第32卷 第1期 海 洋 环 境 科 学 Vol. 32, No. 1
2013年2月 MARINE ENVIRONMENTAL SCIENCE February 2013

四十里湾透明度的遥感估测模型研究

禹定峰[1,2,3],邢前国[1,3],施 平[1,3]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室(烟台海岸带研究所),山东省海岸带环境过程重点实验室,中国科学院烟台海岸带研究所,山东 烟台 264003)

摘 要: 以四十里湾为研究区,通过对2009年6月四十里湾海域实测高光谱数据的分析处理,得到一阶差分光谱和二阶差分光谱。分别对遥感反射率及其一阶、二阶差分光谱与实测透明度进行相关分析,发现后者的相关系数比前两者高出约11%,达到0.88。研究表明:用695 nm处的二阶差分光谱建立的透明度估测模型的决定系数、均方根误差和平均相对误差分别为0.79、0.1 m和7.9%,高于单波段模型和多波段模型。利用同年4月同一海域的数据作为独立样本进行检验,验证模型的均方根误差和平均相对误差分别为0.34 m、16%。本研究结果为近岸水体透明度高光谱遥感反演提供了一种新方法。

关键词: 透明度; 遥感; 高光谱; 四十里湾

中图分类号: X87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2013)01-0079-04

Study on remote sensing estimate model of transparency of seawater in Sishili Bay, China

YU Ding-feng[1,2,3], XING Qian-guo[1,3], SHI Ping[1,3]

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS); Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, YICCAS, Yantai 264003, China)

Abstract: The reflectance spectra and secchi disk depths (SDD) in seawater were collected from two cruises carried out in Sishili Bay in Apr. Jun. 2009. The original spectra with 0.19 nm spectral resolution were re-sampled to 10 nm, and then the first-order and second-order difference spectra were processed. The correlation analysis was performed between SDD and each band. The correlation coefficients between SDD and the second-order difference spectra are about 11% hither than others. The estimation model of SDD was established using the second-order difference spectra at the wavelength of 695 nm on the base of the analytical result. The result showed that this model performed better than the single-band and multi-band models, with the root mean square error (RMSE) of 0.1 m and the average relative error (SE) of 7.9%, respectively. The data obtained from in the same study area in Apr. 2009 as independent samples was used to test this model, and the verification model's RMSE of 0.34 m and SE of 16%. It is suggested a new way for water transparency in the Chinese coastal waters.

Key words: transparency; remote sensing; hyperspectral; Sishili Bay

海水透明度(secchi disk depth, SDD)能直观反映海水清澈和透明的程度,是海水能见度的一个量度,同时也是描述水体光学特征的一个重要参数[1],是海洋水质调查中的一个重要指标。水体透明度反映的是太阳光线在水中的透射深度,而太阳辐射在水下的传输和分布主要受四种物质影响,即非生物悬浮颗粒物、浮游植物、溶解性有机物和纯水[2]。透明度与叶绿素a、悬浮物有密切的内在联系[3-5],水体中悬浮物的存在,会增加对光辐射的衰

收稿日期: 2012-01-17, **修订日期:** 2012-03-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q007-01); 对外合作重点项目(GJHZ1207); 中国科学院创新团队国际合作伙伴计划-海岸带典型环境过程与资源效应(Y02A07103)

作者简介: 禹定峰(1986-),男,河南驻马店市人,博士研究生,主要从事水色遥感研究,E-mail: dfyu@yic.ac.cn

通讯作者: 邢前国,E-mail: qgxing@yic.ac.cn

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

减，从而降低透明度，此外，水体中的浮游植物和可溶性有机物对光也有吸收和散射作用，从而影响透明度[6]。

水体透明度的常规测量方法是塞克盘(Secchi disk)法[7]，然而，该法费时费力，且受人为因素影响较大。而遥感技术可以弥补上述测法的不足，已成为监测水体透明度的重要手段之一[8]，尤其是近年来，随着高光谱技术的迅速发展，其小于10 nm的光谱分辨率可反映目标地物的细微变化特征，利用该技术建立的各种模型可提高遥感反演水质参数的精度[9-10]，且使用两个波段反射率的比值来反演水质参数，有利于校正光照、大气等条件对反射率的影响[11]。关于透明度的遥感反演，已有学者做了大量研究，如基于统计回归的单波段法[12-15]、波段比值法[16-17]、波段差值法[18]和多波段法[19]；基于固有光学特性[20]或神经网络[1,21-22]的算法以及基于光学辐射传输模型的半分析算法[23]。然而，前人利用遥感技术反演透明度，无论是基于卫星数据还是现场实测数据，大多采用的是原始高光谱数据。利用差分光谱技术来处理高光谱数据是遥感中常用的方法，已被广泛应用于叶绿素和悬浮泥沙的反演[24-26]，均取得了较好的效果，而在以往的研究中用该技术反演海水透明度则少有报道。

四十里湾位于胶东半岛北部海域，东邻养马岛，西北与芝罘湾相连，北面为湾口，毗邻北黄海，三面邻陆，一面向海，其间散布有崆峒岛群，海岸线长约20 km，水深多为8～15 m，平均水深10 m左右，面积约130 km^2，是中国北方一个重要的浅海养殖区[27]。近年来，四十里湾受人类活动(海水养殖、旅游观光)影响加剧，赤潮灾害频发，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，而透明度可作为预报赤潮灾害的参数[28]，因此，四十里湾透明度遥感反演具有重要的现实意义。本文以四十里湾为研究区，利用在该海域现场测量并处理后的原始光谱及其一阶和二阶差分光谱，对实测水体透明度与各光谱间的相关性进行分析，尝试采用差分光谱技术来估测近岸水体透明度。该研究不仅为透明度定量反演提供一种新思路，而且为利用卫星遥感技术大面积监测水体透明度奠定基础。

1 数据与方法

1.1 数据获取与光谱处理

光谱测量时间分别为2009年4月22日、23日和6月22日、23日，本研究区共设12个站位。水体透明度依据《海洋调查规范》(GB17378.7-1998)采用塞克盘法测定。光谱与透明度的测量同步进行。

本文的光谱数据采用二类水体水面以上测量[29]，利用的光谱仪是USB4000，其光谱范围为345.34～1046.12 nm，分辨率约为0.19 nm，总波段数为3648，视场角为15度。光谱测量时段为北京时间10:00～14:00，在距水面上方约1 m处进行，光谱仪探头基本垂直于水面。测量时天气晴朗无云，风力1～2级，海面较为平静，因此受水面波动变化影响较小。每个站位测量5组光谱，取其平均值作为该站位的光谱反射率。每个站位的具体观测内容包括上行辐亮度、天空光的辐亮度和标准灰板的辐亮度。

本研究中，采用累加平均的方法[30]将由仪器所测光谱重采样成10 nm的分辨率，再将重采样后的光谱进行差分处理。由于400～800 nm以外的遥感反射率更易受外界条件及仪器本身等因素的影响，可能含有信号噪声，因此本文选择400～800 nm之间的遥感反射率进行研究。原始(零阶)、一阶、二阶差分光谱分别如图1的A、B、C所示：

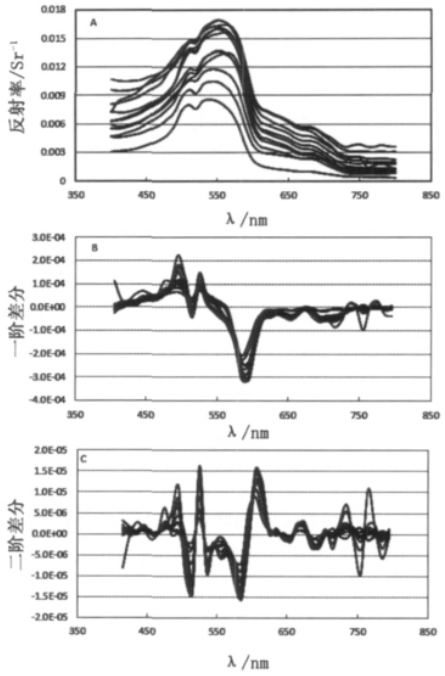

图1 原始光谱、一阶差分光谱及二阶差分光谱

Fig. 1 Samples of reflectance, first-difference and second-difference spectra

1.2 精度评价

本文采用统计学中的均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)作为评价反演值和实测值是否一致的标准，其表达式如下：

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

$$RE = \frac{|\chi_{est}-\chi_{mea}|}{\chi_{mea}} \times 100\% \quad (2)$$

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

2 结果与讨论

2.1 光谱特征分析

如图1A所示，大部分站位的遥感反射率光谱曲线是相似的，在短波波段，由于叶绿素和黄色物质的强吸收，反射率较小。光谱的反射峰谱较窄，最大反射率位于550 nm附近，随着波长的增大，反射率迅速减小。由图1B、1C可以看出，遥感反射率的一阶差分光谱和二阶差分光谱具有较强的对应关系。一阶差分光谱曲线的峰值分别在595 nm、645 nm和695 nm附近，其谷值则位于445 nm、515 nm、535 nm附近；而二阶差分光谱曲线的峰值主要在585 nm、655 nm、695 nm附近，其谷值在445 nm、605 nm、665 nm。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2　相关性分析及模型的建立

原始光谱及其一阶差分、二阶差分与透明度的相关系数如图 2 所示。透明度与遥感反射率明显呈负相关,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。在可见光范围内,520 ~ 600 nm 蓝绿光波段的相关系数绝对值较大(大于 0.70),其最大值位于 570 nm 处为 0.78,这是因为水体在蓝绿波段的穿透能力较强。一阶差分光谱与透明度相关性较大的光谱主要在 595 nm、645 nm 和 695 nm,其最大相关系数在 695 nm 处为 0.78。与原始光谱相比,就相关系数而言,一阶差分光谱与透明度的相关性并未得到较大提高。究其原因,某些波段的一阶差分光谱可以表现出叶绿素、黄色物质等水体组分的细微变化[31],而这些组分可能又与透明度存在相关关系,影响透明度。对相关系数进行对比分析,可以发现,二阶差分光谱与透明度在有些波段具有更好的相关性,尤其是在 605 nm、665 nm、695 nm 处,呈高度相关,最大相关系数位于 695 nm 处为 0.88,分析表明,二阶差分光谱与透明度的最大相关系数比原始光谱和一阶差分光谱的高出约 11%。因此,决定采用 695 nm 处的二阶差分光谱来反演透明度。

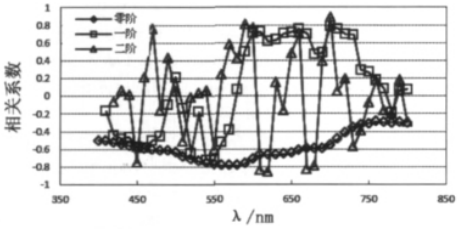

图 2　原始光谱、一阶差分光谱与二阶差分光谱与透明度之间的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficient between SDD and bands of reflectance, first-difference and second-difference spectra

本研究采用统计回归的分析方法建立透明度定量遥感的乘幂模型:

$$y = 7.8266e^{220609x} \ (R^2 = 0.79, p < 0.001) \quad (3)$$

式中: y 为透明度(m); x 为 695 nm 处的二阶差分光谱值。

2.3　模型验证

为了比较实测结果与反演结果,我们利用该反演模型,根据 695 nm 处的二阶差分光谱值进行估算。通过计算,其实测值与估算值之间的均方根误差为 0.1 m,平均相对误差为 7.9%。为了进一步检验上述模型,我们还利用同年 4 月本研究区航次的现场实测数据作为独立样本对该模型进行检验。结果表明,验证模型的均方根误差和平均相对误差分别为 0.34 m、16%。综上,验证结果比较理想,因此可以使用上述模型反演四十里湾海域的透明度。

诚然,本研究所采用的建模数据和检验数据并不多,虽然这些数据具有一定的代表性,但是可能会在一定程度上影响模型的精度。为了检验该模型在空间上和时间上是否具有适用性,进一步的研究是必要的。

一般认为,悬浮泥沙是水体透明度的主要影响因子。然而,对于不同的水体,其光学特性是不同的,透明度的主要影响因素亦不同。已有的研究表明[28,32-35],叶绿素是水体透明度的主要影响因子。四十里湾特定的地理环境和物质条件极其适合藻类的繁殖,夏季又为该海域赤潮的多发季节[36],因此我们认为在夏季叶绿素很可能是影响四十里湾透明度的主要因子,事实是否如此,有待进一步的研究。

2.4　与其他模型的比较

原始光谱与实测透明度的相关性分析表明,570 nm 处的遥感反射率与透明度的相关系数高于其他波段,利用该波段建立估测透明度的乘幂模型:

$$y = 0.2496x^{-0.575} \quad (4)$$

式中: y 为透明度(m); x 为 570 nm 处的遥感反射率。该模型的决定系数为 0.66,利用该模型反演得到的透明度与实测透明度的均方根误差为 0.15 m,平均相对误差为 9.3%。

结合现场实测数据和前人的研究成果[19],通过不同波段组合实验,我们建立了该研究区透明度的多波段估测模型:

$$Ln(SDD) = 1.195 - 39.374 \times (R_{rs}555 + R_{rs}670) + 1.473 \times \left(\frac{R_{rs}490}{R_{rs}555}\right) \quad (5)$$

该模型的决定系数为 0.67,利用该模型反演得到的透明度与实测透明度之间的均方根误差为 0.2 m,平均相对误差为 11%。

综上,通过对比分析模型的决定系数、均方根误差和平均相对误差发现(表 1),差分光谱模型优于单波段模型和多波段模型。

表 1　差分光谱模型与单波段模型和多波段模型对比

Tab. 1 Difference spectra model vs. single-band and multi-band models

模型	λ/nm	相关系数	均方根误差/m	平均相对误差/(%)
差分光谱	695	0.79	0.1	7.9
单波段	570	0.66	0.15	9.3
多波段	490、555、670	0.67	0.2	11

3　结　论

2009 年 4 月和 6 月,在四十里湾海域进行了两个航次的野外光谱与透明度测量。先将实测高光谱数据重采样成 10 nm 带宽,再将其进一步处理成一阶和二阶差分光谱。通过对原始光谱及其一阶、二阶差分光谱与实测透明度的相关性分析,发现原始光谱与透明度普遍呈负相关;同时研究表明,与原始光谱和一阶差分光谱相比,二阶差分光谱的某些波段与透明度具有更好的相关性,其中 695 nm 处的二阶差分与透明度的相关性最高,达到 0.88,用其建立的透明度估测模型的反演值与实测值的均方根误差和平均相对误差分别为 0.1 m、7.9%。采用

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

同一海域不同月份的数据对该模型进行验证，获得了较为满意的精度。对比分析模型的相关系数、均方根误差和平均相对误差表明，差分光谱模型优于单波段模型和多波段模型。

二类水体的组成成分是比较复杂的，其光谱特征形状随着水体组分的种类和浓度变化而变化，同时又受水体状态的影响，对于同一海域，季节不同，水体光学特性往往也是不同的。因此，对于二类水体透明度的遥感反演，目前经验法仍然是主要方法。本文基于实测高光谱数据，提出了一种利用695 nm处的二阶差分光谱来反演海水透明度的新方法，对近岸海水透明度的遥感反演具有一定的参考意义。

致谢：本研究的出海采样得到了中科院烟台海岸带所马万栋博士和刘亚龙同学的大力帮助，作者在此深表感谢。

参考文献：

[1] ZHANG Y Z，PULLIAINEN J，KOPONEN S，et al. Empirical algorithms for Secchi disk depth using optical and microwave remote sensing data from the Gulf of Finland and the Archipelago Sea [J]. Boreal environment research，2003，8(3)：251-261.

[2] KIRK J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems [M]. Third edition. Cambridge：Cambridge University Press，2011：50-132.

[3] 杨生光，张坤诚，吕培顶. 海水相对透明度与叶绿素a的关系 [J]. 黄渤海海洋，1987，5(1)：68-70.

[4] 平仲良. 用实测海水透明度数据和NOAA卫星数据计算黄海悬浮体含量 [J]. 海洋与湖沼，1993，24(1)：24-30.

[5] 张运林，秦伯强，陈伟民，等. 太湖水体光学衰减系数的分布及其变化特征 [J]. 水科学进展，2003，14(4)：443-459.

[6] 丁 玲. 水体透明度模型及其在沉水植物恢复中的应用研究 [D]. 南京：河海大学，2006：86-88.

[7] GRAHAM J J. Secchi disc observations and extinction coefficients in the central and eastern North Pacific Ocean [J]. Limnology and Oceanography，1966，11(2)：184-190.

[8] 唐世林，陈楚群，詹海刚，等. 南海真光层深度的遥感反演 [J]. 热带海洋学报，2007，26(1)：9-15.

[9] 疏小舟，尹 球. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系 [J]. 遥感学报，2000，4(1)：41-45.

[10] 韩 震，陈西庆，恽才兴. 海洋高光谱遥感研究进展 [J]. 海洋科学，2003，27(1)：22-25.

[11] 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(1-3)：59-77.

[12] LATHROP R G. Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay and central Lake Michigan [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1986，52：671-680.

[13] 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.

[14] 陈 蕾，谢 健，彭晓鹃，等. 珠江口海水透明度与光谱相关关系研究 [J]. 国土资源遥感，2011，(3)：151-155.

[15] 丛丕福，曲丽梅，韩庚辰，等. 辽东湾海水透明度的遥感估算模型 [J]. 地球科学进展，2011，26(3)：295-299.

[16] LILLESAND T，CHIPMAN J. Satellite-assisted lake water quality：using satellite data to observe regional trends in lake transparency [J]. GIM International，2001，15(11)：26-29.

[17] 王爱华，史学军，杨春和，等. 基于CBERS数据的农区水体透明度遥感模型研究 [J]. 遥感技术与应用，2009，24(2)：172-179.

[18] WU G G，LEEUW J D，SKIDMORE A K，et al. Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo - spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve，China [J]. International Journal of Remote Sensing，2008，29(8)：2183-2198.

[19] 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 [J]. 海洋学报，2005，27(5)：38-45.

[20] 魏国妹，商少凌，李忠平，等. 基于固有光学特性的北部湾透明度遥感反演及其检验 [J]. 高技术通讯，2009，19(9)：977-982.

[21] 宋开山，张 柏，王宗明，等. 半干旱区内陆湖泊透明度高光谱估测模型研究_以松嫩平原查干湖为例 [J]. 水科学进展，2006，17(6)：790-796.

[22] YUZUGULLU O，AKSOY A. Determination of Secchi Disc depths in Lake Eymir using remotely sensed data [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences，2011，19：586-592.

[23] 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 [J]. 海洋学报，2004，26(5)：55-62.

[24] HAN L H，RUNDQUIST D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration：a case study in a turbid reservoir [J]. Remote Sensing of Environment，1997，62(3)：253-261.

[25] BECKER B L，LUSCH D P，QI J Q. Identifying optimal spectral bands from in situ measurements of Great Lakes coastal wetlands using second-derivative analysis [J]. Remote Sensing of Environment，2005，97(2)：238-248.

[26] 史合印，邢前国，陈楚群，等. 基于导数光谱的混浊河口水体叶绿素浓度反演 [J]. 海洋环境科学，2010，29(4)：575-578.

[27] 周 毅，杨红生. 烟台四十里湾浅海养殖生物及附着生物的化学组成，有机净生产量及其生态效应 [J]. 水产学报，2002，26(1)：21-27.

[28] 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.

[29] 唐军武，田国良，汪小勇，等. 水体光谱测量与分析 Ⅰ：水面以上测量法 [J]. 遥感学报，2004，8(1)：37-44.

[30] 邢前国. 珠江口水质高光谱反演 [D]. 北京：中国科学院研究生院，2007：20-21.

[31] GOODIN D G，UOHENG H L，FRASER R N，et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1993，59(4)：505-510.

[32] FALKOWSKI P G，WILSON C. Phytoplankton productivity in the North Pacific Ocean since 1900 and implications for absorption of anthropogenic CO_2 [J]. Nature，1992，358(6389)：741-743.

[33] JAMU D M，LU Z M，PIEDRAHITA R H. Relationship between Secchi disk visibility and chlorophyll a in aquaculture ponds [J]. Aquaculture，1999，170(3/4)：205-214.

[34] 赵碧云，贺 彬. 滇池水体中透明度的遥感定量模型研究 [J]. 环境科学与技术，2003，26(2)：16-17.

[35] 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.

[36] 高昊东，邓忠伟，孙万龙，等. 烟台四十里湾赤潮发生与生态环境污染研究 [J]. 中国环境监测，2011，27(2)：50-55.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net