

李妍,陈希,于斌,等.2014.基于非均匀水体对比度传输方程的海水透明度计算试验[J].大气科学学报,37(6):767-771.doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130506001.

Li Yan,Chen Xi,Yu Bin,et al.2014.Test of seawater transparency calculation based on the non-uniform contrast transfer equation[J].Trans Atmos Sci,37(6):767-771.(in Chinese)

基于非均匀水体对比度传输方程的海水透明度计算试验

李妍¹,陈希¹,于斌^{1,2},钟奕飞³

(1.解放军理工大学 气象海洋学院,江苏 南京 211101;2.91206 部队训练部,山东 青岛 266108;3.95875 部队,湖南 衡阳 421000)

摘要:针对均匀水体假设的海水透明度经验计算公式不具有普适性的缺点,将海水在垂直方向上分为若干光学性质相近的均匀层,推导出非均匀水体中目标对比度传输方程,在此基础上,建立了海水透明度的计算模型。利用 BROKE_WEST_ACS 实测的海水固有光学性质数据和透明度盘观测数据,对计算模型进行了数值试验和效果分析。结果表明:模型计算值与透明度盘实测值平均相对误差为 9.1%;该模型既克服了透明度盘测量易受天气状况和人眼差异影响较大的缺点,又突破了均匀水体透明度计算方法的局限性。

关键词:非均匀水体;对比度;海水透明度

文章编号:1674-7097(2014)06-0767-05 中图分类号:P733.3 文献标志码:A

doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20130506001

Test of seawater transparency calculation based on the non-uniform contrast transfer equation

LI Yan¹,CHEN Xi¹,YU Bin^{1,2},ZHONG Yi-fei³

(1.College of Meteorology and Oceanography,PLA University of Science and Technology,Nanjing 211101,China;

2.Training Department of Unit No.91206 of PLA,Qingdao 266108,China;3.Unit No.95875 of PLA,Hengyang 421000,China)

Abstract: Aiming at the faults of seawater transparency empirical formulas having no universality based on the assumption of homogeneous water transparency, seawater is divided into several homogeneous layers with similar optical property in vertical direction, and non-uniform water contrast transfer equation is deduced. Based on the contrast transfer equation, the calculation model of seawater transparency is established. The calculation model is used to do numerical experiment and effect analysis using the inherent optical seawater data observed by BROKE_WEST_ACS and the data from transparency plate. Results show that the average relative error between the model calculation values in the paper and the observed values from transparency plate is 9.1%. The model not only overcomes the disadvantages of observations from transparency plate, which are easily influenced by weather conditions and human differences, but also breaks through the limitation of uniform water transparency calculation method.

Key words: non-uniform water transparency; contrast; seawater transparency

0 引言

海水透明度对探潜、反潜及潜艇隐蔽等活动具

有重要的军事意义。利用常规的透明度盘对海水透明度进行测量时(Duntley, 1960),若到达水面的透明度盘反射光和海水背景光之间存在亮度差异,则

收稿日期:2013-05-06;改回日期:2014-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41275113)

通信作者:陈希,博士,教授,研究方向为海洋环境保障及海洋调查技术,lgdxchxtemp@163.com.

透明度盘可见,不断下放透明度盘,当反射光和海水背景光之间的差异低于人眼对比度阈值时,人眼分辨不出透明度盘反射光与背景光,透明度盘在海水中的深度即为海水透明度值(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会,1999)。因此,利用透明度盘反射光与海水背景之间亮度差异的对比度计算方法,能够确定透明度盘的能见度(夏光辉等,2009)。

国内外学者对海水透明度与对比度的相关关系开展了大量研究。Tyler(1968)、张绪琴(1982)、Buiteveld(1995)等理论分析了光学性质均匀水体中海水透明度与对比度之间的关系,认为海水透明度与光束衰减系数和漫射衰减系数之和成反比;Hou et al.(2008)利用对比度分析了海水透明度与漫射衰减系数之间的关系,认为海水透明度与漫射衰减系数成反比;Montes-Hugo et al.(2003)和 Suresh et al.(2006)从对比度出发,借助调制传输函数(Duntley, 1980; Barrett and Myers, 2004; Loyer, 2005; Hou et al., 2007a),得出海水透明度与衰减系数成反比的结论,并通过计算经验系数建立了透明度计算公式,由于不同海区具有不同的经验系数值,需要大量的观测数据进行计算和验证,因此,这种方法不具备通用性;姜璐等(2005)在假设水体光学性质均匀的基础上,从辐亮度传输方程出发,在理论上推导了对比度传输方程。然而,自然界中海水光学特性是非均匀的,故有必要在光学非均匀水体条件下,利用对比度传输方程开展对比度与海水透明度之间相关关系的研究。

本文拟从对比度的定义(Hou et al., 2007b)出发,利用均匀水体的对比度传输方程(Duntley,

1960; Charles, 1982),推导出非均匀水体中对比度传输方程,并利用该方程构建海水透明度计算模型;在此基础上,采用 BROKE_WEST_ACS 实测海水固有光学性质数据和透明度观测数据进行数值试验和结果分析

1 非均匀水体对比度传输方程推导

海水在垂直方向上由许多光学性质均匀的水层构成(Jerlov, 1976; Suresh et al., 2006),如图 1 所示。

图 1 中, B 为透明度盘的亮度, B_b 为背景海水亮度,则透明度盘的对比度 C 的计算公式为

$$C = \frac{(B - B_b)}{B_b} \quad (1)$$

理论上,当透明度盘下放至海水透明度的深度时, $C=0$;而实际上,在人眼观察时, C 为非零常数,该常数称为人眼阈值,一般情况下, $C=0.02$ 。

假设透明度盘在深度 D 处辐亮度为 L_D ,背景辐亮度为 L_{bD} ,则透明度盘的固有对比度 C_D 的计算公式为

$$C_D = \frac{(L_D - L_{bD})}{L_{bD}} \quad (2)$$

在距离透明度盘 r 处,假设观测到的透明度盘辐亮度为 L_r ,背景辐亮度为 L_{br} ,则透明度盘在距离 r 处的相对对比度 C_r 的计算公式为

$$C_r = \frac{(L_r - L_{br})}{L_{br}} \quad (3)$$

在每一均匀海水层中,通过背景上涌光和透明度盘上涌光的辐亮度传输方程,可得固有对比度 C_D 和相对对比度 C_r 的关系(姜璐等,2005)为

$$C_r = C_D e^{-(c+k)\Delta l} \quad (4)$$

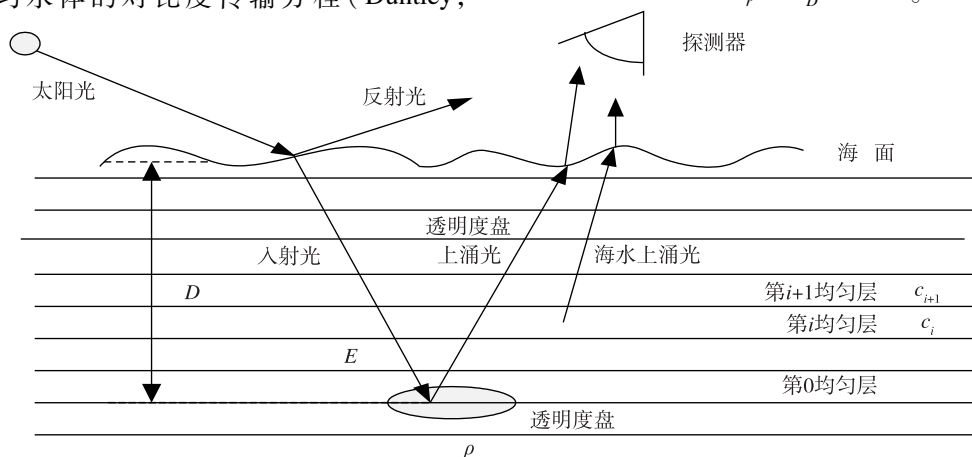


图 1 非均匀海水分若干均匀光学层的示意图

Fig.1 Diagram of non-uniform sea water divided into several optical layers

式中: c 表示均匀水体中的衰减系数; k 表示漫射衰减系数; Δl 为均匀水体的厚度。设透明度盘深度为 D ,所在位置为第0层,固有对比度为 C_{D0} ,在第0层顶,其相对对比度为 C_{r0} 。海水第 i 均匀层衰减系数为 c_i ,在第 i 均匀层层底处,透明度盘具有对比度 C_{Di} ,经过第 i 层的传输,到达第 i 层顶的相对对比度为 C_{ri} 。由于第 i 海水层光学性质均匀,则(4)式成立,有如下关系:

$$C_{ri} = C_{Di} e^{-(c_i+k_i)\Delta l_i} \quad (5)$$

第 i 层顶透明度盘的相对对比度 C_{ri} ,相当于传入第 $i+1$ 层的透明度盘的固有对比度 C_{Di+1} ,即

$$C_{Di+1} = C_{ri} \quad (6)$$

由于第 $i+1$ 层海水光学性质均匀,则根据(4)~(6)式,可得

$$C_{ri+1} = C_{ri} e^{-(c_{i+1}+k_{i+1})\Delta l_{i+1}} \quad (7)$$

由此建立了第 $i+1$ 层顶的透明度盘相对对比度 C_{ri+1} 与第 i 层顶的透明度盘相对对比度 C_{ri} 之间的关系,(7)式变形后, C_{ri} 与 C_{r0} 的关系为

$$C_{ri} = C_{r0} e^{-\sum_{j=1}^i (c_j+k_j)\Delta l_j} \quad (8)$$

由(5)式可知

$$C_{r0} = C_{D0} e^{-(c_0+k_0)\Delta l_0} \quad (9)$$

由(8)、(9)式合并可得

$$C_{ri} = C_{D0} e^{-\sum_{j=0}^i (c_j+k_j)\Delta l_j} \quad (10)$$

式中: k_i 表示第 i 层的向上辐照度漫射衰减系数,可由蒙特卡罗方法根据漫射衰减系数定义计算(Jaffe, 1995; John, 2004; Xu, 2011)。(10)式建立了透明度盘正上方任意位置上的相对对比度与固有对比度的关系,即为非均匀水体对比度传递方程。在给定海水衰减系数和漫射衰减系数的前提下,将透明度盘固有对比度作为(10)式的初始值,能够计算透明度盘的相对对比度,而固有对比度 C_{D0} 可以采用如下方法计算。

假设透明度盘反射率为 ρ ,到达透明度盘所在位置的太阳光辐照度为 E (图1),则透明度盘在深度 D 处的亮度 B_D 为

$$B_D = \frac{\rho E}{\pi} \quad (11)$$

透明度盘所在位置深度 D 处的背景亮度为

$$B_b = \frac{\rho E u_D}{\pi} \quad (12)$$

式中: u_D 为深度 D 处的上涌光相对量。根据(11)和(12)式,可计算深度 D 处的透明度盘固有对比度 C_{D0} :

$$C_{D0} = \frac{B_D - B_b}{B_b} = \frac{\rho}{u_D} - 1 \quad (13)$$

(13)式表述了透明度盘在深度 D 处的固有对比度。由此可见,透明度盘的固有对比度仅与透明度盘反射率、深度 D 处上涌光相对量有关(Haltrin et al., 2000)。而上涌光相对量可由蒙特卡罗方法根据定义计算得到(陈文革等, 1995; 阮立明等, 2003)。

2 基于对比度传输方程的海水透明度计算

基于上一节推导的对比度传输方程,可以数值仿真透明度盘测量海水透明度的过程:透明度盘的初始深度记为 D ,利用非均匀水体中目标的对比度传递方程((10)式),计算透明度盘的相对对比度。调整 D ,当相对对比度低于人眼阈值时(由于人眼距离水面较近,故对比度在大气中的衰减可以不考虑),即为海水透明度值,计算流程如图2所示。

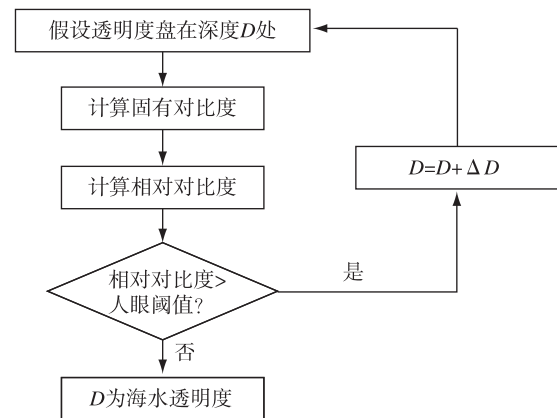


图2 利用对比度传递方程计算海水透明度的流程图

Fig.2 Flow chart of contrast transfer equation used to calculate seawater transparency

3 计算试验

利用本文提出的基于对比度传递方程计算海水透明度的方法,采用 Australian Antarctic Division 的 BROKE_WEST_ACS 数据集的海水固有光学性质垂直剖面数据进行透明度计算,并与透明度盘观测数据进行对比分析。海水固有光学性质数据时间为2006年1—2月,范围为30~80°E、59.8~68.1°S海区。图3、4分别为2006年1月21日09时11号站点海水对550 nm波长的光衰减系数和吸收系数剖面。该海区的水深为100 m,观测数据垂直分辨率为2 m。图3、4表明,在垂直方向上,海水的固有光学性质不均匀性非常明显。

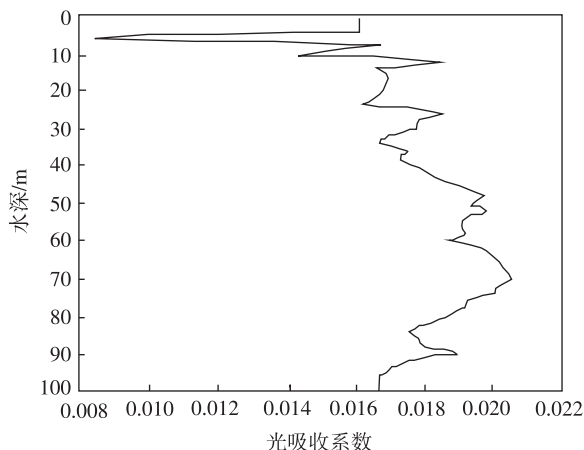


图 3 550 nm 光吸收系数剖面

Fig.3 Vertical section of absorption coefficient of 550 nm ray

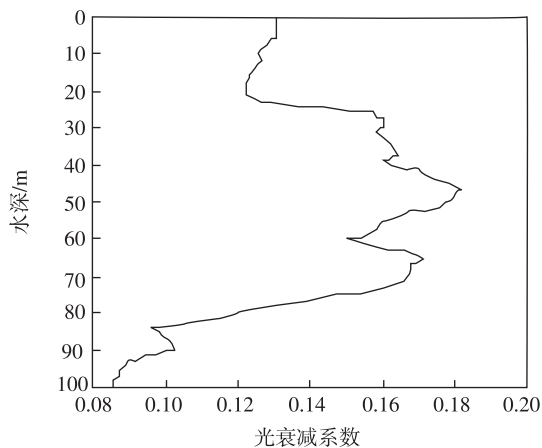


图 4 550 nm 光衰减系数剖面

Fig.4 Vertical section of attenuation coefficient of 550 nm ray

利用上述数据进行非均匀水体透明度的计算步骤为:

1) 设置透明度盘的初始深度 d 为 0.1 m, 透明度模型的海水分层间隔为 2 m, 根据固有光学量数据、漫射衰减系数数据计算上涌光相对量;

2) 将上涌光相对量数据代入(13)式, 计算 d 深度上透明度盘固有对比度;

3) 将透明度盘固有对比度代入(16)式, 计算到达人眼的相对对比度 C_{ri} ;

4) 比较相对对比度 C_{ri} 与人眼对比度阈值 0.02, 若 $C_{ri} > 0.02$, 则将 d 增加 0.1 m 并转向步骤 1), 否则, 认为 d 为海水透明度 D 并输出结果。

为分析模型的特性, 将均匀水体透明度计算方法和本文非均匀海水透明度计算方法的结果进行对比(均匀水体模型使用第一层海水的固有光学性质剖面数据进行计算)。数值试验计算该区域 37 个站点的海水透明度, 并与对应站位的海水透明盘实测数据进行对比。

图 5 为均匀水体模型的海水透明度结果(均匀水体模型选用张绪琴(1982)的算法)、本文模型的海水透明度计算值和透明度盘测量数据在同一站的比较。结果表明, 均匀水体模型结果与透明度盘测量值比较, 平均绝对误差为 2.7 m, 平均相对误差为 18%; 本文模型计算结果与透明度盘测量值比较, 平均绝对误差为 1.1 m, 平均相对误差为 9%, 说明本文的非均匀水体透明度模型取得了较好的效果。

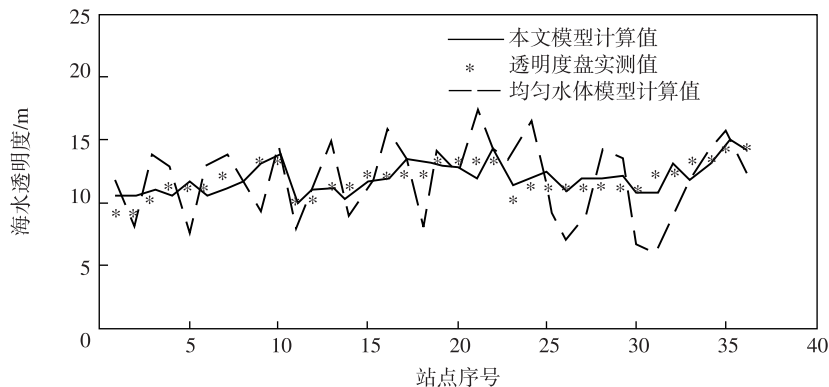


图 5 均匀水体模型结果(虚线)、本文模型计算值(实线)和透明度盘测量数据(星号)的比较

Fig.5 Comparison among the uniform seawater model calculations(dashed line), the model calculations in this paper(solid line) and the observations from transparency plate(asterisk)

4 结论

1)将海水在垂直方向上分为若干光学性质相近的均匀层;在此基础上,从均匀水体的对比度传输方程出发,推导出非均匀水体的对比度传输方程。

2)建立了以透明度盘固有对比度为输入、利用非均匀水体目标对比度传输方程计算海水透明度的数学模型。利用实测的海水固有光学性质系数,对模型的计算结果与实测值进行检验,取得较好效果,表明该模型能够克服透明度盘海水透明度测量方法易受天气状况和人眼差异影响的缺点,计算精度较高。

该计算模型效果对比检验数据为透明度盘的目测方法所获取的观测数据,由于透明度盘的目测方法易受日照状况、太阳高度角和观测者视力等因素的影响,数据误差较大,有待于利用大量精度较高的透明度观测数据对模型进行进一步检验。

参考文献:

- 陈文革,周晓迈,卢益民,等.1995.海洋激光雷达系统的蒙特卡罗模拟方法研究[J].华中理工大学学报,23(10):49-51.
- 姜璐,朱海,李松.2005.机载激光雷达最大探测深度同海水透明度的关系[J].激光与红外,35(6):397-399.
- 阮立明,谭建宇,谈和平,等.2003.辐射传递蒙特卡罗模拟的精度及运行时间分析[C]//中国工程热物理学会学术会议文集:457-460.
- 夏光辉,余义德,熊英.2009.一种海水透明度测量新方法的研究与实现[J].海洋环境科学,28(3):316-319.
- 张绪琴.1982.海水透明度[J].海洋湖沼通报(4):14-17.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.1999.GB 17378.4—1998 海洋监测规范第四部分:海水分析[S].北京:中国标准出版社:105.
- Barrett H H, Myers K J.2004. Foundations of image science[M]. Hoboken: John Wiley and Sons Ltd.
- Buiteveld H.1995. A model for calculation of diffuse light attenuation and secchi depth[J]. Netherland Journal of Aquatic Ecology, 29(1):55-65.
- Charles F S.1982. Conceptual ecologic modeling in regional environmen-

tal management and land planning [D]. Berkeley: University of California.

- Duntley S Q.1960. The visibility of submerged objects[M]. San Diego: University of California.
- Duntley S Q.1980. Scripps institution of oceanography[M]. San Diego: University of California.
- Haltrin V I, Johnson D R, Weidemann A D.2000. Connection between salinity and light absorption coefficient [C]//Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium; 1348-1356.
- Hou W, Gray D J, Weidemann A D, et al.2007a. Automated underwater image restoration and retrieval of related optical properties [C]// Proceeding of Geoscience and Remote Sensing Symposium; 6867-6870.
- Hou W, Lee Z P, Weidemann A D.2007b. Why does the Secchi disk disappear? An imaging perspective [J]. Optics Express, 15(6): 2779-2784.
- Hou W, Gray D J, Weidemann A D, et al.2008. Comparison and validation of point spread models for imaging in natural waters[J]. Optics Express, 16(13): 9958-9965.
- Jaffe J S.1995. Monte Carlo modeling of underwater-image formation: Validity of the linear and small-angle approximations [J]. Appl Opt, 34(24): 5413-5421.
- Jerlov N G.1976. Marine optics [M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company.
- John T O.2004. Monte Carlo modelling of radiative transfer in the ocean [M]. NSW: CSIRO Land & Water, ACT and Kirk Marine Optics, Murrumbateman.
- Loyer S.2005. Dynamical modeling of underwater visibility [C]// Oceans-Europe; 832-838.
- Montes-Hugo M A, Alvarez B S, Giles G A.2003. Estimating underwater PAR attenuation using a horizontal sighting instrument in a coastal lagoon of Baja California [J]. Estuaries, 26: 1302-1309.
- Suresh T, Naik P, Bandishte M, et al.2006. Secchi depth analysis using bio-optical parameters measured in the Arabian Sea [C]//Proc. SPIE 6406, Remote Sensing of the Marine Environment; 1-10.
- Tyler J E.1968. The Secchi disc [J]. Limnology and Oceanography, 13(1): 1-6.
- Xu Z.2011. A DNS capability for obtaining underwater light field and retrieving upper ocean conditions via in-water light measurements [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.

(责任编辑:倪东鸿)