

文章编号: 1001-8166(2011)06-0608-07

光学浅水遥感水底反射校正研究进展*

周冠华

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要:在水色遥感中,光学浅水底部反射的贡献显著地改变了水体反射信号的强度与光谱分布,成为制约二类水体遥感反演精度的瓶颈问题之一。在分析光学浅水概念和内涵的基础上,从水底反射特性测量、水底二向反射特性(BRDF)与水底反射效应校正模型3个方面论述了国内外在水底反射校正研究方面的进展;指出了发展光学浅水区的提取算法、建立典型底质类型光谱数据库、构建典型底质类型BRDF模型、发展有效的水底反射校正模型与光学浅水三维辐射传输模型等几个关键问题,以期为促进二类水体水色遥感发展提供科学依据。

关键词:光学浅水;水质遥感;水底反射效应

中图分类号:P341 **文献标志码:**A

1 引言

近年来,环境问题日益突出,利用卫星遥感技术对大型水体进行水质监测的需求越来越迫切。但受二类水体遥感机理、反演方法与实验技术条件等因素的限制,水质遥感面临着诸多瓶颈问题有待突破。其中,内陆湖泊与近海水体存在大量的光学浅水(Optical shallow water)区(即光穿透深度大于或等于水深),光学浅水的底质反射是影响二类水体水质参数遥感反演精度的重要因素之一^[1]。在光学浅水区,水底反射贡献与离水辐亮度耦合在一起。如果忽视水底反射贡献的存在,把水底反射信号当作水体组分信息,直接基于“伪遥感反射率”进行水质参数的遥感反演,往往会造成水质参数浓度的高估^[2]。此外,在某些光谱范围,不同的水体组分与水底能以相同的方式影响水色遥感信号,难以区分其影响,从而增加了水质遥感的复杂性^[3]。此外,在光学浅水区,水底后向散射信号可传输到水面,造成清洁水体近红外波段离水辐亮度不为零,从而可导致气溶胶光学厚度(一般根据近红外波段信号推

导)估算过高,造成可见光波段大气校正“过高”。因此,从二类水体大气校正的角度,也应该考虑水底反射与水体光学活性物质信息的解耦方法。水环境遥感应用对遥感信息定量化提出了很高的要求,要实现光学浅水区水环境参数的高精度反演,必须对不同底质类型光谱反射特性及其对水体光场垂直结构与水表遥感反射比的影响规律有清楚的认识;必须量化在不同观测条件下,不同状态的水体水底反射率的贡献大小,从而为发展有效的光学浅水环境参数提取模型奠定基础。因此,光学浅水遥感成为水色遥感领域的重要挑战。

2 光学浅水的概念与内涵

光学浅水与光学深水区区别于测量几何意义上的深水与浅水概念,是以水底是否“可见”或水底是否影响水面反射光谱为判断依据。水底的光学影响取决于水深、水体透明度、底质类型与反射光谱特性以及传感器的探测通道等诸多因素^[4-6]。光谱衰减随深度的变化是利用遥感数据进行水深和水底特征测量的关键因素^[7]。穿透深度(或透视深度)和穿透

* 收稿日期:2010-03-31;修回日期:2010-11-16.

* 基金项目:国家自然科学基金项目“光学浅水遥感水底反射效应研究”(编号:40901168);国家“十一五”科技支撑计划项目“基于环境一号等国产卫星的环境遥感监测关键技术及软件研究”(编号:2008BAC34B00)资助。

作者简介:周冠华(1976-),男,湖南攸县人,讲师,主要从事水环境遥感研究. E-mail: zhouguanhua@163.com

的光谱范围随水体透明度急剧变化。水深直接影响了水底是否可见,对于以往的大洋一类水体研究,由于垂直空间尺度大,通常情况下都不需要考虑水底反射的影响。水体透明度直接决定了光线在水体中的穿透深度,对于混浊的二类水体,尽管水深比较浅,但光束衰减系数大,入射光被强烈吸收,可能无法到达水底,属于光学深水;相反,对于较清洁的水体,由于光束衰减系数比较小,太阳光可能入射到水底,这种情况属于光学浅水。水体底质类型及其反射特性对于水底反射光对水面遥感反射信号贡献的大小具有显著的影响。常见的底质类型有水草型、淤泥型、岩石型、砂质型、珊瑚礁型以及混合型等,其中淤泥型底质为吸收型,而岩石型、砂质型、珊瑚礁型底质属于反射型,这2种底质类型的反射特性与波长的关系不太密切;而水草型属于波段选择性吸收与散射型,混合型则更为复杂。在对水面遥感反射比的影响程度上,反射型水底大于吸收型水底^[8]。探测通道是决定水色遥感光学深度的另一个重要因素。传感器接收信号的最大深度随着波长和水体透明度而变化。水体自身的吸收作用限制了可见光中较长波长的穿透深度,而溶解性有机物和浮游植物的吸收作用限制了480 nm以下波长的穿透深度。在最清澈的水域,490 nm处窄波段可以穿透的水深约100 m;在同一水域,达到水下20 m深度的光谱范围为430~580 nm;达到水下10 m深度的光谱范围为400~610 nm。综上所述,水体底部对水色的影响因水体深度、水体透明度、水体底质类型和水底类型以及遥感波段而异,所有这些因素综合形成影响传感器水色观测的水底效应。因此,必须确定光学浅水区的底质类型及其反射特性,并量化水底反射贡献的大小,实现水底反射信号与水体信号的有效分离。这不仅可以提高水质参数遥感反演精度,还可以为浅水底质类型的遥感监测、水深遥感绘图等提供重要的理论与技术基础。

3 光学浅水遥感水底反射校正问题

以往诸多研究对三大水色因子关注较多,而对浅水的光学过程与水底效应关注较少^[3]。近年来,随着新型水下光谱测量仪器的出现与水下光谱测量技术的发展,为分解水柱贡献和水底底质背景反射贡献提供了新的可能,有望通过实测的底部反射率结合水体辐射传输模拟,实现水底反射的校正,使进行大面积浅水环境遥感监测成为现实。

由于水体底部状况复杂多变,缺乏有效的区域

性底部反射率实测数据,通常情况下难以准确测量不同环境水底反射率并估算水底反射的贡献大小,以往大多数有关二类水体水质遥感研究都没考虑水底的影响,简化为光学深水处理,或者不考虑水底反射的BRDF(Bidirectional Reflectance Distribution Function)特性,简单地假设水底为朗伯体,设定一个不随波长变化的底部反射率,这种假设带有很大的不确定性,可能与实际情况大相径庭。因此,必须研究光学浅水区底质反射特性,实现水底信号与水体信号的有效分离,校正水底反射对水面遥感反射比的影响,还原光学浅水区水质参数浓度分布的“真面目”。

目前光学浅水遥感的理论与方法主要是针对海洋水色遥感提出的,尽管内陆水体具有其自身的特殊性,但这些理论与方法可以为内陆水体的研究所借鉴。光学浅水的底部反射对水面遥感反射比有一定的影响和贡献,国际上诸多学者早已注意到这方面的问题^[9~13],并形成了较好的研究基础。在过去的30年里,已经积累了一定的野外和实验室的典型底质类型光谱反射率测量数据,并建立了光学浅水遥感反演的基本理论框架。近10年来,很多为光学浅水设计的新型传感器,促进了这方面的研究。近些年来国内学者也开始关注光学浅水遥感问题^[2,14~17]。

4 水底反射特性测量

由于海洋水色遥感可用于全球变化研究,水体光学(主要是海洋光学)研究在广度与深度上都得到了长足的发展。在过去近30年间,现场水下光场与水体物质光学特性测量仪器得到了快速的发展,相继出现了价格便宜、性能稳定的商业化水下光谱仪与水体固有光学特性测量仪器^[18~20]。针对光学深水区研发的传感器与测量技术可以直接尝试应用于光学浅水区。但光学浅水环境,垂直尺度通常比较小,干扰因素多,对测量技术与测量仪器提出了更高的要求,针对光学浅水环境研究研发的水下传感器与水下成像系统出现得较晚^[21,22]。

水底反射光谱测量需要克服以下2个方面因素的影响:

(1) 水柱吸收的影响。在地面光谱测量中,传感器与目标物之间空气介质的影响通常非常微弱,可以忽略不计。但是在水底光谱测量中,水体对光谱信号的影响却显著得多,主要体现在2个方面:一方面,水体的吸收作用明显,尤其对长波段的吸收更

强;另一方面,水体的后向散射对于水底的光谱测量而言是一种“噪声”。如何有效避免或者消除水体的上述影响,是水底光谱测量需要解决的关键问题之一。

(2) 水面波浪对水底光场的扰动影响。在野外测量时,水面波浪难以避免。入射光线经过非平静水面折射进入水体后将发生“汇聚现象”。这种汇聚现象随着波浪起伏而不断变化,并将导致水底光场在时间与空间上都处于不停的变化之中,给水底光谱测量带来了很大的不确定性。如何有效地克服这方面的影响,是水底光谱测量所需要解决的另一关键问题。

目前,水底反射特性测量方法可大致归纳为 3 类:水面测量法、水下非参考板测量法^[23]与水下参考板测量法^[24],不同的测量方法原理基本一致^[25~27],主要差异体现在下行辐照度的测量方法上,困难之处在于需要尽可能克服水柱与水面波浪造成水下光场变化的“汇聚现象”对水底反射光谱测量的影响^[28]。

目前公开报道的水底反射光谱数据较少,Bostater 等^[29]实测的 5 种典型底质类型(沙质型、水草型、沙质与水草混合型、珊瑚礁型、死珊瑚礁型)反射光谱数据,可供理论研究参考。因此,建立典型底质类型反射光谱数据库,已成为当前光学浅水研究的当务之急。

5 水底 BRDF 特性研究

BRDF 是精确描述物体表面反射光的基本物理参数。据 Nicodemus 等^[30]与 Mobley 等^[10],BRDF 定义如下:

$$BRDF(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \equiv \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos\theta_i \cdot d\Omega(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

其中, i 表示入射, r 表示反射, θ 为天顶角, φ 为方位角, $d\Omega(\theta_i, \varphi_i)$ 为立体角, $L_i(\theta_i, \varphi_i)$ 表示入射辐亮度, $dL_r(\theta_r, \varphi_r)$ 表示反射辐亮度,为简化起见,公式中省略了波长 λ 。BRDF 的单位为 $1/\text{sr}$,可解释为每单位立体角的反射率。

光学浅水水底的 BRDF 特性决定了水底反射光的强度与角度分布。水底底质 BRDF 的研究主要涉及到典型底质类型 BRDF 的测量及其建模、水底 BRDF 对底部反射率的影响、水底 BRDF 对水面遥感反射比的影响、水底二向反射特性对离水辐亮度二向反射特性的影响、朗伯体代替非朗伯体的误差

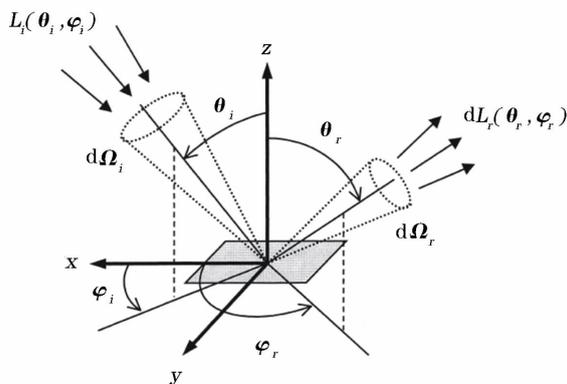


图 1 BRDF 的定义几何 (x - y 平面为反射面, z 轴垂直于反射表面)

Fig. 1 Geometry used in the definition of the BRDF (The reflecting surface lies in the x - y plane; the z axis is normal to the surface)

量化等几个方面。

陆地遥感对土壤和植被的二向反射特性进行了大量的测量与建模,而海洋水色领域长期以来侧重于光学深水的研究,不涉及水底二向反射特性问题。此外,水体内部特殊的环境决定了很难进行 BRDF 测量,因此鲜有水底 BRDF 模型的报道。在大部分的早期研究中,通常假设水底是平坦与同质的朗伯体^[31]。Mobley 等^[9]研究认为在某些情况下,一个具有非朗伯特性水底的 BRDF 可以用具有相同辐照度反射比的 BRDF 来代替。非平坦水底的主要影响是改变了光线的入射角,这种改变可以通过几何(坡度)校正来消除。对于异质性水底可利用面积加权的方法计算不同底质类型反射的贡献。

长期被忽视的水底 BRDF 问题直到最近才引起足够的重视。假设水底 BRDF 为常数,不考虑其反射的方向性,尽管在一定条件下是合理的,但野外测量表明,对于大部分的光照几何,水底反射率与朗伯体表面具有显著的差别^[32~34]。Zhang 等^[34]通过对沙质型底质的 BRDF 特性的野外测量发现,当太阳光垂直入射时,底部几乎为朗伯体,随着入射角的增大,开始呈现非朗伯特性。当入射角小于 35° 时,其 BRDF 近似于朗伯性;而当入射角大于 35° 时,出现明显的后向散射热点,并且这种现象随着入射角与沉积物粒径的增大越来越明显。

水底环境几何结构复杂,并且知之甚少,难以获取其 BRDF 特性。初步的模型模拟研究表明,这种差异对浅水光场产生显著的影响^[9]。此外,尽管已知影响水底反射特性的因素很多,如沉积物理化特

性与底部几何结构特性等,但其影响定量关系尚不清楚。现发展的某些水体辐射传输模型开始考虑了水底几何结构特性的影响^[9,35], Zimmerman^[36]还考虑了海草冠层的三维结构。

水底底质 BRDF 研究处于刚起步阶段,其研究仅仅停留在理论和实验阶段,理论尚待不断的完善。由水底空间结构与水底底质光谱特性共同决定了水底表面 BRDF 特性。鉴于野外条件的复杂性,基于室内可控条件下获取典型底质类型与几何结构条件下的 BRDF 数据进行建模与验证是一个很好的途径。

6 光学浅水水底反射效应研究

在光学深水区,在一个特定的光照条件与水面波浪场,水下光场主要是由水体中溶解的与悬浮的光学活性物质的分布所决定。大量的研究表明,下行辐照度随深度呈负指数规律衰减^[37-39],水底光学特性对下行辐射没有影响,仅影响水体光场上行辐射的垂直结构。因此上行辐照度在垂直结构上不是呈单调的递变规律,不能用一个简单的负指数衰减函数来表达,可能在水柱中某个深度层保持不变,或甚至随深度增加而增加,这取决于水深与水底光学特性^[2,40]。周冠华^[2]利用 Bostater^[29]实测典型底质类型反射率光谱数据作为底部边界条件,以太湖实测的固有光学特性数据^[17]作为底边界条件输入,通过水体光学蒙特卡罗模型模拟了光学浅水的光学过程,重点研究了垂直结构与不同底质类型对水面遥感反射比的影响。在光学浅水区,水深小于入射光穿透深度,部分入射到水底的光重新反射回水柱或再激发成荧光,水底对水面遥感反射比具有一定的贡献。因此,浅水区水下光场不仅是水体成分光学特性的函数,还是水深与水底反射特性的函数。与光学深水相比,虽然浅水中基本的辐射传输过程没有变化,但光的传播环境发生了变化,从而影响了水体辐射传输方程求解的假设与边界条件。

早期,浅水辐射传输计算主要以 Monte Carlo 模拟为主,通常都假设海底为平坦、均一的朗伯反射体^[31,40]。当时受计算资源所限,这些模拟受到很大的限制;另外由于缺乏相应的野外观测仪器,模型也无法验证。一种代替水底反射率为常数的方法是使用一维分析方法参数化海草冠层来解决水体辐射传输问题^[42],同样,这种方法也无法对模型进行验证。Mobley 等^[43]基于水底朗伯体假设,进行了水体辐射传输模型之间的比较,不同的数值模型的模拟结果

是一致的,但都没有进行模型的实际验证。后来, Maritorena 等^[40]采用二流近似的方法,建立了一维辐照度反射比模型,将水面上行辐照度分解为水柱与水底两部分的贡献和,并与野外测量进行了比较。此后,水体内部光场的测量成为可能,高精度辐射传输模型也得到了发展^[39],考虑的因素也越来越多,但水底反射的方向性一直被忽略。后来, Lee 等^[11,12]在 Hydrolight 模型的支持下,以准单次散射理论为基础,发展了 Maritorena 等的解析表达式,得到了星下点光学浅水遥感反射比模型。Albert 等^[44,45]发展了针对二类水体光学深水与光学浅水区的辐照度反射比与遥感反射比分析模型,取得了良好的应用效果。

水体光场取决于水体光学特性与外部光照条件,通常用辐射传输过程描述。在二流近似的基础上,辐射传输方程存在解析解。在二流近似中,假设水体光场为漫反射,因此可用上行辐照度 $E_u(\lambda, Z)$ 与下行辐照度 $E_d(\lambda, Z)$ 加以描述^[7],

$$\begin{cases} dE_d = (-aE_d - b_bE_d + b_bE_u) dZ \\ -dE_u = (-aE_u - b_bE_u + b_bE_d) dZ \end{cases} \quad (2)$$

纵坐标规定为垂直向下,在水面水深 $Z = 0$,在水底 $Z = H$,假设水体均一,各向同性。

给定边界条件,耦合的差分方程组(2)可以求解。其中,边界条件为,

$$\begin{cases} E_d(\lambda, 0) = E_{d0} \\ E_u(\lambda, H) = R_b(\lambda) E_d(\lambda, H) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $R_b(\lambda)$ 为水底的漫反射率。利用边界条件(3)可求得耦合的差分方程组(2)的解为,

$$\begin{cases} E_d = E_{d0} \left\{ \frac{1 - R_w R_b + R_w (R_b - R_w) \exp[-2K(H-Z)]}{1 - R_w R_b + R_w (R_b - R_w) \exp(-2KH)} \right\} e^{-KZ} \\ E_u = E_{d0} \left\{ \frac{R_w (1 - R_w R_b) + (R_b - R_w) \exp[-2K(H-Z)]}{1 - R_w R_b + R_w (R_b - R_w) \exp(-2KH)} \right\} e^{-KZ} \end{cases} \quad (4)$$

水柱辐照度漫反射比为:

$$\begin{aligned} R(\lambda, Z_x) &= \frac{E_u(\lambda, Z)}{E_d(\lambda, Z)} \\ &= \left\{ R_w + \left[\frac{(R_b - R_w) e^{-2K(H-Z)}}{1 - R_w R_b} \right] \right\} / \\ &\quad \left\{ 1 + \left[\frac{R_w (R_b - R_w) e^{-2K(H-Z)}}{1 - R_w R_b} \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)可描述水体深度与漫反射比之间的关系。刚好处于水面以下(或称为次表层)的辐照度反射比如下,

$$R(\lambda, 0^-) = \frac{R_w(1 - R_w R_b) + (R_b - R_w) e^{-2KH}}{(1 - R_w R_b) + R_w(R_b - R_w) e^{-2KH}} \quad (6)$$

实际应用时,可将此表达式进行适当简化,考虑到通常 $R_w < 0.1$, $R_b \leq 0.5$,所以, $R_w R_b = 1$, $1 - R_w R_b \approx 1$,根据该近似,上式可简化为^[46]:

$$R(\lambda, 0^-) \approx R_w + (R_b - R_w) e^{-2KH} \quad (7)$$

即次表层的反射比可表示为以上两项之和,其中第一项为光学深水柱的辐照度漫反射比;第二项表达式刻画了水底光学的影响。水底的影响随深度、漫衰减系数的增加而呈负指数的形式减小,随水底漫反射率的减小而减小。

这里简单地统一用 K 表示下行光漫射衰减系数 K_d 与上行光漫射衰减系数 K_u 的平均值,即, $2K = K_d + K_u$, K 通常认为是“有效”衰减系数^[40],通常 K_d 与 K_u 并不相等^[31],对于混浊的二类水体, K_d 比 K_u 约大一个数量级^[2]。若对 K_d 与 K_u 加以区分时,式(7)变为:

$$R(\lambda, 0^-) \approx R_w [1 - e^{-(K_d + K_u)H}] + R_b e^{-(K_d + K_u)H} \quad (8)$$

当已知水底的底质类型与反射率光谱 $R_b(\lambda)$ 与水面实测的或基于遥感图像大气校正后得到的 $R(\lambda, 0^-)$,通过海洋光学浮标或类似的水体辐照度辐亮度剖面测量仪测量并计算得到水体下行漫射衰减系数 K_d 与上行衰减系数 K_u ,以求得水柱的贡献 $R_w(\lambda)$,从而实现水底反射贡献与离水辐亮度之间的去耦合,最终达到校正水底反射效应的目的。

7 结论与展望

开展光学浅水底质反射效应的校正研究对于二类水体水质遥感具有重要的意义。国内外学者在水体组分浓度反演区域性模型方面的研究中已取得了许多进展,但是,光学浅水的水体光场特征和水体信息与水底信息的耦合效应研究程度严重不足,已成为制约水质遥感领域研究进展的重要课题。

尽管光学深水研究的技术与方法可借鉴于光学浅水的研究,但光学浅水具有其自身的独特性,为了彻底地理解光学浅水光场特征及对水面反射光谱的影响,必须研发新型测量工具与方法,实地获取底部光学特性参数,充分考虑到底部特征复杂分布与几何结构等因素,才能有效地达到校正水底反射效应,实现光学浅水水质参数的高精度反演。

参考文献 (References):

[1] Ackleson S G. Light in shallow waters: A brief research review

- [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 323-328.
- [2] Zhou Guanhua. Research of Simulation of Water Optical Properties and Remote Sensing Inversion of Inland Water Quality Parameter [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, 2007. [周冠华. 内陆水体光学特性模拟与水质遥感反演研究 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 2007.]
- [3] IOCCG. Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex Waters [R]. Sathyendranath S, ed. Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada, 2000.
- [4] Carder K L, Steward R G, Paul J H. Relationships between chlorophyll and ocean color constituents as they affect remote-sensing reflectance models [J]. *Limnology and Oceanography*, 1986, 31(2): 403-413.
- [5] Hamilton M K, Davis C O, Rhea W J, et al. Estimating chlorophyll content and bathymetry of Lake Tahoe using AVIRIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 44(2/3): 217-230.
- [6] Lee Z P. Visible-infrared Remote-sensing Model and Applications for Ocean Waters [D]. Department of Marine Science. St. Petersburg, The University of South Florida, 1994: 160.
- [7] Ohde T, Siegel H. Correction of bottom influence in ocean color satellite images of shallow water areas of the Baltic Sea [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(2/3): 297-313.
- [8] Mobley C D, Sundman L, Zhang H, et al. Effects of Optically Shallow Bottoms on Water Leaving Radiances [C]. Ocean Optics XV, Monte Carlo, October, 2000.
- [9] Mobley C D, Sundman L K. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Inhomogeneous and sloping bottoms [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 329-336.
- [10] Mobley C D, Zhang H, Voss K J. Effects of optically shallow bottoms on upwelling radiances: Bidirectional reflectance distribution function effects [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 337-345.
- [11] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 1. A semianalytical model [J]. *Applied Optics*, 1998, 37: 6 329-6 338.
- [12] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: 2 Deriving bottom depths and water properties by optimization [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(18): 3 831-3 843.
- [13] Kirk J T O. The vertical attenuation of irradiance as a function of the optical properties of the water [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48: 9-17.
- [14] Ren Jingping, Zhao Jinping. Progress and prospect of ocean color remote sensing in case 2 waters [J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(3): 363-371. [任敬萍, 赵进平. 二类水体水色遥感的主要进展与发展前景 [J]. 地球科学进展, 2002, 17(3): 363-371.]
- [15] Yang Dingtian. Progress in research of seagrass remote sensing [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(4): 82-86. [杨顶田. 海草的卫星遥感研究进展 [J]. 热带海洋学报,

- 2007,26(4):82-86.]
- [16] Yuan Lin. A Study on the Remote Sensing Monitoring of Submerged Aquatic Vegetation[D]. Shanghai: East China Normal University,2007. [袁琳. 大型沉水植物遥感监测研究[D]. 上海:华东师范大学,2007.]
- [17] Ma R, Tang J, Dai J. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4 305-4 328.
- [18] Smith R C, Booth C R, Star J L. Oceanographic bio-optical profiling system [J]. *Applied Optics*,1984,23(16): 2 791-2 797.
- [19] Mueller J L, Austin R W, eds. Ocean Optics Protocols for SeaWiFS validation. NASA Technical Memorandum 104566 [R]. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center,1992.
- [20] Hooker S B, Maritorena S. An evaluation of oceanographic radiometers and deployment methodologies[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000,17(6): 811-830.
- [21] Jaffe J S, Mclean J, Moore K D, et al. Underwater optical imaging: Status and prospectus [J]. *Oceanography*,2001,14(2): 64-75.
- [22] Mazel C H. Optics of the sea floor[J]. *Oceanography*,2001,14(3): 54-63.
- [23] Holden H, LeDrew E. The scientific issues surrounding remote detection of submerged coral ecosystems [J]. *Progress in Physical Geography*, 1998,22(2):190-221.
- [24] Goodman J A, Ustin S L. Acquisition of underwater reflectance measurements as ground truth [EB/OL]. ftp://popo.jpl.nasa.gov/pub/docs/workshops/02_docs/2002_Goodman_web.pdf, 2002.
- [25] Karpouzli E, Malthus T J, Place C J. Hyperspectral discrimination of coral reef benthic communities in the Western Caribbean [J]. *Coral Reefs*, 2004,23(1):141-151.
- [26] Hochberg E J, Atkinson M J. Capabilities of remote sensors to classify coral, algae, and sand as pure and mixed spectra[J]. *Remote Sensing of Environment*,2003,85(2): 300-308.
- [27] Hochberg E J, Atkinson M J, Andréfouët S. Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*,2003, 85(2): 159-173.
- [28] Liu Zhigang. Tropical Coastal Wetland Information Extraction Methods Using Remote Sensing[D]. Beijing: Beijing Normal University,2006. [刘志刚. 热带滨海湿地遥感信息提取方法研究[D]. 北京:北京师范大学,2006.]
- [29] Bostater C R. Modeling water surface reflectance signatures and in-water irradiance profiles in shallow tropical waters influenced by bottom reflectance[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Society (IGARSS1997)*,1997, 2(3/8):881-884.
- [30] Nicodemus F E, Richmond J C, Hsia J J, et al. Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance[R]. Washington DC: National Bureau of Standards, US Department of Commerce,1977:52.
- [31] Gordon H R, Brown O B. Influence of bottom depth and albedo on the diffuse reflectance of a flat homogeneous ocean[J]. *Applied Optics*,1974,13(9):2 153-2 159.
- [32] Voss K J, Chapin A, Monti M, et al. An instrument to measure the bi-directional reflectance distribution function (BRDF) of surfaces[J]. *Applied Optics*,2000,39(33): 6 197-6 206.
- [33] Voss K J, Mobley C D, Sundman L K, et al. The spectral upwelling radiance distribution in optically shallow waters [J]. *Limnology and Oceanography*,2003,48(1):364-373.
- [34] Zhang H, Voss K J, Reid R P, et al. Bi-directional reflectance measurements of sediments in the vicinity of Lee Stocking Island, Bahamas[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48: 380-389.
- [35] Zaneveld J R V, Boss E. The influence of bottom morphology on reflectance: Theory and two-dimensional geometry model [J]. *Limnology and Oceanography*,2003,48: 374-379.
- [36] Zimmerman R C. A biooptical model of irradiance distribution and photosynthesis in seagrass canopies [J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1): 568-585.
- [37] Jerlov N G. Marine Optics[M]. New York: Elsevier, 1976.
- [38] Kirk J T O. Light & Photosynthesis in Aquatic Ecosystems[M]. England: Cambridge University Press,1994.
- [39] Mobley C D. Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters [M]. New York: Academic Press, 1994.
- [40] Maritorena S, Morel A, Gentili B. Diffuse reflectance of oceanic shallow waters: Influence of water depth and bottom albedo[J]. *Limnology and Oceanography*,1994, 39(7): 1 689-1 703.
- [41] Plass G N, Kattawar G W. Monte carlo calculations of radiative transfer in the Earth's atmosphere-ocean system; 1. Flux in the atmosphere and ocean [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1972,2(2):139-145.
- [42] Ackleson S G, Klemas V. Two-flow simulation of the natural light field within a canopy of submerged aquatic plants[J]. *Applied Optics*, 1986,25(7): 1 129-1 136.
- [43] Mobley C D, Gentili B, Gordon H R, et al. Comparison of numerical models for computing underwater light fields[J]. *Applied Optics*, 1993,32(36): 7 484-7 504.
- [44] Albert A, Mobley C D. An analytical model from subsurface irradiance and remote sensing reflectance in deep and shallow case-waters [J]. *Optics Express*, 2003,11(22): 2 873-2 879.
- [45] Albert A, Gege P. Inversion of irradiance and remote sensing reflectance in shallow water between 400 and 800 nm for calculations of water and bottom properties[J]. *Applied Optics*, 2006,45(10):2 331-2 343.
- [46] Austin R W. Inherent Spectral Radiance Signatures of the Ocean Surface. Ocean Color Analysis. Ref. 7410[R]. Scripps Institution of Oceanography, San Diego, CA, USA,1974.

Review of Correction of Bottom Effects of Optical Shallow Water Remote Sensing

Zhou Guanhua

(*School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China*)

Abstract: Until recently, optical processes in shallow water, where the sea bottom is shallow enough to be optically detected, has received little attention outside of a relatively small number of modeling and remote sensing investigations. The contribution from the bottom of optical shallow water changes the intensity and spectral distribution of remotely sensed signal above water surface, which became one of the key problems for water quality remote sensing inversion accuracy. In shallow water, where the depth is much less than the potential for light to penetrate, a large fraction of the subsurface light reaches the ocean floor, where portions of the light energy are absorbed, reflected back into the overlying water column, or re-emitted as fluorescence. So variability in the subsurface light field is not only determined by the distribution of optically important matter dissolved and suspended in the water column, but also of the function of the depth and properties of the ocean floor. It is important to understand how light interacts with the sea floor. Though many of the techniques and approaches to investigate light in the deep water are relevant in the shallow water, they are insufficient to address the entire problem, and the treatment of remote sensing reflectance is more complex than for optically deep waters, when water bottom effects are considered. In order to completely understand the details of how light is distributed within the shallow water and to determine the interrelationships and variability of optical properties of water bottom and water-leaving radiance, the measurements of spectral bidirectional reflectance distribution function (BRDF) along with concurrent measurements of the sediment properties (composition, grain size, *etc.*) should be taken. The foundation of spectral database of typical sediment types in the typical coastal areas by experiment is necessary work to do, which can provide the basic data for modeling and application in optically shallow water remote sensing. New in-situ sensors and approaches designed specifically to take into account the complex distribution, structure, and optical properties of benthic features should be developed. Sophisticated models and methods are required to adequately separate the signal from the water column and that from the water bottom to derive the water-leaving radiance, bottom depth or bottom features. The magnitude and angular distribution of the bottom-reflected radiance are determined by the BRDF of the bottom. If the bottom is inhomogeneous, or patchy, or not horizontal, the upwelling radiance is a spatial function of horizontal location as well as depth, and therefore three-dimensional (3D) radiative Transfer (RT) calculations are necessary to predict the in-water and water-leaving radiances.

Key words: Optical shallow water; Water quality Remote Sensing; Bottom effect.