

文章编号: 1000-0615(2005)02-0270-05

·研究简报·

卫星遥感北太平洋渔场叶绿素 a 浓度

毛志华, 朱乾坤, 龚 芳

(国家海洋局第二海洋研究所国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

关键词: 叶绿素 a 浓度; 卫星遥感; 反演模式; 北太平洋渔场

中图分类号: S931.4

文献标识码: A

Satellite remote sensing of chlorophyll a concentration in the north Pacific Fishery

MAO Zhi-hua, ZHU Qian-kun, GONG Fang

(Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of
Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Chlorophyll a concentration (*Chla.*) is a key to understand global biogeochemical cycles and to estimate ocean primary production which is the index of the fish food. The ocean regions with high *Chla.* provide the food condition of the convergence of the fish to become the candidate of the fishery centers. *Chla.* mainly decides the ocean optical properties in Case 1 waters and the satellite can measure the ocean radiances which are in a good relationship with *Chla.*. It has been proved that the ocean color satellites can really measure the *Chla.* of the ocean on the global scale. The *Chla.* distribution images are produced from satellite data and the accuracy of *Chla.* depends on inversion algorithms. The algorithms based on blue-green bands ratio are suitable to be used as operational algorithms to retrieve *Chla.* from the normalized water-leaving radiances for Case 1 waters. Two inversion models of *Chla.* are established on thousands of global *in situ* measurement data. The average relative errors of the *Chla.* retrievals of the two models are 36.4% and 38.5% respectively. Many factors can affect the accuracy of *Chla.* retrievals, including the conditions of atmosphere, ocean and instruments. Since the blue-green ratio algorithms are the localized algorithms which are based on a large amount of *in situ* measurements, a lot of measurements should be taken in the north Pacific Fishery regions to improve the accuracy of the algorithms. The algorithms are seriously affected by the *in situ* data, both the ocean optical parameters and the *Chla.* should be carefully measured with some nice instruments. A *Chla.* distribution map was generated from a month of Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor (SeaWiFS) data by the fusion techniques. The average of satellite-measured *Chla.* is $0.192 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in the whole north Pacific Fishery which is higher than ship-measured value with the average of $0.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The difference is mainly caused by the different regions for the satellite measures of the *Chla.* in the coast areas around the Japanese islands with high *Chla.* more than $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The averages of *Chla.* in the middle part fishery are close between the satellite retrievals and the *in situ* measurements with $0.171 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively and the values are also similar in the east part fishery with $0.132 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $0.12 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ respectively. The ocean color satellite can really measure the *Chla.* in the north Pacific Fishery with high accuracy. The map of *Chla.* derived from SeaWiFS data shows the distribution of *Chla.* in the whole north Pacific Fishery which is very useful to analyze the distribution of fishery centers. The map also shows the distributions of the ocean fronts and eddies, which are also beneficial in locating the fishery centers. The relationship between the *Chla.* map and the fishery centers should be carefully studied. The results show that the satellite-measured *Chla.* will become an important tool in the ocean fishery.

Key words: chlorophyll a concentration; satellite remote sensing; inversion model; the north Pacific Fishery

海洋叶绿素 a (*Chla.*) 含量是了解世界海洋中地球生物化学循环的基础和估算海洋生产力的基本指标, 是判

收稿日期: 2003-10-15

资助项目: 国家 863 计划 (818-11-02、2002AA639220 和 2001AA630701); 国家自然科学基金 (40006011); 国家重点基础研究发展规划 (G1999043701)

作者简介: 毛志华 (1966-), 男, 浙江宁波人, 博士, 研究员, 主要从事海洋遥感研究。Tel: 0571-8076924-2345; E-mail: maozh@hzcnc.com

断水域的肥瘠程度和评价水域渔业潜在生产力的基本依据。富集浮游植物的海域是海洋食植物的大密度存在和水产资源丰富存在的基础,许多鱼类如金枪鱼等中上层鱼群集在锋面两侧或涡旋,这些特征与营养盐供给或混合层深度变化相关。北太平洋渔场已成为我国远洋渔业的重要组成部分¹,卫星遥感技术可以实现大面积同步的观测和一年四季连续的观测,是测定北太平洋渔场海洋叶绿素 a 的最有效方法。

1 材料和方法

1.1 数据来源

卫星资料采用美国海洋水色卫星的宽视场海洋水色扫描仪(SeaWiFS)资料,全球海上测量资料利用国际海洋水色协调工作组(IOCCG)在世界大洋范围测量的 1175 个站点光谱数据和对应的叶绿素 a 浓度,南海测量数据由国家海洋技术中心在南海测量的 48 个站点光谱数据和叶绿素 a 浓度,北太平洋实测叶绿素 a 浓度是由中国水产科学研究院东海水产研究所在 2001 年调查得到。

1.2 叶绿素 a 浓度反演模型研制

海面的离水光谱辐射率是海洋水色卫星从水体获取的唯一有效信号,是水体光谱吸收和后向散射的函数,受 Roman 散射、叶绿素 a 荧光、可溶性有机物荧光等非弹性过程影响²¹。浮游植物色素通过对吸收光谱的影响改变绝大部分海洋水色,在蓝光波段的强吸收和黄绿波段的弱吸收引起大洋一类水体的颜色从寡营养水域的深蓝色向富营养水域的暗绿色变化。叶绿素 a 是浮游植物的主色素,其浓度分布直接影响海洋光学特性,因此,可以通过海洋光学参数的测量来估算海面叶绿素 a 浓度,建立遥感浮游植物色素的反演算法。北太平洋渔区属于大洋一类水体,一类水体叶绿素 a 的反演算法主要有 3 种:蓝绿比值法、荧光法和 IOP 法。目前,蓝绿算法已作为业务化产品制作算法,而荧光算法和 IOP 模型仍作为产品开发的研究算法³。

大洋水体的反射光谱分为受弹性散射效应显著影响的蓝光波段和受非弹性过程影响的红光波段,叶绿素 a 对蓝色波段有吸收效应,当浓度增加时,蓝光波段的反射率下降;叶绿素 a 在绿波段又有散射效应,在 550 nm 附近出现波峰,这一波峰随着叶绿素 a 浓度的增加而升高;介于 490~550 nm 之间的 510 nm 处光谱值对叶绿素 a 并不敏感,相当于纹链点。以上光谱特征是采用蓝绿算法反演海洋叶绿素 a 浓度的基础。采用比值法的另一个重要因素是光谱辐射绝对值的因子变化和不确定性,对于相同叶绿素 a 浓度,这些量的变化可达到 2 倍以上,而光谱比值实际上不受影响。另外,比值法可明显减少海洋反射二向性影响。比较有名的蓝绿算法有 SeaWiFS 模型、OCTS 模型、Calcofi 模型和 Morel 模型等。其基本关系式为:

$$Chl a. = A \cdot \left[\frac{L_{wn}(\lambda_1)}{L_{wn}(\lambda_2)} \right]^B \quad (1)$$

利用我国南海光谱测量和全球光谱数据集对上述关系式的波段组合与叶绿素 a 浓度的关系进行了研究,对各种波段组合的离水辐射率比值与叶绿素 a 浓度相关性进行统计,结果表明 $L_{wn}443/L_{wn}555$ 和 $L_{wn}490/L_{wn}555$ 这 2 种波段组合具有最大的相关系数,结果见图 1。

图 1-a, b 的数据分布非常类似,离水辐射率的蓝绿比值与叶绿素 a 浓度存在良好的负相关,相关系数都达到 -0.99。图 1 显示 48 个南海测量站点的数据集在很小的范围,单纯依靠南海测量数据很难建立合适的叶绿素 a 反演算法。利用世界大洋实测数据建立的 2 种模式分别为:

$$M1 \text{ 模式: } Chl = 1.3905 \cdot \left[\frac{L_{wn}(443)}{L_{wn}(555)} \right]^{-1.0211} \quad (2)$$

$$M2 \text{ 模式: } Chl = 2.2096 \cdot \left[\frac{L_{wn}(490)}{L_{wn}(555)} \right]^{-2.2103} \quad (3)$$

2 结果

2.1 叶绿素 a 浓度反演精度分析

利用 M1 模式对实测光谱进行叶绿素 a 浓度反演并

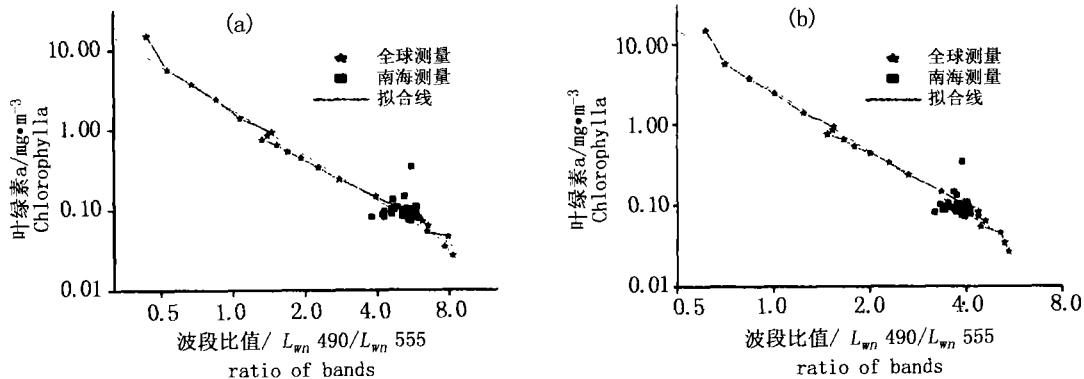


图 1 离水辐射率比值与叶绿素 a 浓度关系图
Fig. 1 The ratio of water leaving radiance vs chlorophyll a concentration
(a) $L_{wn}443/L_{wn}555$; (b) $L_{wn}490/L_{wn}555$

与实测叶绿素 a 浓度值比较,结果见图 2。图 2 是实测叶绿素 a 浓度与反演值在 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下的二维分布图,大部分数据点集中在对角线附近,但存在相当数量的离散数据点,说明从实测光谱数据反演叶绿素 a 的值与实测值存在一定误差。

反演叶绿素 a 浓度与实测叶绿素 a 浓度的相对误差分布见图 3 所示,大部分数据点的相对误差在 35% 以内,但存在一定数量超过 100% 误差的测量点,最大误差为 371.3%,平均误差为 36.4%。尽管叶绿素 a 浓度与离水辐射率存在一定相关性,但其他因素干扰着这二者的关系,在某些条件下,干扰因素超过叶绿素 a 浓度对离水辐射率的影响,使叶绿素 a 浓度反演误差超过 100%。对 M2 提取叶绿素 a 浓度误差统计结果显示最大误差为 308.8%、平均值为 38.5%。从平均相对误差结果看,M1 模式具有更高的精度。当叶绿素 a 浓度从 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 变化到 $15 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, L_{443}/L_{555} 从 10 降至 0.45, L_{490}/L_{555} 从 5 降至 0.6, M1 的比值变化快于 M2,说明 M1 模式比 M2 具有更高的灵敏度,特别在开阔海域的叶绿素 a 浓度范围 ($< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$), M1 模式更具有优点。因此, M1 模式适合用于北太平洋渔区的叶绿素 a 浓度反演。

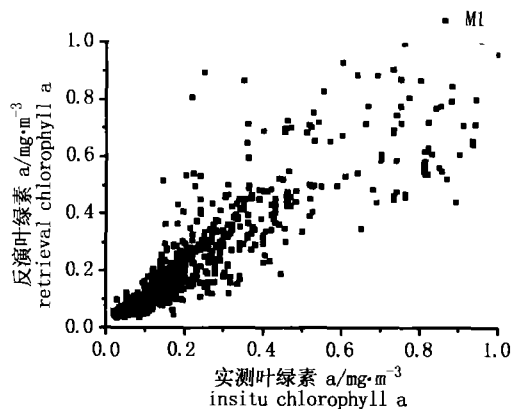


图 2 M1 模型反演叶绿素 a 浓度与实测值比较
Fig.2 Comparison of the retrieval chlorophyll a by M1 model and the *in situ* values

2.2 叶绿素 a 浓度反演误差源分析

因海洋复杂性,卫星测量的各波段辐射率受许多变量影响,叶绿素 a 以外许多因素会改变蓝绿比值。水体本身不同的生物、化学、物理因素等都会影响叶绿素 a 浓度反演精度,复杂的气象条件和海面条件会严重影响卫星资料处理精度,水柱的垂直结构对蓝绿算法产生很大影响。

可溶性有机物或黄色物质对蓝绿比值产生很强的影响,黄色物质在蓝波段具有强吸收,在极端情况下,会掩盖藻类色素吸收特征,严重影响蓝绿算法反演精度。与浮游植物共生有浮游动物、异养细菌和病毒等其他微生物,

利用 M1 模式对北太平洋渔区的 SeaWiFS 遥感资料进行叶绿素 a 浓度反演,与实测数据比较,结果表明大部分数据点的相对误差在 35% 以内,但存在一些数据点的相对误差超过 100%。产生较大误差的因素很多,实测叶绿素 a 浓度本身的精度是一个重要方面,从实测值分布来看,有不少的测量点实测叶绿素 a 浓度小于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最小值为 $0.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,实测叶绿素 a 浓度的小值很容易导致相对误差的大值。另一方面,由于没有实测与卫星过境时间小于 1 h 的同步匹配点,采用 1 周内同步的方法来搜索匹配点,1 周内在相同位置叶绿素 a 浓度变化可能很大,特别是叶绿素 a 浓度在锋区随时间和空间变化很大,这些都是导致叶绿素 a 浓度反演误差较大的重要原因。

对 SeaWiFS 资料大气校正结果检查,发现超过 100% 误差的数据点在 670 nm 波段的离水辐射率都大于 $0.6 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$,高于常规值 20 倍以上,其他波段辐射率也存在异常。遥感器产生的错误数据、未检测的薄云和海雾等大气参数、海面镜面反射和白帽反射等情况都会引起卫星遥感资料大气校正产生较大误差,而大气校正误差会传播到叶绿素 a 浓度反演误差。

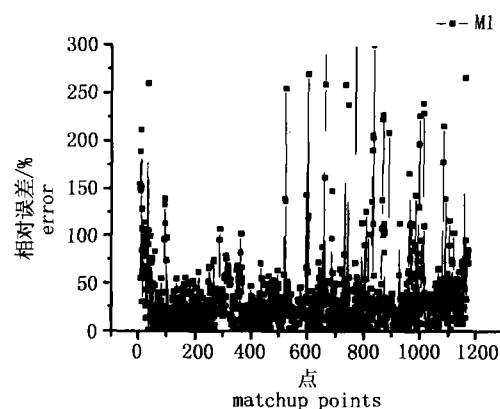


图 3 M1 模型叶绿素 a 浓度反演误差分布图
Fig.3 The error distribution of retrieval chlorophyll a by M1 model

这些生物的降解物以碎屑形式存在,这些颗粒物达到一定浓度时就影响叶绿素 a 浓度反演精度。叶绿素 a 与各种附加色素的不同变化率,细胞大小与形状,细胞内吸收色素的组织及色素的充填效应等因素都能改变蓝绿比值,如岩藻黄素相对于叶绿素 a 比例的变化可改变浮游植物蓝绿吸收率比值达 6 倍^[1]。

叶绿素 a 浓度垂直分布对蓝绿算法影响很大,蓝绿算法实际上反映了真光层深度叶绿素 a 浓度的积分效应,与不同深度实测叶绿素 a 采样存在很大差异,不同海区的叶绿素 a 垂直分布差异很大。叶绿素 a 浓度垂直分布是非

均匀性的,由于多水团的相互作用和锋面的存在,常常在不同深度形成极大值。如在黄海一个测站,表层浓度为 $0.48 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 20 m 层浓度为 $11.07 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 两者相差达到 22 倍。因此,蓝绿算法在某种程度上是一种局地算法。

在算法方面,业务运行的大气校正算法都是基于近红外波段的外推算法,这种外推算法的误差在蓝光波段比绿光波段大,大气校正精度依赖于大气条件包括大气分子、气溶胶、水气和云层等影响,其误差很容易传播到蓝绿算法,在一定程度上影响蓝绿算法的适用范围。水体和浮游植物都对光谱吸收过程起着关键作用,浮游植物吸收是以非线性方式影响离水辐射率,藻类过量繁殖的水域的蓝绿比值不同于常规浮游植物群落而导致过高估算叶绿素 a 浓度^[5]。

2.3 遥感叶绿素 a 浓度分布图

利用 SeaWiFS 资料反演北太平洋渔场的叶绿素 a 浓度,由于该区域存在大量云覆盖,使卫星无法一次性全面测量海面光谱辐射,需要将多天的遥感资料进行融合处理产生一幅比较完整的叶绿素 a 浓度分布图。利用 1 个月的 SeaWiFS 资料生成的叶绿素 a 浓度见图 4 所示。

从叶绿素 a 平面分布趋势来看,明显存在区域分布特征。总体上,北部区域明显高于南部,西部区域高于东部,特别在日本岛附近海域存在大量高值区。该图是 2001 年 9 月的叶绿素 a 分布,在秋季,随着西北季风的逐渐增强,亲潮水的影响势力范围扩大,使相应海域的营养盐得到补

充,为浮游植物的生长繁殖提供了基础,促成叶绿素 a 浓度分布形成高值区。因此,亲潮区域叶绿素 a 的浓度较高,而黑潮续流区域很低。

在亲潮和黑潮间的辐合带存在明显的叶绿素 a 浓度锋面,而且叶绿素 a 浓度的梯度分布反映出该海域的锋面和涡流分布特征,这些特征与中心渔场分布存在相关性。因此,卫星遥感叶绿素 a 浓度分布在生物学和物理海洋学二方面都与中心渔场存在密切相关,有必要系统开展二者相关性研究,使叶绿素 a 浓度与卫星遥感海表温度结合起来,更好地为大洋渔业服务,成为大洋渔业海洋环境速报产品的重要因子。

对北太平洋渔场 2001 年 9 月的叶绿素 a 浓度进行统计,分 6 个区域统计范围、平均值、方差(表 1)。

从表 1 中可以看出,遥感叶绿素 a 浓度表层分布统计与实测值存在较大差异,主要因两者的测量时间、区域、方法都不同,特别卫星遥感测得在日本岛附近海域存在大面积大于 $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的叶绿素 a 分布高值区,最大值达到 $11.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而实测区域远离日本岛,最大值只有 $0.32 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,使遥感统计值明显高于实测值。在中部和东部渔场,叶绿素 a 浓度平均值非常接近,二者相差 15% 以内。从统计结果来看,北部区域的叶绿素 a 浓度平均值是南部的 3 倍多,西部区域高于东部 1 倍。粗略估算亲潮区的叶绿素 a 浓度高于 $0.25 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,而黑潮区只有 $0.05 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,不到前者的 1/5。

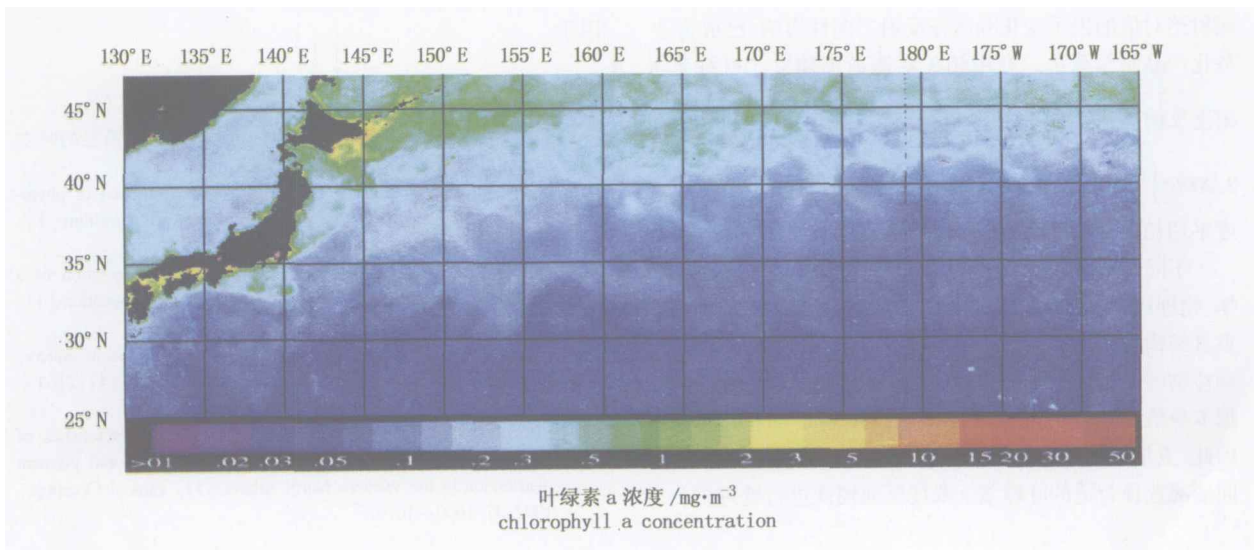


图 4 2001 年 9 月 1 日 - 9 月 30 日北太平洋渔场叶绿素 a 浓度分布图

Fig. 4 A map of satellite-measured chlorophyll a in the north Pacific fishery(September 1-30,2001)

由于每天可以廉价地得到卫星遥感叶绿素 a 浓度分布图,在时间域和空间域二方面比船测调查都存在明显优势,已成为研究全球碳循环的主要资料来源。鉴于遥感叶绿素 a 浓度分布在生物学和物理海洋学两方面都与中心渔

场存在密切相关性,具有良好的实时性和同步性,可大范围显示出渔场的海面叶绿素 a 浓度分布实况,进行高频率长序列统计分析。因此,卫星遥感叶绿素 a 浓度在大洋渔业方面具有良好的应用潜力。

表 1 北太平洋鱿鱼渔场表层叶绿素 a 含量分布
Tab.1 The distribution of chlorophyll a in the north Pacific fishery $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$

区域 region	全调查区 whole area		西部渔场 west part		中部渔场 middle part		东部渔场 east part	
	130°E ~ 165°W		130°E ~ 150°E		150°E ~ 175°E		175°E ~ 165°W	
	25 ~ 47°N	北部 north 35 ~ 47°N	南部 south 25 ~ 35°N	北部 north 35 ~ 47°N	南部 south 25 ~ 47°N	北部 north 35 ~ 47°N	南部 south 25 ~ 35°N	
卫星遥感叶绿素 a 浓度 satellite-measured <i>chl</i> a.	0.01 ~ 11.5	0.01 ~ 10.0	0.01 ~ 11.5	0.015 ~ 1.26	0.02 ~ 0.24	0.02 ~ 0.72	0.03 ~ 0.11	
平均值 average	0.192	0.406	0.139	0.276	0.066	0.208	0.056	
均方差 variance	0.089	0.229	0.154	0.024	0.001	0.0168	0.001	
平均值 average	0.192	0.273	0.171	0.132				
区域 region	全调查区 whole area		西部渔场 west part		中部渔场 middle part		东部渔场 east part	
	152° ~ 171°W		152° ~ 157°E		168° ~ 180°E		179° ~ 171°W	
	39° ~ 43°N	41° ~ 43°N	41° ~ 43°N	39° ~ 42°N	40° ~ 41°N			
实测叶绿素 a 浓度 <i>in situ chl</i> a.	0.03 ~ 0.32		0.04 ~ 0.18		0.03 ~ 0.32		0.06 ~ 0.18	
平均值 average	0.13		0.09		0.15		0.12	

3 结论

一类水体在蓝光波段由藻类色素的强吸收引起辐射率变小,绿光波段的辐射率随叶绿素 a 浓度增加,两者比值组合用于建立反演模式。比值法可明显减少海洋光谱辐射绝对值的因子变化和海洋反射二向性影响,已成为业务化产品制作算法。利用相关实测数据建立了叶绿素 a 浓度反演模式: $Chl = 1.3905 \cdot \left[\frac{L_{443}}{L_{555}} \right]^{-1.6244}$ 和 $Chl = 2.2096 \cdot \left[\frac{L_{490}}{L_{555}} \right]^{-2.2103}$, 这二种模式反演的叶绿素 a 浓度平均相对误差分别为 36.4% 和 38.5%。

不同气候和海面条件以及水体本身不同的生物、化学、物理因素等都会影响叶绿素 a 浓度反演精度,水柱的垂直结构对蓝绿比值算法产生很大影响,黄色物质和悬浮颗粒物等会影响蓝绿算法的精度,大气校正算法和实测数据本身精度是影响叶绿素 a 浓度反演精度的重要因素。因此,卫星遥感海面叶绿素 a 浓度是非常复杂,需根据不同情况选择合适的叶绿素 a 浓度反演模式进行处理。

对北太平洋渔场 SeaWiFS 遥感资料进行了叶绿素 a 浓度反演,通过资料融合方法生成叶绿素 a 浓度分布图,利用该图像,可以从生物学和物理海洋学两方面分析中心渔场,表明卫星遥感叶绿素 a 浓度产品在大洋渔业方面具有良好的应用潜力,将成为大洋渔业海况速报产品的重要因子。

参考文献:

- [1] 陈新军,许柳雄,田思泉. 北太平洋柔鱼资源与渔场的时空分析[J]. 水产学报,2003,27(4):334-342.
- [2] Sathyendranath S, Hoge F E, Platt T, et al. Detection of phytoplankton pigments from ocean color: improved algorithm[J]. Appl Optics, 1994,33:1081-1089.
- [3] Maritorena S, Siegel D A, Peterson A R. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications[J]. Appl Optics, 2002, 41(15):2705-2714.
- [4] Morel A, Maritorena S. Bio-optical properties of oceanic waters: a reappraisal[J]. J Geophysical Research, 2001,106(4):7163-7180.
- [5] Hoeffner N, Sathyendranath S. Bio-optical characteristics of coastal waters: absorption spectra of phytoplankton and pigment distribution in the Western North Atlantic[J]. Limnol Oceanogr, 1992,37:1660-1679.