

基于实测数据的北海区海水表层叶绿素 a 浓度 遥感定量反演

孙乐成¹,王娟¹,王林²

(1. 国家海洋局北海环境监测中心 青岛 266033;2. 国家海洋环境监测中心 大连 116023)

摘要:为提高我国海洋水色遥感技术和海水环境监测水平,文章根据北海区海水遥感现场监测数据,基于经验算法和荧光基线高度法的回归分析,开展海水表层叶绿素 a 浓度的遥感定量反演,并选取北黄海近岸海域样本数据进行算法检验。研究表明:辽东湾等 9 个北海区典型海域具有相同或相似海水表层光学特性,适宜建立海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演模型;典型海域海水表层叶绿素 a 浓度与遥感反射率之间的相关关系较强,模型均为简单波段比值模型;二类海水研究区域海水表层叶绿素 a 浓度与荧光基线高度之间的相关关系不明显;北黄海近岸海域海水表层叶绿素 a 浓度的最优模型遥感定量反演值的相对误差的平均值为 0.669 $\mu\text{g/L}$ 。

关键词:水色遥感;遥感反射率;经验算法;简单波段比值模型;海水环境

中图分类号:X87;P76 文献标志码:A 文章编号:1005—9857(2019)04—0034—05

Quantitative Retrieval of Surface Chlorophyll-a Concentration in North China Sea Area by Remote Sensing Based on On-site Measured Data

SUN Lecheng¹,WANG Juan¹,WANG Lin²

(1. North China Sea Environmental Monitoring Center,SOA,Qingdao 266033,China;
2. National Marine Environmental Monitoring Center,Dalian 116023,China)

Abstract:In order to improve the ocean color remote sensing technology and the level of marine environmental monitoring in China,the quantitative retrieval of sea surface chlorophyll-a concentration was carried out based on the North China Sea on-site measured data and the regression analysis of empirical algorithm and fluorescence line height method,and validation of algorithms in North Yellow Sea coastal waters was carried out.The results showed that nine typical sea areas in North China Sea,such as Liaodong Bay,had same or similar apparent optical properties of the sea surface water,so it was suitable to establish quantitative retrieval models of chlorophyll-a concentration in the sea surface water by remote sensing; the correlation between chlorophyll-a concentration and remote sensing reflectance in the surface water of typical sea areas was strong,and the best models were all simple band ratio models. The correlation between chlorophyll-a concentration and fluorescence line height was not obvious in the case ii sea water research zone; the average relative error of the best model for quantitative inversion of surface chlorophyll-a con-

centration in the North Yellow Sea coastal waters was 0.669 $\mu\text{g/L}$.

Key words: Ocean color remote sensing, Remote sensing reflectance, Empirical algorithm, Simple band ratio model, Seawater environment

0 引言

叶绿素 a 存在于所有浮游植物种群中,因此其浓度可反映水体中浮游植物的生物量,是评价水环境质量和富营养化程度的重要参数之一,也是计算水体初级生产力及其碳通量的主要变量。叶绿素 a 浓度是我国海洋环境监测的重要指标,其精准监测主要依靠船舶走航式监测,但获取的数据是离散的,时间和空间分辨率较差。水色遥感技术使海水表层叶绿素 a 浓度的大面积同步监测和高频率重复监测成为可能。

在水色遥感技术数十年的发展历程中,国内外学者提出多种定量反演水体叶绿素 a 浓度的算法,主要包括经验法、半经验法和分析法^[1]。这些算法一般适用于以浮游植物为主的大洋水体,而对于物质来源复杂的海岸带水体,受海水黄色物质吸收和泥沙散射的影响会产生很大的误差^[2]。国际海洋水色协调工作组(IOCCG)于 2000 年讨论海岸带和其他光学复杂水体的遥感定量反演算法^[3],后又对 11 种遥感固有光学量算法进行测试^[4],其中包括利用叶绿素 a 浓度计算的波段比值经验算法^[5]。

我国已建立区域海洋水色水温遥感模型,并利用遥感技术监测赤潮和污染物以及开展渔场环境和水质的分类速报等,关于水体表层叶绿素 a 浓度的遥感定量反演研究已涵盖我国内陆水体^[6-10]和近岸海域^[11-16]、北太平洋渔场^[17]以及南极普里兹湾^[18]等,但多数模型对于单次实验数据的依赖度过高,不可避免地具有一定的局限性。本研究根据海水表层叶绿素 a 浓度和遥感反射率的实测数据,采用回归分析的方法,开展北海区海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演,总结海水表层叶绿素 a 浓度与遥感反射率的相关关系,并对北黄海近岸海域海水表层叶绿素 a 浓度的遥感定量反演算法进行检验。

1 数据和方法

1.1 数据

本研究采用 2015—2017 年原国家海洋局北海

分局获取的海水遥感现场监测数据。为确保数据准确性,最大限度地剔除云、雾和气等对数据的影响,选取 9—15 时的监测数据作为样本数据。其中,2015—2016 年的数据用于海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演,2017 年的数据用于算法检验。

根据《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)的要求采集和分析数据:对海水表层叶绿素 a 浓度采用 CTD 以及萃取荧光法和分光光度法,对海水表层遥感反射率采用 ASD FS3 和 HH2 地物光谱仪以及水面以上测量法。

1.2 方法

根据《海洋监测技术规程》(HY/T 147—2013),分别研究一类和二类海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演。针对一类海水表层叶绿素 a 浓度,采用经验算法进行遥感定量反演,选取简单波段比值模型和最大波段比值模型,在拟合过程中选取决定系数最高的模型作为最佳算法,并确定相应的经验系数;针对二类海水表层叶绿素 a 浓度,采用荧光基线高度法进行遥感定量反演,选取线性模型和非线性模型,同样在拟合过程中选取决定系数最高的模型作为最佳算法,并确定相应的经验系数。

1.2.1 经验算法

简单波段比值模型为:

$$\rho = 10^{(a_0 + a_1 \times r + a_2 \times r^2 + a_3 \times r^3)} + a_4 \quad (1)$$

式中: ρ 为海水表层叶绿素 a 浓度; $a_0 \sim a_4$ 为简单波段比值模型的经验系数; r 为 2 个波段遥感反射率比值的对数值。

最大波段比值模型为:

$$\rho = 10^{(a_5 + a_6 \times R + a_7 \times R^2 + a_8 \times R^3 + a_9 \times R^4)} \quad (2)$$

式中: $a_5 \sim a_9$ 为最大波段比值模型的经验系数; R 为 2 个波段遥感反射率最大比值的对数值。

1.2.2 荧光基线高度法

荧光基线高度的计算公式为:

$$\text{FLH} = L_F - \left[L_R + \frac{\lambda_R - \lambda_F}{\lambda_R - \lambda_L} (L_L - L_R) \right] \quad (3)$$

式中: λ_R 、 λ_F 和 λ_L 分别为荧光峰右侧基线波段、荧

光峰波段和荧光峰左侧基线波段; L_R 、 L_F 和 L_L 分别为上述波段的归一化离水辐亮度。

当叶绿素 a 浓度较低时,采用线性函数模拟荧光基线高度与叶绿素 a 浓度的关系,线性模型为:

$$FLH = a_{10} + a_{11}\rho \tag{4}$$

式中: a_{10} 和 a_{11} 为线性模型的经验系数。

随着叶绿素 a 浓度的逐渐增大,荧光基线高度的增加逐渐变缓,采用指数函数模拟荧光基线高度与叶绿素 a 浓度的关系,非线性模型为:

$$FLH = a_{12} + a_{13} \exp \left(\frac{\rho}{a_{14}} \right) \tag{5}$$

式中: $a_{12} \sim a_{14}$ 为非线性模型的经验系数。

本研究在数据处理过程中采用 MODIS 传感器的光谱响应函数;在经验算法中,采用 412 nm、443 nm、488 nm、531 nm 和 551 nm 波段;在荧光基线高度法中, λ_R 、 λ_F 和 λ_L 分别采用 667 nm、678 nm 和 748 nm 波段。

2 北海区海水表层叶绿素 a 浓度与遥感反射率的回归分析

本研究共获取用于海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演的样本数据 160 组,站位分布如图 1 所示。

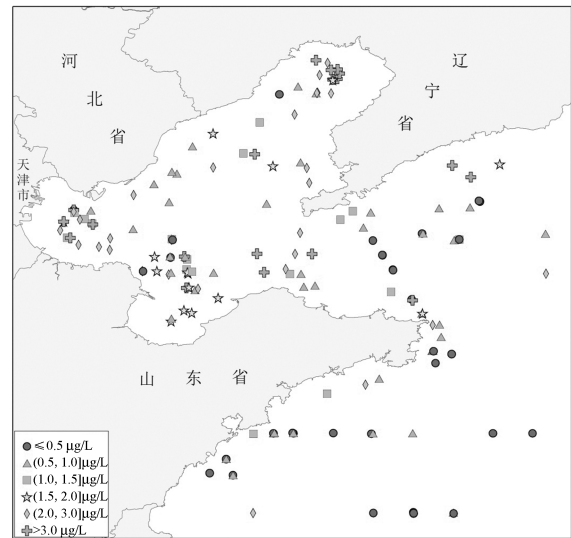


图 1 北海区海水表层叶绿素 a 浓度的空间分布

由图 1 可以看出,不同叶绿素 a 浓度区间在北海区的空间分布范围较广。

2.1 基于经验算法的回归分析

分别以北海区、渤海和北黄海为研究区域进行

回归分析(表 1)。

表 1 北海区、渤海和北黄海经验算法回归分析结果

研究区域	决定系数	决定系数	决定系数
	最高的模型	最高的波段/nm	
北海区	简单波段比值模型	531 和 551	0.142
渤海	简单波段比值模型	531 和 551	0.055
北黄海	简单波段比值模型	488 和 551	0.406

由表 1 可以看出,由于决定系数较低,很难用 1 个模型在 3 个研究区域内实现海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演,表明在整体上 3 个研究区域海水表层叶绿素 a 浓度与遥感反射率之间的相关关系不强。

根据图 1, (0.5, 1.0] $\mu\text{g/L}$ 的叶绿素 a 浓度区间在北海区大部分海域均有分布,但分布海域的海水表层光学特性却明显不同。由于海水表层光学特性不同的海域分布有相同的叶绿素 a 浓度区间,建立决定系数较高的北海区海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演模型应聚焦具有相同或相似海水表层光学特性的典型海域。

根据多年对海水表层光学特性的现场调查和经验判断,本研究将北海区划分辽东湾、渤海中部和河北省近岸、渤海湾、渤海湾与莱州湾之间、莱州湾、莱州湾北部、渤海海峡、北黄海大部分以及北黄海近岸 9 个典型海域,开展海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演,其中决定系数最高的模型均为简单波段比值模型(表 2)。

表 2 北海区典型海域经验算法回归分析结果

典型海域	决定系数	决定系数
	最高的波段/nm	
辽东湾	488 和 551	0.329
渤海中部和河北省近岸	531 和 551	0.348
渤海湾	412 和 551	0.844
渤海湾与莱州湾之间	531 和 551	0.503
莱州湾	443 和 551	0.853
莱州湾北部	443 和 551	0.736
渤海海峡	488 和 551	0.536
北黄海大部分	443、488 和 551	0.690
北黄海近岸	531 和 551	0.854

由表 2 可以看出,北海区典型海域海水表层叶绿素 a 浓度与遥感反射率之间的相关关系较强,相关关系较强的模型均为简单波段比值模型。

2.2 基于荧光基线高度法的回归分析

由于荧光基线高度法适用于二类或赤潮海水的水表层叶绿素 a 浓度的遥感监测,本研究根据 2015—2016 年北海区现场监测数据,选取二类海水面积覆盖较多的辽东湾、渤海湾和莱州湾作为研究区域(表 3)。

表 3 辽东湾、渤海湾和莱州湾
荧光基线高度法回归分析结果

研究区域	决定系数	决定系数	决定系数
	最高的模型	最高的波段/nm	
辽东湾	非线性模型	488 和 551	0.084
渤海湾	线性模型/非线性模型	412 和 551	0.071
莱州湾	线性模型/非线性模型	443 和 551	0.028

由表 3 可以看出,在 3 个研究区域内未发现海水表层叶绿素 a 浓度与荧光基线高度之间有明显的相关关系。

3 算法检验

以 2017 年北海区海水遥感现场监测数据为数据源,共获取样本数据 142 组。将样本数据按照北海区典型海域的划分进行区域属性赋值,得到可用于算法检验的样本数据 124 组(表 4)。

表 4 北海区典型海域可用于算法检验的样本数据

典型海域	最优模型	可用于算法检验的 样本数据/组
	决定系数	
辽东湾	0.329	10
渤海中部和河北省近岸	0.348	15
渤海湾	0.844	5
渤海湾与莱州湾之间	0.503	9
莱州湾	0.853	1
莱州湾北部	0.736	13
渤海海峡	0.536	20
北黄海大部分	0.690	36
北黄海近岸	0.854	15

根据《海洋监测技术规程》(HY/T 147—2013),在算法建立过程中,最优模型决定系数不应低于 0.800,可用于算法检验的样本数据不应低于 15 组。因此,本研究选取满足要求的北黄海近岸海域的样本数据。

根据回归分析结果,在参与回归分析的样本数据范围内,北黄海近岸海域海水表层叶绿素 a 浓度的最优反演模型为 531 nm 波段和 551 nm 波段遥感反射率比值的对数值的简单波段比值模型:

$$\rho = 10^{(-5.521+510.741r+9\ 967.462r^2+1\ 232\ 709.269r^3)} + 0.538$$

(6)

利用该模型计算得到 15 组样本数据的海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演值(表 5)。

表 5 北黄海近岸海域海水表层叶绿素 a 浓度的
实测值和遥感定量反演值 $\mu\text{g/L}$

站位	实测值	遥感定量反演值
H37PQX06	1.710	0.970
H37YQX30	0.838	0.538
H37YQ610	0.630	0.538
H37YQ529	0.642	0.591
H37YQ411	0.713	1.478
H37YQ528	0.439	0.876
H37YQ543	0.345	0.538
H37YQ527	0.462	0.547
H37YQ542	1.250	0.568
H37YQ606	0.266	0.538
H37JQ515	0.196	0.538
H37YQ530	0.791	2.201
H37YQ506	0.697	1.087
A4HZ073	0.877	0.552
A4HZ074	0.674	0.556

计算遥感定量反演值的相对误差的平均值:

$$\overline{\Delta\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\rho_{ri} - \rho_{mi}}{\rho_{mi}} \right|}{n}$$

(7)

式中: n 为检验站位总数; ρ_{ri} 和 ρ_{mi} 分别为第 i 个检验站位海水表层叶绿素 a 浓度的遥感定量反演值和实测值。

经计算,北黄海近岸海域海水表层叶绿素 a 浓

度的最优模型遥感定量反演值的相对误差的平均值 $\overline{\Delta\rho}=0.669\ \mu\text{g/L}$ 。

4 结语

本研究根据北海区历年海水遥感现场监测中对海水表层光学特性的直观理解划分 9 个典型海域,存在一定的随机性,回归分析结果不能完全代表北海区所有海域,今后可根据实际业务需要选取目标海域进行回归分析,以确定特定海域内海水表层叶绿素 a 浓度遥感定量反演的最优模型。此外,每个典型海域内参与计算的样本数据可能不足以完全代表该海域的海水表层光学特性,今后可在海水遥感现场监测中继续补充典型海域的样本数据,不断完善最优模型,以提高定量反演算法的准确性。

随着陆源污染综合治理和渤海专项整治的持续实施,在北海区海洋生态环境持续向好的递进效应影响下,已完成回归分析的 9 个典型海域的海洋水色环境可能发生变化,相同叶绿素 a 浓度海水表层的光学特性也会随之变化,因此须相应调整典型海域最优模型的经验系数和参与比值计算的卫星波段。

在距岸较近海域(如渤海湾和辽东湾)海水遥感现场监测过程中,由于水深较浅,船舶的扰动会带起大量泥沙,导致监测点海水水色突变,由此得到的现场监测数据在回归分析中会极大地降低模型的准确性。因此,在海水遥感现场监测过程中,应详细记录监测环境,对于监测环境异常的站位或海水表层光学监测点与叶绿素 a 浓度采样点水色环境不一致的站位,应从样本数据中剔除。

参考文献

[1] 陈晓玲,赵红梅,田礼乔.环境遥感模型与应用[M].武汉:武汉大学出版社,2008.
[2] 潘德炉,毛志华.海洋水色遥感机理及反演[M].北京:海洋出版社,2012.
[3] International Ocean Color Coordinating Group.IOCCG Report

3:remote sensing of ocean colour in coastal and other optically-complex waters[R/OL].(2015-02-24)[2018-09-29].http://www.ioccg.org/reports/reports3.pdf.
[4] International Ocean Color Coordinating Group.IOCCG Report 5:remote sensing of inherent optical properties:fundamental, tests of algorithms,and applications[R/OL].(2015-02-24)[2018-09-29].http://www.ioccg.org/reports/reports5.pdf.
[5] MOREL A, MARITORENA S.Bio-optical properties of oceanic waters:a reappraisal[J].Journal of Geophysical Research Oceans, 2002(106):7163-7180.
[6] 杨硕,王世新,周艺,等.基于光谱匹配的内陆水体反演算法[J].光谱学与光谱分析,2010,30(11):3056-3060.
[7] 韩秀珍,郑伟,刘翔.基于实测光谱的太湖水体表面离水反射率研究[J].国土资源遥感,2010(3):54-57.
[8] 张运,冯学智,马荣华.内陆水体叶绿素 a 遥感信息提取的研究现状与进展[J].生态经济,2009(5):139-143.
[9] 马荣华,戴锦芳.太湖水色遥感中叶绿素和悬浮物的高光谱分析[A].2005 遥感科技论坛暨中国遥感应用协会 2005 年年会论文集[C].北京:中国宇航出版社,2009.
[10] 周冠华,柳钦火,马荣华,等.基于半分析模型的波段最优化组合反演浑浊太湖水体叶绿素 a[J].湖泊科学,2008,20(2):153-159.
[11] 黄海清,何贤强,王迪峰,等.神经网络法反演海水叶绿素浓度的分析[J].地球信息科学,2004,6(2):31-36.
[12] 杨斌,田力,徐雯佳,等.河北海域叶绿素浓度遥感反演业务化算法[J].海洋预报,2017,34(2):60-66.
[13] 丛丕福,曲丽梅,王臣立,等.基于 MODIS 模拟的辽东湾叶绿素 a 的遥感反演模型[J].生态环境学报,2009,18(6):2057-2060.
[14] 陈晓玲,李毓湘,李志林.香港海域叶绿素 a 浓度的时空分布规律[J].地理学报,2002,57(4):422-428.
[15] 王林,杨建洪,赵冬至.大连湾及邻近海域水体叶绿素浓度荧光遥感算法研究[J].应用海洋学学报,2014,33(1):111-117.
[16] 向先全,路文海,许艳,等.基于空间自相关分析方法的渤海湾赤潮遥感叶绿素浓度研究[J].海洋通报,2015,34(3):344-352.
[17] 毛志华,朱乾坤,龚芳.卫星遥感北太平洋渔场叶绿素 a 浓度[J].水产学报,2005,29(2):270-274.
[18] 金思韵,潘建明,韩正兵.南极夏季普里兹湾叶绿素 a 的时空变化研究[J].极地研究,2012,24(4):361-370.