

# 海洋辐射传递两流理论的 海中悬浮泥沙光学模式\*

刘 智 深

(山东海洋学院物理系)

## 提 要

用海洋光学的辐射传递两流理论导出光学遥感探测海洋中悬浮泥沙的光学模式,并证明其准确性优于现在海洋遥感探测中应用的“对数模式”,理论方法较蒙特卡罗(Monte Carlo)方法简便。实验室水槽测量结果与这一理论模式计算结果一致。

## 一、引 言

海洋辐射传递理论是海洋光学的理论基础。60年代前后海洋辐射传递理论主要是研究水中辐射场分布问题。70年代海洋遥感技术的发展尤其是光学遥感,提出了不少有待于海洋光学研究解决的海洋遥感的光学模式问题。其中最受人注意的是悬浮泥沙浓度及叶绿素含量的遥感光学模式。Gordon, H. R.<sup>[1,2]</sup>用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法详细研究了海洋固有光学性质和表观光学性质的关系,并提出了有效的遥感光学模式。Austin, R. W.<sup>[3,4]</sup>详细研究了海洋遥感的光谱辐射。本文将从海洋辐射传递两流理论出发,推出海水中悬浮泥沙浓度与海面光辐射的关系式,并与国内外实测数据进行比较,证明这种简单的海洋光学方法有一定的应用价值。

## 二、海洋辐射传递的两流理论

海洋辐射传递两流理论是比较简单但有很多应用价值较为成熟的理论<sup>[5]</sup>。它讨论海洋中向上及向下辐照度。其基本微分方程为

$$\begin{aligned} dE_d(z)/dz &= -(aD+2b_b)E_d(z) + b_bE_u(z), \\ -[dE_u(z)]/dz &= -(aD+2b_b)E_u(z) + b_bE_d(z). \end{aligned} \quad (1)$$

其中  $E_d$  为向下辐照度,  $E_u$  为向上辐照度,  $a$  为海水的光吸收系数,  $D$  为分布函数,  $b_b$  为后向散射系数,  $z$  为海水深度。解方程得

$$E_d(z) = m_+g_- \exp(+kz) + m_-g_+ \exp(-kz);$$

$$E_u(z) = m_+g_+ \exp(+kz) + m_-g_- \exp(-kz)。$$

这里  $m_+$  及  $m_-$  为任意常数,  $g_{\pm} = 1 \pm aD/k$ ,  $k = \sqrt{aD(aD+2b_b)}$ 。当水体为无限深时, 即  $z \rightarrow \infty$  的边界条件, 强迫  $m_+ = 0$ , 故

收稿日期: 1984年12月12日; 收到修改稿日期: 1985年2月25日

\* 本工作得到中国科学院科学基金资助。

$$E_d(z) = m_- g_+ \exp(-kz),$$

$$E_u(z) = m_- g_- \exp(-kz)。$$

因此水体中水平分层的反射比为

$$R = g_- / g_+ = (k - \alpha D) / (k + \alpha D)。 \quad (2)$$

详细的讨论, 参见 [5]。

### 三、海中悬浮泥沙浓度的光学模式

假设日光穿透海水深度小于海洋水体深度, 则可认为满足  $z \rightarrow \infty$  的条件。恰在海面以下的向上辐射亮度可表示为

$$L_u = E_d(0) R / 4\pi。$$

这里假设海面以下的水层为完全漫射体<sup>[1]</sup>。海面上的向上辐射亮度为

$$L_w = r L_s + (t/n^2) L_u。$$

这里  $r$  为海面反射率;  $L_s$  为海面向上反射的入射天空光辐射亮度,  $n$  为水体折射率,  $t$  为海水-空气界面透射率。由此可见上式中的  $R$  携带了悬浮泥沙浓度的信息。假设为漫射照明, 则此时分布函数  $D \approx 2$ , 则

$$\begin{aligned} R &= (k - \alpha D) / (k + \alpha D) = (\sqrt{aD(aD + 2b_b)} - \alpha D) / (\sqrt{aD(aD + 2b_b)} + \alpha D) \\ &= \left( \sqrt{1 + \frac{b_b}{a}} - 1 \right) / \left( \sqrt{1 + \frac{b_b}{a}} + 1 \right)。 \end{aligned}$$

令  $x = b_b / (a + b_b)$ 。 (3)

则  $R = (1 - \sqrt{1-x}) / (1 + \sqrt{1-x})$ 。对上式取一级近似, 则

$$R = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{1}{2} x \right) \right] / \left[ 1 + \left( 1 - \frac{1}{2} x \right) \right] = x / (4 - x) = b_b / (4a + 3b_b)。 \quad (4)$$

我们从 (4) 式可以看到, 海洋辐射传递两流理论, 在一级近似条件下所导出的  $R$  结果与 Gordon 在准单次散射假设条件下所推出的结果<sup>[6]</sup>

$$R = b_b / 3(a + b_b), \quad (5)$$

几乎相同。而 (4) 式的结果更准确。假说

$$R = \sum_{n=0}^N g_n x^n。 \quad (6)$$

现在, 我们根据海洋辐射传递两流理论来求  $R$  的二级近似:

$$\begin{aligned} R &= (1 - \sqrt{1-x}) / (1 + \sqrt{1-x}) \\ &\approx \left( 1 - \left[ 1 - \frac{1}{2} x - \frac{1}{2.4} x^2 \right] \right) / \left( 1 + \left[ 1 - \frac{1}{2} x - \frac{1}{2.4} x^2 \right] \right) \approx g_1 x + g_2 x^2。 \end{aligned} \quad (7)$$

根据 (5) 式, 设  $g_1 \approx 1/3$ , 则根据 (7) 式两边  $x^2$  项系数应该相等的假设, 可求得  $g_2 \approx 1/7$ 。同样取  $R$  的三级近似后, 可求的:  $g_3 = 1/8$ 。由此可得

$$R \approx 0 + x/3 + x^2/7 + x^3/8 \approx 0 + 0.33x + 0.14x^2 + 0.13x^3, \quad (8)$$

这与 Gordon 经大量数值运算<sup>[1]</sup>, 用蒙特卡罗方法所求得的

$$R = 0.0001 + 0.3244x + 0.1425x^2 + 0.1308x^3, \quad (9)$$

相比较,说明运用海洋辐射传递两流理论所得出的结果(8)式,有相当的准确性。

下面我们用一次近似结果(4)式来讨论海中悬浮泥沙浓度与向上辐射亮度的关系。也即泥沙浓度  $\rho$  与  $R$  的关系。用多光谱遥感方法可以提取海洋中悬浮泥沙的辐照反射比  $R^{[6]}$ ,故我们假设吸收系数  $a$  及后向散射系数  $b_b$  为纯海水的吸收系数  $a(w)$  及后向散射系数  $b_b(w)$  与悬浮泥沙的吸收系数  $a(s)$  及后向散射系数  $b_b(s)$  之和,则(4)式可写为

$$R = [b_b(w) + b_b(s) \cdot \rho] / \{4a(w) + 3b_b(w) + [4a(s) + 3b_b(s)]\rho\} \quad (10)$$

由(10)式显然可见,当  $\rho$  很小时,  $R$  近似与  $\rho$  为线性关系。当  $\rho$  很大时,  $R$  趋于恒定值。我

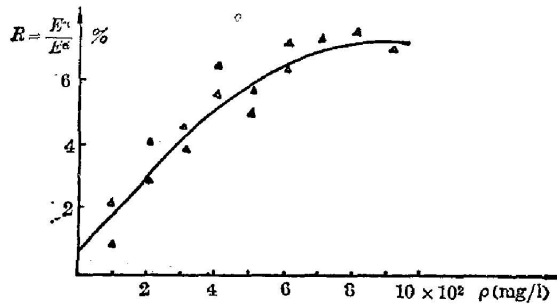


图1 在实验水槽中测定的辐照反射比  $R$  与悬浮泥沙浓度的变化关系

Fig. 1 Reflectance  $R$  as function of the concentration of suspended sand in the water tank  $\Delta$ ; Values of  $R$  measured for different sand concentrations; ---, Correlative fitting curve

我们认为海水中悬浮泥沙的对数模式仅仅是一种近似的光学模式。它只适合于悬浮泥沙浓度较小的情况。

们的实测曲线图1。以及国外发表的实测结果<sup>[7]</sup>完全说明了这一点。根据(10)式我们可推出

$$dR/d\rho = A / (B + E\rho + F\rho^2) \quad (11)$$

其中  $A$ 、 $B$ 、 $E$ 、 $F$  均为与散射系数、吸收系数有关的常数,若假设  $\rho^2 \ll \rho$ , 则

$$dR/d\rho = b / (B + E\rho) \quad (12)$$

根据简化的(12)式可推知

$$R - R_0(\rho=0) = (A/E) \ln(B + E\rho) \quad (13)$$

(13)式即一般称之为“对数模式”<sup>[8]</sup>。由此可见,对数模式(13)是(10)式的近似表达式。(10)式又是模式(6)的一级近似。所以

## 四、讨 论

1. 本文从海洋辐射传递的两流理论出发所导出的海水中悬浮泥沙光学模式有相当的准确性,因此为海洋遥感光学模式的研究提供了一种简单的海洋光学方法。

2. 用水中辐照度计同时测定水表层向上,向下辐照度,可以作为海洋现场调查海水中泥沙含量的有效方法。

3. 根据(10)式可见,绝对测量悬浮泥沙浓度  $\rho$ , 必须对纯海水的吸收系数  $a(w)$  及后向散射系数  $b_b(w)$  进行测定。同时由(4)式可见,用遥感方法可以测量海水的固有光学性质 ( $b_b/a$ ) 参量。

4. 图1为我们实验测定的  $R$  与泥沙浓度  $\rho$  的实测分布曲线。下式为 Klemas, V.<sup>[7]</sup> 在 Delaware 湾测定的 MSS-5 辐射亮度  $L_u$  与泥沙浓度  $\rho$  (mg/L) 的经验关系

$$L_u = (1/8.481) \ln[\rho/1.169]$$

这些实测结果证明本文用海洋辐射传递两流理论导出的悬浮泥沙光学模式有较准确的结果。

## 参 考 文 献

- [1] H. R. Gordon; *Appl. Opt.*, 1976, **15**, No. 8 (Aug), 1974.
- [2] H. R. Gordon; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 8 (Aug), 1893.
- [3] R. W. Austin; "Remote Sensing of Spectral Radiance" in "Optical Aspects of Oceanography", (Academic Press, 1974).
- [4] R. W. Austin; *SPIE*, 1979, **208**, 170.
- [5] R. W. Preisendorfer; "Hydrologic Optics", (U. S. Department of Commerce NOAA 1976).
- [6] H. R. Gordon; *SPIE*, 1979, **208**, 14.
- [7] 杉森康宏; "海洋のリモートセンシング", (共立出版株式会社, 1982), § 3.
- [8] J. C. Mundy Jr et al.; *Remote Sensing of Environment*, 1979, **8**, No. 2 (May), 169.

**An optical model of suspended sand in the sea based  
on two-flow theory of radiative transfer in the sea**

LIU ZEISHEN

(Optical Information Processing Lab, Physics Department, Shandong College of Oceanography, Qingdao)

(Received 12 December 1984; revised 25 February 1985)

**Abstract**

In this paper, a simple optical model for detecting suspended sand concentration by remote sensing is proposed based on the two-flow theory of radiative transfer in the sea. This optical model is more accurate than the "Logarithm model", while its mathematics is simpler than the Monte Carlo method by H. R. Gordon.

Experimental results obtained in a water tank are presented and compared with results of the proposed optical model.