

Progress in Ocean Color Remote Sensing of Chinese Marginal Seas

Hui Gao¹, Hui Zhao¹, Chunyan Shen²

¹College of Oceanography and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

²Fisheries College, Guangdong Ocean University, Zhanjiang Guangdong

Email: huigao109@163.com, cyshe101@163.com

Received: May 6th, 2017; accepted: May 23rd, 2017; published: May 27th, 2017

Abstract

Ocean color remote sensing is an important means of monitoring the marine environment; it has the advantages of high observation frequency, wide spatial coverage and small influence by sea condition. In recent years, marine scientific researchers and marine monitoring branches have been paid more and more attention. This paper reviews the development process of ocean color sensor, summarizes and classifies the ocean color inversion algorithms, and further takes remote sensing of ocean color in Chinese coastal regions as an example, to show the present status, progress and application prospect of ocean color in recent years.

Keywords

Chinese Marginal Seas, Ocean Color Remote Sensing Algorithm, Chlorophyll-A

中国近海水色遥感研究进展

高 慧¹, 赵 辉¹, 沈春燕²

¹广东海洋大学, 海洋与气象学院, 广东 湛江

²广东海洋大学, 水产学院, 广东 湛江

Email: huigao109@163.com, cyshe101@163.com

收稿日期: 2017年5月6日; 录用日期: 2017年5月23日; 发布日期: 2017年5月27日

摘 要

海洋水色遥感是海洋环境监测的重要手段, 具有观测频率高、空间覆盖广以及受海况影响小的优点, 近年来逐渐受到海洋科研工作者和海洋监测部门的重视。本文概述了水色传感器的发展历程, 对水色反演

算法进行了总结分类,并以中国近海为研究区域综述了中国近海遥感研究成果,展示近年来海洋水色研究的现状、取得的进展以及应用前景。

关键词

中国近海, 水色遥感算法, 叶绿素

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

海洋水色遥感是卫星对地观测系统中的一个重要组成部分[1]。水色三要素是指水体叶绿素、悬浮无机物和黄色有机物质。通过卫星传感器接收的电磁波谱信息来反演得到水体中影响海水光学性质的组分浓度,进而探测到海洋上层物质组成成分和浓度是海洋水色遥感技术的原理[2]。水色遥感在针对海洋初级生产力的估算、海洋碳循环研究、海洋生态环境监测、海洋动力学研究、海洋渔业开发管理服务等方面都具有广泛的应用前景与深远的研究意义。

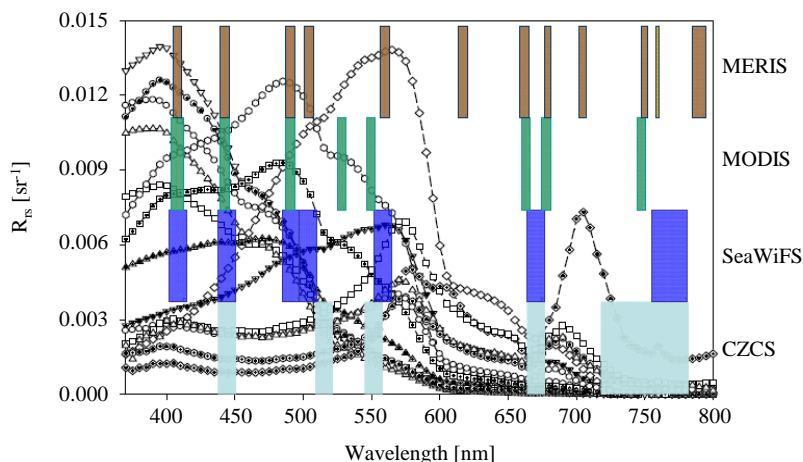
海水叶绿素浓度的测定对海洋初级生产力的研究至关重要。水体叶绿素的常规测量方法需要在现场逐点采集水样,不仅成本高、速度慢、采样点稀疏,而且难以实现长时间大范围水域的同步采样测量,因此实测数据相对匮乏。而水色卫星遥感可以弥补常规监测的缺陷,提供海洋大面积、实时、连续、密集、同步、高重复频率的叶绿素浓度的数据,这对于研究海洋生态环境演变、生物地球化学循环、气候变化、海洋-大气系统中碳循环、赤潮灾害监测、环境监测、海流(上升流、沿岸流等)及海洋渔业等方面具有重要的意义[3]。

2. 水色卫星传感器的发展

1978年8月,美国国家宇航局(NASA)发射了世界上第一颗携带海洋水色传感器海岸带水色扫描仪 CZCS (Coastal Zone Color Scanner)的卫星“雨云-7”(Nimbus-7),它一直工作到1986年。CZCS的8年成功运行验证了从卫星获取海洋水色要素浓度的可行性及其潜在的庞大价值,加快推进新型水色传感器的研究。在CZCS停止运行10年之后,新型水色传感器纷纷投入业务化运行阶段,第二代水色卫星传感器主要有美国的SeaWiFS,日本的OCTS,法国的POLDER等。第二代水色传感器与第一代水色传感器CZCS相比具有优良的灵敏度、更多的光谱波段和更高的光谱分辨率。第三代传感器又以美国的MODIS,日本的GLI,欧空局的MERIS等为代表。目前使用较为广泛的水色卫星传感器数据主要来源于SeaWiFS、MODIS、MERIS以及多卫星传感器的融合数据(图1)。

20世纪80年代,中国开始了对海洋水色遥感进行研究,2002年5月15日,中国国内首颗海洋水色卫星——“海洋一号”A星(HY-1A)的成功发射,不仅结束了我国没有海洋卫星的历史,还成为了世界上第七个拥有海洋水色卫星自主权的国家[5]。“海洋一号”卫星上装载有两个水色传感器,分别是10通道的海洋水色扫描仪COCTS和4通道海岸带成像仪CZI(CCD相机),它们都十分适合于海岸带水体环境的监测和管理。

近几年及未来计划新增加的海洋水色传感器主要有地球静止海洋水色成像仪(GOCI)、可见光红外成



图片来源于 Lee 等人(2007)的图 1 [4]

Figure 1. Spectral bands (location and width) of CZCS, SeaWiFS, MODIS, and MERIS

图 1. CZCS、SeaWiFS、MODIS 和 MERIS 覆盖的光谱波段(位置和宽度)

像辐射仪(VIIRS)、海洋和陆地颜色仪(OLCI)、第二代全球成像仪(SGLI)、超光谱成像仪(HSI)、以及改进型 COCTS 及 CZI 等[6](表 1)。

GOCI 是全球首个搭载在地球静止轨道卫星上的海洋水色传感器,它能对以 130°E、36°N 为中心的一定范围的海域进行观测,具有高光谱、高空间和高时间分辨率的特点。由于它能在同一天内对同一区域进行多次观测,使得数据更新时间间隔短,因此它不仅能进行高频率的监测,而且对突发事件的处理也非常有利。VIIRS 是 MODIS 在未来的替代传感器,它可以收集陆地、大气、冰层和海洋在可见光和红外波段的辐射图像,其水色遥感功能和 MODIS 相仿,辐射特征也差不多。OLCI 是在 MERIS 的基础上发展起来的,OLCI 针对海洋水色遥感的共有 16 个波段,它与之前的水色遥感器如 MODIS、SeaWiFS 等相比水色遥感的功能大大增强。

3. 海洋水色遥感算法

海洋水色要素的反演算法通常可分为经验公式法和基于模型的解析算法两种类别[7]。海水根据其光学性质的不同可划分为一类水体和二类水体[8],一类水体指那些光学性质主要受浮游植物叶绿素影响的水体,通常一类水体为水深较深的开阔大洋;二类水体则受到的干扰因素较多,它不仅受水中浮游植物的影响,还受到其它悬浮无机物中和黄色有机物质的影响,对于水深比较浅的水域,还需要考虑水底物质对水体光学性质的影响,通常近岸水水体属于二类水体。

3.1. 经验公式算法

经验公式算法是基于实验数据,通过测量获取水体表面的光谱辐射特征和水体中各要素的浓度,建立了以水体光学性质和水色要素浓度之间的定量关系为研究对象的算法。

3.1.1. 波段比值算法

波段比值算法是最为典型的经验算法。蓝绿波段比值法是海洋水色算法中反演叶绿素最常用的算法,因为大多数浮游植物吸收的可见光位于蓝绿光谱内(440~550 nm)。蓝绿波段比值法最初是由 Clark [9]提出用来方便处理和解释 CZCS 图像。Gordon [10] [11]等人进一步详细的讨论了基于 CZCS 数据的叶绿素浓度的统计算法,研究了叶绿素浓度在开阔大洋的近表面分布并探讨它们与其他海洋要素之间的关系。对

Table 1. Basic situation of the main ocean color satellite sensors**表 1.** 主要水色卫星传感器基本情况(参阅 IOCCG) (<http://ioccg.org/resources/missions-instruments/>)

传感器	卫星	国家	开始工作时间	结束工作时间	用于水色遥感波段数
CZCS	Nimbus-7	美国	1978 年 8 月	1986 年 6 月	6
MOS	IRS-P3	印度	1996 年 3 月	2001 年 3 月	18
OCTS	ADEOS-1	日本	1996 年 8 月	1997 年 6 月	12
POLDER	ADEOS-1	法国	1996 年 8 月	1997 年 6 月	9
SeaWiFS	SeaSTAR	美国	1997 年 8 月	2010 年 12 月	8
OCI	福卫一号	中国台湾	1999 年 1 月	2003 年 4 月	6
OCM	IRS-P4	印度	1999 年 5 月	2003 年 11 月	8
OSMI	Kompast	韩国	1999 年 8 月	2002 年 7 月	6
MODIS	Terra/Aqua	美国	1999.12/2002.5	至今	8
MERIS	Envisat-1	欧洲	2002 年 1 月	至今	15
GLI	ADEOS-2	日本	2002 年 12 月	2005 年 6 月	36
COCTS	HY-1A/ HY-1B	中国	2002.5/2007.4	2004.3/至今	10
CZI	HY-1A/ HY-1B	中国	2002.5/2007.4	2004.3/至今	4
POLDER2	ADEOS-2	法国	2002 年 12 月	2003 年 10 月	9
POLDER3	PARASOL	法国	2005 年 3 月	至今	9
GOCI	COMS	韩国	2010 年 6 月	至今	8
VIIRS	NPP	美国	2011 年 10 月	至今	7
OLCI	Sentinel-3	欧洲	2016 年 2 月	至今	16

于光学性质复杂的二类水体来说, 蓝绿波段比值法对于叶绿素浓度变化的敏感度较低, 所以反演精度较低。但是该方法对一类水体是有效的, 许多其他波段比值法的研究便是在此基础上发展而来的, 包括基于第二代与第三代水色传感器的反演算法, 如 OCTS-C、SeaWiFS OC4、MODIS OC3M、MERIS OC4E 等; 甚至二类水体经验算法也可以通过针对不同的水域、依据所采集的实测数据来确定所选择的波段和参数用以提高算法精度来改进, 发展了适用于二类水体经验算法, 如 CZCS OC3C、OCTS OC40v4、SeaWiFSOC4v4 等。

3.1.2. 荧光算法

荧光算法是建立在叶绿素 a 荧光峰特征与其浓度之间关系的基础上得到的算法, 利用荧光特征对叶绿素 a 进行研究始于 20 世纪 60 年代。随着 Moral 和 Prieur [8], Neville 和 Gower [12]的进一步研究, 人们逐渐认识到荧光峰高度同叶绿素 a 浓度之间存在很强的相关关系。第一颗携带有荧光通道可以探测叶绿素 a 荧光的水色传感器 MODIS 于 1999 年升空, 标志着利用荧光估算叶绿素浓度进入了卫星遥感的阶段[13]。叶绿素荧光遥感的方法有基线荧光高度法(FLH)、归一化荧光高度法(NFH)、最大叶绿素指数算法(MCI)、浮藻指数算法(FAI) [14] [15]与大型藻类指数算法(SAI) [16]以及 Hu 等人[17]提出的颜色指数算法(CIA)。

3.2. 基于模型的算法

基于模型算法是用生物光学模型对水体组成要素和水体光谱辐射特征之间的相关性进行描述, 模拟水面或水面上空大气层的光谱特征, 即利用反射或辐射光谱与水色要素浓度之间的关系反演水体组成要

素的各种特征的算法。目前正在发展的基于模型算法主要有代数法、非线性最优化法、主成分分析法和神经网络法。

3.2.1. 代数法

代数法在模型算法中相对比较简单，它也被称为半分析型生物光学算法。代数法用代数表达式对海洋水色与地球物理特征的相关性进行描述，也就是通过解析海洋光学原理的方法建立遥感反射率模型，它可以用来反演叶绿素浓度和其他水体主要光学成分的吸收系数和后向散射系数，模型中会使用一些经验公式来参数化一些海洋光学特征。Gordon [18]等提出针对一类水体反演海表面叶绿素浓度的半分析算法。Carder [19]等人提供了一种适用于 MODIS 或者与 MODIS 具有相似波段的传感器获取的遥感影像反演叶绿素浓度、浮游植物及有色溶解有机物(CDOM)的吸收系数的半分析算法。

3.2.2. 非线性最优化方法

非线性最优化算法首先提出一种预测模型，通过调整作为模型中输入变量的叶绿素、悬浮无机物、黄色有机物质等几种水色要素的浓度值以及气溶胶光学厚度，最终使模型求解出的光谱辐射的预测值和实际测量值之间的误差最小。可采用 simplex 算法[20]、Levenberg-Marquardt 方法[21] [22]或 Gauss-Newton 算法[23]等非线性优化方法减小误差求解的最小值。

3.2.3. 主成分分析方法

主成分分析方法即为先对各波段辐射率数据集进行主成分分析，然后按照各因子(即任意几个波段的一个线性组合)对总方差的贡献率的大小，确定各因子对水体组成要素反演的影响程度。它把大气的光学性质作为反演模型中的附加变量来考虑，将卫星传感器测量的大气顶部的光谱数据作为反演的初值，这样不但可以得到大气的性质，而且还可以定量地反演出水色要素(叶绿素、黄色溶解有机物和悬浮无机物)的浓度，此外还可以根据水体内部光学性质的不同对算法进行调整。该算法的优势在于它将大气参数和水体组成要素浓度等各参数都看作未知量同时进行反演，却不需要通过大气修正处理。Krawczyk 和 Neumann [24]等人提出了基于主成分分析(PCA)的水色反演算法。

3.2.4. 神经网络法

神经网络算法具有较高的实用价值，它是人工智能方法的一支，利用黑箱子操作，通过对不同波段组合和叶绿素浓度的进行训练，找到最佳的模型。基于神经网络技术的多元非线性回归技术与简单线性回归的技术，神经网络算法可以依据一组测量数据(即浓度和反射率)或者一组模拟数据集进行回归分析。

Doerffer 等人[25]与 Lee 等人[26]都成功地基于神经网络算法对叶绿素浓度等水体组成要素进行了分析。Buckton [27]等利用 MERIS 数据在计算海水组分时发现神经网络算法不但比传统的经验方法如波段比值法等具有更高的反演精度，而且还可以获得一些其他多余参数如几何参数和没有用到的信息如大气能见度等。

3.3. 不同算法比较

不论是经验公式法还是基于模型的解析算法，由于不同水体它们的内部光学性质不同，水色因子组成成分等也不同，因此它们都只能针对局部的区域。其中一类水体的反演算法较为简单也发展的较为成熟，而二类水体的反演算法却需要添加复杂的数学函数进行计算以及需要考虑处理更多的变量，并在非线性反演算法中含有更多的未知参数。

经验算法和解析算法基本上都需要生物光学数据或实测数据作为输入，代数法与非线性最优化算法的输入要求为生物-光学模型，主成分分析法与神经网络法可以将有代表性的生物-光学模型和现场实

测数据作为输入，但是它们同时也需要依赖模拟或训练数据。非线性最优化算法是最复杂、运算最耗时的算法，但它却是反演精度最高的算法[28]。

4. 水色遥感数据在中国近海的应用

中国近海是指毗邻中国大陆边缘与岛屿边缘的海的统称，包括渤海、黄海、东海、南海和台湾以东海域[29]。其中渤黄东海陆架构成了宽而广阔的陆缘浅海。黄河从山东省东营垦利县注入渤海，长江则在上海附近进入东海。南海的面积大约是渤海、黄海、东海面积总和的3倍，在南海的中部北侧有一很大的深海盆地，南海四周几乎被大陆、岛屿所包围，通过众多海峡与太平洋及邻近海域相连通。珠江从中国广东省注入南海北部，湄公河从中南半岛流经于越南进入南海南部。渤海、黄海、东海的绝大部分水体和南海近岸部分水体都属于二类水体，具有极为复杂光学特征。渤海水深最浅，平均水深只有18m，且渤海沿岸江河纵横，每年入海河流携带大量泥沙，为渤海提供了丰富的营养盐。黄、东海是典型的陆架海洋生态系统，受人类活动影响较大，对我国海洋生产力的贡献较大，属于生产力的高值海域[30]。不同于其他北部的海域，南海除了近岸部分的水体外大部分海域都处于寡营养(低叶绿素浓度)状态。

CZCS 虽然作为一次实验性质的试验，但是提供了宝贵的8年连续遥感数据，并为新型海色传感器的研究提供了借鉴，开启了利用光学遥感监测全球海洋变化的时代。国内较早使用水色传感器数据的学者有宁修仁、唐丹玲等，Ning 等人[31]将1978年至1986年的CZCS水色遥感数据和1981年至1986年AVHRR水温遥感相结合对东海海域浮游植物生态动力学过程进行研究，研究结果肯定了CZCS水色数据对于观测东海渔区非常重要，但是同时也提出CZCS数据不能明确流经东海的环流对浮游植物生物量影响程度。Tang 等人[32]通过分析1978年~1986年CZCS数据较早研究了中国边缘海的色素(叶绿素)浓度的年际和空间分布，结果表明色素浓度在内陆架和北部海区相对较高且多变，而在外陆架和东南海区色素浓度较低且变化较小。色素浓度从1979年至1986年的年际变化较强，并于1981年达到最大值。其后，Tang 等人[33]又基于CZCS数据研究了1978年至1986年渤海、黄海、东海以及南海北部叶绿素浓度的月变化以及对季节性风与海表温度进行分析，并突出其中1979年11月至1980年10月CZCS数据相对较好的时段，比较黄河口、长江口、珠江口3个区域叶绿素浓度月变化。研究表明，叶绿素浓度季节变化很有可能与季风反转有关，而其空间变化则受河流径流量、上升流与沿岸流的影响。

随着第二代水色传感器的发展，美国于1997年9月发射了专门海洋水色卫星Seastar，其上配置有SeaWiFS传感器，它连续13年的运行以及更多的光谱通道与更好的灵敏度为后来的水色研究提供了良好的数据源。针对SeaWiFS传感器，不同的海域有不同的研究，如在渤海海域Tang等[34]依据SeaWiFS水色遥感数据以及其他海洋特征数据分析了1998年秋季发生在渤海海域藻华的形成、分布与平流输送，结果显示藻华开始于9月初在渤海西海岸爆发，当海表温度上升到25℃~26℃时向东南方向扩散。藻华形成可能是由河流在西海岸运输的混合营养盐与海表温度上升引起的，后来在9月末10月初的时候藻华向东转移的可能是由西北风加强的局地环流引起的。钱莉等[35]利用1998~2009年的SeaWiFS数据，运用经验正交分解函数 EOF 分析渤海表层叶绿素浓度的时空分布特点，得出叶绿素浓度在空间分布上表现为从近岸向外海迅速减少，在季节变化上呈现夏季偏低，其他三个季节相对较高的结论。

在黄、东海海域，Yamaguchi 等[36]应用1997年9月至2006年10月的SeaWiFS月平均水色数据对黄海与东海海域叶绿素浓度季节分布特征与影响因子进行了讨论，同时评估年际变化用以帮助说明夏季长江流量的影响，得出叶绿素浓度年际变化受长江径流量控制的结论，且在这10年内黄海夏季叶绿素浓度在逐渐增加，很有可能会引发水体富营养化。李国胜等[37]利用SeaWiFS的海洋叶绿素浓度SeaBAM模型反演结果，在中国东海建立分别针对一、二类水体的修订模式，反演计算获取东海1998年各月叶绿素浓度的分布，并通过VGPM模型获得逐月初级生产力时空分布以及全年累积量的空间分布情况。结果

表明, 东海的近海由于受海流状况与长江冲淡水影响, 叶绿素浓度季节变化明显, 而在远海区域全年变化较小; 整个东海海域初级生产力的月变化呈现出双峰特征, 峰值分别出现在春秋, 其中春季峰值较大。

在南海海域, 陈楚群等[3]利用 SeawiFS 资料分析系统 SeaDAS 的估算模式分析获取叶绿素资料, 初步分析南海表层叶绿素浓度的时空分布变化特征及其与营养盐、南海环流、海温等的关系, 分析结果表明叶绿素浓度分布与南海环流具有良好的耦合性, 其分布格局基本上受南海环流结构的控制。赵辉等[38]基于 1997 年 10 月至 2002 年 9 月 SeaWiFS 卫星遥感数据, 探讨了南海浮游植物叶绿素浓度的时空分布状况。结果表明, 南海叶绿素浓度具有明显的季节性变化特征, 具体表现为大部分海域叶绿素浓度冬季较高, 春季较低; 在空间分布上, 叶绿素浓度呈现近岸区高、中央海盆区低的特征。赵辉等[39]还利用 SeaWiFS 获取的 1997~2005 年期间叶绿素 a 数据以及其他海洋要素数据分析南海叶绿素分布的年际变化, 得出 1998 年南海低叶绿素浓度的异常事件受厄尔尼诺影响的结论。后来刘昕等[40]运用 SeaWiFS 获取的近 13 年的逐月叶绿素浓度资料, 通过经验正交函数(EOF)分解方法, 分析南海叶绿素浓度的空间分布状况及其随时间的变化特征。

在南海北部海域, 郝镭等[41]利用南海北部 7 年平均 SeaWiFS 水色数据结合 AVHRR 海温遥感资料, 在 VGPM 模型的支持下计算南海北部海域河口、上升流、反气旋涡等区域表层叶绿素浓度和初级生产力的周年变化以及分析这些因子之间的相关性。研究结果显示, 南海北部海域初级生产力在空间分布上呈现由近岸向外海逐渐降低的变化趋势, 在季节变化上表现为冬高夏低。在南海西北部海域, 赵辉等[42]利用 1999~2003 年 SeaWiFS 卫星遥感获取的叶绿素浓度数据和 2004 年的航测的数据, 并结合海表温度、风场、海面高度等资料, 分析讨论叶绿素浓度的时空分布及其与其他海洋环境要素的相关性, 除此之外还通过对比实测叶绿素和遥感叶绿素验证了 SeaWiFS 遥感叶绿素数据在南海西北部的可用性, 结果表明, 南海西北部的叶绿素浓度具有明显的空间变化特征且与风场等环境因子关系密切。

除了上述海域的研究, 商少凌等[43]利用 SeaWiFS 获取的 1998 年 2 到 3 月份台湾海峡的水色数据与现场调查得到的叶绿素数据进行了初步的对比分析, 比较了遥感观测叶绿素分布情况与实测叶绿素的分布情况, 希望通过便利的水色遥感信息掌握叶绿素的时空变化, 进而研究海洋初级生产力。结果显示 SeaWiFS 水色数据与现场实测数据呈现良好的相关性, 初步证明 SeaWiFS 水色数据能够在一定程度上反映海域的真实叶绿素浓度。

继 SeaWiFS 之后, 第三代传感器 MODIS、MERIS 等在中国近海海域也同样得到广泛应用。在渤海海域, Cui 等[44]将渤海的站点数据结合可获取到的 MERIS 离水辐射率、悬浮颗粒物浓度与叶绿素浓度数据, 证实对于沿岸浑浊水体依据严格的匹配分析其生物光学特性的实测结果与 MERIS 反演结果呈良好的相关关系。钱莉等[45]继使用 SeaWiFS 数据分析渤海海域表层叶绿素浓度的时空分布特征后, 又采用统计学方法分析了 2002~2009 年的基于 MODIS 反演渤海叶绿素浓度的时空变化特征, 其中空间分布与之前使用 SeaWiFS 分析结果一致, 时间变化略有不同, 引起差别的原因可能是由于标准的 MODIS 叶绿素算法针对一类水体开发的, 而渤海是内海为典型的二类水体, 黄色物质和悬浮泥沙等因素的影响较大。

许士国等[46]利用 MODIS 月平均叶绿素浓度数据, 分析了 2003~2013 年渤海表层叶绿素浓度的季节与年际的空间分布变化特征, 研究结果表明: 渤海表层水体叶绿素浓度在沿岸浅水区域偏高, 从 2003 到 2013 年, 除莱州湾外, 渤海表层叶绿素浓度逐年增加; 季节分布呈双峰特征, 冬季最低, 春季逐渐升高, 夏季达到峰值后降低, 夏末秋初时又有回升至冬季又有所下降, 最高值出现在 5~9 月, 与赤潮容易暴发时间段相吻合。文章还探讨了与之前他人研究结论有所差异的原因, 如钱莉等[36]研究发现渤海海域整体叶绿素浓度均值以 2006 年为分水岭, 在 2006 年以前缓慢上升, 2006 年后缓慢下降, 分析发现两者结论不一致的原因在于选择研究范围不同以及所采用的统计指标也不同; 与 Yamaguchi 等[37]所得到的渤海叶绿素浓度最高值出现在 3 月的结论不相符, 结论不同的原因可能是两者选择了不同的数据源以及两者

所研究时段不同。Fu 等[47]利用 2003~2014 年的 MODIS 数据研究分析渤海表层叶绿素浓度的时空变化,探讨了浮游植物的动态变化与其环境变化和人类活动的关系。结果表明渤海表层叶绿素浓度在沿岸区较高,特别是秦皇岛附近。春、夏季从南至北藻华的爆发有一个月的滞后,离岸区呈现持续地增长趋势,近岸区显示出持续下降的趋势,表明富营养化从沿海区向深海区的扩张过程。季节性浮游植物水华的基本上是由水柱垂直结构所驱动的。气候和海水养殖活动与叶绿素浓度的变化趋势息息相关,河流流量和含沙也同样会影响叶绿素浓度。

在黄海海域,杨曦光[48]利用 MODIS 获取的遥感影像数据结合实测得到的光谱数据,采用统计分析和神经网络等数学方法,建立了针对黄海二类水体叶绿素浓度的反演模型,计算得到不同时间段的叶绿素浓度分布图,分析黄海海域叶绿素浓度的时空变化特征。结果表明,春季和夏初整个海区叶绿素浓度较高,夏季叶绿素浓度略有下降,秋季叶绿素浓度又有所增加,冬季由于受水温影响,叶绿素浓度水平整体偏低。在南海北部海域,马翱慧等[49]基于 2007 年至 2010 年 MODIS 的 L2 级叶绿素浓度数据产品,将叶绿素浓度数据进行分级分区处理为年平均和月平均数据,探讨南海北部叶绿素浓度的时空分布变化特征及其与其他海洋环境要素的关系。结果表明,在空间分布上,南海北部海域表层叶绿素浓度表现为由近岸向外海递减;在时间变化上,叶绿素浓度在水深较浅的近岸海域没有明显的季节变化,而在深水区域有明显的季节变化,具体表现为冬季最大夏季最小。

近几年,有不少学者应用多卫星传感器的融合数据对中国近海的水色遥感进行了研究,如檀赛春等[50]利用 SeaWiFS 和 MODIS 的合成产品叶绿素浓度、有效光合辐射(PAR)和海表温度(SST)资料,反演估算了 2003 至 2005 年中国近海的初级生产力,分析了它们的时空分布变化特征以及与其他影响因子之间的关系。分析结果表明,初级生产力沿岸高于外海,且呈带状递减分布,其中长江口附近的初级生产力最高、南海最低。李新星等[51]基于 MODIS-Aqua、MODIS-Terra 及 MERIS 所获取的南海叶绿素浓度的数据,利用平均法、生物光学模型法和最优插值法 3 种数据融合方法对其进行了融合,将南海叶绿素融合数据与现场实测数据进行匹配,分析结果显示,融合的南海叶绿素的时空分布特征与以前有关研究结果相吻合,说明融合数据具有较高可信度。施英妮等[52]通过客观分析融合方法对卫星传感器 Aqua/MODIS、Terra/MODIS 与 Envisat/MERIS 多源卫星产品获取的西北太平洋海域叶绿素浓度进行融合,研究结果表明融合产品不仅保证了数据精度还提高数据空间覆盖率。

除了上述研究之外,还有学者对不同卫星传感器的水色产品进行了比较分析,如 Qin 等[53]基于匹配方法分析比较了 2011 年 4 月 11 日在黄海近岸的 GOCI 与 MERIS 水色产品。Cui 等人[54]在黄、东海通过 3 种主要水色卫星传感器 MODIS、MERIS 以及 SeaWiFS 与实测数据进行匹配,评估并比较了水色产品包括悬浮颗粒物(SPM)与叶绿素(chl-a)。

5. 总结与展望

卫星遥感极大推进了海洋水色的研究进程,打破了传统船测不能同步观测、采样点稀疏的局限。目前一类水体的水色遥感反演发展趋于成熟,然而中国近海的大多数水体属于二类水体,针对二类水体仍有众多难点需要克服。当前除了韩国的 GOCL 之外,其他绝大部分用于海洋观测的水色卫星传感器所搭载的卫星的轨道都是极轨。由于极轨卫星的传感器覆盖面有限,使得其覆盖周期变长,而近岸水体光学性质复杂,同一区域水体光学特性变化快,且轨道之间的间隙、气溶胶的厚度以及天空中的云等都对卫星传感器获得的数据精度产生了影响,限制了对海洋的有效采样。除此之外,每一个传感器的设计寿命是有限的,且水色传感器的进步与水色遥感反演算法的发展是相辅相成的,随着水色传感器的改进,发展了一系列与之匹配的反演算法,又因为反演算法的需求而改良水色传感器的不足,因此单一传感器不能满足连续长时间观测海洋的需求。

前人的研究大多数集中在单个传感器使用寿命内的水色遥感研究, 针对多传感器长时间序列研究还有所欠缺, 且反演数据的精度相对于实测数据来说还是有很大的差距, 因此提高遥感反演数据精度迫在眉睫, 多传感器融合数据能很好地提高数据精度, 这也是今后研究的热点。总之, 针对中国近海水色遥感的研究仍需要进一步展开。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] 刘玉光. 卫星海洋学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [3] 陈楚群, 施平, 毛庆文. 南海海域叶绿素浓度分布特征的卫星遥感分析[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(2): 66-70.
- [4] Lee, Z.P., Carder, K., Arnone, R., *et al.* (2007) Determination of Primary Spectral Bands for Remote Sensing of Aquatic Environments. *Sensors*, **7**, 3428-3441. <https://doi.org/10.3390/s7123428>
- [5] 潘德炉, 林寿仁, 李淑菁, 等. 海洋水色遥感在海岸带综合管理中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 34-9+25.
- [6] 刘良明, 祝家东. 海洋水色遥感器发展趋势初探[J]. 遥感信息, 2011(2): 111-119.
- [7] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社; 2005.
- [8] Morel, A. and Prieur, L. (1977) Analysis of Variations in Ocean Color. *Limnology & Oceanography*, **22**, 709-722. <https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.4.0709>
- [9] Clark, D.K. (1981) Phytoplankton Pigment Algorithms for the Nimbus-7 CZCS. *Oceanography from Space*, 227-237. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3315-9_28
- [10] Gordon, H.R., Clark, D.K., Brown, J.W., *et al.* (1983) Phytoplankton Pigment Concentrations in the Middle Atlantic Bight: Comparison of Ship Determinations and CZCS Estimates. *Applied Optics*, **22**, 20-36. <https://doi.org/10.1364/AO.22.000020>
- [11] Gordon, H.R., Clark, D.K., Mueller, J.L., *et al.* (1980) Phytoplankton Pigments from the Nimbus-7 Coastal Zone Color Scanner: Comparisons with Surface Measurements. *Science*, **210**, 63-66. <https://doi.org/10.1126/science.210.4465.63>
- [12] Neville, R.A. and Gower, J.F.R. (1977) Passive Remote Sensing of Phytoplankton via Chlorophyll *a* Fluorescence. *Journal of Geophysical Research*, **82**, 3487-3493. <https://doi.org/10.1029/JC082i024p03487>
- [13] 邢小罡, 赵冬至, 刘玉光, 等. 叶绿素 *a* 荧光遥感研究进展[J]. 遥感学报, 2007, 11(1): 137-144.
- [14] Hu, C. (2009) A Novel Ocean Color Index to Detect Floating Algae in the Global Oceans. *Remote Sensing of Environment*, **113**, 2118-2129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.012>
- [15] Hu, C., Zhongping, L., Ma, R., *et al.* (2010) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Observations of Cyanobacteria Blooms in Taihu Lake, China. *Prehospital & Disaster Medicine*, **29**, 303-306. <https://doi.org/10.1029/2009jc005511>
- [16] Garcia, R.A., Peter, F., Keesing, J.K., *et al.* (2013) Quantification of Floating Macroalgae Blooms Using the Scaled Algae Index. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **118**, 26-42. <https://doi.org/10.1029/2012JC008292>
- [17] Hu, C., Zhongping, L. and Bryan, F. (2012) Chlorophyll *a* Algorithms for Oligotrophic Oceans: A Novel Approach Based on Three-Band Reflectance Difference. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **117**, 92-99. <https://doi.org/10.1029/2011JC007395>
- [18] Gordon, H.R., Brown, O.B., Evans, R.H., *et al.* (1988) A Semianalytic Radiance Model of Ocean Color. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **93**, 10909-10924. <https://doi.org/10.1029/JD093iD09p10909>
- [19] Carder, K.L., Chen, F.R., Lee, Z.P., *et al.* (1999) Semianalytic Moderate-Resolution Imaging Spectrometer Algorithms for Chlorophyll *A* and Absorption with Bio-Optical Domains Based on Nitrate-Depletion Temperatures. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **104**, 5403-5421. <https://doi.org/10.1029/1998JC900082>
- [20] Roesler, C.S. and Perry, M.J. (1995) *In Situ* Phytoplankton Absorption, Fluorescence Emission, and Particulate Back-scattering Spectra Determined from Reflectance. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **100**, 13279-13294. <https://doi.org/10.1029/95JC00455>
- [21] Lee, Z.P., Carder, K.L., Peacock, T.G., *et al.* (1996) Method to Derive Ocean Absorption Coefficients from Remote-Sensing Reflectance. *Applied Optics*, **35**, 453-462. <https://doi.org/10.1364/AO.35.000453>
- [22] Lee, Z., Carder, K.L., Mobley, C.D., *et al.* (1999) Hyperspectral Remote Sensing for Shallow Waters. 2. Deriving Bottom Depths and Water Properties by Optimization. *Applied Optics*, **38**, 3831-3843. <https://doi.org/10.1364/AO.38.003831>

- [23] Garver, S.A. and Siegel, D.A. (1997) Inherent Optical Property Inversion of Ocean Color Spectra and Its Biogeochemical Interpretation: 1. Time Series from the Sargasso Sea. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **102**, 18607-18625. <https://doi.org/10.1029/96JC03243>
- [24] Krawczyk, H., Neumann, A., Walzel, T., *et al.* (1993) Investigation of Interpretation Possibilities of Spectral High-Dimensional Measurements by Means of Principal Component Analysis: A Concept for Physical Interpretation of Those Measurements. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, **1938**, 28-35. <https://doi.org/10.1117/12.161565>
- [25] Doerffer, R. (1998) Determination of Case 2 Water Constituents Using Radiative Transfer Simulation and Its Inversion by Neural Networks. *Proceedings of Ocean Optics*, **XI(V)**, 1-13.
- [26] Lee, Z.P., Zhang, M.R., Carder, K.L., *et al.* (1998) A Neural Network Approach to Deriving Optical Properties and Depths of Shallow Waters.
- [27] Buckton, D., O'Mongain, E. and Danaher, S. (2010) The Use of Neural Networks for the Estimation of Oceanic Constituents Based on the MERIS Instrument. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 1841-1851. <https://doi.org/10.1080/014311699212515>
- [28] 陈淼. 海洋水色卫星遥感算法综述[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2005.
- [29] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006.
- [30] Ning, X.R., Shi, J.X. and Cai, Y.M. (2004) Biological Productivity front in the Changjiang Estuary and the Hangzhou Bay and Its Ecological Effects. *Acta Oceanologica Sinica*, **26**, 96-106.
- [31] Ning, X., Liu, Z., Cai, Y., *et al.* (1998) Physicobiological Oceanographic Remote Sensing of the East China Sea: Satellite and *In Situ* Observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **103**, 21623-21635. <https://doi.org/10.1029/98JC01612>
- [32] Tang, D.L., Ni, I.-H., Muller-Karger, F.E., *et al.* (1998) Analysis of Annual and Spatial Patterns of CZCS-Derived Pigment Concentration on the Continental Shelf of China. *Continental Shelf Research*, **18**, 1493-515. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(98\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(98)00039-9)
- [33] Tang, D.L., Ni, I.-H., Muller-Karger, F.E., *et al.* (2003) Monthly Variation of Pigment Concentrations and Seasonal Winds in China's Marginal Seas. *Hydrobiologia*, **511**, 1-15. <https://doi.org/10.1023/B:HYDR.0000014001.43554.6f>
- [34] Tang, D.L., Kawamura, H., Oh, I.S., *et al.* (2006) Satellite Evidence of Harmful Algal Blooms and Related Oceanographic Features in the Bohai Sea during Autumn 1998. *Advances in Space Research*, **37**, 681-689. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.04.045>
- [35] 钱莉, 刘文岭, 李伟, 等. 渤海海域表层叶绿素 A 浓度的分布特征[J]. 盐业与化工, 2010, 39(5): 20-24.
- [36] Yamaguchi, H., Kim, H.C., Son, Y.B., *et al.* (2012) Seasonal and Summer Interannual Variations of SeaWiFS Chlorophyll a in the Yellow Sea and East China Sea. *Progress in Oceanography*, **105**, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2012.04.004>
- [37] 李国胜, 王芳, 梁强, 等. 东海初级生产力遥感反演及其时空演化机制[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 483-93.
- [38] 赵辉, 齐义泉, 王东晓, 等. 南海叶绿素浓度季节变化及空间分布特征研究[J]. 海洋学报(中文版), 2005, 27(4): 45-52.
- [39] Zhao, H. and Tang, D.L. (2007) Effect of 1998 El Niño on the Distribution of Phytoplankton in the South China Sea. *Journal of Geophysical Research Oceans*, **112**, 117-128.
- [40] 刘昕, 王静, 程旭华, 等. 南海叶绿素浓度的时空变化特征分析[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(4): 42-48.
- [41] 郝镛, 宁修仁, 刘诚刚, 等. 南海北部初级生产力遥感反演及其环境调控机制[J]. 海洋学报(中文版), 2007, 29(3): 58-68.
- [42] 赵辉, 唐丹玲, 王素芬. 南海西北部夏季叶绿素 a 浓度的分布特征及其对海洋环境的响应[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(6): 31-7+90.
- [43] 商少凌, 洪华生, 张彩云, 等. 1998 年冬季台湾海峡遥测叶绿素分布特征[J]. 海洋通报, 2001, 20(2): 25-29.
- [44] Cui, T., Zhang, J., Groom, S., *et al.* (2010) Validation of MERIS Ocean-Color Products in the Bohai Sea: A Case Study for Turbid Coastal Waters. *Remote Sensing of Environment*, **114**, 2326-2336. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.009>
- [45] 钱莉, 刘文岭, 郑小慎. 基于 MODIS 数据反演的渤海叶绿素浓度时空变化[J]. 海洋通报, 2011, 30(6): 683-687.
- [46] 许士国, 富砚昭, 康萍萍. 渤海表层叶绿素 a 时空分布及演变特征[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(6): 898-903.
- [47] Fu, Y., Xu, S. and Liu, J. (2016) Temporal-Spatial Variations and Developing Trends of Chlorophyll-a in the Bohai Sea, China. *Estuarine Coastal & Shelf Science*, **173**, 49-56. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.02.016>

- [48] 杨曦光. 黄海叶绿素及初级生产力的遥感估算[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所); 2013.
- [49] 马翱慧, 刘湘南, 李婷, 等. 南海北部海域叶绿素 a 浓度时空特征遥感分析[J]. 海洋学报(中文版), 2013, 35(4): 98-105.
- [50] 檀赛春, 石广玉. 中国近海初级生产力的遥感研究及其时空演化[J]. 地理学报, 2006, 61(11): 1189-1199.
- [51] 李新星, 张亭祿, 田林, 等. 多卫星传感器南海叶绿素 a 浓度遥感数据融合[J]. 遥感学报, 2015, 19(4): 680-689.
- [52] 施英妮, 张亭祿, 石立坚, 等. 基于客观分析的多源卫星叶绿素 a 浓度产品融合方法研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(3): 82-87.
- [53] Qin, P., Shen, Y., Mu, B., *et al.* (2013) Comparison of MERIS and GOCI Ocean Color Product in the Yellow Sea of China. ESA Special Publication.
- [54] Cui, T., Zhang, J., Tang, J., *et al.* (2014) Assessment of Satellite Ocean Color Products of MERIS, MODIS and SeaWiFS along the East China Coast (in the Yellow Sea and East China Sea). *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, **87**, 137-151. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.10.013>

附 录

CZCS	海岸带彩色扫描仪	MOS	模块式光电扫描仪
OCTS	海洋水色——温度扫描仪	POLDER	地球反射偏振和方向性探测仪
SeaWiFS	海洋宽视场水色扫描仪	MODIS	中等分辨率光谱成像仪
MERIS	中等分辨率成像频谱仪	GLI	全球成像仪
OCM	海洋水色监测仪	OSMI	海洋多光谱扫描成像仪
OCI	海洋水色照相机	COCTS	水色水温扫描仪
CZI	海岸带成像仪	VIIRS	可见光红外成像辐射仪
GOCI	地球静止海洋水色成像仪	OLCI	海洋和陆地颜色仪
HIS	超光谱成像仪	CDOM	有色溶解有机物

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ije@hanspub.org