

基于固有光学特性的北部湾透明度遥感反演及其检验^①

魏国妹^{②*} 商少凌^{③*} 李忠平^{**} 兰 健^{***}

(* 厦门大学近海海洋环境科学国家重点实验室 厦门 361005)

(** Northern Gulf Institute, Mississippi State University MS 39529)

(*** 中国海洋大学海洋系 青岛 266100)

摘 要 综合了固有光学量的反演和透明度与固有光学量的关系,构成了基于固有光学特性的透明度遥感算法。将此算法应用于北部湾的 MODIS 遥感数据,得到了该区域的透明度,并利用实测透明度对遥感反演结果进行了验证。通过对时间窗口为 $\pm 48\text{h}$,空间窗口为 1km 的 30 组实测与遥感匹配数据的统计分析(实测透明度在 $1.8\sim 26.0\text{m}$ 范围),得到平均百分比误差(ϵ)为 22%,对数均方根误差($\log_RMSE$)为 0.121。而基于叶绿素的经验算法反演的透明度, ϵ 为 42%, $\log_RMSE$ 为 0.185。上述结果说明,至少对于北部湾这类近岸水体,海色遥感结合基于固有光学量的算法,可以实现较高准确度的透明度遥感反演。

关键词 北部湾,透明度,半分析算法,MODIS

0 引 言

水体透明度(Secchi depth, Z_{sd})是指放入水中的黑白相间的塞氏盘(Secchi disk)开始看不见时所到达的深度。它是描述海水特性的一个重要参数,它可以辅助水团、流系识别^[1],在军事上是确定潜艇潜没的深度和布设水雷的重要参考参数^[2]。在海洋水质监测中,它是一种直观的指示参数,它可粗略反映水体中悬浮物的多少和水体的污染情况^[3]。此外,在渔业上可根据透明度(Z_{sd})来判断鱼类的活动范围和数量^[4]。尽管透明度的实时测量操作简单,但要获得大海域范围的海水透明度的时空分布,通过船舶出航来完成是不现实的,而利用海色遥感反演则是十分重要的手段。

已有不少学者建立了用于不同水域和不同遥感系统的透明度遥感算法^[5-7],如 Morel 等^[5]在 Preisendorfer^[8]和 Tyler^[9]的理论的基础上,建立了透明度(或真光层深度)和叶绿素浓度之间的经验关系模式,但该算法可能仅适用于一类水体。王晓梅等^[6]建立了黄海、东海二类水体透明度统计反演模式,但此类算法需要预先取得大量的现场数据来调

试模式参数,区域性要求比较强,相对而言缺乏普适性。何贤强等^[7]建立了海水透明度的半分析(quasi-analytical)模式,它在一类水体中可取得较好的反演结果,相对平均误差为 23%,但作者没有给出透明度小于 10m 的浑浊水体的检验结果,且指出,对于此类水体,反演误差较大,反演结果一般也偏大。

Preisendorfer^[8]通过理论推导指出,除了测量时的环境条件和人员因素外, Z_{sd} 主要取决于水体的固有光学特性(inherent optical properties, IOP)。因此,在 Preisendorfer^[8]和 Tyler^[9]的理论的基础上,Doron 等^[10]给出了基于 490nm 波段垂直漫衰减系数和光束衰减系数的 Z_{sd} 计算方法。为了获得 490nm 波段的漫衰减系数和光束衰减系数,参考半分析算法(quasi-analytical algorithm, QAA)^[11],Doron 等^[10]以 709nm 为起始波段开始推导水体的固有光学量,该起始波段在高浊度水体中固然更有效,但对于大洋和大部分的近岸水体,由于水分子在长波处的强烈吸收,以相对较短波段作为起始波段则是必需的^[11]。

故此,我们尝试采用已被广泛应用的 QAA 算法^[12],由遥感反射率反演吸收与散射系数,而后结合 Doron 等^[10]的 Z_{sd} 计算公式,形成一个基于固有光

① 863 计划(2006AA09A302,2008AA09Z108),国家自然科学基金(40521003),国家 908 专项 908-01-ST09 项目和厦门大学新世纪人才计划联合资助。

② 女,1985 年生,硕士;研究方向:海洋遥感;E-mail: weiguomei@163.com

③ 通讯作者,E-mail: slshang@xmu.edu.cn; slshang@gmail.com
(收稿日期:2008-08-04)

学量的透明度遥感算法(为表述简便,以下称之为 IOP 算法),然后应用中分辨率成像光谱(MODIS)遥感反射率数据反演 Z_{sd} ,采用北部湾的实测 Z_{sd} 数据进行检验。

1 透明度水色反演方法

Preisendorfer^[8]和 Tyler^[9]提出,可见光在均匀介质中传播时, Z_{sd} 可表达为

$$Z_{sd} = \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)}{K_d(v) + c(v)} \quad (1)$$

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。根据文献[8], $\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)$ 是一个常数,其变化范围在 5 到 10 之间。 $K_d(v)$ 和 $c(v)$ 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^[10]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 7 个航次调查构成的数据集(COASTLOOC dataset),发现 $K_d(v) + c(v)$ 与 $K_d(490) + c(490)$ 之间高度相关,可以一个多项式拟合二者的关系,因此 Z_{sd} 可以下式估算:

$$Z_{sd} = \frac{\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)}{P(K_d(490) + c(490))} \quad (2)$$

这里

$$P(X) = 0.0989X^2 + 0.8879X - 0.0467 \quad (3)$$

$K_d(490)$ 和 $c(490)$ 是水的吸收系数 $a(490)$ 、后向散射系数 $b_b(490)$ 和总散射系数 $b(490)$ 的函数^[13,14]。北部湾水体受河流影响较大,水中悬浮无机质较多^[15],因而颗粒后向散射系数和颗粒总散射系数的比值(b_{bp}/b_p)考虑为 0.02^[16],由此 $K_d(490)$ (见 Lee 等^[14])和 $c(490)$ 表示为

$$K_d(490) = a(490) + 3.47 \times b_b(490) \quad (4)$$

$$c(490) = a(490) + b_{bp}(490)/0.02 + b_w(490) \quad (5)$$

式中 $a(490)$, $b_b(490)$ 和 $b_{bp}(490)$ 采用 QAA 算法由遥感反射率计算,详见文献[12]。 $b_w(490)$ 为纯水的散射系数,取 0.0030m^{-1} ^[17]。

2 北部湾透明度 Z_{sd} 的计算及检验

2.1 数据来源

现场观测数据来自“908-01-ST09”项目 2006 年 7 月 15 日至 8 月 7 日和 2006 年 12 月 25 日至 2007 年 1 月 22 日两个北部湾航次。遥感数据为美国 NASA 提供的 MODIS 归一化离水辐射率(nLw) L2 级数据,空间分辨率 1km。

由于受云的影响较大,在卫星过境短时间间隔内的实测与卫星匹配数据极少,为增加匹配数据组,我们将时间窗口扩大到 $\pm 48\text{h}$,由此获得遥感与实测匹配数据 34 组,分布位置见图 1。

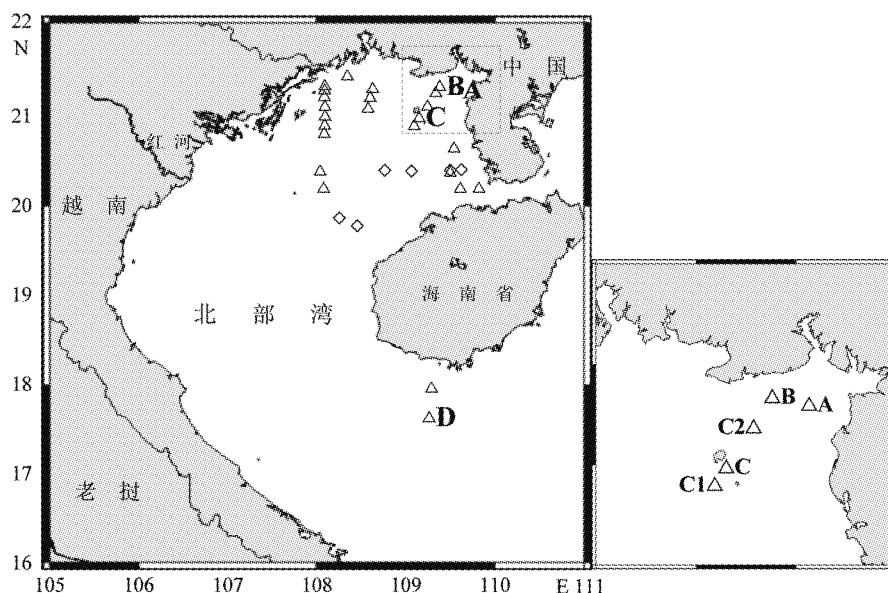


图 1 2006 年夏季($\triangle$)及 2007 年冬季($\diamond$)北部湾航次站位图;左图小方框指 A、B、C 站的范围,放大图见右下角

2.2 计算及误差分析方法

在整个 Z_{sd} 计算流程中唯一需要特定选择的参

数是 $\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)$, 它的取值在 5 ~ 10 之间,它可能随

着观测时间、环境及观测人的视力发生变化。Morel 等^[5]采用 108323 个现场数据(美国海洋数据中心, US-NODC)进行分析,认为 $\ln\left(\frac{D_0}{D_{\min}}\right)$ 取 5.5 为最佳平均值。因而对北部湾区域,我们同样选择 $\ln\left(\frac{D_0}{D_{\min}}\right) = 5.5$ 的经验系数进行计算。

为作比较,我们同时采用了 Morel 提出的经验算法^[5]进行计算,简称为[Chl]算法:

$$(Z_{sd})_{5.5} = 8.5 - 12.6X + 7.36X^2 - 1.43X^3 \quad (6)$$

$$X = \log([Chl]) \quad (7)$$

式(6)中,角标 5.5 是常数 $\ln\left(\frac{D_0}{D_{\min}}\right)$ 的取值;式(7)中的[Chl]是 MODIS 标准产品,由 OC3M 算法^[18]获

得。

为了比较反演结果与实测结果,我们计算了平均百分比误差(ϵ)和对数均方根误差($\log_RMSE$)。定义如下:

$$\epsilon = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i^{dir} - x_i^{mea}}{x_i^{mea}} \right| \right) \times 100\% \quad (8)$$

$$\log_RMSE = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\log(x_i^{dir}) - \log(x_i^{mea}))^2} \quad (9)$$

x^{dir} 表示反演值, x^{mea} 表示实测值。

2.3 结果与讨论

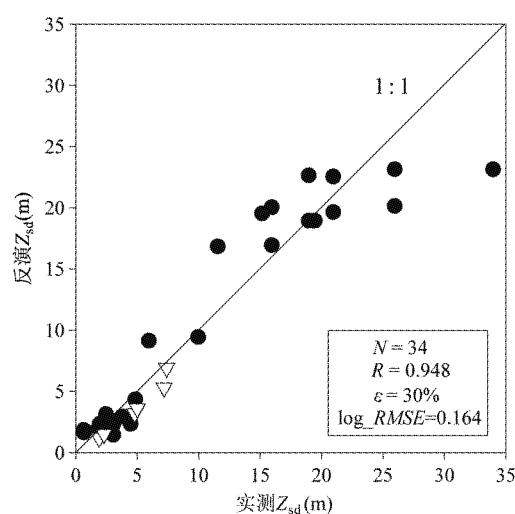
IOP 算法与[Chl]算法的反演值和实测值进行对比的结果见表 1 和图 2。

表 1 实测值和两种算法的反演值的比较

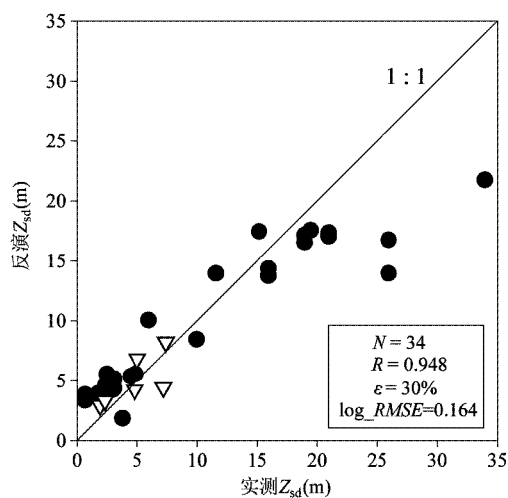
经度(E)	纬度(N)	实测 $Z_{sd}(m)$	IOP 算法		[Chl]算法	
			反演值(m)	误差(%)	反演值(m)	误差(%)
109.5656	21.3021	0.7	1.6	129	3.3	371
109.3820	21.3402	0.7	1.8	157	3.8	443
109.3374	21.2723	1.8	1.8	0	3.9	117
109.2449	21.1207	3.0	2.3	23	4.2	40
109.1521	20.9912	3.1	1.4	55	4.3	39
109.0946	20.9039	2.4	1.8	25	4.6	92
108.6298	21.3173	4.5	2.3	49	5.3	18
108.6020	21.2187	6.0	9.1	52	10.0	67
108.5780	21.0983	15.2	19.5	28	17.4	15
108.3450	21.4594	3.8	2.9	24	1.8	53
108.0915	21.3501	2.0	2.3	15	3.8	90
108.0893	21.3008	4.9	4.3	12	5.5	12
108.0865	21.2280	10.0	9.4	6	8.4	16
108.0935	21.1184	11.6	16.8	45	13.9	20
108.0944	21.0087	16.0	16.9	6	13.7	14
108.0905	20.9077	19.0	18.9	1	16.5	13
108.0864	20.8155	21.0	19.6	7	17.3	18
109.5427	20.6519	3.1	2.3	26	5.1	65
109.4997	20.3821	3.0	2.2	27	4.8	60
108.0392	20.3936	26.0	23.1	11	16.7	36
109.6136	20.2002	2.5	3.1	24	5.5	120
109.8225	20.2015	2.1	1.6	24	4.0	91
108.0944	21.0087	16.0	20.0	25	14.3	11
108.0905	20.9077	19.0	22.6	19	17.1	10
108.0864	20.8155	21.0	22.5	7	17.0	19
108.0789	20.2016	26.0	20.1	23	13.9	47
109.2635	17.6356	34.0	23.1	32	21.7	36
109.2889	17.9665	19.5	18.9	3	17.5	10
109.6258	20.3967	1.9	1.2	37	2.9	53
109.5006	20.3894	2.3	1.5	35	3.3	44
109.0664	20.3806	4.8	3.2	33	4.2	13
108.7663	20.3892	7.2	5.3	26	4.4	39
108.2550	19.8564	7.4	6.9	7	8.2	11
108.4562	19.7688	5.0	3.6	28	6.8	36

由表 1 结果可知,对于本文所研究的 34 组数据,实测透明度在 0.7~34.0 m 的范围内变动,反演误差为 0~157% (IOP 算法) 和 10%~443% ([Chl] 算法) 不等,[Chl] 算法的反演误差显著高于 IOP 算法。对于 IOP 算法,高误差出现在 A (109.5656E, 21.3021N)、B (109.3820E, 21.3402N) 和 C (109.1521E, 20.9912N) 站(具体位置见图 1),误差范围为 55%~157%,相应 [Chl] 算法得到的误差范围为 39%~443%。A 和 B 站处于近岸位置,水深都是

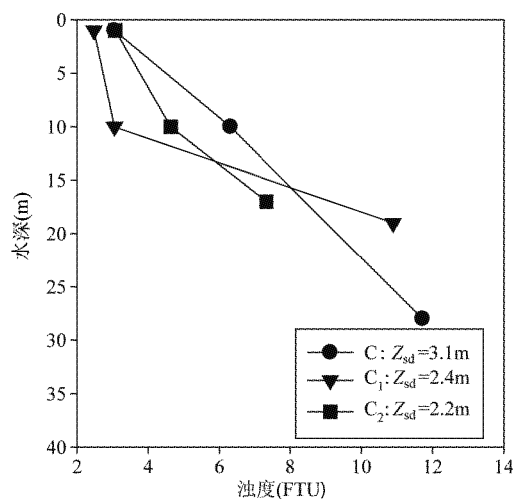
14m,是仅有的两个实测透明度小于 1m 的站位(皆为 0.7m)。测量当天的海况分别是 4 级和 5 级,我们认为底层沉积物的再悬浮以及海浪很可能直接影响实测结果,其可靠程度较低。C 站和周围站点 (C_{1-2}) 相比(详细位置参见图 1 右下角),现场实测叶绿素和浊度相对较高 (>50%),但实测透明度却高于 (>30%) 周围站点(图 3),由此可以推断,该站点的实测数据存在问题。



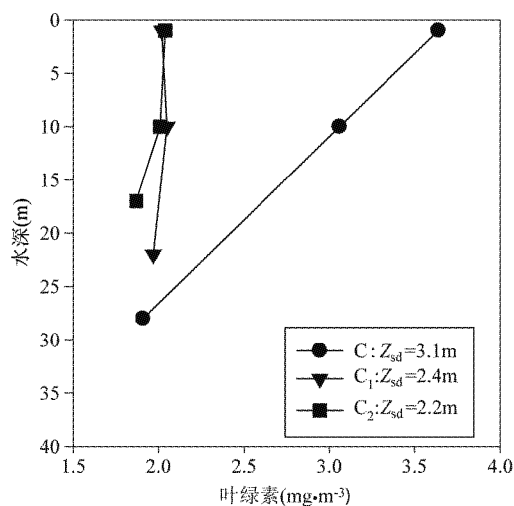
(a) IOP 算法



(b) [Chl] 算法

图 2 北部湾 Z_{sd} 实测值和反演值的比较 (●为夏季, ▽为冬季)

(a) 浊度



(b) 叶绿素浓度

图 3 C 站和周围站点 (C_{1-2}) 的透明度、浊度和叶绿素 a 浓度

由图 2 可见,两种算法的 Z_{sd} 反演结果与实测值皆呈高度相关。然而,采用基于一类水体建立的 [Chl] 算法^[5] 计算,在透明度较小时,反演值偏高;透

明度较大时,反演值则偏低。IOP 算法的反演值则相对均匀地分布在 1:1 线周围,惟有一个数据点显著偏离 1:1 线。该点为所研究数据组中的最大透明

度点(站点 D(109.2635E, 17.6356N), 具体位置参见图 1)。原因何在, 尚难有定论, 可能是算法在高透明度水体中存在局限性, 也可能是深水中洋流造成测量绳的倾斜使得实测数据失真, 有待未来加强数据采集工作, 做进一步的检验。

根据以上分析, 我们判定 C 站的实测数据为异常, 同时考虑到 A、B 两个透明度极低站点 ($< 1\text{m}$) 的反演质量难于把握, 最大透明度点偏离 1:1 线的原因也尚难有定论, 故而排除这 4 个站点, 进行误差统计。结果表明, 当透明度在 $1 \sim 26\text{m}$ 之间, [Chl] 算法平均百分比误差 (ϵ) 为 42%, 最大误差 120%, $\log_RMSE$ 为 0.185。结合 Doron 等^[10]提出的 Z_{sd} 关系式和 QAA 后形成的 IOP 算法, ϵ 为 22%, 最大误差 52%, $\log_RMSE$ 为 0.121。两种算法差异甚大, 最主要的原因在于基于叶绿素浓度的 Z_{sd} 算法完全是一种经验算法, 既依赖于叶绿素的经验反演, 又依赖于 Z_{sd} 和 [Chl] 的经验关系。当水的光学系数由非叶绿素成分决定时 (如有色溶解有机物或再悬浮的沉积物), 或近岸经验反演的 [Chl] 受近岸高浓度颗粒碎屑和有色溶解有机物的干扰时, 都足以让 Z_{sd} 产生很大的误差^[19,20]。

3 结 论

透明度是一个具有实用价值的水质参数, 实际测量简便, 但要实现大面积、多时段的观测只能依靠遥感手段。不少研究者已试图建立各种算法实现透明度的遥感反演, 但在不同程度地存在局限性。本研究通过结合 Doron 等^[10]给出的透明度计算公式与反演 IOP 的 QAA 算法^[12], 构成基于 IOP 的透明度反演算法, 并将之应用于北部湾的测量。采用两个航次 (2006 年夏季和 2007 年冬季) 的实测数据对遥感透明度进行检验, 当时间窗口为 $\pm 48\text{h}$, 空间窗口为 1km , 实测透明度在 $1 \sim 26\text{m}$ 的范围内, 该算法反演的透明度, 平均百分比误差为 22%, 最大误差 52% (该点实测 Z_{sd} 为 6.0m), 对数均方根误差 $\log_RMSE$ 为 0.121, 与 Morel 等^[5]提出的基于叶绿素的算法相比, 反演准确度有了显著的提高。诚然, 本研究所采用的检验数据, 就时空覆盖度和数据量而言, 还是有限的。为了将此算法应用于其他区域和季节的 Z_{sd} 反演, 进一步的测量和研究将是必要的。需要特别指出的是, 我们没有利用实测数据来确定或修订算法参数, 而是利用独立的实测数据来检验和评价由 MODIS 数据反演的遥感 Z_{sd} , 并由此来衡量算法的

适用性。

需要指出的是, 本研究采用的 Z_{sd} 计算公式中, 参数 $\ln\left(\frac{D_0}{D_{min}}\right)$ 的取值可能随着观测时间、环境和观测者而变化, 这一不确定性是伴随着透明度这一参数本身的定义而产生的。而另一个同样反映水体透明度的参数——真光层深度, 是科学上定义严格的一个概念, 计算之需要的物理量都建立在海洋光学理论的基础上, 而且可以通过电子光学仪器准确测量, 将之用于衡量水体透光程度, 可以在很大程度上降低不确定性^[12]。

致谢: 国家 863 计划 (2006AA09A302, 2008AA09Z108)、国家自然科学基金 (40521003)、国家 908 专项 908-01-ST09 项目、厦门大学新世纪人才计划联合资助。感谢现场调查航次首席科学家厦门大学李炎与胡建宇教授的支持。

参考文献

- [1] 张绪琴. 渤海、黄海和东海的水色分布和季节变化. 黄渤海海洋, 1989, 7(4): 39-45
- [2] 何贤强, 潘德炉, 黄二辉等. 中国海透明度卫星遥感监测. 中国工程科学, 2004, 6(9): 33-37
- [3] Jamu D M, Lu Z M, Piedrahita R H. Relationship between secchi disk visibility and chlorophyll a in aquaculture ponds. *Aquaculture*, 1999, 170: 205-214
- [4] 周雅静, 林建国, 俞慕耕. 东海透明度特征探讨. 东海海洋, 1999, 17(3): 67-72
- [5] Morel A, Huot Y, Gentili B, et al. Examining the consistency of products derived from various ocean color sensors in open ocean (Case 1) waters in the perspective of a multi-sensor approach. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 111: 69-88
- [6] 王晓梅, 唐军武, 丁静等. 黄海、东海二类水体漫衰减系数与透明度反演模式研究. 海洋学报, 2005, 27(5): 38-45
- [7] 何贤强, 潘德炉, 毛志华等. 利用 SeaWiFS 反演海水透明度的模式研究. 海洋科学, 2004, 26(5): 55-62
- [8] Preisendorfer R W. Secchi disk science: Visual optics of natural waters. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(5): 909-926.
- [9] Tyler J E. The Secchi disc. *Limnology and Oceanography*, 1968, 8(1): 1-7
- [10] Doron M, Babin M, Mangin A, et al. Estimation of light penetration, and horizontal and vertical visibility in oceanic and coastal waters from surface reflectance. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, C06003
- [11] Lee Z P, Carder K, Amone R. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters. *Applied Optics*, 2002, 41(27): 5755-

- 5772.
- [12] Lee Z P, Weidemann A, Kindle J, et al. Euphotic zone depth: Its derivation and implication to ocean-color remote sensing. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112, C03009
- [13] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters. London: Academic Press, 1994
- [14] Lee Z P, Du K P, Arnone R. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, C02016
- [15] Maren D S V, Hoekstra P. Dispersal of suspended sediments in the turbid and highly stratified Red River plume. *Continental Shelf Research*, 2005, 25: 503-519
- [16] Twardowski M S, Boss E, Macdonald J B, et al. A model for estimating bulk refractive index from the optical backscattering ratio and the implications for understanding particle composition in case I and case II waters. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (C7): 14129-14142
- [17] Morel A. Optical properties of pure water and pure sea water. In: *Optical Aspects of Oceanography*. London: Academic Press, 1974. 17
- [18] O'Reilly J E, Maritorena S, Siegel D, et al. Ocean color chlorophyll a algorithms for SeaWiFS, OC2, and OC4: Version 4. In: *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3*. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. 9-23
- [19] Campbell J W. Development of algorithms and strategies for monitoring chlorophyll and primary productivity in coastal ocean, estuarine and inland water ecosystems. <http://modis.gsfc.nasa.gov/MODIS/OCEANS/REPORTS/campbell.2003.finalReport.pdf>; NASA, 2003
- [20] Zhang C Y, Hu C M, Shang S L, et al. Bridging between SeaWiFS and MODIS for continuity of chlorophyll-a concentration assessments off Southeastern China. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 102: 250-263
- [21] 冯士筭, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论. 第 1 版. 北京: 高等教育出版社, 2005. 464-466

An IOP-based remote-sensing algorithm for Secchi depth and its validation for the Gulf of Tonkin

Wei Guomei^{*}, Shang Shaoling^{*}, Lee Zhongping^{**}, Lan Jian^{***}

(^{*} State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005)

(^{**} Northern Gulf Institute, Mississippi State University, MS 39529)

(^{***} Department of Oceanology, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract

By combining the retrieval of inherent optical properties (IOP) with the relationship between IOP and Secchi depth (Z_{sd}), an IOP-based algorithm was formulated to estimate Z_{sd} from remote sensing of water color. This algorithm was further applied to the moderate-resolution imaging spectroradiometry (MODIS) data over the Gulf of Tonkin to get Z_{sd} from satellite observations, and the calculated results were evaluated with the data from the *in situ* measurements. With a time window of $\pm 48\text{h}$ and a spatial range of 1km, 30 match-up points were found (the measured Z_{sd} was in a range of 1.8 ~ 26.0m). By comparing the Z_{sd} from the IOP-based algorithm with the Z_{sd} from *in situ* measurements, the average percentage error (ε) was 22%, and the root-mean-square-error in log scale ($\log_RMSE$) was 0.121. When the satellite Z_{sd} is calculated with the traditional chlorophyll-based approach, however, ε is 42% and the $\log_RMSE$ is 0.185. Clearly, these results demonstrate that, at least for waters in the Gulf of Tonkin, much more accurate Z_{sd} estimation is achieved when it is calculated with the IOP-based algorithm.

Key words: Gulf of Tonkin, Secchi depth, quasi-analytical algorithm, moderate-resolution imaging spectroradiometry (MODIS)