

# 黄、东海海洋黄色物质的卫星反演\*

吴绍渊<sup>1</sup> 吴永森<sup>2</sup> 张士魁<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境学院 青岛 266100; 2. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**提要** 在对物理特性分析的基础上,建立了黄、东海海域卫星离水辐射率黄色物质反演模式,并利用 2003 年 4 月 15 日 SeaWiFS 卫星获得的黄、东海海域离水辐射率( $L_w$ )数据反演给出了黄海中部—东海南部(北起  $33^{\circ}52'N$ , 南到  $22^{\circ}00'N$ ; 西起  $122^{\circ}36'E$ , 东止  $125^{\circ}28'E$ )海域的黄色物质分布图。结果分析表明,研究区给出的黄、东海海域黄色物质吸收系数在  $0.003—0.13m^{-1}$  范围内,与大西洋北海测得的黄色物质吸收系数比较接近,但明显低于波罗的海和地中海,更低于世界各地沿海海湾。平均而言,比在太平洋点测黄色物质吸收系数值高约 80%,达  $0.09m^{-1}$  左右。在水平分布上,黄海海域的黄色物质吸收系数明显高于东海海域,沿岸水域明显高于远海水域。受长江水系和黄海环流以及沿岸排污等要素的影响,在长江口以外和黄海、南部水域及其沿岸附近有明显的高吸收系数值聚集区。同时发现,在黄海西部沿岸,由于有较高反射率的高泥沙含量的影响,对该区黄色物质的反演产生了较大的影响,特别在苏北沿岸和长江口水域尤其如此。而在韩国、日本西海岸、浙江及福建沿岸水域则比较正常的给出了黄色物质的分布。

**关键词** 黄、东海海域; 离水辐射率; 黄色物质; 卫星反演

**中图分类号** P733

人类赖以生存的地球环境的持续恶化,已经引起世界各国科学家的高度重视。对全球环境而言,海洋环境是其中的一个重要方面。全球海洋环境是无数个区域海洋环境构成了涉及全球的海洋大环境,因此,如果把整个参与全球变化的海洋物质环流过程分为三级链,那么,第一级链,也就是最初级,应该是沿岸河流对海湾和近海沿岸的物质输入;第二级链应该是海洋沿岸国家的近海或内海,如大西洋的北海,波罗的海、地中海,渤海、黄海、东海、南海、日本海等等;而第三级链则是大洋,如太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋。因此,只有控制第一级链的污染事件的发生和污染物输入,监测第二级链的环境动态变化和存在状态,进而才有可能使参与第三级链的输入物质得以准确、客观的监控,才有可能对大洋环境乃至地球环境得以客观更正的评价。所以,强化对第二级链环境的监测是评价全球环境变化的关键,也是评价沿岸国污染排放、环境治理、环境政策

与管理是否得力的重要基础依据和指标,需要各国科学家和政府管理部门高度重视,共同努力,不断研究新方法和新的评定环境优劣的指标、标准,实施更为有效的环境监管。迄今为止,在海洋环境评价中已经建立了多个指标体系,如生物指标体系和化学指标体系等,但是,这些指标体系需要大量定期、定点或动态的对现场监测水域进行现场取样、分析,在国际统一标准的条件下,可以获得严格意义上的科学数据,遗憾的是它需要大量的经费投入和较为雄厚的国力支持,往往在经济不太发达的国家和地区已经成为一种奢望。因此,发展高新技术实施对全球环境的监测,其中,发展海洋环境的空间探测技术是解决这一难题实施全球环境监测有效而经济的方法之一。

本研究是针对上述现状发展的一种用于对第二级链进行环境监测与评价的卫星空间监测技术——海洋黄色物质的卫星遥感定量反演技术。其优点在于:客观、经济、快速、大面积、不受地域和当地国家与

\* 国家自然科学基金资助项目, 60578060 号。吴绍渊, 博士, E-mail: sywuqd@hotmail.com

通讯作者: E-mail: yswu@sina.com

收稿日期: 2011-11-06, 收修改稿日期: 2012-03-22

政府的限制。它的研究不仅在于对它本身特征了解的客观需求,而且对相关学科具有重要的科学意义:

1) 在遥感上,海洋黄色物质反演模式的建立和黄色物质分布与浓度的定量反演将为海洋遥感开拓一新的应用研究领域和为其它相关学科的研究提供咨询、研究数据源和新的监测手段,填补常规监测手段、方法和数据之不足。

2) 在环境评价方面。由于黄色物质是一种有机物,而有机物含量是衡量和评价环境优劣、富营养化程度的一种有效的指标。尽管造成环境污染和恶化的不仅仅是有机物,但是有机物毕竟占有相当大的比重。尤其在沿海近岸海域,有机物多由河流沟渠输入海湾,并聚集,常规条件下点的监测难以反映真实的全面情况,因此,它的卫星定量反演对建立环境评价指标和判定是否构成达到污染程度具有重要的应用价值。

3) 在海洋学研究方面的意义。海洋黄色物质的形成和聚集有多种形式,主要是由陆域形成经河流输入,在海洋聚集。当然,还有很多形式如浮游动物的尸解,排泄等都可形成黄色物质。利用它的流动性、附属性和保守性,进而可以为研究和识别海洋学现象及其动力学过程如涡旋,沿岸流,江河冲淡水的海洋锋、混合、赤潮、绿潮预警预报等提供一新的数据源。这些特性的利用对海洋学研究具有一定的意义。

总之,海洋黄色物质卫星反演模式的研究不管对海洋环境质量评价、海洋学研究,还是对遥感技术的发展本身都具有十分重要的意义。

黄色物质(Yellow Substance, 亦称为 Gelbstoff, Chromophoric Dissolved Organic Matter, Coloured Dissolved Organic Matter, 简称为 CDOM)实际上是一种带色的可溶性有机物,它的生化成分极为复杂。在我国海域,仅在胶州湾水域对黄色物质的生化成分进行了分析(吴永森等, 2004),其它海域尚未见报道。据目前研究认为,黄色物质具有保守性的生物属性,因此可以对相关海洋学现象实施跟踪、监测。同时,也正是因为它是一种有机物,所以与海洋环境、海洋富营养化、污染、赤潮、绿潮等灾害发生有着密切的关系。随着研究和认识的深入,黄色物质终将在海洋环境评估,赤潮、绿潮等灾害的发生、预报,海洋学现象分析中成为的一种极具实用价值的环境监测和遥感监测参量,可弥补现在环境监测手段、数据之不足。

在黄色物质研究方面,国际上已经进行了不少的研究,但大多限于点测数据,进行其吸收、荧光特性及  $S$ (光谱斜率)值的研究和确定。在光谱模式和测量方法上,多认可 Jerov 模式及其欧洲科学家所采用的测量方法,其量值,多用波长 380nm 或更短波长 375nm 处的吸收系数来表示(Jerov, 1976; Bricaud, 1981; Hojerslev, 1982; Tassan, 1988)。NASA 测量方法,实际上是欧洲科学家所采用测量方法的深化版。截至目前,在海洋大范围的黄色物质监测和卫星反演方面目前也取得了一些进展,如利用 Naples 湾水域现场数据建立了黄色物质的反射率经验算法(Tassan, 1994)。在其它海域如波罗的海等也有类似研究结果发表(Fischer *et al*, 1987; Neumann *et al*, 1990)。在国内,尽管有不少学者对黄色物质的研究极感兴趣,但大多集中于黄色物质特性研究,如陈楚群等(2003)在珠江口对海水光谱模拟,且以 DOC(代替黄色物质)对模式进行了研究反演;唐军武等(2004)在黄、东海海域的海洋光学测量中对海水的光吸收等固有光学参量进行了测量;张运林等(2007)、孔德星等(2008)和郭卫东等(2010)分别对太湖、长江口和珠江口等水域进行了 CDOM 和 DOC 等的光学特性进行了研究(Mueller *et al*, 1992; 吴永森等, 2002; 张绪琴等, 2002; 陈楚群等, 2003; Wu *et al*, 2003; 唐军武等, 2004),等等。但对黄、东海海域黄色物质分布的研究无论在国内还是国外仍是一片空白。迄今尚未见直接由卫星数据反演给出其黄色物质的空间分布。本研究除直接展现给人们在研究海域黄色物质的空间分布外,更重要的是建立了一种黄色物质卫星反演模式和方法,为未来全球范围的黄色物质卫星反演分布图制作提供了方法和实证尝试。

## 1 模式的建立与反演结果

由辐射传输方程,水体的光谱反射率又可以近似的描述为

$$R(\lambda) = 0.33 \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda)} \quad (1)$$

其中,  $R(\lambda)$  为辐射波长为  $\lambda$  时的水面光谱反射率; 而  $b_b(\lambda)$  和  $a(\lambda)$  分别为辐射波长为  $\lambda$  时水体的后向散射系数和吸收系数。

水体的后向散射系数为纯水水分子、叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质的散射系数之和。在光谱上,由于黄色物质主要以吸收为主,其散射可以忽略不计。故,式(1)中,后向散射系数  $b_b(\lambda)$  可以写为

$$b_b(\lambda) = r_w b_w(\lambda) + r_c b_c(\lambda) + r_s b_s(\lambda) \quad (2)$$

式(2)中,  $r_w$ 、 $r_c$  和  $r_s$  分别为纯水、叶绿素和悬浮泥沙的后向散射率。其量值分别为  $r_w=0.5$ ;  $r_c=0.005$ ;  $r_s=0.015$ ; 而  $b_w(\lambda)$ 、 $b_c(\lambda)$  和  $b_s(\lambda)$  则分别为纯水、叶绿素和悬浮泥沙的后向散射系数。

式(1)中, 总的吸收系数  $a(\lambda)$  可以表示为

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_c(\lambda)C + a_s(\lambda)S + a_y(\lambda) \quad (3)$$

其中,  $a$  为总吸收系数( $m^{-1}$ );  $C$  和  $S$  分别为叶绿素色素和悬浮物浓度( $mg/m^3$  和  $g/m^3$ ); 下标  $w$ 、 $c$ 、 $s$ 、 $y$  分别代表纯水、叶绿素、悬浮沉积物(主要是悬浮泥沙)和黄色物质;  $a_w(\lambda)$ 、 $a_c(\lambda)$ 、 $a_s(\lambda)$  和  $a_y(\lambda)$  分别为辐射波长为  $\lambda$  时的纯水、叶绿素、悬浮沉积物和黄色物质的吸收系数。

所以, 由式(1)可以看出, 海面反射率( $R$ )与水体的吸收系数( $a$ )呈反比关系。

同理, 遥感反射率和海洋固有光学量存在关系也可写成如下形式(Hooker *et al*, 2000):

$$R_{rs} = \frac{L_w}{E_d} = 0.051 \frac{b_b}{a} \quad (4)$$

其中,  $R_{rs}$  为水体的遥感反射率;  $L_w$  为离水辐射率;  $E_d$  为水面下行辐照度;  $b_b$  为水体的后向散射系数;  $a$  为水体总吸收系数。

由式(4)可见,  $R_{rs}$  正比于  $b_b$ , 反比于  $a$ 。

式(1)和(4)的成立, 为分析经处理后获得的 SeaWIFS 卫星反演结果提供了理论基础。

各种不同的物质具有不同的光谱特性, 因而具有了选择性吸收的特点。叶绿素在 540nm 波长上的光吸收最小, 而在 460nm 波长上叶绿素的光吸收最大。它的存在对可见光的蓝紫光(390—490nm)和红橙光(600—770nm)具有非常强烈的吸收效应; 而悬浮泥沙最敏感的波长位于 550nm 和 670nm; 黄色物质的主要吸收位于紫外波段, 即在 400nm 以下。当仪器的波长被选定后, 在不考虑大气影响的条件下(通常由大气修正完成), 它所获得的来自海面的发射辐射就只是在限定波长的纯海水和海水中叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质散射和吸收量值的函数, 加上叶绿素、悬浮泥沙和黄色物质各自所具有独特的选择性特点, 所有这些便决定了 SeaWIFS 在空间所接收到的来自海面的发射辐射在第一波段中含有明显的黄色物质的光谱贡献。这为用 SeaWIFS 卫星可见光通道数据研究黄色物质的信息提取提供了理论依据。

正由 SeaWIFS 归一化离水辐射率又正比于海面反射率, 则 SeaWIFS 卫星归一化离水辐射率,  $nL_w(\lambda)$ ,

可写为

$$nL_w(\lambda) = \frac{L_w}{t(\lambda, \theta_0)(1 - \rho(\theta_0)) \cos \theta_0} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \quad (5)$$

其中,  $nL_w(\lambda)$  为归一化离水辐射率。式中各项的物理意义由 Mueller 等(1992)所描述。

而在卫星标准产品——归一化离水辐射率数据输出前, 已经由美国 NASA 提供的大气修正模式对大气的瑞利辐射, 大气的气溶胶辐射等进行了严格地辐射修正, 在 SeaWIFS 卫星地面站粗数据的预处理中一次完成。因而, 给出的归一化离水辐射率产品可以认为是海面的真实辐射值。当然, 这种大气辐射修正模式是否完全适合于中国海域, 有待进一步研究, 但这不是本研究所涉及的内容。故此, 认为本研究所使用的数据是真实的。

根据上述海洋光学和遥感测量的技术理论分析, 利用 SeaWIFS 卫星  $L_w$ (离水辐射率)数据和卫星过境时间准同步的现场测量数据, 建立了适合黄、东海海域卫星离水辐射率黄色物质反演模式如下。

$$Ay(380) = C \left[ \frac{1}{D \left[ \frac{L_w(412)}{L_w(490)} \sqrt{L_w(443)} \right]^\beta} \right] \quad (6)$$

其中,  $Ay(380)$  为在波长为 380nm 处的黄色物质吸收系数;  $C = 1.071951762$ (比例系数);  $D = 10$ (常数);  $\beta = 0.0459052$ (待定指数, 用最小二乘法由卫星与现场同步实测数据确定)。

$L_w(412)$ 、 $L_w(443)$  和  $L_w(490)$  分别为 SeaStar 卫星 SeaWIFS 传感器对应的 412nm、443nm 和 490nm 通道获得的离水辐射率。其量值按美国 NASA 规定的模式、修订计算而得。

将 SeaWIFS 卫星三通道 [ $L_w(412)$ 、 $L_w(443)$  和  $L_w(490)$ ] 数据代入式(6), 获得黄、东海黄色物质分布图(图 1)。

对研究海域的黄色物质反演结果进行统计发现, 黄、东海海域黄色物质  $Ay(380)$  吸收系数的量级范围在  $0.090—0.114m^{-1}$ 。

## 2 讨论

### 2.1 模式的建立

为了将本研究反演数据结果方便地与国际大多科学家所获研究结果进行比较, 故采用与国际上大多科学家所采用的标准一致, 即用 380nm 处的吸收系数  $Ay(380)$  来代替黄色物质的浓度。

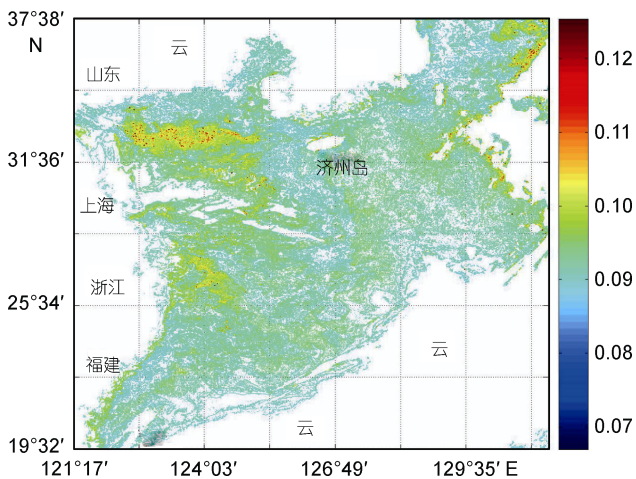


图 1 SeaWiFS 离水辐射率反演获得的黄色物质分布图  
Fig.1 The distribution of marine yellow substance retrieved by SeaWiFS  $nL_w$  in the waters of Yellow Sea and East China Sea

值得说明的是, 这里利用离水辐射率建立黄色物质反演模式的主要理论和技术依据有: (1) 海面反射率正比于海面离水辐射率; (2) 海面离水辐射率又是 SeaWiFS 卫星可以提供的卫星产品数据, 使用方便。研究中, 从吸收与反射成反比, 反射与离水辐射率成正比的光学理论出发, 建立了与 SeaWiFS 卫星通道对应的黄、东海卫星离水辐射率黄色物质反演模式(式 1)。

为了与国外相关模式进行比较, 作者将 Tassan (1994)黄色物质反射率模式直接用于黄、东海黄色物质计算, 即将现场同步点测实验数据——海面反射率数据代入, 并将计算结果与现场近同步实测黄色物质吸收系数值进行了比较。结果发现 Tassan 模式计算所得的结果要比现场实测结果小约两个数量级, 即计算给出黄色物质吸收系数约在  $0.0006—0.001\text{m}^{-1}$  之间。而同步对应点的现场(2003 年 4 月 15 日黄、东海现场实验)实测值在  $0.07—0.11\text{m}^{-1}$  之间。要比太平洋水域前人点测黄色物质吸收系数值低约两个数量级。

由此断定, 用 Tassan 模式计算反演给出的黄色物质结果是不切合本海域的实际情况, 至少可以说, 不能直接应用于本海域的研究反演。

## 2.2 反演值与实测值的比较

为了验证本研究建模模式的真实性和可靠性, 对利用 SeaWiFS 卫星离水辐射率数据计算反演的黄、东海黄色物质吸收系数值做了比较、验证。

将  $L_w(412)$ 、 $L_w(443)$ 和  $L_w(490)$ 三通道逐点的离水

辐射率值代入模式, 计算获得逐点  $A_y(380)$ 值。经统计图内全部反演值, 给出反演区内黄色物质质量值范围为  $0.090—0.114\text{m}^{-1}$ ; 而由现场已获得的实测  $A_y(380)$ 值一般在  $0.07—0.11\text{m}^{-1}$ 。偏差在 28.5%—3.6%; 平均在 16%左右。

为了判断模式反演结果可信性, 与国外相关研究结果进行了比较。国外相关测量结果见表 1。

表 1 国外有关黄色物质吸收系数测量结果统计表  
Tab.1 Statistics of absorption coefficient measurements of yellow substance in different regions of the world

区域	吸收系数( $\text{m}^{-1}$ )	波长(nm)
秘鲁和赤道	0.05—0.16	400
北海	0.18	420
北大西洋	0.05	
百慕大岛外	0.03	
北太平洋	0.05	
沿岸区		
区域	吸收系数( $\text{m}^{-1}$ )	波长(nm)
Var 河口	0.36	
Rhone 河口(位于 Fos-sur-mer 湾)	0.05—0.16	
波罗的海	4.20	
北海(位于 Kattegat)	0.10	
Kirk (澳大利亚湖和河)	8.00	
Marseilles 水域	1.40—0.16	
Etang de Berre 水域	0.60—1.30	
胶州湾(中国)	1.305	380

注: 表中胶州湾数据见吴永森等(2002), 其它数据来自 Bricaud(1981)

表 1 给出了国外不同研究海域获得的黄色物质吸收系数观测结果。最高值在 Kirk (Australian lake and river water), 其黄色物质的吸收系数为  $8.0\text{m}^{-1}$ ; 在 The Baltic Sea, 为  $4.2\text{m}^{-1}$ ; 最低值在百慕大岛外, 黄色物质的吸收系数为  $0.03\text{m}^{-1}$ ; 在北太平洋和北大西洋, 为  $0.05\text{m}^{-1}$ 。分析利用 2003 年 4 月 15 日将修正后的 SeaWiFS 卫星离水辐射率( $L_w$ )数据代入式(1)计算获得研究海区的黄色物质反演结果发现, 平均在  $0.09\text{m}^{-1}$ , 岸边约在  $1.3\text{m}^{-1}$ 左右。

由此可见, 黄、东海海域的黄色物质吸收系数平均值要高于太平洋开阔水域, 是太平洋开阔水域黄色物质的 1.8 倍, 稍低于大西洋的北海, 更低于波罗的海。总体上, 其模式反演值在量级上是合理的。

## 2.3 泥沙对反演模式的影响

由图 1 可见, 在沿岸区, 特别是苏北沿岸-长江口海域范围内, 黄色物质的分布无法在图中显示出来。

其原因主要是, 由于研究所选的数据窗口位于 SeaWiFS 传感器可见光 412nm、443nm 和 490nm 的三波段窗口。实验已经证明, 悬浮泥沙水体具有两个反射峰值, 第一个反射峰值在黄光波段(580—730nm); 第二反射峰值在近红外的反射波段(790—830nm)。其中在第一个波段内, 随着泥沙浓度的增加, 峰值波长向长波长方向移动, 即有光谱“红移”现象发生(陈涛等, 1994; 樊辉等, 2007), 而在第二个峰值波长, 则没有此现象发生。这里所说的“峰值波长”只是说在整个光谱测量中, 在这里反射量值达到最高, 但并不是说在此峰值前的波长无反射发生。实际上, 在整个可见光波段范围内, 由于泥沙的存在, 其反射辐射的量值都始终存在于被监测到的数据之中, 只是有强弱的不同, 而不是有无的区别。其结果, 与存在于被测水体中的其它物质发射是一种叠加的结果。因此, 在 SeaWiFS 卫星所选择的窗口波长所监测给出的在 412nm、443nm 和 490nm 各波长的数据中都明显存在有泥沙反射辐射的量值, 这一点应该是没有异议的。随着离开岸边距离的增加, 水体中泥沙含量的减少, 这种影响将随之减少。到外海, 至大洋海域, 海水中泥沙的含量极微, 这种影响将达到可以忽略的程度。

从图 1 中可以看出, 到达一定距离的外海, 随着海水中泥沙含量的减少, 影响也随之减少, 因此, 由模式(1)可以很好地反演给出黄、东海海域黄色物质的分布情况。

如何利用 SeaWiFS 和海洋卫星(HY-1 卫星)现有数据, 有效地反演我国全海域海洋黄色物质的分布情况, 去除沿岸区悬浮泥沙的影响, 得到不含悬浮泥沙的原始卫星海洋水体的信息, 全面反演包括沿岸区在内的我国全海域黄色物质的卫星反演是未来研究的重要课题和方向。

### 3 结语

本研究依据海洋光学理论, 建立了黄、东海海域 SeaWiFS 卫星离水辐射率黄色物质反演模式, 并利用 SeaWiFS 卫星测得的离水辐射率( $L_w$ )数据, 反演给出了黄海中部—东海南部海域的黄色物质分布图。

分析认为, 研究所建立的黄、东海海域黄色物质的卫星反演模式适合本海域现状, 反演给出的黄色物质数量级符合实际情况。与相关研究结果比较发现, 黄、东海黄色物质反演值平均比太平洋水域黄色物质点测值高约 80%, 比北海和波罗的海获得的测量值

小。获得了在研究海域成片状和条带状分布的证据, 为业务性监测特定海域黄色物质的分布和动态变化提供了卫星反演模式, 为未来全球海洋黄色物质卫星监测和该海域的环流特征、环境质量变化的监测, 赤潮预警预报, 渔场探测, 局域和全球气候等研究与分析提供一种新的空间监测数据、监测手段和应用参考。

我国近岸海域受陆域江河如黄河、长江、珠江等影响, 携带大量的泥沙和陆域黄色物质进入海洋, 但由于在这些淡水中泥沙的存在使得反射量远远高于其它信息的辐射量值。尽管星载传感器可以用不同波段对观测目标进行有效的窗口多波段选择性观测, 以获得观测量, 但不难发现, 在卫星接收到的发射辐射量中有时会处于过饱和状态, 如在苏北—长江口海域, 这种过饱和状态的辐射量直接影响了黄色物质模式反演量的精度。为对沿岸特别是山东东部—南部沿岸, 苏北沿岸—长江口区进行有效的黄色物质反演, 在未来的研究中, 需要对原始的卫星数据进行分离和过滤处理, 以消除泥沙反射在其原始观测值上的影响, 获取真实的可以反映海洋相当于正常大洋或远离沿岸影响水体的发射辐射, 在此基础上, 进一步反演海洋黄色物质, 方可给出全海域包括沿岸区在内的黄色物质分布图。

### 参 考 文 献

- 孔德星, 杨红, 吴建辉, 2008. 长江口海域黄色物质光吸收特性. 海洋环境科学, 27(6): 629—631
- 吴永森, 张士魁, 张绪琴等, 2002. 海水黄色物质的光吸收特性实验研究. 海洋与湖沼, 33(4): 402—406
- 吴永森, 张士魁, 张绪琴等, 2004. 胶州湾海洋黄色物质生化成分分析. 海洋学报, 16(4): 58—64
- 张运林, 秦伯强, 2007. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析. 水科学进展, 18(3): 415—423
- 张绪琴, 吴永森, 张士魁等, 2002. 胶州湾海水黄色物质荧光分布初步研究. 遥感学报, 6(3): 229—232
- 陈涛, 李武, 吴曙初, 1994. 悬浮泥沙浓度与光谱反射率峰值波长红移的相关关系. 海洋学报, 16(1): 38—43
- 陈楚群, 潘志林, 施平, 2003. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用. 热带海洋学报, 22(5): 33—39
- 郭卫东, 黄建平, 洪华生等, 2010. 河口区溶解有机物三维荧光光谱的平行因子分析及其示踪特性. 环境科学, 31(6): 1419—1427
- 唐军武, 王晓梅, 宋庆君等, 2004. 黄、东海二类水体水色要素的统计反演模式. 海洋科学进展, 22(增刊): 1—7
- 樊辉, 黄海军, 唐军武, 2007. 黄河口水体光谱特性及悬沙浓度遥感估测. 武汉大学学报(信息科学版), 32(7): 601—604
- Bricaud A, 1981. Absorption by dissolved organic matter of the

- sea (Yellow substance) in the UV and visible domains. *Limnol Oceanogr*, 26: 43—53
- Fischer J, Doerffer R, 1987. An inverse technique for remote detection of suspended matter, phytoplankton and yellow substance from CZCS measurements. *Advances in Space Research*, 7(2): 21—26
- Hojerslev N K, 1982. Yellow Substance in the Sea. In: Calkins J ed. *The Role of Solar Ultraviolet Radiance in Marine Ecosystems*. New York: Plenum, 263—281
- Hooker S B, Maritorena S, 2000. An evaluation of oceanographic radiometers and deployment methodologies. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(6): 811—830
- Jerov N G, 1976. *Marine Optics*. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam-Oxford-New York, 161—171
- Mueller J L, Rosewell W Austin, 1992. NASA Technical Memorandum 104566, Vol.5, seaWIFS Technical report series, Volume 5, Ocean Optics Protocols for seaWIFS Validation, 37—38
- Neumann A, Krawczyk H, Riha S *et al*, 1990. Advances in Earth Observation of Global Change. In: Chuvieco E, Li J, Yang X ed. *Remote Sensing of Coastal Water Quality in the Baltic Sea Using MERIS*. Springer, 55—68
- Tassan S, 1988. The effect of dissolved “yellow substance” on the quantitative retrieval of chlorophyll and total suspended sediment concentrations from remote measurements of water colour. *International Journal of Remote Sensing*, 9: 787—797
- Tassan S, 1994. Local algorithms using SeaWIFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment, and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 33(12): 2369—2378
- Wu Yong-sen, Zhang Shi-kui, Zhang Xu-qin, 2003. Yellow Substance in Jiaozhou Bay of China and the Prospect of Its Application, SPIE’s Third International Asia-Pacific Environmental Remote Sensing Symposium 2002. Hangzhou, China, 4890(2): 930—936

## THE SATELLITE RETRIEVAL OF MARINE YELLOW SUBSTANCE IN YELLOW SEA AND EAST CHINA SEA

WU Shao-Yuan<sup>1</sup>, WU Yong-Sen<sup>2</sup>, ZHANG Shi-Kui<sup>2</sup>

(1. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao, 266100;

2. The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao, 266061)

**Abstract** Based on physical analysis, a model is set up using the SeaWIFS data to retrieve marine yellow substance in the Yellow Sea and East China Sea. The distribution map of yellow substance in the Yellow and East China Sea waters (33°52′—22°00′N; 122°36′—125°28′E) is retrieved and acquired with the water-leaving radiance ( $L_w$ ) data acquired by SeaWIFS on April 15, 2003. The retrieved result is inspiring, indicating that the absorption coefficients of yellow substance ranges from  $0.003\text{m}^{-1}$  to  $0.13\text{m}^{-1}$ , which is about the same as those of the North Sea and Atlantic Ocean, lower than those of the Baltic Sea and Mediterranean, and even lower than those of the gulfs in the world. The average value  $0.09\text{m}^{-1}$  is 80% higher than that measured in the Pacific Ocean. In the horizontal distribution, the coefficients in in-shore waters are clearly higher than those in off-shore waters. Affected jointly by the Yangtze River (or Changjiang in Chinese), the Yellow Sea current, and the pollutants discharge, the clearly gathering area of high absorption coefficients were formed off the Yangtze River estuary and near the coastal waters of the Yellow Sea and its mid-southern part. The absorption coefficients in the Yellow Sea are clearly higher than those in the East China Sea. For the western part of the Yellow Sea, especially in the coastal waters of the Yellow Sea and the estuary, sand content and the sea surface reflectance are high, which affected largely the yellow substance retrieving. However, the distribution of yellow substance was normal in the coastal zones of Zhejiang and Fujian, and Korea as well.

**Key words** Yellow Sea and Eastern China Sea; the water-leaving radiance ( $L_w$ ); marine yellow substance; satellite retrieval