

基于环境一号卫星的四十里湾透明度遥感反演

禹定峰^{1,2}, 邢前国¹, 周斌², 孙元芳², 周燕², 盖颖颖², 施平¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东烟台 264003; 2. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东青岛 266001)

摘要:利用环境一号小卫星的 CCD 数据及同步地面观测数据,进行了烟台四十里湾海域透明度的遥感反演研究。结果表明红蓝波段比值与实测透明度具有较高的相关性,并在此基础上建立了该区域水体透明度的遥感反演模型,反演值与实测值的平均相对误差为 8.6%,均方根误差为 0.1 m。据此模型绘制了四十里湾水体透明度分布图。研究发现透明度具有近岸低、远岸高的特点,且从近岸向外海基本呈逐渐递减的趋势。

关键词:环境一号;遥感;透明度;四十里湾

中图分类号:X87

文献标识码:A

文章编号:1007-6336(2014)04-0580-05

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2014.04.015

Retrieval of secchi disk depth in Sishili Bay using the HJ-1B CCD image

YU Ding-feng^{1,2}, XING Qian-guo¹, ZHOU Bin², SUN Yuan-fang²,
ZHOU Yan², GAI Ying-ying², SHI Ping¹

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266001, China)

Abstract: Secchi disk depth (*SDD*) is an important optical property of water related to water quality and primary production. The traditional sampling method is not only time-consuming and labor-intensive but also limited in terms of temporal and spatial coverage, while remote sensing technology can deal with these limitations. In this study, models estimating *SDD* have been proposed based on the regression analysis between the HJ-1 satellite CCD image and synchronous in situ measurements. The results illustrate the band ratio model of B3/B1 of CCD could be used to estimate Secchi depth in this region, with MRE of 8.6% and RMSE of 0.1 m, respectively. In addition, *SDD* was deeper in offshore waters than in inshore waters.

Key words: HJ-1 satellite; remote sensing; secchi disk depth; Sishili Bay

透明度是指放入水中的塞克盘能够看得见的最大深度^[1],使用塞克盘 (Secchi disk) 测量水体透明度 (secchi disk depth, *SDD*) 迄今已有超过 240 a 的历史。它是描述水体光学性质的基本参数之一,也是水质调查中的一个重要指标,反映了水体的透光能力。在军事上,透明度是确定潜艇

潜没深度和布设水雷的重要参数^[2]。在海洋水质监测中,它是一种直观的指示参数,可以评估水体的富营养化程度。水体透明度的变化会严重影响沉水植被的生长以及依靠可见光捕食的鱼类和水鸟等水生动物的生存。此外,水体透明度可估算水体固有光学参数^[3-5]、叶绿素 *a* 浓度^[6] 甚至

收稿日期:2013-07-02,修订日期:2013-10-09

基金项目:中国科学院先导专项(XDA11020403);山东省留学人员科技活动择优资助项目(SR-12-H0-4)

作者简介:禹定峰(1986-)男,山东青岛人,副研究员,主要从事水色遥感研究,E-mail: seesevern7@gmail.com

通讯作者:邢前国,E-mail: qgxing@yic.ac.cn

是初级生产力^[7]。因此,水体透明度的研究对水环境变化、水体光学参数、水生生态系统以及初级生产力的深入研究具有重要意义。然而,尽管传统透明度测量方法操作简单,但要实现监测大面积水体透明度的时空变化,显然是不现实的。遥感技术具有快速、大面积、动态覆盖等优势,能弥补传统测法耗时长且费用高的缺陷,尤其是能监测人员较难到达的区域,因而逐渐成为监测水体透明度的重要且有效的手段之一。

SeaWiFS、MODIS、MERIS 等海洋水色卫星空间分辨率较低,对于海岸带水体水质参数监测存在一定难度。2008 年 9 月 6 日我国成功发射了专门用于环境与灾害监测的环境一号小卫星,其 30 m 的高空间分辨率可有效监测面积相对较小的水域,而较短的重访周期则有利于对水体的大规模实时监测。在水色遥感领域,目前该数据已被成功应用于悬浮物^[8]、叶绿素 *a*^[9]、黄色物质^[10]、营养盐^[11]、吸收和散射系数^[12] 等的遥感反演,然而,利用环境一号 CCD 数据进行透明度的遥感反演则尚未见报道。本研究以北黄海典型海岸带水体——四十里湾为研究区,综合利用地面实测数据和 HJ-1B CCD 遥感数据,建立该区域透明度遥感反演模型,并对透明度的变化特征及其影响因素进行分析。

1 数据与方法

1.1 研究区域

四十里湾位于胶东半岛北部海域,是中国北方沿海的一个重要养殖区。它三面邻陆,一面向海,其间散布有崆峒岛群,为一耳状半封闭型海域,面积约 130 km²,水深为 8 m~15 m,流入湾内的河流主要有逛荡河、辛安河和小鱼鸟河(图 1)。

近年来,随着烟台市经济社会的快速发展,四十里湾海域受污水排放、海水养殖、旅游观光等人类活动影响加剧,给该海域的生态环境带来了较大的压力,赤潮灾害频发,不仅给该海域的生态环境带来了较大的压力,而且给当地渔业养殖带来了极大的危害,严重影响了渔业经济的可持续发展。而透明度作为水质监测的一个重要指标,可以作为赤潮预警监测的参数^[13],因此,为监测该海域的生态环境变化,透明度的监测尤其重要。

1.2 地面实测数据

海水透明度测量采用塞克盘法,所用的透明

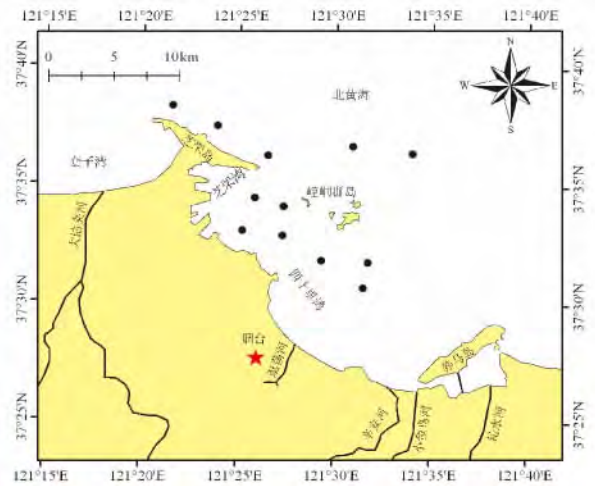


图 1 四十里湾及采样站点

度盘是直径为 30 cm 的白色木质圆盘,测量日期为 2009 年 6 月 22~23 日,时间为 10:00~14:00,共 12 个站点(图 1)。水体透明度的测量方法均按照 GB 17378.4-2007 第四部分的相关规定执行。

1.3 遥感数据

HJ-1A 和 HJ-1B 两颗卫星均装载有两台设计原理完全相同的 CCD (Charge-Coupled Device) 相机,以星下点对称放置,平分视场、并行观测,联合完成对地刈幅宽度为 700 km、地面像元分辨率为 30 m、4 个谱段的推扫成像。CCD 相机的主要参数如表 1 所示。

表 1 HJ-1A/B 卫星 CCD 相机的主要技术指标
Tab. 1 Main parameters of CCD onboard HJ-1A/B

波段	光谱范围/ μm	空间分辨率/m	幅宽/km	重访周期/d
1	0.43~0.52	30	360(单台)	4
2	0.52~0.60			
3	0.63~0.69		720(双台)	
4	0.76~0.90			

本研究所用的遥感数据为 HJ-1B CCD1 影像,其成像时间为北京时间 2009 年 6 月 23 日上午 10:58:26.27,轨道号为 450/68,该幅影像质量较好且覆盖本研究区。此外,成像时间与地面数据采集时间最为相近。

遥感数据的预处理主要包括辐射校正、几何校正和大气校正等。

辐射校正:利用绝对定标系数将 CCD1 的 DN 值转换为辐亮度图像,公式如下:

$$L = DN/a + L_0$$

式中: a 为绝对定标系数增益; L_0 为偏移量; L 为定标后的辐亮度,单位为 $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ 。其中 a 和 L_0 的具体参数由《HJ-1AB在轨绝对辐射定标系数》提供^[14](中国资源卫星应用中心,2009)。

几何校正:以成像时间为2010年9月27日上午10:51的Landsat-5 TM影像作为基准影像,对HJ-1B CCD1数据采用二次多项式进行几何校正,重采样方法选用最邻近法,几何校正总的均方

根误差为0.83。

大气校正:基于MODTRAN4+的FLAASH(Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)是目前世界上精度较高、应用较广的辐射传输模型。ENVI下的FLAASH模块采用向导式的流程来指导用户进行大气校正,具有简洁快速等特点。本研究在ENVI 5.0软件环境支持下,采用该模块对HJ-1B CCD1数据进行大气校正,输入的相关参数入表2所示。

表2 FLAASH大气校正基本参数

Tab.2 Parameters for atmospheric correction based on FLAASH

成像日期	成像时间	中心经度	中心纬度	传感器高度	像元大小
2009-06-23	02.58.26.27	121.4670388	37.554572	650 km	30 m
大气能见度	大气模式	气溶胶类型	地面高程	MODTRAN分辨率	CO ₂ 混合比例
40 km	中纬度夏季	海洋	0.05 km	15 cm ⁻¹	390 × 10 ⁻⁶

1.4 精度评价

透明度算法精度评价指标采用均方根误差(RMSE)和相对误差(RE),表达式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{est\ i} - x_{mea\ i})^2}{n}}$$

$$RE = \frac{|x_{est} - x_{mea}|}{x_{mea}} \times 100\%$$

式中: x_{est} 是透明度的反演值; x_{mea} 是透明度的实测值; n 为样本数。

1.5 透明度遥感原理

水体的光谱主要由纯水本身以及水中的有机物、无机物、颗粒和溶解物对太阳辐射的吸收和散射决定,同时也受水体各种状态影响。太阳辐射在水下的传输和分布主要受4种物质影响,即非生物悬浮颗粒物、浮游植物、溶解性有机物和纯

水。纯水的吸收特性是不变的,水体组分不同,这些物质对光的吸收和散射亦不同,传感器接受到的离水辐射也有差异。因此,水体组分含量的差别造成一定波谱范围反射率的显著不同,成为遥感定量监测水质参数的基础^[15]。

2 结果与讨论

2.1 透明度遥感反演模型建立

根据实测透明度站位的经纬度,采用3×3窗口对大气校正后的HJ-1B CCD1 4个波段单个像元作平均,以用于与实测透明度做相关性分析。受云层影响,能够匹配的只有8个站位。利用SPSS 19.0对CCD1的4个波段反射率与透明度进行皮尔逊相关性分析,其相关系数如表3所示。

表3 HJ-1B CCD1各波段或波段比值与透明度的相关分析

Tab.3 Correlation between SDD and single band or band ratios of CCD1 /HJ-1B

SDD/m	B1	B2	B3	B4	B4/B3	B4/B2	B4/B1	B3/B2	B3/B1	B2/B1	
SDD/m	1										
B1	-0.466	1									
B2	-0.409	0.971**	1								
B3	-0.603	0.904**	0.892**	1							
B4	-0.418	0.951**	0.991**	0.877**	1						
B4/B3	-0.429	0.930**	0.978**	0.845**	0.996**	1					
B4/B2	-0.502	0.942**	0.977**	0.914**	0.992**	0.988**	1				
B4/B1	-0.450	0.941**	0.986**	0.890**	0.998**	0.995**	0.997**	1			
B3/B2	-0.572	0.191	0.118	0.554	0.104	0.058	0.210	0.144	1		
B3/B1	-0.642	0.679	0.680	0.928**	0.668	0.631	0.740*	0.700	0.790*	1	
B2/B1	-0.358	0.880**	0.967**	0.848**	0.964**	0.959**	0.953**	0.967**	0.089	0.681	1

**在0.01水平(双侧)上显著相关;*在0.05水平(双侧)上显著相关。

由表 3 可以看出 4 个波段的反射率与透明度均呈负相关,这是因为透明度与水体中的悬浮物、浮游植物、黄色物质等密切相关,透明度越大,说明水体中这些物质的含量越少,因此水体的反射率就越低。除第 3 波段与透明度相关系数较高以外,其他 3 个波段反射率与透明度的相关系数普遍较低,分别为 -0.466, -0.409, -0.418。第 3 波段反射率与透明度的皮尔逊相关系数达到了 -0.603。Hellweger 等^[16]针对纽约港的研究表明, TM 第 3 波段(红)是反演水体透明度的重要波段,要优于传统的蓝绿波段,该结果与本文较为一致,其原因可能是该海域悬浮物浓度较高,水体较为浑浊,水体在红波段的后向散射较强,而水体透明度又与悬浮物含量有关。

波段比值算法是反演水质参数常用的方法,使用两个波段比值而不是单个波段的反射率或辐照度,有利于校正光照、大气等环境背景对测量结果的影响^[17]。在本研究中,为寻找 CCD 反演水体透明度的最佳波段比值,在 SPSS19.0 的支持下,我们分析了所有波段比值与透明度的相关性(表 3)。结果表明,第 3 与 1 波段遥感反射率的比值与透明度对数的相关系数最高,为 -0.642。这与 Olmanson^[18]和 Guan^[19]等的研究结果相一致,即红蓝波段比值与二类水体透明度存在较高的相关性。据此,建立了反演四十里湾水体透明度的指数模型(图 2),其决定系数为 0.5205,反演得到的透明度与实测透明度之间的平均相对误差为 8.6%、均方根误差为 0.1 m。由图 3 可以看出,反演得到的透明度与实测值基本均匀的分布在 1:1 线附近,表明该模型能用来反演该海域该时间段的水体透明度。

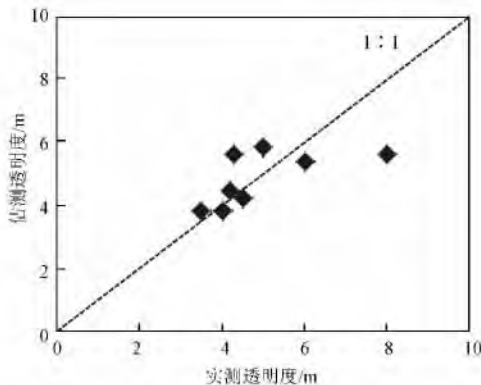


图 2 HJ-1B CCD1 波段比值 B3/B1 与实测透明度之间的关系
Fig. 2 Relationship between SDD and B3/B1 of CCD1/ HJ-1B

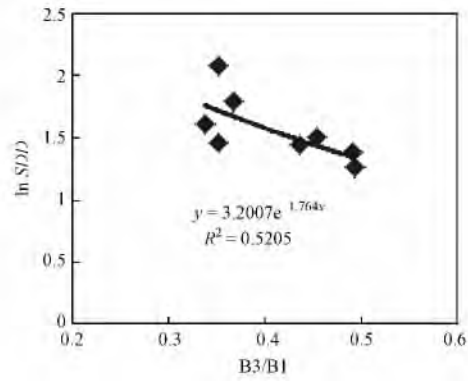


图 3 HJ-1B CCD1 反演得到的透明度与实测值的对比
Fig. 3 SDD estimated vs. the measured using CCD1/ HJ-1B

2.2 透明度变化特征分析

利用遥感图像处理软件 ENVI 5.0 与 ArcGIS 10.0 将建立的模型应用于 2009 年 6 月 23 日的 CDD 影像上,得到四十里湾水体透明度分布图(图 4)。由图上可以看出,本研究区域透明度的整体分布趋势是近岸低、远岸高,从近岸向外海基本呈梯度递减趋势。

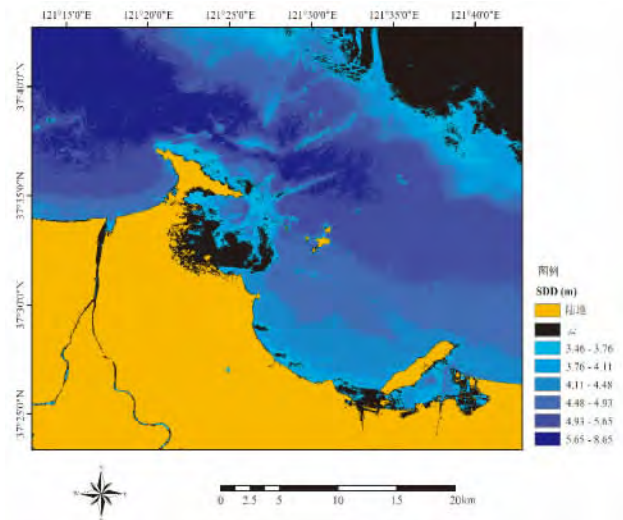


图 4 2009 年 6 月 23 日四十里湾透明度分布
Fig. 4 Distribution of SDD in Sishili Bay on June 26, 2009

3 结论

(1) 利用我国自主研制的环境一号卫星 CCD 数据进行水体透明度的遥感估测,可以获得较高的反演精度,反演得到的透明度与实测透明度之间的平均相对误差为 8.6%、均方根误差为 0.1 m。

(2) 环境一号卫星 CCD 数据的 4 个波段中,第 3 波段与透明度具有较高的相关性,而第 3 与

1 波段的比值可用于水体透明度的遥感反演。

(3) 四十里湾海域水体透明度呈近岸低、外海高的特征。

参考文献:

- [1] TYLER J E. The Secchi disc [J]. *Limnology and Oceanography*, 1968, 13(1): 1-6.
- [2] 何贤强, 潘德炉, 黄二辉, 等. 中国海透明度卫星遥感监测 [J]. *中国工程科学*, 2004, 6(9): 33-37.
- [3] CHEN Z Q, MULLER-KARGER F E, HU C M. Remote sensing of water clarity in Tampa Bay [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(2): 249-259.
- [4] SON S, CAMPBELL J, DOWELL M, et al. Primary production in the Yellow Sea determined by ocean color remote sensing [J]. *Maine Ecology Progress Series*, 2005, 303: 91-103.
- [5] LEVIN I, RADOMYSLSKAYA T. Estimate of water inherent optical properties from Secchi depth [J]. *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, 48(2): 214-221.
- [6] KOSTEN S, VERNOOIJ M, VANNES E H, et al. Bimodal transparency as an indicator for alternative states in South American lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2012, 57: 1191-1201.
- [7] FALKOWSKI P G, WILSON C. Phytoplankton productivity in the North Pacific ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO₂ [J]. *Nature*, 1992, 358(6389): 741-743.
- [8] YU Z F, CHEN X L, ZHOU B, et al. Assessment of total suspended sediment concentrations in Poyang Lake using HJ-1A/1B CCD imagery [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2012, 30(2): 295-304.
- [9] 旷达, 韩秀珍, 刘翔, 等. 基于环境一号卫星的太湖叶绿素 a 浓度提取 [J]. *中国环境科学*, 2010, (9): 1268-1273.
- [10] 周博天, 刘湘南, 吴伶, 等. 基于水色遥感的香港海域黄色物质浓度反演模型 [J]. *海洋环境科学*, 2013, 32(1): 115-119.
- [11] 王林, 赵冬至, 杨建洪. 基于环境一号卫星的大洋河河口海域营养盐遥感反演 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 136-141.
- [12] CHEN J, QUAN W T, YAO G, et al. Retrieval of absorption and backscattering coefficients from HJ-1A/CCD imagery in coastal waters [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5803-5821.
- [13] 矫晓阳. 透明度作为赤潮预警监测参数的初步研究 [J]. *海洋环境科学*, 2001, 20(1): 27-31.
- [14] 中国资源卫星应用中心. 2009 年 HJ-1A/B 星绝对辐射定标系统 [EB/OL]. <http://www.cresda.com/n16/n1115/n1522/n2103/9547.html>. 2009-12-29.
- [15] KALLIO K, KUTSER T, HANNONEN T, et al. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons [J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 268(1/2/3): 59-77.
- [16] HELLWEGER F, SCHLOSSER P, LALL U, et al. Use of satellite imagery for water quality studies in New York Harbor [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 61(3): 437-448.
- [17] KOPONEN S, PULLIAINEN J, KALLIO K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(1): 51-59.
- [18] OLMANSON L G, BAUER M E, BREZONIK P L. A 20-year Landsat water clarity census of Minnesota's 10,000 lakes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(11): 4086-4097.
- [19] GUAN X, LI J, BOOTY W G. Monitoring lake simcoe water clarity using Landsat-5 TM images [J]. *Water resources management*, 2011, 25(8): 2015-2033.