

# 基于 Gordon 模型的多次散射项参数化研究

黄昌春, 李云梅, 王 桥, 孙德勇, 乐成峰, 金 鑫, 王彦飞

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210046)

[摘要] 针对内陆湖泊高散射特性水体, 利用 Hydrolight 模拟软件模拟不同散射系数、风速、太阳天顶角条件下水表面以下辐照度比  $R(0^-)$  与  $b_b/(a+b_b)$  的比值  $g$ , 利用 Gordon 线性方程和二次方程对  $g$  值进行拟合, 分析散射系数、风速、太阳天顶角等因素对拟合方程系数和多次散射项的影响, 分析结果表明二次方程系数受太阳天顶角和风速影响的范围明显小于线性方程, 并且与线性方程相比二次方程对多次散射作用的表达和实际状况以及前人研究结果更加相符, 从而建立高散射特性水体中考虑多次散射作用的水表面以下辐照度比  $R(0^-)$  与  $b_b/(a+b_b)$  的改进关系式, 利用新的模拟数据对该表达形式进行检验, 误差范围为  $-4.0158\% \sim 4.4981\%$ , 说明该模型能够较好地应用于  $R(0^-)$  的精确计算或利用  $R(0^-)$  准确反演固有光学属性, 在湖泊水色遥感方面具有较好的应用前景。

[关键词] 多次散射, 水表面以下辐照度比, Hydrolight 模拟

[中图分类号] X703.5 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2009)04-0127-07

## Parameterization of Multiple Scattering Item Based on the Gordon Model

Huang Changchun, Li Yumei, Wang Qiao, Sun Deyong, Le Chengfeng, Jin Xin, Wang Yanfei

(Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University, Ministry of Education, Nanjing 210046, China)

**Abstract** Using the optical simulation software Hydrolight, this paper simulates the specific value  $g$  between the irradiance reflectance under water surface and the  $b_b/(a+b_b)$  with different scattering coefficients, wind speeds and solar zenith angle in high scattering water body. Utilizing the Gordon linear equation and quadratic equation to fit the value  $g$ , this paper analyses the scattering coefficients, wind speeds and solar zenith angle affect on the parameter of fit equation and the item of multiple scattering expressed by Gordon's linear equation and quadratic equation. Compared to the Gordon linear equation, the result of analyses indicate that not only the range of affection that the wind speeds and solar zenith angle on the quadratic equation's parameter is much narrow, but also the expression of the item of multiple scattering by quadratic equation is much more consistent to the fact condition and the result by fore-runner's research. Accordingly, considering the item of multiple scattering in the high scattering characteristic water body in the inland lake, we finally establish the improved relationship between the  $R(0^-)$  and  $b_b/(a+b_b)$ , and perfect express equation of value  $g$ . Using the simulate data to test the equation, the range of error is  $-4.0158\% \sim 4.4981\%$ , and it shows that this model can be applied to calculate the  $R(0^-)$  exactly or inverse the inherent optical property from the  $R(0^-)$  nicely, so the model has a good prospect in study on water color remote sensing in lake.

**Key words** multiple scattering, the irradiance reflectance under water surface, Hydrolight simulation

水表面以下辐照度比  $R(0^-)$  是刚好处于水表面以下的上行辐照度 ( $E_u(0^-)$ ) 与下行辐照度 ( $E_d(0^-)$ ) 的比值. 1975年 Gordon<sup>[1,2]</sup> 利用蒙特卡罗方法推导出  $R(0^-)$  与固有光学属性后向散射系数 ( $b_b$ ) 及吸收系数 ( $a$ ) 具有  $R(0^-) = \sum_{n=0}^3 f_n \left[ \frac{b_b}{a+b_b} \right]^n = \sum_{n=0}^3 \left[ f_n \left[ \frac{b_b}{a+b_b} \right]^{n-1} \right] \frac{b_b}{a+b_b}$  的关系. 当处于水体表面时,  $f_0$  值很小且物理意义不明确, 可以忽略, 即  $R(0^-) = g \frac{b_b}{a+b_b}$ , 其中  $g = \sum_{n=1}^3 \left[ f_n \left[ \frac{b_b}{a+b_b} \right]^{n-1} \right]$ , 在海洋水

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC34B05)、江苏省 2008 年度普通高校研究生科研创新计划(CX08B\_015Z)资助项目.

通讯联系人: 黄昌春, 博士研究生, 研究方向: 环境污染遥感监测. E-mail: huangchangchun\_aaa@163.com

体中  $b_b \ll a$ , 因此, 可以不考虑多次散射作用对参数  $g$  的影响,  $n = 2$  和  $n = 3$  项均可忽略, 只保留  $n = 1$  项; 当太阳在天顶时即天顶角  $\theta_0 \leq 20^\circ$  时,  $f_1 = 0.3244$  当天空漫射光均匀分布, 天顶角  $\theta_0 \geq 30^\circ$  时,  $f_1 = 0.3687$  然而与海洋水体相比, 内陆湖泊(如太湖)水体的散射系数至少高 1 个数量级<sup>[3-7]</sup>, 多次散射对  $g$  值的贡献率显著增加, 使得只保留  $n = 1$  项的形式难以表达多次散射作用对参数  $g$  的影响, 这对该模型在内陆高散射特性水体中的应用精度起到了极大的限制作用。

为了更加准确地模拟高散射特性水体的  $R(\bar{O})$ , 本文利用 HYDROLIGHT 软件模拟不同  $b_b/(a + b_b)$ 、太阳天顶角和水 - 气界面(风速)条件下的  $R(\bar{O})$  值, 进而建立基于多次散射的  $R(\bar{O})$  模拟模型。

## 1 数据与方法

HYDROLIGHT 是基于辐射传输理论的水体光学模拟软件, 利用该软件, 可以通过输入水体固有光学属性、光线入射状况和水体边界条件等参数, 模拟不同深度的辐照度、辐亮度、辐照度比  $R(\bar{O})$ 、漫衰减系数  $K$ 、水下平均余弦  $U$  等。本文首先利用该软件模拟不同条件下的  $R(\bar{O})$ , 进而计算  $g$  值; 其次, 分别利用 Gordon 一次线性(即  $n = 2$ )和二次方程(即  $n = 3$ )拟合  $g$  值, 通过分析  $b_b/(a + b_b)$ 、太阳天顶角和水 - 气界面状况(风速)对两种拟合方法的影响, 最终确定多次散射项和  $g$  值的最佳表达式, 提出改进的考虑多次散射作用的水表面以下辐照度比模拟模型, 模型模拟的精度用未参与模型建立的模拟值检验。

### 1.1 $R(\bar{O})$ 的模拟

利用 HYDROLIGHT 模拟<sup>[8-9]</sup> 440 nm 波段不同散射系数、风速、太阳天顶角条件下的水表面以下辐照度比  $R(\bar{O})$ , 其中, 部分数据用于分析和建立  $R(\bar{O})$  模拟模型, 另一部分数据用于模型检验。用于模型构建的  $R(\bar{O})$  模拟的输入参数见表 1。

表 1 HYDROLIGHT 模拟输入值  
Table 1 The input value of HYDROLIGHT simulation

变量	输入值
吸收系数 ( $a/m^{-1}$ )	9
散射系数 ( $b/m^{-1}$ )	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48
散射相函数 ( $\beta(\theta)$ )	FF $b_b$ 0.018 (FF 为散射相函数类型, $b_b$ 0.018 为后向散射率)
太阳天顶角 ( $\theta^\circ$ )	0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 85°
风速 ( $v/(m/s)$ )	0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8

表 1 的输入参数根据近两年本实验小组对太湖的实测数据估算。输入的吸收和最大散射系数是利用 AG-S 测得的太湖全湖数据的平均值, 而散射项函数的选取是依据 Mobley 等的研究结果<sup>[10-11]</sup>, 选用 Fournier-Fordand 散射函数, 后向散射概率选用太湖全湖平均值 0.018 后向散射概率中后向散射系数为 BB9 测得的太湖全湖  $b_b$  数据的平均值。

在高浑浊水体, 表面反射受水体底质影响较小, 因此在 HYDROLIGHT 模拟中忽略底反射。

模型检验的模拟数据的输入参数是表 1 中未选取的参数, 如  $b_b/(a + b_b)$  为 0.045 太阳天顶角为  $10^\circ$ , 风速为 1.5 m/s 等等, 用于模型检验的数据共有 214 个。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 参数 $g$ 值的计算

利用模拟的  $R(\bar{O})$  和公式  $R(\bar{O}) = g \frac{b_b}{a + b_b}$  计算不同  $b_b/(a + b_b)$  条件下、太阳天顶角和风速分别为  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 85^\circ$  和 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 m/s 条件下的  $g$  值。

#### 1.2.2 $g$ 值的参数化表达

(1) 利用 Gordon 一次线性模型估算  $g$  值

根据 Gordon 方程中  $g$  值与  $b_b/(a + b_b)$  之间的线性关系:  $g = f'_1 + f'_2 \frac{b_b}{a + b_b}$ , 利用 SPSS 回归得到不同太阳天顶角和风速条件下的参数  $f'_1$  和  $f'_2$  值。

(2) 利用二次方程模型估算  $g$  值

利用二次方程  $g = f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right] + f_1$  形式进行回归, 得到不同太阳天顶角和风速条件下的

参数  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  值.

### 1.2.3 多次散射项的计算

在同一太阳天顶角与风速条件下, 利用不同的  $b_b / (a + b_b)$  和  $g$  值进行回归, 对回归结果进行分析, 发现  $f_1$  方差为 0 标准差为 0.035%, 变异系数为 0.082%, 几乎不随  $b_b / (a + b_b)$  的变化而变化; 而在不同太阳天顶角和风速条件下, 变异系数分别达到 11.986% 和 0.32%,  $f'_1$  与  $f_1$  具有相似性质, 因此将  $f_1$  和  $f'_1$  定义为表观光学量; 而受固有光学量影响的  $f'_2 \frac{b_b}{a + b_b}$  与  $f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]$  项定义为多次散射项. 利用回归参数与  $b_b / (a + b_b)$  计算多次散射项值.

## 2 结果与分析

### 2.1 $g$ 值因素影响的分析

根据 1.2.1 的计算结果, 分析得到不同条件下的  $g$  值受风速、太阳天顶角以及  $b_b / (a + b_b)$  的影响如图 1 所示:

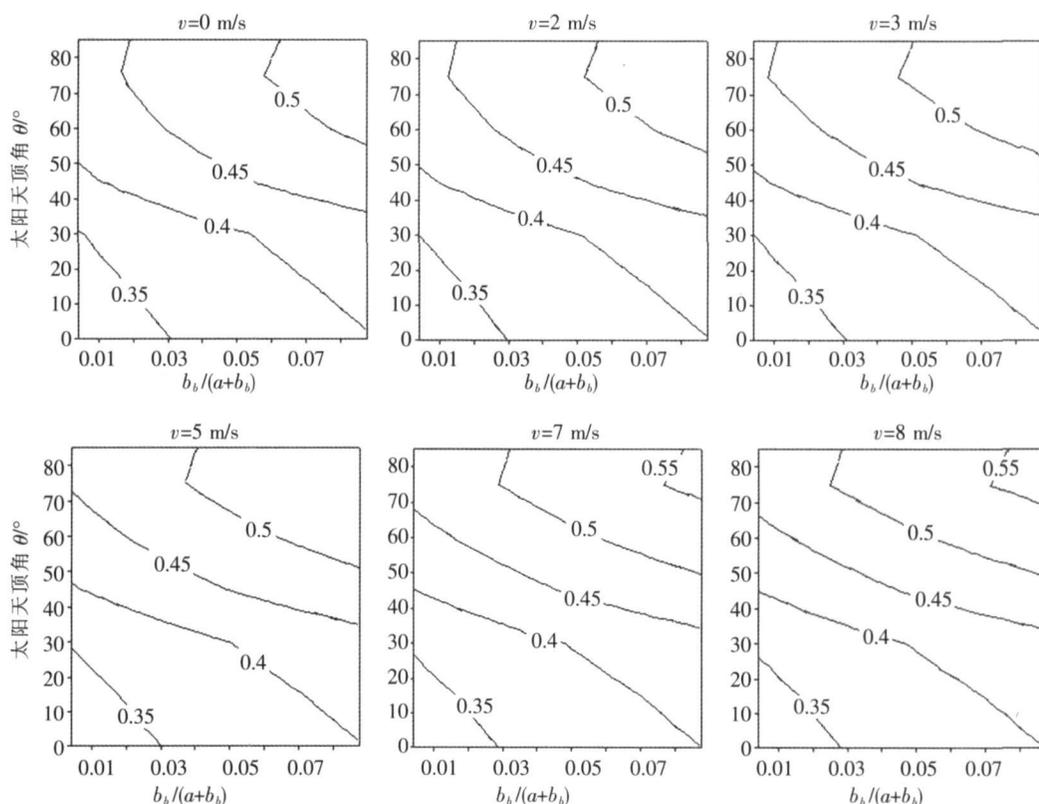


图 1  $v=0$  m/s, 2 m/s, 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s, 8 m/s 时,  $g$  值随太阳天顶角和  $b_b/(a+b_b)$  的变化轮廓图

Fig.1 The key drawing of the value of  $g$  vary with solar zenith angle and  $b_b/(a+b_b)$  when  $v=0$  m/s, 2 m/s, 3 m/s, 5 m/s, 7 m/s, 8 m/s

从图 1 可以看到, 随着风速的增加,  $g$  等值线图向  $b_b / (a + b_b)$  小的方向漂移, 即随着风速的增大  $g$  值增大, 发生漂移的范围主要集中在太阳天顶角大于  $30^\circ$  的范围之内, 而漂移的速度随着太阳天顶角的增加而增加, 如图 2 所示, 准直线斜率随太阳天顶角在不断的增大. 随着太阳天顶角的增加,  $g$  值总体呈现指数形式增大, 但是  $30^\circ$  和  $75^\circ$  处出现偏离指数形式, 若将  $30^\circ$  点作为一分界点, 在小于  $30^\circ$  条件下,  $g$  值随太阳天顶角呈现线性增长, 大于  $30^\circ$  呈现对数增长形式如图 3 所示.

### 2.2 Gordon 方程不同计算模式对多次散射表达的分析

利用线性方程和二次方程分别对参数  $g$  和  $g$  值中的多次散射项进行表达, 综合考虑太阳天顶角和风速的变化对参数  $g$  和  $g$  值中多次散射项的影响, 从 ① 参数  $g$  表达式系数受太阳天顶角和风速影响状况, ② 对多次散射项表达的合理性, 两个方面来确定高散射特性水体中多次散射项和参数  $g$  的最佳表达形

式<sup>[12-14]</sup>

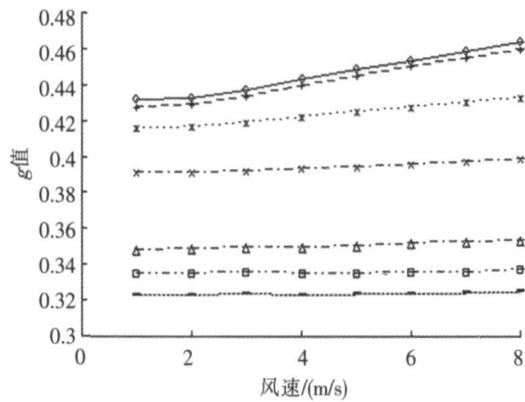


图 2 g 值随风速的变化

Fig.2 The change of g value with wind speed

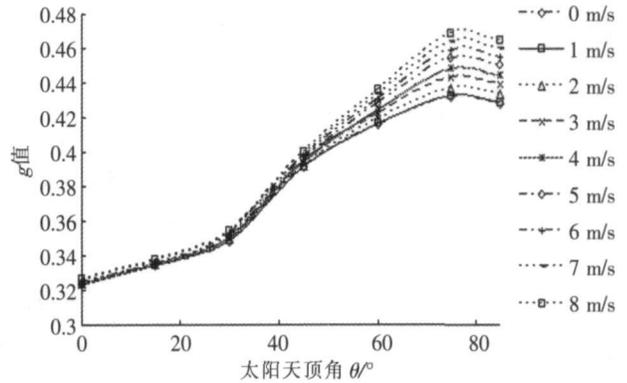


图 3 g 值随太阳天顶角的变化

Fig.3 The change of g value with the solar zenith angle

2.2.1 线性方程模式及多次散射项的影响因素分析

Gordon 线性方程模式为  $g = f'_1 + f'_2 \frac{b_b}{a + b_b}$ , 经计算得到参数  $f'_1$  和  $f'_2$  随风速与太阳天顶角的关系如图 4 所示,  $f'_1$  在太阳天顶角小于  $60^\circ$  时, 受到风速的影响较小, 当太阳天顶角大于  $60^\circ$  时,  $f'_1$  受风速的影响明显增加; 而  $f'_2$  在太阳天顶角小于  $30^\circ$  或大于  $60^\circ$  时有较大的波动, 在  $30^\circ$  到  $60^\circ$  之间变动较小. 多次散射项受风速和太阳天顶角的影响主要体现在系数  $f'_2$  上, 因此风速和太阳天顶角对多次散射项的影响与对  $f'_2$  的影响相类似, 只是数值有一定的变化. 多次散射项对 g 值的贡献率随着  $b_b/(a + b_b)$  的增加不断增大, 如图 5 所示, 在  $0^\circ \sim 85^\circ, 1 \sim 8 \text{ m/s}$  范围内其增长率的范围为  $1.065 \sim 1.212$ . 由于贡献率随  $b_b/(a + b_b)$  线性增加, 故不存在最大贡献率, 这一结论与实际情况不符, 也与 Cham i<sup>[15]</sup> 等研究结果具有一定的差异性.

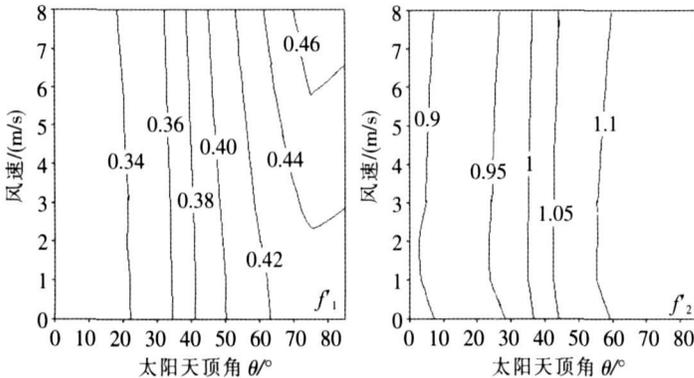


图 4 参数  $f'_1$  和  $f'_2$  随太阳天顶角和风速变化轮廓线

Fig.4 The key drawing of the parameter  $f'_1$  and  $f'_2$  vary with wind speed and solar zenith angle

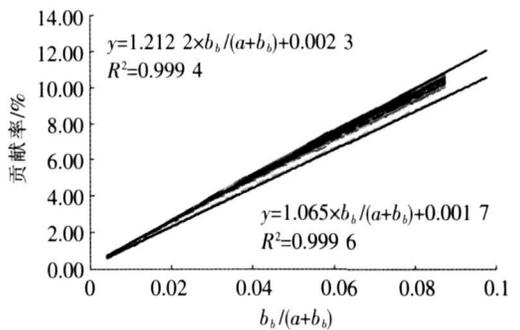


图 5 多次散射项对 g 值的贡献率随  $b_b/(a+b_b)$  的变化

Fig.5 The value of contribution for multiple scattering to the value of g vary with the  $b_b/(a+b_b)$

2.2.2 二次方程模式及多次散射项的影响因素分析

Gordon 二次方程模式为  $g = f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right] + f_1$ ,  $f_1, f_2, f_3$  值受太阳天顶角和风速的影响如图 6 所示,  $f_1$  在太阳天顶角小于  $70^\circ$  时, 受到风速的影响较小, 当太阳天顶角大于  $70^\circ$  时受风速的影响明显增加, 这个角度范围明显大于线性方程参数  $f'_1$ ;  $f_2$  在  $75^\circ \sim 80^\circ, 7 \sim 8 \text{ m/s}$  呈现出较小波动, 在小角度地区也存在轻微的变动; 而  $f_3$  在太阳天顶角小于  $10^\circ$  或大于  $70^\circ$  时有较大的波动, 在  $10^\circ$  到  $70^\circ$  之间变动较小, 而这个角度区间与线性方程参数  $f'$  相比也明显增大了. 综合二次方程参数  $f_1, f_2, f_3$  与线性方程参数相比较, 二次方程参数受风速影响的角速度区间明显要小于线性方程.

多次散射项  $f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]$  受风速和太阳天顶角的影响主要是来源于系数  $f_2, f_3$ . 如图 7 所示, 分别给出了  $b_b/(a + b_b)$  为 0.004 0.02 0.035 0.049 0.064 0.088 时, 多次散射项受风速和太阳天顶

角的影响轮廓图.

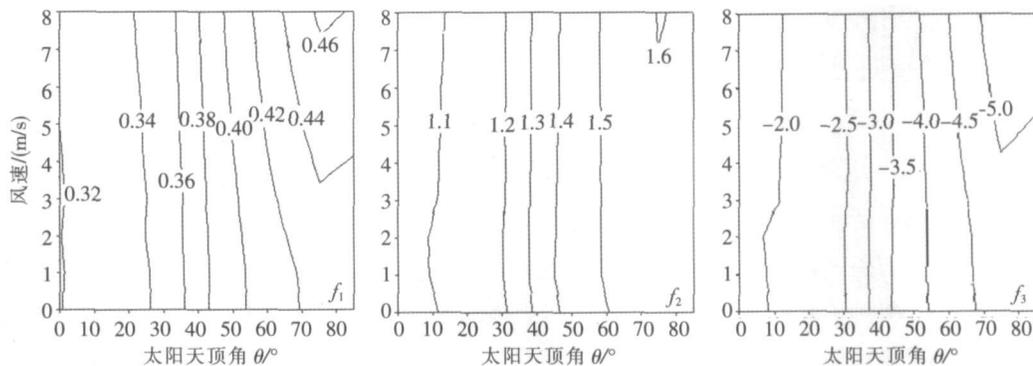


图 6 参数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  随太阳天顶角和风速变化轮廓线

Fig.6 The key drawing of the parameter  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  vary with wind speed and solar zenith angle

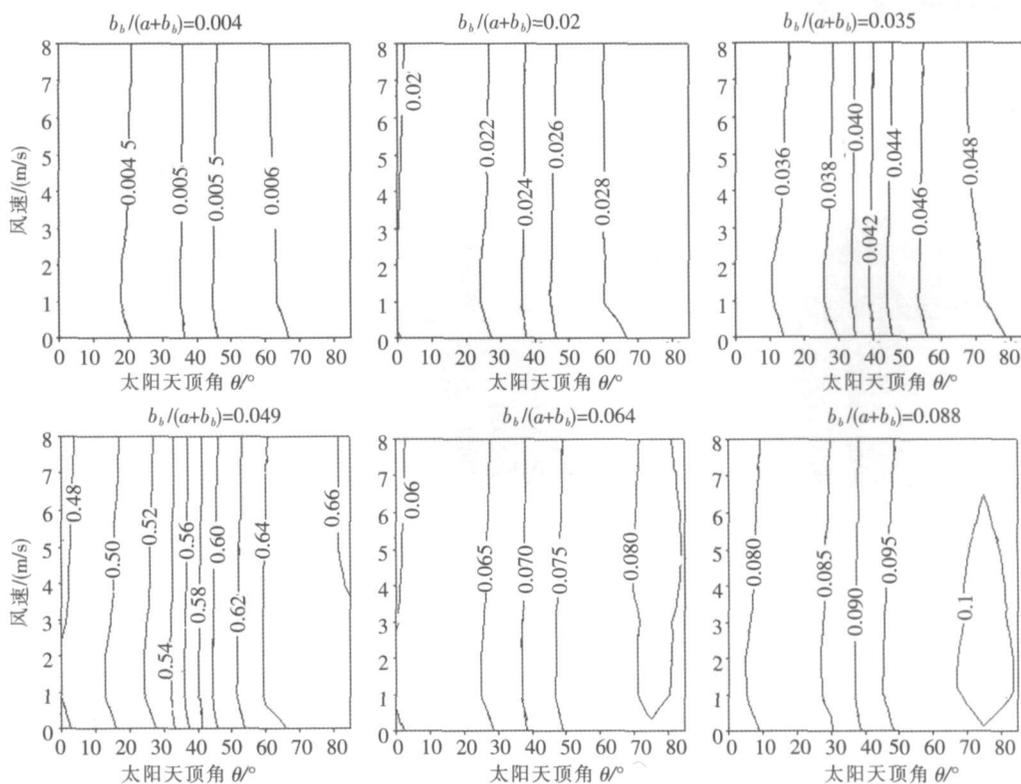


图 7  $b_b/(a+b_b) = 0.004, 0.02, 0.035, 0.049, 0.064, 0.088$  时多次散射项随太阳天顶角和风速变化轮廓线

Fig.7 The key drawing of the item of multiple scattering vary with wind speed and solar zenith angle when  $b_b/(a+b_b) = 0.004, 0.02, 0.035, 0.049, 0.064, 0.088$

图 7清楚地描述了由低散射向高散射过渡时多次散射项受太阳天顶角和风速影响的情况,当  $b_b/(a+b_b)$  较小时,多次受散射项主要受  $f_2$  的影响,如图 7 中  $b_b/(a+b_b) = 0.004, 0.02, 0.035$  的轮廓线,与图 6 中参数  $f_2$  极为相似;当  $b_b/(a+b_b)$  较大时多次散射项主要受  $f_2$ 、 $f_3$  共同作用,如图 7 中  $b_b/(a+b_b) = 0.049, 0.064, 0.088$  轮廓线,与图 6 中参数  $f_2$ 、 $f_3$  综合效果极为相似;随着  $b_b/(a+b_b)$  的增加在太阳天顶角  $65^\circ \sim 85^\circ$  之间以  $75^\circ$  为对称轴逐渐形成一闭合

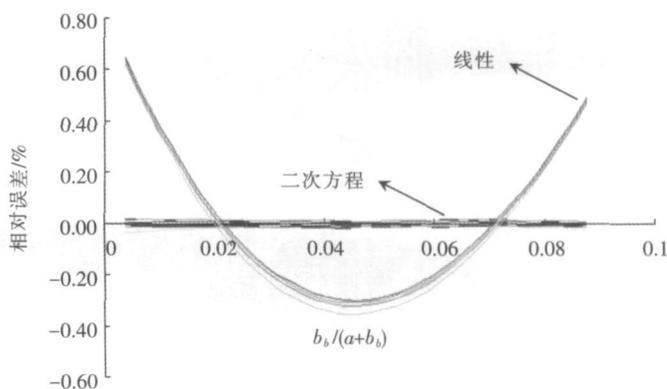


图 8 线性和二次方程反推  $g$  值的误差

Fig.8 The error of reverse from linear equation and quadratic equation

圈,即高散射水体中多次散射项并不是随着太阳天顶角的增加而增加的,当  $b_b/(a+b_b)$  达到一定程度时,多次散射项在高太阳天顶角区域是随着太阳天顶角的增加而降低的。

2.2.3 两种表达模式的比较

将  $g$  值的 Gordon 一次线性表达式与二次方程表达式相比较,发现二次方程无论是相关性还是显著性都要明显好于线性关系。分别利用线性和二次方程来反推  $g$  值,相对误差  $\eta = \frac{g_{\text{quad(lin)}} - g}{g}$  如图 8 所示,其中  $g_{\text{quad(lin)}}$  为二次方程(线性方程)反推  $g$  值。虽然线性方程与二次方程在反推  $g$  值的误差绝对值较小,但是相对线性方程而言,二次方程的误差十分稳定;同时 Gordon 一次线性表达式参数具有易受外界条件影响等不足,并且一次线性方程中对多次散射项的表达与客观现实之间存在着较大差异,二次方程参数  $f_1, f_2, f_3$  受风速和太阳天顶角的影响范围较小,并且对多次散射项的表达与实际情况相似,与前人研究结果也相似,因此其建立的表达式计算结果要优于线性系数  $f'_1$  和  $f'_2$  建立的表达式。

3  $R(\bar{0})$  计算模型的确定和检验

通过以上分析,认为公式(1)的二次方程模式能够准确表达  $g$  值,

$$g = f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right] + f_1 \tag{1}$$

从而,水表面以下辐照度比可以用(2)式模拟:

$$R(\bar{0}) = \left[ f_3 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right]^2 + f_2 \left[ \frac{b_b}{a + b_b} \right] + f_1 \right] \frac{b_b}{a + b_b} \tag{2}$$

$f_1, f_2, f_3$  通过太阳天顶角估算,如表 2 所示:

表 2  $f_1, f_2, f_3$  的估算 ( $u_0 = \cos\theta$ )

Table 2 The equation of  $f_1, f_2, f_3 (u_0 = \cos\theta)$

参数	表达式	$R^2$
$f_1$	$f_1 = -0.1646u_0^2 + 0.043965u_0 + 0.439$	$R^2 = 0.9946$
$f_2$	$f_2 = -0.8699u_0^2 + 0.385744u_0 + 1.5379$	$R^2 = 0.9965$
$f_3$	$f_3 = 4.16694u_0^2 - 1.02393u_0 - 4.899$	$R^2 = 0.9958$

利用模拟未参与建模的  $R(\bar{0})$  数据对公式(2)进行检验,HydroLight 模拟的  $R(\bar{0})$  与(2)式计算的

$R(\bar{0})$  的相关关系如图 9 所示;利用公式  $\eta = \frac{r_j(i) - r_m(i)}{r_j(i)}$  计算预测值的相对误差,其中  $r_j(i)$  为实际模拟值,  $r_m(i)$  为模型预测值,如图 10 所示:误差范围为  $-4.0158\% \sim 4.4981\%$ ,并且误差呈现正态分布,偏度为 1.33505,峰度为 0.28334

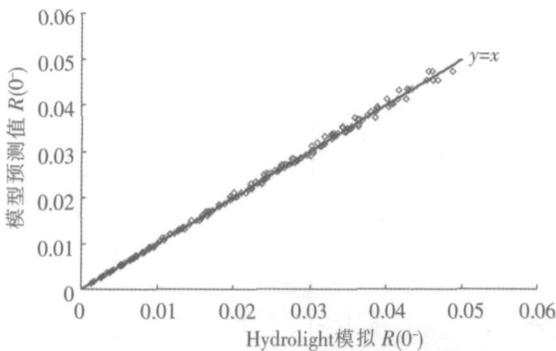


图 9 模拟  $R(\bar{0})$  与模型预测值相关图

Fig.9 The relationship between the value of simulation and forecasted

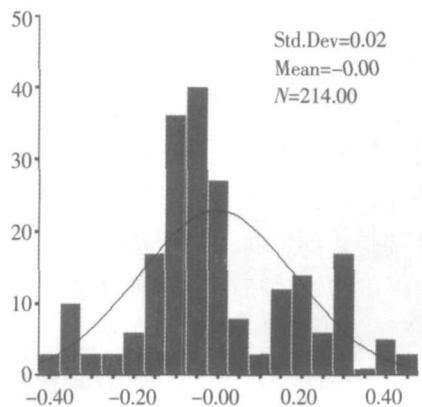


图 10 相对误差概率分布图

Fig.10 The distribution of relative error

## 4 结论

本文在分析水表面下辐照度比中多次散射作用的 Gordon 一次线性表达式和二次方程表达式的基础上,建立了  $R(\bar{0})$  模拟模型,得到以下结论:

(1) 与一次线性方程中系数  $f'_1$ 、 $f'_2$  相比较,二次方程参数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  受风速和太阳天顶角的影响范围要小,因此其建立的平均表达式计算结果要优于线性系数  $f'_1$ 、 $f'_2$  建立的平均表达式。

(2) 水表面以下辐照度比可以用模型  $R(\bar{0}) = \left[ f_3 \left( \frac{b_b}{a + b_b} \right)^2 + f_2 \left( \frac{b_b}{a + b_b} \right) + f_1 \right] \frac{b_b}{a + b_b}$  模拟,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  参数在  $0^\circ \sim 10^\circ$  和  $70^\circ \sim 85^\circ$  之间受风速和太阳天顶角共同作用;  $10^\circ \sim 70^\circ$  之间主要受太阳天顶角作用,风速作用可以忽略。

### [参考文献]

- [1] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean[J]. *Appl Opt* 1975, 14: 417-427.
- [2] Gordon H R, Brown O B, Evans R H, et al. A semi-analytic radiance model of ocean color[J]. *J Geophys Res* 1988, 93: 10 909-10 924.
- [3] Satyendranath S, Platt T. Ocean-color model incorporating transpectral processes[J]. *Appl Opt* 1998, 37: 2 216-2 227.
- [4] Lee Z P, Carder K L, Hawes S K, et al. Model for interpretation of hyperspectral remote sensing reflectance[J]. *Appl Opt* 1994, 33: 5 721-5 732.
- [5] Lee Z P, Carder K L, Mobley C D, et al. Hyperspectral remote sensing for shallow waters: I: A semi-analytical model[J]. *Appl Opt* 1998, 37: 6 329-6 338.
- [6] Zhongping Lee, Carder Kendall L, Keping Du. Effects of molecular and particle scatterings on the model parameter for remote-sensing reflectance[J]. *Appl Opt* 2004, 43: 4 957-4 964.
- [7] Morel A, Loisel H. Apparent optical properties of oceanic water: dependence on the molecular scattering contribution[J]. *Appl Opt* 1998, 37: 4 765-4 776.
- [8] Mobley C D, Sundman L K. *HydroLight 4.1 Users' Guide*[M]. Redmond: Sequoia Scientific Inc, 2000.
- [9] Mobley C D, Sundman L K. *HydroLight 4.1 Technical Documentation*[M]. Redmond: Sequoia Scientific Inc, 2000.
- [10] Mobley C D. Phase function effects on oceanic light field[J]. *Appl Opt* 2002, 41: 1 035-1 050.
- [11] Mobley C D. *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*[M]. San Diego: Academic, San Diego, 1994.
- [12] Mishchenko Michael I, Liu Lij. Gordon V ideen. Conditions of applicability of the single scattering approximation[J]. *Optics Express* 2007, 15(12): 7 522-7 527.
- [13] Dedrick K G. *The single-scattering approximation in skyshine problems*[D]. Stanford: Stanford University, 1997.
- [14] Kattawar G W. A three-parameter analytic phase function for multiple scattering calculations[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer* 1975, 15: 839-849.
- [15] Chan i Malik, McKee David, Leymarie Edouard, et al. Influence of the angular shape of the volume-scattering function and multiple scattering on remote sensing reflectance[J]. *Appl Opt* 2006, 45: 1 235-1 248.

[责任编辑: 丁 蓉]