸收系数呈现出密切的关系,如构建二者之间的关系模型,可通过卫星遥感数据反演得到的吸收系数,推算光谱响应因子,实现探测水体浮游植物粒径等级分布的目的。王桂芬等^[31]利用浮游植物吸收光谱斜率变化,对南海北部湾水体也做了类似研究。Nair 等^[2]利用浮游植物比吸收系数光谱对海洋水体中的几种典型藻类(包括原绿球藻、聚球藻、金藻和硅藻)进行识别,探测不同功能类型的浮游植物。Alvain 等^[32-33]利用归一化离水辐亮度数据对水体典型浮游植物的光谱特征进行分析,提出不用浮游植物的光谱量化特征,进而通过 SeaWiFS 影像数据对全球大洋 Case I 水体的浮游植物进行遥感探测。

2.5 基于理论推演的算法(算法 5)

Roy 等^[3,34]从表征叶绿素 a 浓度本质出发,对于特定浮游植物细胞大小范围的叶绿素 a 浓度,可由 3 个因素决定,即该大小范围的浮游植物细胞数量、每个细胞的体积和细胞内叶绿素 a 浓度,这 3 个因素可进一步由浮游植物大小光谱指数、比吸收系数及相关参数进行量化表达,最终建立起微微型、微型和小型浮游植物的分布比例因子与浮游植物大小光谱指数,

比吸收系数及相关参数的关系模型,实现通过 MODIS 数据反演全球大洋水体微微型、微型和小型浮游植物的空间分布。Kostadinov 等^[35]基于 Mie 理论建立了描述水体悬浮颗粒物粒径分布的 Junge 指数,粒子数浓度与后向散射光谱指数之间关系的查找表,利用 SeaWiFS 遥感数据反演得到全球宏观水域的不同波段的悬浮颗粒物后向散射系数,并推算其光谱指数,再通过建立的查找表即可获得不同粒径范围的悬浮颗粒物粒子数浓度,从而计算不同粒径范围粒子数浓度与总浓度的比率,即可得到浮游植物粒径等级的分布。

2.6 其它算法(算法 6)

Fujiwara 等^[36]针对 Chukchi 和 Bering 大陆架海区水域,通过粒径大于 5 μm 浮游植物的叶绿素 a 浓度与总叶绿素 a 浓度的比率定义了浮游植物大小的因子指数,并建立了该因子与水体固有光学量(吸收比率 $a_{\text{ph}}(443)/a_{\text{ph}}(667)$ 、 $a_{\text{ph}}(488)/a_{\text{ph}}(555)$ 、悬浮颗粒物后向散射的光谱指数 γ)之间的经验关系模型,从而可通过卫星数据反演的固有光学量推算水体浮游植物大小的因子指数。Organelli 等^[8]利用大洋水体(包括北大西洋、赤道太平洋、地中海、南太平洋等)的实测诊断色素数据,对微微型、微型和小型浮游植物粒径等级的比例因子进行量化表达,结合偏最小二乘法,建立比例因子与吸收光谱四阶微分之间的经验关系,最终达到利用遥感数据反演的吸收探测浮游植物粒径等级的目的。

2.7 6 种算法优缺点分析

由此可见,学者们对大洋水体浮游植物粒径等级的遥感探测已进行了较充分的研究,基本揭示了浮游植物粒径等级的宏观分布及空间变化。然而,上述算法各具优缺点。具体而言,对于算法 1 和算法 2,它们的优势是对出现较大或较小色素浓度的水体具有很好的表现,而不足之处在于对中间色素浓度的水体状态的表现不尽如人意,这是由于不同浮游植物粒径等级的出现更易混淆中间色素浓度的信号,导致对呈现相同浮游植物生物量水体中的不同浮游植物粒径等级未能进行准确区分^[7]。对于算法 3 和算法 4,它们的优势是充分利用了浮游植物的光谱特征(无论是吸收光谱还是离水辐射光谱),对呈现出相同或相近色素浓度的不同浮游植物粒径等级可进行区分^[37-41],而该方法的局限性在于无法探测呈现相似光谱特征的不同浮游植物粒径等级,并且对于由生长状况、营养条件和光获取等变化因素而导致不同光谱特征的相同浮游植物也无法适用^[2]。对于算法 5,优势在于该方法是基于理论推演而开发的,所以更具鲁棒性,

在不同水体状态应用中的普适性较好,然而,令人遗憾的是用于计算浮游植物粒径等级的量化表征因子的参数,如浮游植物大小光谱指数、叶绿素 a 细胞内浓度与粒径的关系指数等,目前很难通过遥感方法准确获取,仍需要原位实测或理论推算获得^[3,34-35,42-43],这无疑阻碍了该方法的应用。对于算法 6,优点是操作简单易行,缺点是该方法以局部水域的经验关系为基础,无法保证算法应用的鲁棒性和普适性。

与此同时,已开发算法中用于浮游植物粒径等级的量化表征因子呈现出多样无序性,如色素浓度表示法,通过诊断色素与相应权重推算微微型、微型和小型浮游植物的叶绿素 a 浓度,再分别计算三者的浓度贡献比例,见算法 1、算法 2 和算法 6;浮游植物比吸收的分解参数表示法,将浮游植物比吸收分解成微微型和小型浮游植物的贡献,再利用模型中的分解参数来表示,见算法 3;光谱特征响应表示法,通过量化不同浮游植物粒径等级之间的吸收光谱、比吸收光谱、离水辐亮度光谱等的差异进行表示,见算法 4;理论比重因子表示法,由理论推演得到,通过叶绿素 a 细胞内浓度与粒径的关系指数、细胞粒径阈值和浮游植物大小光谱指数的耦合关系进行表示,见算法 5。虽然这些量化表征因子均被用于表示海洋水体中浮游植物粒径等级,但本质上它们的出发点不尽相同,如浮游植物比吸收的分解参数表示法仅反映微微型和小型两种浮游植物的比例贡献。况且,这些量化表征因子之间是否具有有一致性,是否可相互验证,现有的研究中均未给出答案。

此外,多数已开发算法是以叶绿素 a 和固有光学量的准确反演为前提的,而针对开阔的大洋 Case I 水体,这两者的遥感反演是相对准确和可行的^[44-47],因此也保证了这些算法的有效性。然而,针对我国近海及海岸带的光学复杂水体,通过卫星遥感数据反演叶绿素 a 和固有光学量仍存在一定的模糊性和误差^[48-53],使得针对大洋水体中开发的算法难于近岸水体,由此针对我国近海及海岸带水体的浮游植物粒径等级遥感探测的研究势在必行。

3 浮游植物粒径等级遥感探测的研究展望

针对我国典型近海及海岸带水体,探明浮游植物粒径等级呈现出的分布特征,及其有效的时空演化探测方法,成为理解近海及海岸带水体浮游植物种群结构、认识浮游植物功能多样性和揭示水生态系统中许多生物地理化学过程的重要途径。为了更好的解决这个问题,今后需从以下几个方面开展工作:(1)开展针对我国海域特征的水体浮游植物粒径等级的量化

表征因子研究;(2)开展量化表征因子对实测水体反射信号的光谱映射机制研究;(3)开展遥感探测浮游植物粒径等级的模型构建方法研究。

参考文献:

- [1] LE QUERE C, HARRISON S P, PRENTICE I C, et al. Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models [J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 2016-2040.
- [2] NAIR A, SATHYENDRANATH S, PLATT T, et al. Remote sensing of phytoplankton functional types [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(8): 3366-3375.
- [3] ROY S, SATHYENDRANATH S, BOUMAN H, et al. The global distribution of phytoplankton size spectrum and size classes from their light-absorption spectra derived from satellite data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 139: 185-197.
- [4] FALCIATORE A, D'ALCALA M R, CROOT P, et al. Perception of environmental signals by a marine diatom [J]. *Science*, 2000, 288(5475): 2363-2366.
- [5] NELSON D M, TRÉGUER P, BRZEZINSKI M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean: Revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359-372.
- [6] BROTAS V, BREWIN R J M, SÁ C, et al. Deriving phytoplankton size classes from satellite data: Validation along a trophic gradient in the eastern Atlantic Ocean [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 134: 66-77.
- [7] BREWIN R J W, HARDMAN-MOUNTFORD N J, LAVENDER S J, et al. An intercomparison of bio-optical techniques for detecting dominant phytoplankton size class from satellite remote sensing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2): 325-339.
- [8] ORGANELLI E, BRICAUD A, ANTOINE D, et al. Multivariate approach for the retrieval of phytoplankton size structure from measured light absorption spectra in the Mediterranean Sea (BOUSSOLE site) [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(11): 2257-2273.
- [9] SIEBURTH J M, SMETACEK V, LENZ J. Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions [J]. *Limnology and Oceanography*, 1978, 23(6): 1256-1263.
- [10] 周然. 渤海湾浮游植物种群变化及其影响因素 [J]. *水道港口*, 2012, 33(1): 72-76.
ZHOU R. Temporal changes of marine phytoplankton communities and influential factors of Bohai Bay, China [J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2012, 33(1): 72-76.
- [11] 肖凯恩. 珠江口东海域营养盐比例及其对藻类的影响

- [J]. 环境保护科学, 2012, 38(3): 14-19, 24.
- XIAO K E. Nutrients proportion and its impact on algae in the East Estuary of Pearl River[J]. Environmental Protection Science, 2012, 38(3): 14-19, 24.
- [12] 方涛, 李道季, 李云, 等. 长江口及其毗邻海域浮游植物种群特征的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2008(2): 147-151.
- FANG T, LI D J, LI Y, et al. Preliminary study on population characteristics of phytoplankton in the Changjiang estuary and its adjacent sea[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008(2): 147-151.
- [13] 宋伦, 周遵春, 王年斌, 等. 辽东湾浮游植物多样性及与海洋环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(4): 365-368.
- SONG L, ZHOU Z C, WANG N B, et al. Phytoplankton on diversity of Liaodong Bay and relationship with ocean environmental factors[J]. Marine Environment Science, 2007, 26(4): 365-368.
- [14] 陈纪新, 黄帮钦, 刘媛, 等. 应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构[J]. 地球科学进展, 2006, 21(7): 738-746.
- CHEN J X, HUANG B Q, LIU Y, et al. Phytoplankton community structure in the transects across East China Sea and Northern South China Sea determined by analysis of HPLC photosynthetic pigment signatures[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(7): 738-746.
- [15] 孙军, 刘东艳, 杨世民, 等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 461-471.
- SUN J, LIU D Y, YANG S M. The preliminary study on phytoplankton community structure in the central Bohai Sea and the Bohai Strait and its adjacent area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 461-471.
- [16] 王海黎, 洪华生. 近岸海域光合色素的生物标志作用研究 I. 台湾海峡特征光合色素的分布及其对浮游植物类群结构的指示[J]. 海洋学报, 2000, 22(3): 94-102.
- WANG H N, HONG H S. Photosynthetic pigments as biomarkers of biogeochemical processes in coastal waters I. The distribution of photosynthetic pigments and their indication for phytoplankton community structure in the Taiwan Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000, 22(3): 94-102.
- [17] 王俊, 康元德. 渤海浮游植物种群动态的研究[J]. 海洋水产研究, 1998, 19(1): 43-52.
- WANG J, KANG Y D. Study on population dynamics of phytoplankton in the Bohai Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 1998, 19(1): 43-52.
- [18] 福建海洋研究所. 台湾海峡中、北部海洋综合调查研究报告[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 244-258.
- Fujian Institute of Oceanography. Comprehensive investigation and Study Report in the Middle and North Taiwan Strait[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Lad, 1988: 244-258.
- [19] 徐恭昭. 大亚湾环境与资源[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1989.
- XU G Z. Daya Bay Environment and Resources[M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 1989.
- [20] 中国海湾志编委会. 中国海湾志: 第4分册: 山东半岛南段和江苏省海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- China's Gulf Editorial Board. Chinese Bay. The 4th Volume. The Southern Section of Shandong Peninsula and the Gulf of Jiangsu Province [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993.
- [21] 陆健健, 孙宪坤, 何文珊. 中国湿地研究和保护[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1998.
- LU J J, SUN X K, HE W S. Research and Conservation of China Wetland[M]. Shanghai: East China Normal University Press, 1998.
- [22] 徐兆礼, 白雪梅, 袁骥, 等. 长江口浮游植物生态研究[J]. 中国水产科学, 1999, 6(5): 52-54.
- XU Z L, BAI X M, YUAN Q, et al. An ecological study on phytoplankton in the Changjiang estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1999, 6(5): 52-54.
- [23] 孔凡洲. 长江口赤潮区浮游植物的粒级结构、种类组成和色素分析[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2012.
- KONG F Z. Size-fraction Structure, Species Component and Pigments Analyses of Phytoplankton in the Bloom Zone near Changjiang Estuary[D]. Qindao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [24] AIKEN J, FISHWICK J R, LAVENDER S, et al. Validation of MERIS reflectance and chlorophyll during the BENCAL cruise October 2002: Preliminary validation of new demonstration products for phytoplankton functional types and photosynthetic parameters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 28(3/4): 497-516.
- [25] 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.
- [26] UITZ J, CLAUSTRE H, MOREL A, et al. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(C8): C08005. DOI: 10.1029/2005JC003207.
- [27] MOUW C B, YODER J A. Optical determination of phytoplankton size composition from global SeaWiFS imagery[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, 115(C12): C12018. DOI: 10.1029/2010JC006337.
- [28] CIOTTI A M, BRICAUD A. Retrievals of a size parameter for phytoplankton and spectral light absorption by colored detrital matter from water-leaving radi-

- ances at SeaWiFS channels in a continental shelf off Brazil[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2006, 4(7): 237-253.
- [29] DEVRED E, SATHYENDRANATH S, STUART V, et al. A two-component model of phytoplankton absorption in the open ocean: Theory and applications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C3): C03011. DOI: 10. 1029/2005JC002880.
- [30] HIRATA T, AIKEN J, HARDMAN-MOUNTFORD N J, et al. An absorption model to determine phytoplankton size classes from satellite ocean colour [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 3153-3159.
- [31] 王桂芬, 曹文熙, 周雯, 等. 基于南海北部湾海区浮游植物吸收光谱斜率变化的粒级结构反演 [J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(2): 25-32.
WANG G F, CAO W X, ZHOU W, et al. Retrieval of phytoplankton size structure based on the spectral slope of phytoplankton absorption in the northern South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(2): 25-32.
- [32] ALVAIN S, MOULIN C, DANDONNEAU Y, et al. Remote sensing of phytoplankton groups in case 1 waters from global SeaWiFS imagery [J]. *Deep Sea Research I: Oceanographic Research Papers*, 2005, 52(11): 1989-2004.
- [33] ALVAIN S, MOULIN C, DANDONNEAU Y, et al. Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(3). DOI: 10. 1029/2007GB003154.
- [34] ROY S, SATHYENDRANATH S, PLATT T. Retrieval of phytoplankton size from bio-optical measurements: Theory and applications [J]. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2011, 8(58): 650-660.
- [35] KOSTADINOV T S, SIEGEL D A, MARITORENA S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114(C9): C09015. DOI: 10. 1029/2009JC005303.
- [36] FUJIWARA A, HIRAWAKE T, SUZUKI K, et al. Remote sensing of size structure of phytoplankton communities using optical properties of the Chukchi and Bering Sea shelf region [J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(12): 3567-3580.
- [37] ACKLESON S G, BALCH W M, HOLLIGAN P M. Response of water-leaving radiance to particulate calcite and chlorophylla concentrations: A model for Gulf of Maine coccolithophore blooms [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C4): 7483-7499.
- [38] BROWN C W, PODESTÁ G P. Remote sensing of coccolithophore blooms in the Western South Atlantic Ocean [J]. *Remote Sensing Environment*, 1997, 60(1): 83-91.
- [39] HOLLIGAN P M, VIOLLIER M, HARBOUR D S, et al. Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge [J]. *Nature*, 1983, 304(5924): 339-342.
- [40] SATHYENDRANATH S, WATTS L, DEVRED E, et al. Discrimination of diatoms from other phytoplankton using ocean-colour data [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2004, 272: 59-68.
- [41] SUBRAMANIAM A, CARPENTER E J, KARENTZ D, et al. Bio-optical properties of the marine diazotrophic cyanobacteria *Trichodesmium* spp. I. Absorption and photosynthetic action spectra [J]. *Limnology and Oceanography*, 1999, 44(3): 608-617.
- [42] BOSS E, PEGAU W S, LEE M, et al. Particulate backscattering ratio at LEO 15 and its use to study particle composition and distribution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(C1): C01014. DOI: 10. 1029/2002JC001514.
- [43] TWARDOWSKI M S, BOSS E, MACDONALD J B, et al. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters [J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 2001, 106(C7): 14129-14142.
- [44] IOCCG (International Ocean-Colour Coordinating Group). Remote sensing of inherent optical properties: Fundamentals, tests of algorithms, and applications [C]//Lee Z P (ed.). *Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group*, No. 5. Dartmouth, Canada: IOCCG, 2006.
- [45] LEE Z P, CARDER K L, ARNONE R A. Deriving inherent optical properties from water color: A multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-5772.
- [46] MUELLER J L, FARGION G S. *Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 3, Volume 1* [R]. NASA/TM-2002-210004/Rev3-Vol2, Greenbelt, MD: NASA Goddard Space Flight Center, 2002.
- [47] O'REILLY J, MARITORENA S, MITCHELL B G, et al. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1998, 103(C11): 24937-24953.
- [48] 李四海, 王宏, 许卫东. 海洋水色卫星遥感研究与进展 [J]. *地球科学进展*, 2000, 15(2): 190-196.
LI S H, WANG H, XU W D. Research and progress in satellite ocean color remote sensing [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15(2): 190-196.
- [49] 毛志华, 陈建裕, 黄海清, 等. 高光谱卫星海洋遥感资料辐射精度评价模型研究 [J]. *中国科学: 信息科学*,

2010,40(5):763-771.

MIAO Z H, CHEN J Y, HUANG H Q, et al. Evaluation of the accuracy of hyperspectral remote sensing reflectance model (HRSREM) for marine data[J]. Science China: Information Sciences, 2010, 40(5): 763-771.

[50] 潘德炉,白雁. 我国海洋水色遥感应用工程技术的新进展[J]. 中国工程科学, 2008,10(9):14-24.

PAN D L, BAI Y. Advances on the application of ocean color remote sensing engineering in China[J]. Engineering Sciences, 2008, 10(9): 14-24.

[51] 王桂芬,曹文熙,殷建平,等. 海洋颗粒有机碳浓度水色遥感研究进展[J]. 热带海洋学报, 2012,31(6):48-56.

WANG G F, CAO W X, YIN J P, et al. Progress on ocean-color remote sensing of particulate organic carbon [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2012, 31(6): 48-56.

[52] 詹海刚,施平,陈楚群. 基于贝叶斯反演理论的海水固有光学特性准分析算法[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 204-210.

ZHAN H G, SHI P, CHEN C Q. A quasi analytical method for inherent optical properties of sea water based on Bayesian inversion theory[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 204-210.

[53] 赵冬至,罗虎,傅云娜,等. 海洋水色组分吸收系数的测定方法研究[J]. 海洋通报, 2004,23(3):81-86.

ZHAO D Z, LUO H, FU Y N, et al. Determination of spectral absorption coefficients of particles, dissolved material and phytoplankton for ocean discrete water samples[J]. Marine Science Bulletin, 2004, 23(3): 81-86.

(责任编辑:尹 闯)

2017年《广西科学》栏目设置计划

No.	拟登特色栏目名称	栏目主编	初步计划期号	最后收稿日期
1	理论物理	郭 进	第二期	3月1日
2	材料物理	高英俊	第二期	3月1日
3	藻 类	牛建峰	第三期	5月1日
4	海洋动力学	陈 波	第三期	5月1日
5	生物化工	董张法	第三期	5月1日
6	蔗糖生物加工	梁达奉	第四期	7月1日
7	海洋生物多样性	李宝泉	第四期	7月1日
8	海洋遥感	何宜军	第四期	7月1日
9	最优化理论	简金宝	第五期	9月1日
10	最优化理论与方法	陈武华	第五期	9月1日
11	中药标准检测	刘布鸣	第五期	9月1日
12	海洋生物	范航清	第六期	11月1日
13	森林生态	温远光	第六期	11月1日
14	生物物理	黄庶识	第六期	11月1日

注:1. 投稿指南详见<http://gxkk.cbpt.cnki.cn/>,也可将稿件发送至 2503915@163.com。

2. 请作者在最后收稿日期前投稿,以便尽早编辑。

3. 期刊已使用优先发表系统,论文录用后一个星期内即可从中国知网查到。如需尽早见刊,请在投稿时附注,我刊将以特约稿件的方式优先出版。

4. 研究类论文投稿前请到期刊网站下载我刊的论文模板,并按格式撰写,以免反复修改。

5. 稿件拟收取一定的版面费,如需免版面费,在经栏目主编审定后,我刊一律免费刊登。

6. 由于稿件数量及稿件篇幅不一,拟安排的期号只是暂定,有可能往后推迟 1~2 期。