

文章编号：1007-4619(2006)06-0949-06

黄色物质光学特性及遥感研究进展

沈 红<sup>1,2</sup>, 赵冬至<sup>1</sup>, 付云娜<sup>1</sup>, 杨建洪<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 大连海事大学 环境工程学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要：**黄色物质是海洋水色三组分之一。本文回顾了黄色物质定义的演变历史及其来源研究,描述了表征黄色物质光学特性的两个参数(吸收系数和比例系数 S),概括了吸收系数研究的两种数学模型,即 190—250nm 区间的高斯模型和 250—650nm 区间的指数模型。高斯模型为化学方法研究黄色物质的分子结构提供了有力帮助,指数模型为光学特性和遥感应用提供了便利条件。本文提供了 S 值的三种数学模拟方法,结果表明带有背景参数的非线性回归方法确定 S 值可使平均值增加 13%,相应的标准偏差降低 72%。而且黄色物质的吸收系数同荧光线性关系很强。吸收系数不仅是黄色物质光学特性的表征,而且还是黄色物质遥感的基础。根据遥感器的不同特点总结了 CZCS、SeaWiFS、MERIS、MODIS、GLI 等遥感器的黄色物质反演模型,展望了黄色物质遥感的未来。

**关键词：**黄色物质; 吸收系数; S; 遥感模型  
**中图分类号：** TP79/P71      **文献标识码：** A

An Overview of Optics Characteristic and Remote Sensing of CDOM

SHEN Hong<sup>1,2</sup>, ZHAO Dong-zhi<sup>1</sup>, FU Yun-na<sup>1</sup>, YANG Jian-hong<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Monitoring Center, Liaoning Dalian 116023, China;  
2. College of Environment Engineering Dalian Maritime University, Liaoning Dalian 116026, China)

**Abstract** CDOM is one of the three-components of ocean color. The research of CDOM has been made for several decades. This article reviews the development history of CDOM's definition and the investigation of sources. Absorption coefficient and S are two important parameters. Two models for absorption by CDOM are the Exponential model (250—650nm) and Gaussian model (190—250nm). Gaussian model offers a deeper understanding of chemical interaction affecting CDOM molecular structure while Exponential model is acceptable for optical modeling and remote sensing applications. There are three methods to calculate S parameter and non-linear regression with background parameter is the one that provides the best fit and makes the average of S with 13% improvement and the standard deviation with 72% reduction. Furthermore there is a strong linear relation between the absorption coefficient and the fluorescence. Absorption coefficient is not only the optical properties of CDOM but the base of remote sensing. This article summarizes several kinds of retrieval equations such as those for SeaWiFS, MERIS, MODIS and GLI color sensors. The retrievals of color sensors have different characteristics and difficulties, so the remote sensing of CDOM is expected to be more exact in the future.

**Key words** CDOM; absorption coefficient; S; remote sensing model

1 引 言

黄色物质、悬浮物和浮游植物是海洋水色遥感

的三个重要组分。黄色物质的研究开始于 20 世纪 30 年代,最初英文表示为 Gelbstoff 原指海水中的胶质胶性溶解物。Kalle<sup>[1]</sup>于 1966 年指出黄色物质由碳水化合物经麦拉德反应形成,即含有碱和氨基酸

收稿日期: 2005-07-05; 修订日期: 2005-10-21  
基金项目: 国家 863 计划项目 (编号: 2001AA636020, 2004AA604150) 及 908 专项 908-02-03-01 资助。  
作者简介: 沈 红 (1979—), 女, 2001 年毕业于大连理工大学, 获学士学位。现为大连海事大学硕士研究生, 目前在国家海洋环境监测中心进行论文研究工作, 主要从事海洋水色及海洋生态环境遥感研究。E-mail: shenhong1117@126.com。

的溶液经化学反应受热形成黄色或棕色的类黑精终产物。随着研究的深入,1977年 Gagosian<sup>[2]</sup>指出黄色物质可能由下列成分组成:氨基酸、糖、氨基糖和脂肪酸类,另外也可能含有类胡萝卜素、氯纶色素、碳水化合物和酚等。随着全球碳循环研究的进展,发现海水中碳的存在形式主要有颗粒有机碳(POC)和溶解有机碳(DOC)两种。在溶解有机碳中,在黄光波段吸收较小且呈黄色的那部分物质被称为黄色物质,此时将黄色物质的英文表示改为 Yellow Substance。随着研究的深入,人们还发现自然水体中的黄色物质由可溶性有机物碎片组成,为了更准确地表达黄色物质的理化属性,目前国际上称其为“有色可溶性有机物质”(coloured dissolved organic matter 英文缩写‘CDOM’)。国内黄色物质研究工作起步比较晚,没有将各种表示加以区分,仍统称为“黄色物质”。在研究它的组成同时,大部分学者认为黄色物质有两种来源。一种来源于陆地,主要是江河径流携带;另一种由海洋浮游植物有机体化学降解而形成。在近海,江河径流携带入海为主要来源,而在大洋则主要是由海洋有机物自身降解所产生的。因此海水中的黄色物质分为“海洋”和“陆地”两种起源。黄色物质在生物过程和光化学过程中起着重要作用。由于它能有效地吸收有害的紫外辐射,所以在水生生态系统中起着保护生物的作用。黄色物质具有独特的光学特性,在赤潮监测与研究 and 海洋生态方面有广阔的应用前景。

2 黄色物质光学特性

黄色物质的光学特性以其吸收系数表示,光学上的定义是指在某一波长处光束的衰减量,单位为  $m^{-1}$ 。其测量有两种方法:一种是 AC-9 现场测量,另一种是紫外-可见光(190—800nm)分光光度计室内测量。AC-9 测量主要是通过测量颗粒物和黄色物质的吸收及散射,进而消除黄色物质吸收影响,获取颗粒物的吸收和散射。分光光度计是常用的测量方法,使用 10cm 长的样品池,以 Milli-Q 水做参比。在测量大洋一类水体时也有使用 1m 或 2m 长的样品池,以增加测量精度。黄色物质吸收系数的计算采用公式(1):

$$a(\lambda) = (2.303) [(OD_s(\lambda) - OD_b(\lambda)) / L]$$

(1)

式中,  $OD_s(\lambda)$  为样品的吸收值,  $OD_b(\lambda)$  为空白样的吸收值, L 为样品池的长度。对于分光光度计来

说,可以简化为公式(2):

$$a(\lambda) = (2.303) A_{\lambda} / L$$

(2)

淡水中黄色物质的吸收在 355nm 处,是  $2.2-4.1m^{-1}$ ,近岸二类水体相对较低<sup>[3]</sup>,为  $0.4-1.1m^{-1}$ ,大洋一类水体在 440nm 处吸收更低,在  $0.005-0.03m^{-1}$  之间<sup>[4]</sup>。

黄色物质的光学特性研究开始于 1978 年,Unoki<sup>[5]</sup>, Bukat<sup>[6]</sup>, Roesler<sup>[7]</sup> 和 Bricaud<sup>[8]</sup> 等人研究发现黄色物质的吸收光谱曲线具有良好的一致性(图 1)。对于黄色物质 190—250nm 间的吸收峰, Schwarz 和 Kowalczyk<sup>[9]</sup> 认为可以用高斯曲线模拟。由于 250—650nm 的吸收随着波长的增加而降低, Bricaud<sup>[8]</sup> 认为这部分吸收可以使用指数模型模拟(图 2)。

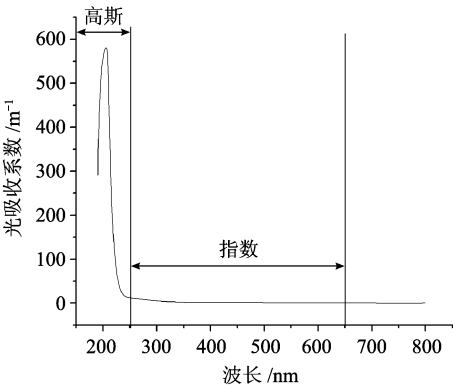


图 1 黄色物质吸收曲线

Fig 1 Absorption curve of CDOM

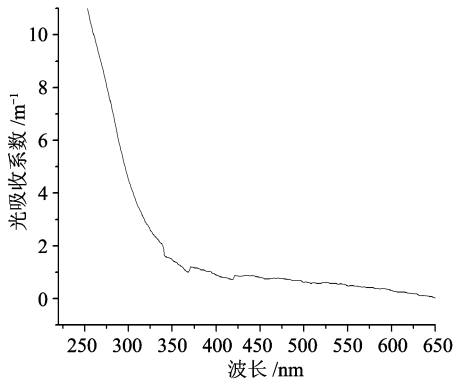


图 2 250—650nm 黄色物质吸收曲线

Fig 2 Absorption curve of CDOM (250—650nm)

2.1 黄色物质的指数吸收模型

黄色物质随波长增长呈指数衰减的指数模型表达为式(3)<sup>[8]</sup>。

$$\alpha_y(\lambda) = \alpha_y(\lambda_0) \exp \{ -S(\lambda - \lambda_0) \}$$

(3)

式中,  $\alpha_y(\lambda_0)$  为选定波长  $\lambda_0$  处的吸收系数; S 为吸

收衰减系数对波长的比例系数,单位为  $\text{nm}^{-1}$ 。

$\lambda_0$  的选择视研究领域而定,在紫外和可见光范围内选择。对于黄色物质和浮游植物色素吸收的遥感研究而言,通常使用  $440\text{nm}$ ,这是由于黄色物质和浮游植物色素在蓝光处吸收重叠的原因。开阔大洋水域考虑到信噪比和自然水体中黄色物质对紫外光的衰减,可以考虑用  $350\text{nm}$  或更短的波长<sup>[10]</sup>。Roderick<sup>[11]</sup>使用  $380\text{nm}$ , Ferrari 和 Tassan<sup>[11]</sup>使用  $375\text{nm}$ , Rochelle<sup>[3]</sup>研究淡水中黄色物质采用  $280\text{nm}$ 。

黄色物质的指数回归主要采用三个波段范围<sup>[8]</sup>:  $250\text{--}650\text{nm}$ ,  $360\text{--}440\text{nm}$ ,  $440\text{--}540\text{nm}$ ; 其次还可使用 5 个窄波段范围:  $250\text{--}280\text{nm}$ ,  $280\text{--}320\text{nm}$ ,  $320\text{--}360\text{nm}$ ,  $360\text{--}400\text{nm}$ ,  $400\text{--}440\text{nm}$ 。  $300\text{--}650\text{nm}$  之间 S 的拟合分析方法有三种,计算公式见表 1。

表 1 S 值估算方法

Table 1 Calculation methods of S

| 方 程                                                                     | 拟合方法 | 方法描述   |
|-------------------------------------------------------------------------|------|--------|
| $\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \exp(-S(\lambda - \lambda_0))$     | 线性法  | 自然对数拟合 |
| $\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \exp(-S(\lambda - \lambda_0))$     | 非线性一 | 非线性拟合  |
| $\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_0) \exp(-S(\lambda - \lambda_0)) + k$ | 非线性二 | 非线性拟合  |

三种估算方法的拟合值与实测值的相关性都很强,  $R^2$  均值也很接近,不同的是标准偏差。其中非线性思想更适用,因为黄色物质在短波的吸收很强,而这种方法主要是针对短波设计的。回归方法中背景参数 K 是很重要的,由于散射或折射指数的不同,会出现基线的抵消。测量数据分析用非线性回归方法代替线性回归方法时残差降至  $82\%$ ,线性数据将扩大低值的相对比重。丹麦海域的研究结果表明<sup>[12]</sup>,对长波研究线性法不适用,因为气泡和小颗粒的散射对长波区产生很大影响,对 S 值的确定产生重大误差。当使用第三种方法确定 S 值时,平均值增加  $13\%$ ,相应的标准偏差降低  $72\%$ 。

Roesler<sup>[7]</sup>1989 年公布的黄色物质 S 的平均值为  $0.016\text{nm}^{-1}$ ,标准偏差为  $0.002\text{nm}^{-1}$ ; 在  $280\text{--}490\text{nm}$  间 S 为  $0.017\text{nm}^{-1}$ ,标准偏差为  $0.001\text{nm}^{-1}$ 。1993 年 Roderick<sup>[10]</sup>测量了荷兰北海的黄色物质在  $250\text{--}800\text{nm}$  吸收系数,当回归的波段范围在  $250\text{--}650\text{nm}$  时, S 的变化范围为  $0.016\text{--}0.023\text{nm}^{-1}$ ,当回归的范围在  $360\text{--}540\text{nm}$  时, S 值降低了  $25\%$ ,在  $260\text{--}275\text{nm}$  时 S 值达到了最低。 Rochelle<sup>[3]</sup>在讨论

黄色物质吸收和荧光的关系时,采用的波长范围是  $280\text{--}650\text{nm}$ 。 Niklas Strombeck<sup>[13]</sup>使用  $400\text{--}750\text{nm}$  波段,  $S=0.0151\text{nm}^{-1}$ 。 Bricaud 由在混浊海水中测得的非叶绿素组分反射光谱反演的 S 值为  $0.010\text{--}0.020\text{nm}^{-1}$ ,平均值为  $0.014\text{nm}^{-1}$ 。 Hojerslev<sup>[14]</sup>在 1998 年报告称 S 范围是  $0.008\text{--}0.042\text{nm}^{-1}$ 。 Kopelevich<sup>[15]</sup>在 1989 年报告中称  $500\text{--}600\text{nm}$  间的平均比例系数降至  $0.011\text{nm}^{-1}$ 。根据 Carder<sup>[16]</sup>的研究,黄色物质吸收光谱比例系数(S)的变化与黄色物质的成分有关,并指出海洋中灰黄酸的比例系数为  $0.019\text{nm}^{-1}$ ,海洋中腐殖酸比例系数为  $0.011\text{nm}^{-1}$ 。 Keith 和 Yoder 认为 S 值的大小也会反映黄色物质组成成分的比例。以灰黄酸为主要组分的黄色物质,其 S 值是腐殖酸占主要成分的黄色物质的两倍。

2 2 黄色物质的高斯模型

高斯模型吸收带在紫外部分,吸收波长的范围从  $190\text{nm}$  到  $500\text{nm}$ 。使用黄色物质紫外吸收数据有两个目的:一是从紫外高斯吸收峰获得可溶性化学组分的信息,另一个是研究水色遥感中黄色物质对水体吸收的影响。这两方面同高斯吸收峰的大小和宽度有紧密的联系。吸收波长转换能量使用公式(4),浮游植物的高斯吸收带分别为  $6.05, 5.32, 4.94, 5.9, 4.5\text{eV}$  (相应  $205, 233, 251, 210, 276\text{nm}$ ), 其中后两个允许吸收带分裂。

$$E(\text{eV}) = 1240/\lambda(\text{nm}) \tag{4}$$

高斯模型使用的数据具有严格的要求。 Schwarz 和 Kowalczyk 研究指出<sup>[9]</sup>,波罗的海测量的两组数据覆盖整个紫外可见光部分,适合于高斯模型的分析。 Korshin<sup>[17]</sup>同时指出黄色物质在  $260\text{nm}$  处的吸收峰由几个高斯吸收能带组成,而且其能量级与苯的前三个电子交换能量级相近。苯是芬芳族环状结构,是形成腐殖物质的重要组成部分,苯的三个能带分别为  $6.9, 6.1$  和  $4.9\text{eV}$  (相对波长  $180, 203$  和  $253\text{nm}$ )。这个吸收峰受苯环取代反应的影响,两个能量较低的能带受量子化的作用,只在相应的能带处发生变化。而且大分子量的高分子会帮助官能团吸附到芳香族环状结构上,导致能级的修正和吸收峰的分裂。

对比 AC-9 和波罗的海的两组数据发现,  $\ln(a_g440)$  和  $\ln(S_{440})$  之间在统计上有明显的相关关系。  $a_g440$  是黄色物质在  $440\text{nm}$  处的吸收,  $S_{440}$  是黄色物质半分析算法吸收系数斜率。高吸收值的

$\ln(a_{g,440})$ 和  $\ln(S_{440})$ 之间的关系有两个特点,一个是  $AC^{-9}$ 数据比较陡峭,另一个特点是具有相似的斜率,但在  $a_{g,440}$ 的高值区有一个数量级的偏移。从高斯模型角度看,高能区有一个狭窄并会移动的吸收带,在维斯瓦河可观察到它随盐度增长。Grzybowski<sup>[18]</sup>在波罗的海发现可选波长的光分解效应在 280nm 到 300nm 间有明显的吸收带。在紫外光照射下会产生衰减,几小时后就会观察到明显的效果。另一方面芳香族物质、金属复合物及产生吸收的分子间的相互作用需要进一步调查。河口的 DOM 动力学效应对碳循环和入海口  $CO_2$  浓度有直接的影响<sup>[19]</sup>。黄色物质吸收的高斯特性,在紫外区又出现了新的应用,这为系统研究黄色物质特性提供了有价值的工具。

2 3 黄色物质的吸收系数与荧光

海水中的黄色物质,在激发光照射下能发出荧光。荧光发射光谱所用的激发光波长是 0.308, 0.450 和 0.553 $\mu m$ 。对于这三个激发波长,黄色物质发出的荧光峰值在 0.344, 0.533 和 0.650 $\mu m$ 。在 0.685 $\mu m$ 处的峰值有叶绿素产生的特征荧光峰。黄色物质受激发后荧光发射强度在蓝光波段最为强烈。实验表明,用紫外光和蓝光等激发光激发水体黄色物质产生荧光时,水体本身也产生拉曼散射,这主要是由水分子中的羟基引起的,它对黄色物质的测定是非常重要的<sup>[20]</sup>。

在入海口和近岸海域荧光 吸收的比值比较相近,而在盐度较高的海区荧光 吸收的比值不为常数,这说明 CDOM 不是单一来源,而是存在多个来源<sup>[21]</sup>。Hoge 等人指出,在开阔海域及海岸带,CDOM 的吸收同荧光有很强的线性关系。在单一的激发波长由荧光反演黄色物质吸收是可能的,这样可以提供航空遥感独立测量的黄色物质浓度方法<sup>[22]</sup>。当黄色物质浓度波动范围很大时,吸收和荧光也存在明显且稳定的线性关系。但是当黄色物质浓度很高(大于 2m<sup>-1</sup>)时,由于存在一定的散射而导致线性关系很不稳定。淡水黄色物质成分中的腐殖质成分比海水中成分要高,分子结构不同也将导致荧光测量的不稳定,同样也会影响黄色物质特性的测量<sup>[21]</sup>。

3 黄色物质遥感模型研究进展

黄色物质光学特性研究的目的是应用于海洋水

色遥感的调查,海洋水色遥感使用的遥感器很多,应用于叶绿素遥感的遥感器基本上都适用于黄色物质的遥感。黄色物质遥感早期使用的是 CZCS 随着遥感技术的发展,SeaWiFS MERIS MODIS GLI等遥感器也陆续应用于黄色物质的遥感。

第一代海洋水色卫星遥感器是海岸带水色扫描仪 CZCS 它的近 8 年的运行提供了全球的叶绿素分布,海洋水色遥感由此确立。1988 年 Tassan 利用 CZCS 数据通过参数分析模型最早发现黄色物质对叶绿素遥感的影响。Tassan<sup>[11]</sup>利用 Jackson<sup>[23]</sup>的反演模型,测量并评估黄色物质对叶绿素遥感的影响时,选用了 CZCS 的四个波段(443nm, 520nm, 550nm, 670nm,  $\Delta\lambda = 20nm$ )。1994 年 Roland 利用 CZCS 数据对二类水体的叶绿素、悬浮物、黄色物质进行反演<sup>[24]</sup>,黄色物质的反演结果同实际测量值比较有些偏低。

在 CZCS 完成了其使命后,1997 年搭载有第二代海洋水色遥感器 SeaWiFS 的 SEASTAR 卫星顺利发射升空。SeaWiFS 具有更多波段,其目的是为了观测全球生物生产力。OC4V4 算法是 SeaWiFS 全球叶绿素 a 反演算法,选用 443/555, 490/555, 510/555 波段比中的最大值作为模型中的  $R_t$ 。MOORE 和 Aiken<sup>[25]</sup>将黄色物质光学特性应用于 SeaWiFS 的海洋水色反演,结果不是很理想,可能的原因是黄色物质对可见光光谱末端蓝光的强烈反射使得 SeaWiFS 反演结果偏低。陈楚群等人<sup>[26]</sup>利用 SeaWiFS 数据建立了黄色物质吸收系数及溶解有机碳(DOC)回归模型,其中黄色物质吸收模型见公式(5)。

$$\lg - [A_y(440)] = -0.3 - 1.93 \lg$$
$$[(R_{412}/R_{490})(R_{443})^{0.5}] \quad (5)$$

式中, R 是在某波段处的反射率,  $A_y$  黄色物质的吸收系数。Eurico 和 Richard<sup>[27]</sup>在研究密西西比河枯水期的生物光学特性时,采用 SeaWiFS 数据反演黄色物质。他们选用了 490/555, 500/555, 510/555 等波段比,其中  $R_{rs}(500)/R_{rs}(555)$  效果最佳,反演的模型为公式(6)。

$$a_{CDOM}(412) = 0.2495 [R_{rs}(500)/R_{rs}(555)]^{-2.225}$$
$$\quad (6)$$

在 SeaWiFS 发射后不久,相继发射了第三代海洋水色卫星 MODIS MERIS GLI 等。美国国家航天局的 MODIS 是具有 36 个波段的海洋水色遥感器。MODIS 的生物光学算法<sup>[28]</sup>中黄色物质算法模型为公式(7)。MODIS 的波段多,反演精度比较高。

$$a_{CDOM}(400)=1.5[10^{-1.147+1.963e_{51}-0.01e_{51}^2-0.856e_{51}+1.702e_{51}^2}]$$

(7)

式中,  $e_{51} = \lg[R_{rs}(412)/R_{rs}(551)]$ ,  $e_{55} = \lg[R_{rs}(443)/R_{rs}(551)]$ 。

MERIS是在 2002年欧洲航天局发射 Envisat卫星上搭载的海洋水色遥感器。Aiken 等人<sup>[29]</sup>在二类水体 MERIS算法反演叶绿素敏感度分析研究中,提出了黄色物质反演的几种假设。假设黄色物质可以由一个波段比计算,波段的选取对计算结果影响较小;后向散射系数  $b_b$  可以由公式 (8)确定;纯水吸收系数  $a_w$ 、总叶绿素吸收系数  $a_{TCHL}$  和总悬浮物吸收系数  $a_{TSM}$  可视为经验常数。黄色物质的反演模型为公式 (9)。

$$b_b = 2.3R(0^-)_{704}$$

(8)

$$CDOM = (c_{443} - R \cdot c_{561} + 2.3 \cdot R(0^-)_{704} - R \cdot 2.3 \cdot R(0^-)_{704}) / (R \cdot a_{CDOM,561}^* - a_{CDOM,443}^*)$$

(9)

式中,  $R = R(0^-)_{561} / R(0^-)_{443}$ ,  $a_{\lambda} = a_{w,\lambda} + TCHL \cdot a_{TCHL,\lambda}^* + TSM \cdot a_{TSM,\lambda}^*$ ,  $R(0^-)$  为水面下 0 米处辐射率, TCHL 为总叶绿素浓度, TSM 为总悬浮物浓度。同时还证明黄色物质的辐射率或反射比与它的固有光学特性吸收系数有关,因此可以使用与叶绿素反演相类似的波段即蓝光区的 442.5nm, 490nm, 510nm 和 560nm。

日本国家宇宙事业开发团在 2000 年发射了搭载有 GLI 遥感器的 ADEOS-2 卫星,目的是建立适合全球的生物光学基础算法(包括卡尔科弗卢尔、印度洋、亚热带的大西洋、西太平洋、日本海、南大洋、亚欧大洋)。其黄色物质反演模型为公式 (10)。

$$CDOM(440) = 10^{(a_0+a_1 \cdot R)}$$

(10)

式中,  $a_0 = -1.493$ ,  $a_1 = -1.618$ ,  $R = \lg(NWLR443/NWLR520)$ 。

将 GLI 各波段比值组合同现场实测数据进行对比发现,在 300nm 吸收系数的实测值与几个波段比值的反演值具有相似的  $R^2$  和均方差。NWLN380/NWLN545 ( $R^2=0.802$ , RMSE=0.059) 具有高的  $R^2$  和低的均方根误差,最符合要求。NWLN412/NWLN520, NWLN412/NWLN545 和 NWLN443/NWLN520 比 NWLN380/NWLN545 稍差。与 SeaWiFS 对比研究表明<sup>[30]</sup>,近岸海域短波处的大气校正有很大的误差,黄色物质的算法不能选择短波波段(包括 380nm 和 412nm),而其他长波波段的大气校正误差相对较小,因此采用 NWLR443/NWLN520 波段比,此波段比值的反演结果与实测值有很好的相关性,同时浮游植物的荧光信号在波段

比值中很容易被消除。波段比的另一个优点(相对于使用 380 和 400nm)是 443 和 520nm 为其他遥感器共有的波段,同样的算法适用于其他遥感器。目前使用的黄色物质的光学浓度定义是指黄色物质在某一波段的吸收系数。以前使用 300nm 处的反演算法是因为在这个波段有比较好的信噪比,而现在使用 440nm 处的反演算法相应的测量误差明显提高,  $R^2$  明显降低。

#### 4 中国黄色物质光学特性与遥感应用展望

黄色物质的研究在国外已经开展了几十年,目前国内学者对黄色物质研究主要集中在化学组成及光学特性等方面。吴永森、张士魁、张绪琴<sup>[31]</sup>建立了胶州湾黄色物质吸收系数与波长的单调变化关系。夏达英、李宝华<sup>[32]</sup>对黄色物质的荧光特性进行了研究,采用荧光法获得青岛近海黄色物质的浓度。朱建华、李铜基<sup>[33]</sup>建立了黄东海非色素颗粒物和黄色物质吸收系数光谱模型,回归 S 经验值为 0.0175。陈楚群、潘志林<sup>[26]</sup>利用 SeaWiFS 资料提取了珠江口水域黄色物质的浓度信息。这些黄色物质的研究只是刚刚起步,还有很多的工作需要努力。

中国海域边界辽阔,生态环境复杂,利用卫星遥感这个有力手段可有效地监测黄色物质,了解中国近海黄色物质的时空分布,揭示生态环境的变化。

#### 参 考 文 献 (References)

[ 1 ] Kalle K. The Problem of the Gelbstoff in the Sea[ J]. Oceanogr Mar Biol Annu Rev, 1996, 4: 91—104.

[ 2 ] Gagosian R R, Suermer D H. The Cycling of Biogenic Compounds and Their Diagenetically Transformed Products in Sea Water[ J]. Mar Chem, 1977, 5(4—6): 605—632.

[ 3 ] Rochelle E J, Newall Fisher T R. Chromophoric Dissolved Organic Matter and Dissolved Organic Carbon in Chesapeake Bay [ J]. Marine Chemistry 2002, 77: 23—41.

[ 4 ] Hansell D A, Carlson C A. Chromophoric DOM in the Open Ocean [ R ]. Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter Academic press San Diego 2001.

[ 5 ] Unoki S, Okami N, Kishino M, et al Optical Characteristics of Sea Water at Tokyo Bay[ J]. Science and Technology Agency Report Japan 1978.

[ 6 ] Bukata R P, Jerome T H, Bruton J E, et al Optical Water Quality Model of Lake Ontario[ J]. Appl Optics 1981, 20: 1696—1703.

[ 7 ] Roesler C S, Perry M J, Cander K L. Modeling in Situ Phytoplankton Absorption from Total Absorption Spectra in

Productive Inland Marine Waters[ J]. *Limnol Oceanogr* 1989, **34**: 1510— 1523

[ 8 ] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by Dissolved Organic Matter of The Sea (Yellow Substance) in the UV and Visible Domains[ J]. *Limnol Oceanogr* 1981, **26**: 43— 53

[ 9 ] Schwarz J N, Kowalczyk P, Kaczmarek S, et al. Two Models for Absorption by Coloured Dissolved Organic Matter [ J]. *Oceanologia*, 2002, **44**(2): 209— 241.

[ 10 ] Roderick E W, Amock W, Infried W, C G, Gieskes Sandor van Laar. Regional and Seasonal Differences in Light Absorption by Yellow Substance in the Southern Bight of the North Sea[ J]. *Journal of Research* 1999, **42**: 169— 178

[ 11 ] Ferrari G M, Tassan S. Evaluation of the Influence of Yellow Substance Absorption on the Remote Sensing of Water Quality in the Gulf of Naples: A Case Study[ J]. *Int J Remote Sensing*, 1992, **13**(12): 2177— 2189.

[ 12 ] Stedmon C A, Markager S, Kaas H. Optical Properties and Signatures of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Danish Coastal Waters[ J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 2000, **51**: 267— 278

[ 13 ] Niklas Strombeck, Donald C Pierson. The Effects of Variability in the Inherent Optical Properties on Estimations of Chlorophyll a by Remote Sensing in Swedish Freshwaters[ J]. *The Science of Total Environment* 2001, **268**: 123— 137.

[ 14 ] Høfjerslev N K. Spectral Light Absorption by Gelbstoff in Coastal Waters Displaying Highly Different Concentrations [ A ]. *Proceedings Ocean Optics XIV*, Ackleson S G, Campbell J. Office of Naval Research, Washington, DC, 1998

[ 15 ] Kopelevich O V, Lutsarev S V, Rodionov V V. Light Spectral Absorption by Yellow Substance of Ocean Water (in Russian) [ J]. *Okeanologiya* 1989, **29**: 409— 414.

[ 16 ] Cander K L, Steward R G, Harvey G R, et al. Marine Humic and Fulvic Acids: their Effects on Remote Sensing of Ocean Chlorophyll[ J]. *Limnol Oceanogr* 1989, **34**(1): 68— 81.

[ 17 ] Korshin G V, Chi Wang L, Benjamin M M. Monitoring the Properties of Natural Organic Matter Through UV Spectroscopy: A Consistent Theory[ J]. *Water Res*, 1997, **31**(7): 1787— 1795.

[ 18 ] Grzybowski W. Effect of Short-term Sunlight Irradiation on Absorbance Spectra of Chromophoric Organic Matter Dissolved in Coastal and Riverine Water[ J]. *Chemosphere* 2000, **40**: 1313— 1318

[ 19 ] Frankignoulle M, Abril G, Borges A, et al. Carbon Dioxide Emission from European Estuaries[ J]. *Science* 1998, **282**: 434— 436

[ 20 ] Lin M J. Application of Ocean and Coast Remote Sensing[M]. Ocean press 1991. [林敏基, 海洋与海岸带遥感应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1991.]

[ 21 ] Rochelle E, J-Newall, Fisher T R. Chromophoric Dissolved Organic Matter and Dissolved Organic Carbon in Chesapeake Bay [ J]. *Marine Chemistry* 2002, **77**: 23— 41.

[ 22 ] Hoge F E, Vodacek A, Blough N V. Inherent Optical Properties of the Ocean: Retrieval of the Absorption Co-efficient of Chromophoric Dissolved Organic Matter from Fluorescence Measurements[ J]. *Limnol Oceanogr* 1993, **38**: 1394— 1402

[ 23 ] Jackson T. Humic Matter in Natural Waters and Sediments[ J]. *Soil Science* 1975, **119**: 56— 57.

[ 24 ] Roland Doerffer, Jurgen Fischer. Concentrations of Chlorophyll Suspended Matter and Gelbstoff in Case II Waters Derived from Satellite Coastal Zone Color Scanner Data with Inverse Modeling Methods[ J]. *J G Research*, **99**(C4): 7457— 7466

[ 25 ] Moore G F, Aiken J A. Bio-optical Model for the Determination of Inherent Optical Properties from Reflectance Data: Applications to Remotely Sensed Data from Case I and Case II Waters[ J]. *Applied Optics* 2003

[ 26 ] Chen C Q, Pan Z L, Shi P. Simulation of Sea Water Reflectance and Its Application in Retrieval of Yellow Substance by Remote Sensing Data[ J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, **22**(5): 34— 39. [陈楚群, 潘志林, 施平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用 [J]. 热带海洋学报, 2003, **22**(5): 34— 39.]

[ 27 ] Eurico J D ' Sa, Richard L Miller. Bio-optical Properties in Waters Influenced by the Mississippi River during Low Flow Conditions [ J]. *Remote Sensing of Environment* 2003, **84**: 538— 549

[ 28 ] Miroslaw Darecki, Dariusz Stramski. An Evaluation of MODIS and SeaWiFS Bio-Optical Algorithms in the Baltic Sea[ J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, **89**: 326— 350

[ 29 ] Aiken J, Moore G F, Trees C C, et al. The SeaWiFS CZCS-Type Pigment Algorithm [ A ]. *NASA Tech Memo* 104566, Vol 29, Hooker S B, Firestone E R. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland[ C], 1995

[ 30 ] Kahn M, Mitchell B G. Empirical Chlorophyll Algorithm and Preliminary SeaWiFS Validation for the California Current[ J]. *Int J of Remote Sensing*, 1999

[ 31 ] Wu Y S, Zhang S K, Zhang X J, et al. Experimental Study on the Optical Absorption Property of Yellow Substance in Sea Water [ J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, **33**(4): 402— 406. [吴永森, 张士魁, 张绪琴等. 海水黄色物质光吸收特性实验研究 [J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(4): 402— 406.]

[ 32 ] Xia D Y, Li B H, Wu Y S, et al. A Preliminary Study on Fluorescence Characteristics of Yellow Substance in Sea Water [ J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 1999, **30**(6): 720— 725. [夏达英, 李宝华, 吴永森等. 海水黄色物质荧光特性的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 1999, **30**(6): 720— 725.]

[ 33 ] Zhu J H, Li T J. Spectral Mode Research about Absorption Coefficient of The Depigment Particles and Yellow Substance in Yellow Sea and East China Sea[ J]. *Ocean Technology* 2004, **23**(2): 8— 13. [朱建华, 李铜基. 黄东海非色素颗粒与黄色物质的吸收系数光谱模型研究 [J]. 海洋技术, 2004, **23**(2): 8— 13.]