

以改进的半分析光谱模型反演近海岸透明度

韩留生^{1,2}, 陈水森^{2*}, 陈修治^{1,2}, 李丹¹, 李勇¹, 孙林³, 卢楚谦⁴, 陈玮琦²

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640
2. 广州地理研究所, 广东 广州 510070
3. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266510
4. 国家海洋局南海环境监测中心, 广东 广州 510300

摘要 针对近海岸混浊水体透明度的分析和半分析算法中吸收系数和散射系数难以获得的难题, 试图构建一个不需要计算吸收系数和散射系数且适用于近海透明度的半分析反演模型。基于 Preisendorfer(1986)和 Tyler(1968)提出的 Zsd(Secchi depth)反演理论, 综合 490 nm 处垂直漫衰减系数 $K_d(490)$ 和光束衰减系数 $c(490)$ 与遥感反射率的关系, 建立了以两波段遥感反射率比值和潮汐系数修正的适用于近海岸海水透明度反演的简易半分析光谱模型。将此半分析光谱模型应用于珠江口生态区(2012年10月21日—23日、2012年11月2日)和徐闻珊瑚礁自然保护区(2013年1月13日—14日)的透明度反演。利用同步实测数据验证发现, 大潮期间, 该模型计算的透明度与实测值整体偏高 0.4 m 左右, 小潮期间, 该模型计算的透明度比实测值比较吻合。因此对该模型做了潮汐系数修正, 潮汐修正后反演的透明度与实测数值的决定系数为 0.663, 绝对平均误差为 0.14 m, 相对平均误差为 19.5%。综合表明, 该模型只需要 490 与 560 nm 两个波段处遥感反射率的比值即可完成透明度的反演, 且模型相对简便, 透明度反演精度相对较高。

关键词 近海岸; 透明度; 光谱模型; 半分析算法

中图分类号: O657.3 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)02-0477-06

引言

海水透明度的快速、有效监测非常重要^[1]。目前透明度的测量方法有实测塞克盘法和基于光谱(遥感)信息间接获取两种方法; 前者只能获得水面的单点信息, 无法快速、有效地获取透明度的时空分布特征。后者是利用透明度与遥感数据或者遥感数据衍生产品的关系间接获取透明度的方法, 该方法能够快速、有效地获取水体透明度的时空分布。遥感透明度方法可归纳为经验模型和半分析模型两类。经验模型是指基于透明度和遥感反射率单波段或者波段组合的相关性, 利用统计学方法建立的水体透明度反演模式, 该方法具有明显的区域和时间局限性, 缺乏空间普适性^[2]。基于物理机制的半分析模型, 通过输入水体吸收系数和散射系数来计算垂直漫衰减系数和光束衰减系数, 进而实现透明度的反演, 模型结果具有普适性, 适合于较大区域范围内的透明度长时期

观测^[3]。

目前, 水体吸收系数和散射系数计算主要是采用 GSM (garver, siegel, maritorena model)^[4]和 QAA (quasi-analytical algorithm)^[5]算法反演, 这些算法计算比较复杂, 而且主要是针对相对清洁的二类水体, 目前还没有发现将这些算法用于近海岸高度混浊水体的研究, 对此类水体的适用性尚值得探讨。针对这一问题, 本研究以 Maritorena 等^[6-9]给出的近岸二类水体遥感反射率与吸收系数和散射系数的关系式来替代输入的固有光学特性参数, 结合潮汐改正系数, 构建了适用于近海岸透明度反演的 490 与 560 nm 双波段半分析光谱模型, 并将该模型用于珠江口生态区和徐闻珊瑚礁自然保护区透明度的反演。

1 实验区概况及数据获取

1.1 研究区概况

收稿日期: 2013-04-29, 修订日期: 2013-07-24

基金项目: 广东省科技计划重点项目(2011B031100003), 广东省水利科技创新项目(2011-20), 国家自然科学基金项目(41201338, 40771160)资助

作者简介: 韩留生, 1983年生, 中国科学院广州地球化学研究所博士研究生 e-mail: hanliusheng6@126.com

*通讯联系人 e-mail: css@gdas.ac.cn

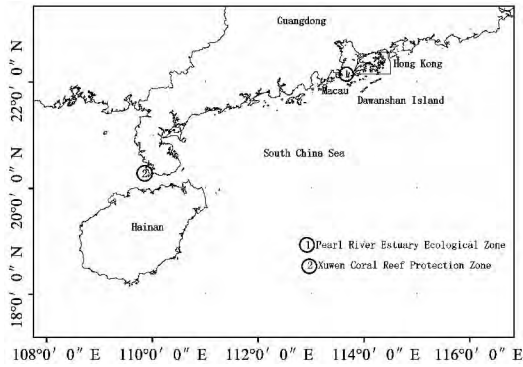


Fig 1 The location of field sampling sites

There are 20 sampling sites collected in October 21, 23, 2012 and November 2, 2012 in Pearl River Estuary Ecological Zone and 25 sampling sites collected in January 13, 14, 2013 in Xuwen Coral Reef Protection Zone, Guangdong Province

Table 1 Dates and location for field water sampling in 2012 & 2013

Date	Sites	Sampling numbers	Measured items	Description
21—23/10/2012	珠江口生态监控区	2	遥感反射率、透明度、悬浮泥沙	对应农历九月初七和初九，潮汐类型为小潮
2/11/2012	珠江口生态监控区	18	同上	对应农历九月十九，潮汐类型为大潮
13—14/1/2013	徐闻珊瑚礁保护区	25	同上	对应农历十二月初二，初三，潮汐类型为大潮

1.2 野外试验和数据采集

透明度的测量和水体表面反射率实地测量选在 2012 年 10 月 21 日—23 日、11 月 2 日和 2013 年 1 月 13 日—14 日同步进行。总共获取样点是 45 个。其中，在珠江口共测量了 20 个点(10 月 21 日和 23 日、11 月 2 日)，在徐闻珊瑚礁自然保护区灯楼角、水尾角附近测量了 25 个点(1 月 13 日和 14 日)，如图 1 和表 1 所示。实测站位平均水深为 2~5 m，由于水体比较浑浊，肉眼看不到底，本区域水体可视作光学深水，可以忽略底质的影响。透明度的测量在船体主甲板的背阳光处，将直径为 30 cm 的白色圆板(透明度盘)放入水中，沉到刚好看不见的深度。采用水面以上光谱测量方法^[11]，使用 ASD 分析光谱设备(350~2 500 nm)，光谱仪采样间隔：在 350~1 000 nm 范围内为 1.4 nm，在 1 000~2 500 nm 范围内为 2 nm。测量所用标准板的反射率为 30%。水面光谱观测的持续时间为 9:30—14:30。在检测水面波谱的同时记录下各测点的 GPS 坐标。为了避免阴影和太阳直射光照的影响，观测几何要满足以下条件：观测方位角为 135°左右(设太阳入射的方位角为 0°)，观测天顶角 θ 为 40°左右。在每一站点，需要依次观测标准板反射辐亮度、遮挡直射阳光的标准板反射辐亮度、水面辐亮度、天空光辐亮度，每组观测数据均采样 10 次，每个站点至少要观测三组数据。

野外测量的光谱数据受到天空光的直射反射的影响，此外还有其他环境因素的影响，需要将其转化为受外界条件影响较小且只含有水体信号的遥感反射率，具体处理方法如下^[11]

珠江口生态监控区：海域位于南海北部，珠江三角洲南面，广东省海岸带的中段(<http://www.pearlwater.gov.cn>)。珠江口水域水温和盐度条件适中、生物资源丰富，适宜中华白海豚的生存繁衍，这里有白海豚国家级自然保护区(图 1)。近年来由于人们在河口的经济活动日益加剧，三角洲河口周边城市经济发展迅速，直接导致了珠江河口及邻近海域生态环境的日益恶化，大量的白海豚死亡，而水体透明度是水质污染的一个直观指标。

徐闻珊瑚礁国家级自然保护区：海域位于广东省雷州半岛的西南部，地处徐闻县境内，处于北纬 20°10.60′—27.00′，东经 109°50.20′—56.40′之间，是我国大陆沿岸唯一面积最大、珊瑚种类最多，连片最为完整的珊瑚礁国家级自然保护区(图 1)。但是由于当地渔民的生产生活(养殖过程的机械破坏与水质污染)影响和工业污染，水体富营养化、悬浮沉积，导致珊瑚礁自然保护区透明度较低，遮挡了阳光照射，使水中生物的光合作用减弱和水温下降，从而影响珊瑚礁的生长^[10]。

$$L_{sw} = L_{au} - rL_{sky} \quad (1)$$

式中： L_{sw} 为离水辐亮度； L_{au} 为水面以上的上行辐射亮度； L_{sky} 为天空光辐射亮度， r 为气水界面对天空光的漫射反射率，在试验中，风速小于 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，在此 r 取 0.022。

遥感反射率

$$R_{rs} = \frac{L_{sw}}{E_d} = \frac{L_{au} - rL_{sky}}{\pi L_{ad}} \quad (2)$$

式中： L_{ad} 为水面以上的下行辐射亮度； L_{sw} 为离水辐亮度； R_{rs} 为遥感反射率。

2 透明度反演方法

2.1 理论基础

Preisendorfer 等^[12,13]等提出了透明度半分析算法，认为可见光在均匀介质中传播时， Z_{sd} 可表达为

$$Z_{sd} = \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)}{K_d(\lambda) + c(\lambda)} \quad (3)$$

式中， D_0 是水表面的透明度盘的表观对比度， D_{min} 为透明度盘的表观对比度下降到肉眼的灵敏度阈值。根据 Preisendorfer^[12]的理论， $\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)$ 是一个常数，其变化范围在 5~10 之间。 $K_d(\lambda)$ 和 $c(\lambda)$ 分别表示可见光波段光的垂直漫衰减系数和光束衰减系数，Doron 等^[14]根据一个主要针对欧洲二类水体(地中海、波罗的海、北海、英吉利海峡、亚得里亚海)、由

七个航次调查构成的数据集 (COASTLOOC dataset), 发现 $K_d(\lambda) + c(\lambda)$ 与 $K_d(490) + c(490)$ 之间高度相关, 可以使用一个公式表示二者的关系, 因而 Z_{sd} 可以用下式估算

$$Z_{sd} = \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)}{P(K_d(490) + c(490))} \quad (4)$$

2.2 改进和构建简化的半经验光谱模型

依据上述透明度反演理论[式(4)], He 等^[3,12,13]对较清澈的海水进行了透明度的反演, 达到了较高的精度。但是该模型的输入变量需要已知水体的吸收系数和散射系数, 才能反演出水体透明度信息。然而, 目前获取这些吸收系数和散射系数比较复杂, 尤其对于近海岸混浊水体来说, 使用 QAA 等算法进行吸收系数和散射系数的获取尚值得探讨。因此, Preisendorfer 等^[12,13]提出的透明度反演理论[式(4)]也不适合我国近海岸透明度反演的应用需求。

因此, 本文试图以光速漫衰减系数与波段遥感反射率的关系, 构建一套仅包含 490 和 555 nm 波段反射率比值的简化透明度反演模型, 推导过程如下。

根据 Doron 等^[12]研究发现, $P(K_d(490) + c(490))$ 可以表达为式(5)

$$P(X) = 0.0989X^2 + 0.8879X - 0.0467 \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 如何估算这两个参数: $K_d(490)$ 和 $c(490)$, 是计算透明度的关键。

Maritorena 等^[7-9]根据大量的实测结果得到

$$K_{d490} = K_{w490} + 0.15645(R_{rs490}/R_{rs555})^{-1.5401} \quad (6)$$

式中, $K_{w490} = 0.016$ 。

Gordon^[9]以辐射传输原理推导出 K_d 的计算式[式(7)]。Gordon^[8]利用蒙特卡洛模型计算得到一类水体的 $k_0 = 1.0395$, Albert 等^[15]通过 Hydrolight 软件模拟发现, 对于二类水体 $k_0 = 1.0546$ 。而 $c(\lambda)$ 是与 $K_d(\lambda)$ 一个相关的函数。

$$K_d(\lambda) = k_0 \frac{a(\lambda) + b_b(\lambda)}{\cos\theta'_{sun}} \quad (7)$$

综合上述给出的近岸二类水体反射率与吸收系数和散射系数的关系式[联合式(3)~式(7)], 推导出以下透明度反演模型

$$D_{zp} = a_0 \frac{5}{F\left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}\right)} + a_1 \quad (8)$$

式中, D_{zp} 指透明度; 调整系数 a_0 为固定的尺度系数 0.1, 与区域无关; a_1 为潮汐修改系数, 通过经验关系发现, 大潮时取 0.4, 小潮时取 0.0, 这两个参数的值在两个研究区都适用, 这一点也是本文的新发现之一。另外, 透明度与潮汐之间的关系只是一个初步发现, 因为目前没有得到潮高数据, 无法对此进行深入分析, 下一步工作会对此做详细的分析探讨。 $F\left(\frac{R_{rs}(490)}{R_{rs}(555)}\right)$ 是一个与遥感反射率比值相关的函数。

可以看出, 本文构建的新模型其实是有一定的理论基础的, 其所采取式(6)的函数形式, 所依据的就是国际公认的 Preisendorfer 等^[11,12]提出的透明度半分析算法, 本工作在此基础上开发一个具有较好适用性的模型。该模型仅包含了 490 和 555 nm 波段反射率比值, 无需吸收系数和散射系数作

为输入参量, 克服了目前近海岸透明度反演模型中吸收系数和散射系数难以获取的难点, 简化了近海岸透明度反演模型, 具有一定的创新意义。

3 结果与讨论

3.1 实测透明度信息的特征分析

珠江口生态区实测数据显示(表 2), 珠江口生态区的平均透明度为 0.9 m, 透明度的范围在 0.4~2 m 之间, 最小透明度为 0.4 m, 最大透明度为 2 m, 位于大万山岛附近。根据越靠近外海透明度越高的规律, 河口携带的泥沙和有机污染物可能是珠江口生态区近海岸透明度较低的一个重要原因。

Table 2 Field measured water clarity in Pearl River Estuary Ecological Zone

Date\ Sample No.	21, 23/10/2012 Dzp/m	Date\ Sample No.	2/11/2012 Dzp/m
Z1	0.9	Z3	0.4
Z2	2	Z4	0.8
		Z5	0.8
		Z6	1
		Z7	1.1
		Z8	1.1
		Z9	1.2
		Z10	1
		Z11	0.8
		Z12	0.5
		Z13	0.7
		Z14	0.7
		Z15	0.8
		Z16	0.6
		Z17	0.9
		Z18	1.1
		Z19	0.9
		Z20	0.6

Table 3 Field measured water clarity in Xuwen Coral Reef Protection Zone

Date\ Sample No.	13/1/2013 Dzp/m	Date\ Sample No.	14/1/2013 Dzp/m
X1	0.7	X13	1.1
X2	0.9	X14	0.5
X3	0.85	X15	0.5
X4	0.95	X16	0.4
X5	1.1	X17	0.5
X6	0.9	X18	1.1
X7	0.9	X19	1.1
X8	1	X20	1.5
X9	1.1	X21	1.4
X10	0.8	X22	1.4
X11	0.9	X23	1.1
X12	1.1	X24	0.85
		X25	1.1

徐闻珊瑚礁自然保护区实测数据显示(表 3), 徐闻珊瑚礁自然保护区的平均透明度为 0.95 m, 透明度的范围在 0.4~1.5 m 之间, 最小透明度为 0.4 m, 最大透明度为 1.5 m。由于周围没有大的河流, 徐闻珊瑚礁自然保护区的水产养殖是该区域近海岸透明度较低的一个重要原因^[10]。

综上所述, 珠江口生态区和徐闻珊瑚礁自然保护区透明度值均较低, 透明度范围较窄, 而且不同区域影响因素不同, 造成反演近海岸水域透明度比较困难, 近海岸是人类活动和生物活动的主要聚集地, 研究近海岸水体透明度具有重要意义并具有挑战性。

3.2 基于改进半分析光谱模型的透明度反演与精度验证

为验证模型的适用性, 选择不同区域(徐闻珊瑚礁保护区和珠江口生态控制区)、不同时相(2012 年 10 月 21 日, 23

日, 11 月 2 日、2013 年 1 月 13 日—14 日)野外实测的 45 条反射率光谱进行透明度的反演。潮汐改正前, 反演结果如图 2(a)所示, 除个别样本外, 反演结果与实际测量结果变化趋势基本一致, 除了 Z1 和 Z2 采样点的反演结果与实测结果比较接近, X1~X25 以及 Z3~Z20 反演值比实测值整体偏高 0.4 m 左右, 根据表 1 描述, 2012 年 10 月 21、23 日对应于农历九月初七和初九为小潮, 2012 年 11 月 2 日和 2013 年 1 月 13、14 日对应于对应农历九月十九和对应农历十二月初二, 初三, 属于大潮, 因此研究中根据潮汐与透明度的经验关系对反演结果进行了潮汐修正, 对模型加了潮汐修正系数 a_1 , 大潮时取 0.4, 小潮时取 0.0。修正后的结果[图 2(b)]除了透明度小于 0.5 m 的以外, 大于 0.5 m 的反演结果都与实测结果有较好的一致性。

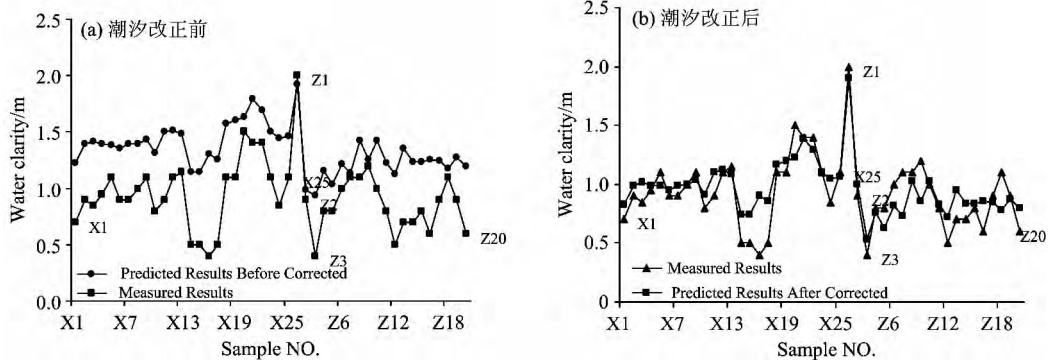


Fig 2 Comparison between the measured and predicted values of water clarity by proposed model

X1~X25 were sampled in January 13, 14, 2013; Z1 and Z2 were sampled in October 21, 23, 2012;

Z3~Z20 were sampled in November 2, 2012

为作比较, 同时采用了 Doron^[3]提出的经验模型、He^[1]提出的半分析模型(采用 QAA 算法^[5]计算吸收系数和散射系数)对中国南海近海进行了透明度的反演, 从表 4 可以看出, He 提出的半分析算法用于近海岸水体透明度反演, 决定性系数很小($R^2=0.088$), 反演的透明度整体也偏低, 主要原因可能是 QAA 算法适用于较清洁的水体(遥感反射率

小于 0.01 的清洁水体)^[5], 而本研究区为遥感反射率远大于 0.01 的低透明度水域, 因而套用该算法于本研究区会产生很大的误差。Doron^[3]提出的经验模型平均绝对误差为 0.14, 平均相对误差为 17.9%, 决定系数 R^2 为 0.637, 精度最好, 然而构建的经验算法[式(9)和式(10)], 不同的区域系数不同, 很难得到一个统一的模型。

Table 4 Validation of three different algorithms based on the measured data(N=45)

Algorithms	Line regression model of predicted and measured water clarity	R^2	Average absolute error/m	Average relative error/%
This paper' Model	$y=0.5967x+0.4105$	0.663	0.14	19.5
He' Model	$y=0.6233x+0.3504$	0.088	0.64	70.9
Doron' EMP algorithm	$y=0.5849x-0.2535$	0.637	0.14	17.9

y is the predicted water clarity, x is the measured water clarity

珠江口生态保护区的经验模型

$$Z_{sd} = 1.888\gamma_0 \left(\frac{R(0^+, 490)}{R(0^+, 550)} - 0.52 \right),$$

$$\gamma_0 = 2.2901, R^2 = 0.545 \quad (9)$$

徐闻珊瑚礁自然保护区的经验模型

$$Z_{sd} = 1.888\gamma_0 \left(\frac{R(0^+, 490)}{R(0^+, 550)} - 0.52 \right),$$

$$\gamma_0 = 1.9043, R^2 = 0.732 \quad (10)$$

与 Doron^[3]提出的经验模型、He^[1]提出的半分析模型相比, 本研究提出的算法经潮汐系数修正后与实测透明度的决定系数为 0.663, 绝对平均误差为 0.14 m, 相对平均误差为 19.5%。上述比较结果进一步说明, 本研究构建的半分析算法对于近海岸水体, 具有较好的普适性, 可以实现较高准确度的透明度遥感反演。

4 结 论

由于不同区域水体光学特性各不相同,所以,目前通过光谱模型反演近海岸水域透明度具有较大的挑战性。通过推导 490 nm 处垂直漫衰减系数 $K_d(490)$ 、光束衰减系数 $c(490)$ 和遥感反射率与透明度的关系,改进 Preisendorfer 等^[12,13]提出的透明度(Z_{sd} , secchi depth)反演理论,建立了基于两波段反射率比值和潮汐系数修正的适用于中国南海近海岸二类水体海水透明度反演的简单半分析光谱模型。

将所提出的算法应用于 2012 年 10 月 21 日—23 日、2012 年 11 月 2 日珠江口生态区和 2013 年 1 月 13 日—14 日徐闻珊瑚礁灯楼角、水尾角近海岸水域透明度反演,结果发现实测值与反演值变化趋势基本一致。由于潮汐对计算结果

产生 0.4 m 的偏差,因此,对模型进一步做了潮汐系数修正,潮汐修正后模型反演的透明度与实测透明度的决定系数为 0.663,绝对平均误差为 0.14 m,相对平均误差为 19.5%。与前人提出的模型相比^[1,3],本文提出的模型相对简单(只需要 490 与 560 nm 两个波段处遥感反射率的比值),即可完成透明度的反演,对于近海岸低透明度水体(透明度小于 2 m)具有精度较高和计算简便两个优点。

由于模型构建所用数据的研究区属于两个不同透明度范围的近岸混浊二类水体,且两个研究区也有着不同的污染物类型,因此认为该模型可以适用于混浊近岸二类水体的透明度反演。对于清澈水体的适用性有待进一步验证。但目前没有获取潮高数据,没有对透明度与潮汐有关的机制进行深入分析,期待下一步工作对此进行详细的分析探讨。

References

- [1] HE Xian-qiang, PAN De-lu, HUANG Er-hui, et al(何贤强,潘德炉,黄二辉,等). Engineering Sciences(中国工程科学), 2004, 6(9): 33.
- [2] Nuchanart Sriwongsitanon, Kritsanat Surakit, Sansarith Thianpopirug. Journal of Hydrology, 2011, 405: 203.
- [3] Maéva Doron, Marcel Babin, Odile Hembise, et al. Remote Sensing of Environment, 2011, 115: 2986.
- [4] Maritorena S, Siegel D A, Peterson A. Applied Optics, 2002, 41(15): 2705.
- [5] Lee Z P, Carder K, Amone R. Applied Optics, 2002, 41(27): 5755.
- [6] Maritorena S, Siegel D A, Peterson A R. Applied Optics, 2002, 41: 2705.
- [7] Mueller J L. NASA Technical Memorandum 2000-206892, Greenbelt, Maryland; NASA-GSFC. 2000, 11: 24.
- [8] Berthon J F, Zibordi G, Doyle J P, et al. NASA Technical Memorandum 2002-206892, Greenbelt, Maryland; NASA-GSFC. 2002, 20: 1.
- [9] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. Journal of Geophysical Research, 1988, 93: 10909.
- [10] SONG Chao-jing, ZHAO Huan-ting, WANG Li-rong(宋朝景,赵焕庭,王丽荣). Tropical Geography(热带地理), 2007, 27(4): 294.
- [11] TANG Jun-wu, TIAN Guo-liang, WANG Xiao-yong, et al(唐军武,田国良,汪小勇,等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2004, 8(1): 37.
- [12] Preisendorfer R W. Limnology and Oceanography, 1986, 31(5): 909.
- [13] Tyler J E. The Secchi Disc. Limnology and Oceanography, 1968, 8(1): 1.
- [14] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: C06003.
- [15] Albert A, Mobley C D. Optics Express, 2003, 11(22): 2873.

Estimation of Water Clarity in Offshore Marine Areas Based on Modified Semi-Analysis Spectra Model

HAN Liu-sheng^{1,2}, CHEN Shui-sen^{2*}, CHEN Xiu-zhi^{1,2}, LI Dan¹, LI Yong¹, SUN Lin³, LU Chu-qian⁴, CHEN Wei-qi²

1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Guangzhou Institute of Geography, Guangzhou 510070, China

3. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China

4. South China Sea Environment Monitoring Center, State Oceanic Administration, Guangzhou 510300, China

Abstract The main objectives of the research described in the present paper are to develop a semi-analysis model of water clarity for case 2 waters without inputting the absorption and scattering coefficient, which are not easy to be obtained for offshore marine areas so far. Based on the Z_{sd} (Secchi depth)inversion theory, a simple semi-analysis spectra model was established for offshore seawater clarity by analyzing the relationship between vertical diffuse attenuation coefficient $K_d(490)$ and the beam attenuation coefficient $c(490)$ with remote sensing reflectance. This semi-analysis spectra model needed two band reflectance ratios on-

ly, while tidal correction was produced for this model to improve the precision of the retrieving results. The semi-analysis spectra model was applied to ASD hyperspectral reflectance data measured in the Pearl River Estuary Ecological Zone (October 21, 23, 2012, November 2, 2012; $N=20$) and the Xuwen Coral Reef Protection Zone (January 13, 14, 2013, $N=25$) which covered different water body of tidal times and different pollution sources. The results indicated that the changing tendency of predicted values was consistent with the synchronous measurement values after comparing them. However, water clarity calculated by the ASD hyperspectral reflectance measured in spring tidal time, generated 0.4 m deviation compared with in-situ water clarity, while water clarity calculated by the ASD hyperspectral reflectance measured in neap tidal time is close to the in-situ water clarity. So the tidal correction coefficient of 0.4 was further applied for the model. After modification, the coefficient of determination between the inversed and measured water clarity was 0.663, the average absolute error was 0.14 m and the average relative error was 19.5%. Research demonstrated that this semi-analysis inversion algorithm just needs two band reflectance ratio to complete the inversion of water clarity, which is simple and works relatively well for lower clarity (less than 2 meters) waters compared to He'(2004) and Doron'(2011) algorithms.

Keywords Offshore; Water clarity; Spectra model; Semi-analysis algorithm

(Received Apr. 29, 2013; accepted Jul. 24, 2013)

* Corresponding author