

Q 值的影响因素分析及其参数化

黄昌春 李云梅 孙德勇 乐成峰

(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 针对高散射特性的二类水体中难以测量的双向性函数 Q , 利用 HYDROLIGHT 模拟观测角为太阳天底角下 440 nm 处的 Q 值, 并分析环境及水体光学特性对 Q 值的影响。结果表明, 在高散射特性的近岸水体或内陆湖泊水体中, 由于散射次数的增加, 使得风速、散射相函数等影响因素对 Q 值影响相对减小, 单次散射反照率 W_0 和太阳天顶角 θ 成为 Q 值的主要影响因素; 随着深度的增加, 双向性函数 Q 受边界条件和光线入射状况影响的程度逐渐减少, 直至不受其影响, 而成为只与固有光学量相关的内秉光学量; 利用 Q 值的主要影响因素 W_0 、 θ 和上行辐亮度的漫衰减系数 K_{L_u} 分别对 Q 值进行参数化, 得到 Q 值的 2 种参数表达式。

关键词 海洋光学; Q 值; 影响因素; 参数化

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092908.2059

Analysis on Influencing Factors of Q Value and its Parametrization

Huang Changchun Li Yunmei Sun Deyong Le Chengfeng

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

Abstract The measurement of bidirectional function Q is difficult in the case of II waters, due to their high-scattering properties, and the HYDROLIGHT is used to simulate the Q value at the 440 nm wavelength with observation angles at the solar nadir angle. Then the effects of environment and water optical characters on Q value are analyzed. Results indicate that in shore and inland lakes of high-scattering waters, the influence of wind speed, scattering phase function, and other factors on the Q value decreases due to the increase in scattering time. So single albedo (W_0) and solar zenith angle (θ) become the main influencing factors. With increasing depth, the effect of conditions such as boundary and incident light on the bidirectional function Q value becomes weaker and weaker until the effect disappears completely. In this case the Q value becomes the internal optical parameter that bears no relationship with the conditions of boundary and incident light. The main influencing factors W_0 , θ , and diffuse attenuation coefficient K_{L_u} of upwelling radiance are used to parameterize the Q value that can be expressed in two ways.

Key words oceanic optics; Q value; influencing factors; parametrization

1 引言

表征离水辐亮度 (L_w) 各向异性特征的双向性函数 $Q[\theta', \theta_0, \Delta\varphi, \tau, V, \omega_0, \beta(\theta)]$ 较大程度上决定了水色要素遥感信号的准确获取^[1], 使得 Q 无论在遥感前向正演模型还是在后向反演模型中都是极为重

要的光学物理量。然而影响双向性函数 Q 值的因素 [单次散射反照率 W_0 、散射相函数 $\beta(\theta)$ 、太阳的位置 ($\theta_0, \Delta\varphi$)、大气的混浊度 (气溶胶光学厚度 τ)、观测角 θ' 、水气界面风速 V 等] 极为复杂, 要准确计算各条件下的 Q 值是十分困难的^[2]。Morel^[3] 等对 Q 值

收稿日期: 2008-06-22; 收到修改稿日期: 2008-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40571110)、十一五国家科技支撑计划项目 (2008BAC34B05) 资助和南师大优秀博士论文培养计划 (1243211601036) 资助课题。

作者简介: 黄昌春 (1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境污染遥感监测方面的研究。

E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

导师简介: 李云梅 (1964—), 女, 教授, 主要从事环境污染遥感监测与 GIS 等方面的研究。E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

以及 f/Q 进行了系统的理论性研究,认为 Q 值的变化范围在 $0.3 \sim 6.5$ 之间;在给定太阳天顶角 θ_0 和 W_0 条件下, $Q_{\max} - Q_{\min}$ 随水分子散射系数与总散射系数的比值 η_w 的减小而增加;在给定太阳天顶角 θ_0 条件下,当 $W_0 < 0.8$ 时, $Q_{\max} - Q_{\min}$ 对 W_0 的变动不敏感,同时给出了 Q 值和 f/Q 的三维空间表达图。唐军武^[4] 对 Q 值进行了 M-C 模拟计算给出了 Q 值的空间变化以及海面粗糙度对 Q 值空间分布的影响,研究表明海面波浪将使前向峰变宽,同时存在后向耀斑,其他方向 Q 值几乎不受影响。以上研究是基于海洋一类清洁水体的研究,而基于内陆湖泊二类水体研究相对较薄弱。由于内陆湖泊水体其散射系数的增加,使得 Q 值的各向异性得到了较大的减弱,因而本文选用 $\theta' = 0$ 条件下的 Q 值进行研究。

基于光学模拟软件 HYDROLIGHT 模拟的辐照度 $E_u(z)$ 、辐亮度 $L_u(z)$ 以及漫衰减系数 K_{L_u} , 利用 $Q(z) = E_u(z)/L_u(z)$ 计算不同太阳天顶角、风速、单次散射反照率、漫射光、深度条件下的 Q 值,着重分析太阳天顶角、风速、单次散射反照率、漫射光对 Q 值的影响,以及 Q 值随深度的变化,并利用其主要影响因素单次散射反照率、太阳天顶角以及上行辐亮度漫衰减系数 K_{L_u} 对其参数化,最终给出 Q 值与影响参数之间的表达式,为 Q 值的实际应用和在离水辐亮度 L_w 计算误差分析中提供依据和参考。

2 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 $E_u(z)$ 和 $E_d(z)$ 、辐亮度 $L_u(z)$ 和 $L_d(z)$ 、辐照度比 $R(0^-)$ 、漫衰减系数 K 、水下平均余弦 U 等表观光学量。

2.1 Q 值的模拟

利用 HYDROLIGHT 模拟^[5,6] 440 nm 波段不同散射系数、风速、太阳天顶角条件下的 $E_u(z)$, $L_u(z)$, 输入参数见表 1。表 1 中第一部分模拟输入参数是依据于近 2 年本实验小组对太湖的实测数据。输入的吸收和最大散射系数是利用 AC-S 测得的太湖全湖数据的平均值,而散射相函数的选取是依据 Mobley 等的研究的结果^[7], 选用 Fournier-Forand 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。第 2 部分模拟输入参数以第 1 部分为依据,将单次散射反照率设计

在以 0.1 为间隔的 $0 \sim 1$ 之间。

表 1 HYDROLIGHT 模拟输入值

Table 1 Input value of HYDROLIGHT simulation

Variable	Input value
Part 1	
Absorption coefficient a / m^{-1}	9
Scatter coefficient 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
Scatter phase function $\beta(\theta)$	FF b_b 0.018
Solar zenith angles $\theta / (^{\circ})$	0,15,30,45,60, 75,85
Wind speeds $v / (m/s)$	0,1,2,3,4,5,6,7,8
Percentage of diffuse light to total irradiance $/\%$	0
Part 2	
Single albedo w_0 / m^{-1}	0,0.1,0.2,0.3,0.4, 0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1
Scatter phase function $\beta(\theta)$	FF b_b 0.018
Wind speeds $v / (m/s)$	2
solar zenith angles $\theta / (^{\circ})$	45 $^{\circ}$
Percentage of diffuse light to total irradiance $/\%$	0,10,20,30,40,50, 60,70,8,90,100

* FF is style of scatter phase function, b_b 0.018 is backscattering ratio

在高浑浊水体或远海海洋清洁水中,表面反射受水体底质影响较小,因此在 HYDROLIGHT 模拟中忽略底反射等因素。

2.2 理论背景

单位面积接收到的辐射通量,称为该处的辐照度,符号为 E ,单位为 W/m^2 。如果是单位光谱波长上的,单位为 $W/(m^2 \mu m)$,;单位投影面积、单位立体角上的辐射通量,符号为 L ,单位为 $W/(m^2 sr)$,如果是单位光谱波长上的,单位为 $W/(m^2 \mu m sr)$ 。以水平面为界,上半球的分别称为下行辐照度 E_d 和下行辐亮度 L_d ,下半球的称为上行辐照度 E_u 和上行辐亮度 L_u ;以水气界面为界 E_d, L_d, E_u 和 L_u 可以分为水面以上和水面以下 $E_d(0^+), E_d(0^-), L_d(0^+), L_d(0^-), E_u(0^+), E_u(0^-)$ 和 $L_u(0^+), L_u(0^-)$,其中最为常用的为海面入射辐照度 $E_d(0^+)$ 、水表面以下上行辐照度 $E_u(0^-)$ 、离水辐亮度 $L_u(0^+)$ (即 L_w)、水面以下上行辐亮度 $L_u(0^-)$ ^[8]。

Q 值看表示为

$$Q = E_u(0^-) / L_u(0^-), \quad (1)$$

$E_d(0^+)$ 和 $E_d(0^-)$ 之间可表示为

$$E_d(0^-) = E_d(0^+)(1 - \bar{\rho}) / (1 - \bar{\rho}S), \quad (2)$$

式中 $\bar{\rho}$ 为海表面对总辐照度的漫反射率, S 为大气的球反照率(spherical albedo of the atmosphere)遥感反射率 R_{rs} 可表示为

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+), \quad (3)$$

水表面以下辐照度比 $R(0^-)$ 可表示为^[9]

$$R(0^-) = E_u(0^-) / E_d(0^-) = f * b_b / (a + b_b), \quad (4)$$

式中 f 为模型参数, b_b 为总后向散射系数, a 为吸收系数。水表面以下辐亮度与离水辐亮度之间的关系可表示为

$$L_w(\theta, \varphi) = L_u(0^-, \theta', \varphi) \frac{1 - \rho(\theta', \theta)}{n^2}, \quad (5)$$

式中 $\rho(\theta', \theta)$ 为 θ' 向 θ 方向上的水-气界面菲涅尔系数, n 为折射系数, θ', θ, φ 角度如图 1 所示, 其中 $\theta' = \arcsin(\frac{\sin \theta}{n})$ 。

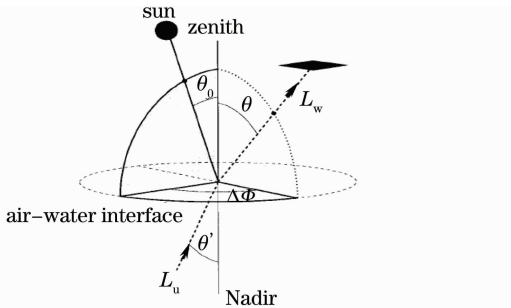


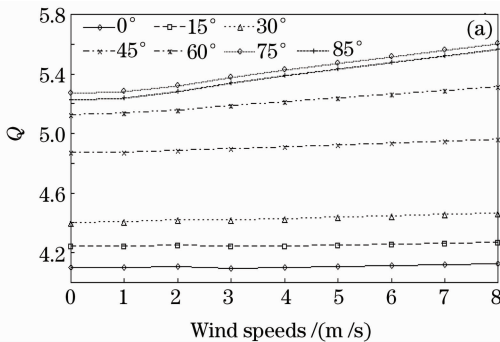
图 1 辐亮度和角度结构示意图

Fig. 1 Schematic geometry and symbols for radiances and angles

结合(1)式~(5)式得到:

$$R_{rs} = \frac{(1 - \bar{\rho}) [1 - \rho(\theta', \theta)]}{n^2 (1 - \rho S) Q} f \frac{b_b}{a + b_b}$$

将遥感反射率与水体固有光学属性建立联系, 为利用遥感反射率反演水体组分提供了理论依据^[10]。



3 结果与分析

3.1 Q 值影响因素分析

影响双向性函数 Q 的因素主要有固有光学量即单次散射反照率 W_0 和散射相函数 $\beta(\theta)$ 和光照条件即太阳的位置以及大气的混浊度(气溶胶光学厚度 τ), 同时也与水气界面风速 V 条件相关^[11,12]。在一类水体由于 W_0 较小, 散射相函数 $\beta(\theta)$ 对水表面以下辐亮度结构具有较大的影响, 即当发生单次散射时^[13,14], 辐亮度的前向和后向角度分布将与散射相函数相同, 而随着散射次数的增加, 散射相函数对辐亮度的前向和后向角度分布影响将逐渐减小, 辐亮度的前向和后向角度分布将趋向于对称, 因而在高散射特性的水体中或纯水(瑞利散射)中, 散射相函数对辐亮度角度分布几乎没有影响。以下主要分析太阳天顶角、风速、单次散射反照率和漫射光占总辐射的比例对 Q 值的影响。

3.1.1 太阳天顶角、风速、单次散射反照率对 Q 值的影响

太阳天顶角、风速对 Q 值影响的模拟结果如图 2 所示, 总体来看, 风速对 Q 值的影响较小如图 2(a)所示, 在地太阳天顶角的条件下 ($\theta \leq 30^\circ$), 风速对 Q 值的影响相对最小, Q 值随太阳天顶角的增加几乎没有变化; 在 $\theta \geq 30^\circ$ 随着太阳天顶角的增加, 风速对 Q 值的影响逐渐增大, Q 值呈现随太阳天顶角的增加而增大趋势。太阳天顶角对 Q 值的影响相对较为单一如图 2(b)所示, 在 $0^\circ \sim 75^\circ$ 范围内, 随着太阳天顶角的增加 Q 值逐渐增大, 但是 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内增长的速度平缓, 而 $30^\circ \sim 45^\circ$ 范围内 Q 值的快速增长, $45^\circ \sim 75^\circ$ 范围内增加的速度变得较慢; 在 $75^\circ \sim 85^\circ$ 范围内, Q 值随太阳天顶角的增加逐渐减小。

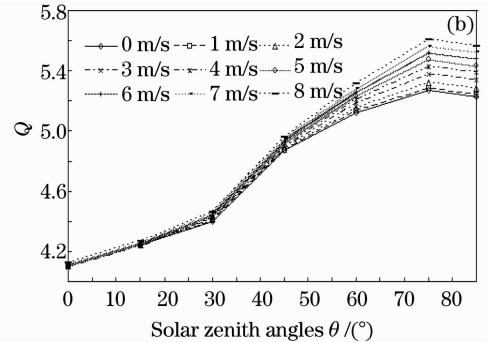


图 2 Q 值随太阳天顶角和风速的变化

Fig. 2 Curve of Q value changing with the solar zenith angles and wind speeds

单次散射反照率对 Q 值的影响的模拟结果如图 3 所示, 其风速为 1 m/s, 由于受太阳天顶角的影响,

Q 值随单次散射反照率变化的趋势相对较为复杂, 但总的趋势为 Q 值随单次散射反照率的增加逐

渐增加,达到峰值后,再呈现逐渐减小的趋势;但是受太阳天顶角的影响 Q 极值对应的单次散射反照率 W_0 。随太阳天顶角以指数为 -0.0044 指数形式逐渐减小($R^2 = 0.9697$)如图3中的最后一幅图所示,其次在 Q 值随单次散射反照率 W_0 增加而增加的区域, W_0 低值区域 Q 值的增加速度随太阳天顶角的增加要高于 W_0 高值区域 Q 值的增加的速度,最终

增加速度趋向于近似平缓;而在 Q 值随单次散射反照率 W_0 增加而减小的区域, Q 值随 W_0 减小的速度随着太阳天顶角的增加而迅速增加,但由于 Q 值随太阳天顶角的增加而增加的速度大于 Q 值随 W_0 减小的速度,因此在 Q 值随单次散射反照率 W_0 增加而减小的区域, Q 值仍然随着太阳天顶角的增加而增加。

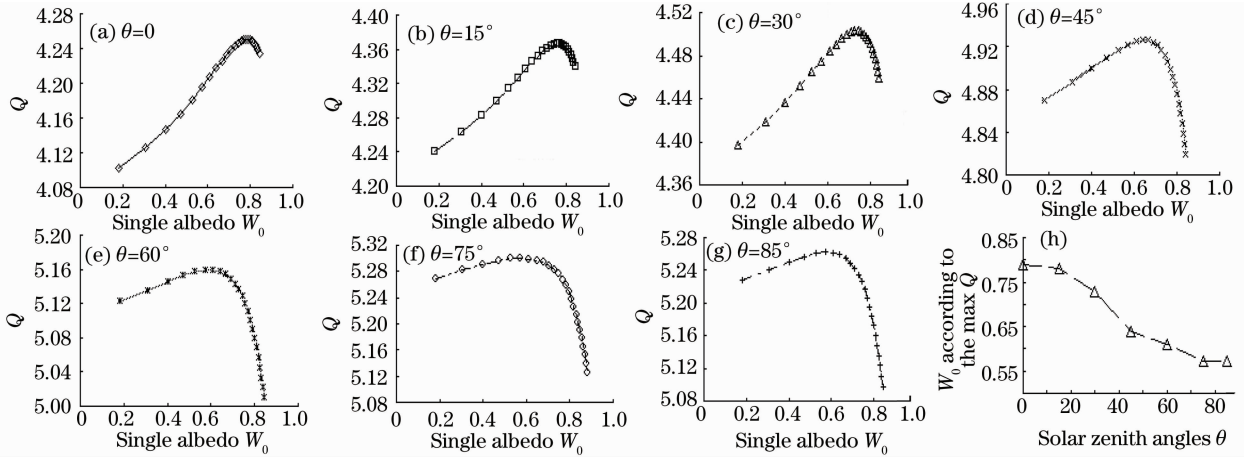


图3 Q 值在不同太阳天顶角随 w_0 的变化曲线(a)~(g)和 Q 极值对应的 W_0 随太阳天顶角的变化曲线(h)

Fig. 3 Curve of Q value changing with W_0 when the solar zenith angles at different angles (a)~(g) and the curve of W_0 according to the max Q value changing with the solar zenith angles (h)

结合太阳天顶角、风速和单次散射反照率对 Q 值的综合影响模拟结果如图4所示,在太阳天顶角为 0° 时,在 $W_0 \leq 0.7$ 区域内,风速对 Q 值的影响较弱, $W_0 \geq 0.7$ 有一定的波动,但是随着太阳天顶角

的增加,风速对 Q 值的影响越来越大,而 W_0 对 Q 值的影响将逐渐降低,在太阳天顶角为 85° 时,在 $W_0 \leq 0.7$ 区域, W_0 对 Q 值几乎没有影响,在 $W_0 \geq 0.7$, Q 值随 W_0 的增加迅速增大;在太阳天顶角为

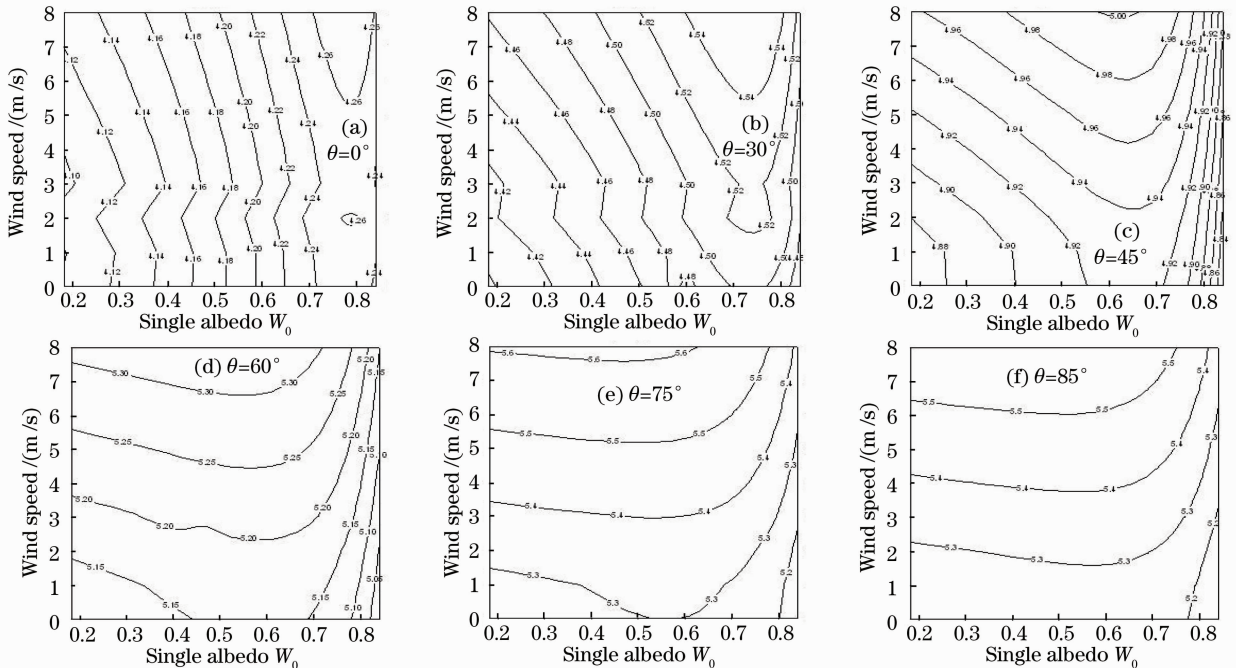


图4 Q 值在不同太阳天顶角时随风速和 W_0 的等值线图

Fig. 4 Isolines of Q value changing with wind speeds and W_0 with the solar zenith angles at different angles

30° 时,以 $W_0 = 0.75$ 为对称轴,在其左右形成一对对称曲线,随着太阳天顶角的增加对称轴向 W_0 小值方向移动,并且对称趋势逐渐减弱最终消失;在太阳天顶角为 45° 和 60° 时,以 Q 极值对应的 W_0 为分界线,小于该 W_0 的范围内,风速对其影响处于主导地位, W_0 的影响处于次要地位,而大于该 W_0 的范围内,风速对其影响处于次要地位, W_0 的影响处于主要地位,体现了介于 30° 与 85° 之间太阳天顶角的过度状态。

3.1.2 漫射光对 Q 值的影响

除上述影响因素之外,双向性函数 Q 还受大气的混浊度的影响,主要体现在总辐射中直射光和漫射光的比例,漫射光对 Q 值的影响如图 5 所示,漫射光对 Q 值的影响根据 W_0 值的大小可以分为 3 个区

域,即 $W_0 \leq 0.8$, $0.8 \leq W_0 \leq 0.9$, $W_0 \geq 0.9$,在 $W_0 \leq 0.8$ 范围内, Q 值随漫射光的增加而迅速减少,当漫射光接近 1 时, Q 值趋向于 π 即上行辐亮度具有各向同性,而在此范围内, Q 值随 W_0 变化较小即 Q 值对 W_0 变化不敏感;而在 $0.8 \leq W_0 \leq 0.9$ 范围内,漫射光对 Q 值的影响力迅速降低,而 Q 值对 W_0 的变化变得较为敏感,随着 W_0 的增加 Q 逐渐减小;在 $W_0 \geq 0.9$ 区域内,漫射光对 Q 值几乎没有任何影响,因而 $W_0 = 0.9$ 成为 Q 值变化的突变点,即 $W_0 \leq 0.9$ 时漫射光对 Q 值具有影响,而 $W_0 \geq 0.9$ 时漫射光对 Q 值没有影响,此时的 Q 值只随 W_0 的增加而急剧减小,在 $W_0 = 1$ 的理论状态下 Q 值为 π ,此时上行辐亮度同样具有各向同性性质。

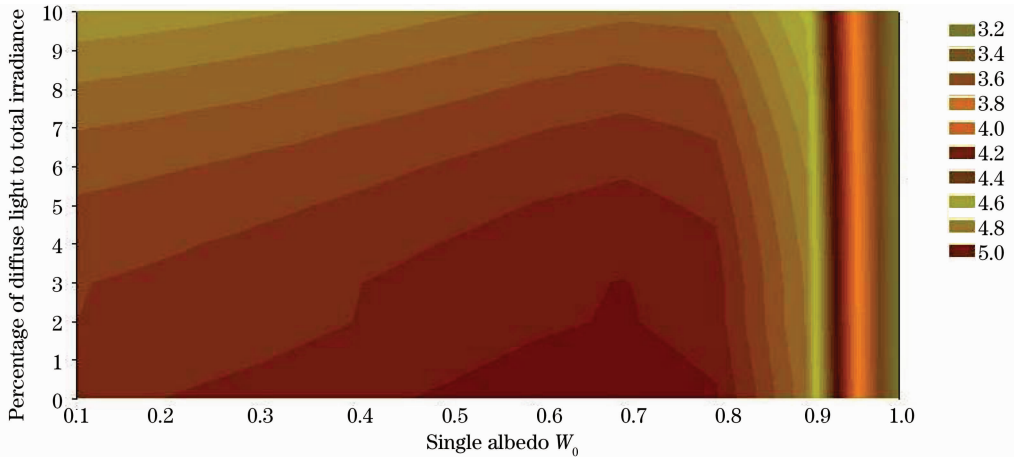


图 5 Q 值随漫射光占总辐射比例 f 和 W_0 等直线图
Fig. 5 Isoline of Q value changing with f and W_0 .

3.2 Q 值随单次散射反照率的变化特征

利用公式: $Q' = [Q(\omega_{0i}) - Q(\omega_{0j})] / (\omega_{0i} - \omega_{0j})$ 计算 Q 值随单次散射反照率 W_0 的变化率,综合所有风速条件下 Q 值随单次散射反照率的变化率可以分为两种变化趋势,如图 6 所示,在风速较小

(0~1 m/s),高太阳天顶角区域,以 75° 对称轴在其左右会出现对称现象,而在风速较大(2~8 m/s)条件下,该对称区域不复存在; Q 值随单次散射反照率 W_0 的变化率最大的区域出现在高太阳天顶角和高 W_0 区域,可以看出当 $W_0 \geq 0.75$ 时, Q 值对 W_0 的

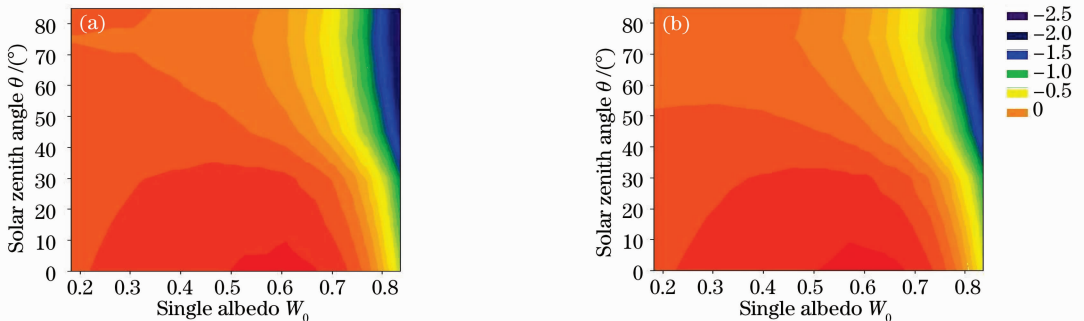


图 6 Q 随单次散射反照率 W_0 的变化率。(a) 0~1 m/s; (b) 2~8 m/s

Fig. 6 Rate of Q value changing with the single-scattering albedo W_0 . (a) 0~1 m/s; (b) 2~8 m/s

变化十分的敏感,特别是在高太阳天顶角区域($\theta \geq 50^\circ$),因而在高散射特性水体中,Q值的应用应该需要具体计算而不可以使用参考Q值。

3.3 不同深度Q值的特征

根据双向性函数Q的定义,可以得到不同深度的Q:

$$Q(z) = \frac{Eu(z)}{Lu(z)} = \frac{Eu(0^-)\exp(-k_u z)}{Lu(0^-)\exp(-k_{L_u} z)} =$$

$$Q(0^-)\exp[(k_{L_u} - k_u)z] = Q\exp(k_Q z)$$

其中 k_u 为上行辐照度的向下漫衰减系数, k_{L_u} 为上行辐亮度的向下漫衰减系数, z 为深度, 0^- 为正好处于水面以下, $k_Q = k_{L_u} - k_u$ 。由于 k_{L_u} 与 k_u 随深度增加,边界以及光照条件对其影响逐渐减少,最终对其几乎没有影响,而达到渐近态,此时 k_{L_u} 与 k_u 成为只与固有光学量相关的参数,此时的Q值也成为只与固有光学量相关的内乘光学量。

Q值随深度变化的模拟结果如图7所示,给出了风速为0时,太阳天顶角分别为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ,$

$75^\circ, 85^\circ$ 时Q值随深度和单次散射反照率 w_0 变化的等值线图。在太阳天顶角为 0° 时,在 $0 \sim 0.2$ m,Q值随深度的增加而增加,而在大于 0.2 m后Q值呈现趋向于以恒定值,随深度的变化几乎不变,在太阳天顶角为 30° 时,在低单次散射反照率 W_0 范围内出现Q值随着深度的增加而减小,而在高单次散射反照率 w_0 范围内Q值仍呈现随深度的增加而减小,最终趋向于恒定值而不随深度的变化而变化;而当太阳天顶角为 45° 时,在 $0 \sim 0.2$ m, $W_0 \leq 0.35$ 范围内,Q值仍呈现随深度的增加而增大,在大于 0.2 m,所有 W_0 值范围内,Q值随深度的增加而减小,在高单次散射反照率 W_0 范围内,Q值迅速趋向于恒定值,而在低 W_0 范围内,Q值趋向于恒定值的速度较慢,而在太阳天顶角为 $60^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ 时,Q值几乎完全转变为随深度增加而减小的变化趋势,同样在高 W_0 范围内,Q值受深度的影响相对要小于低 W_0 范围内Q值受深度的影响程度。

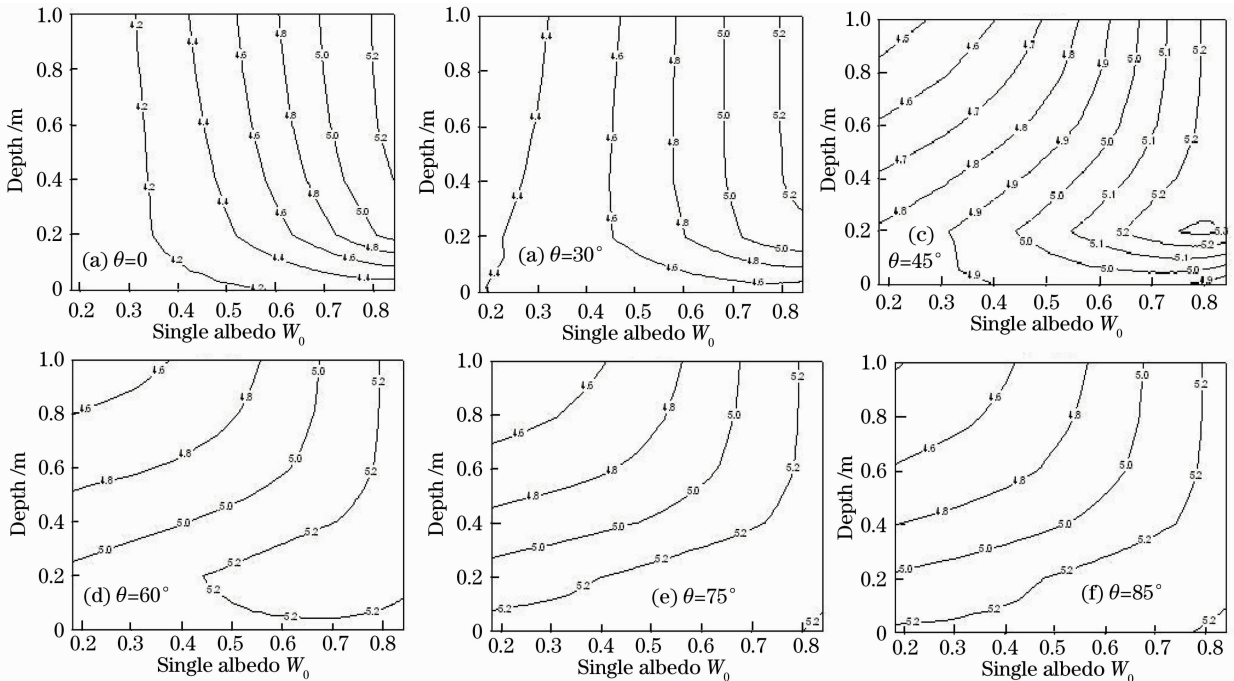


图7 风速为0时,Q值随深度和 W_0 的等值线图

Fig. 7 Isoline of Q value changing with the depths and W_0 , wind speeds of 0

4 Q 随的参数化

基于以上Q值的各个影响因子分析,选用太阳天顶角和单次散射反照率、上行辐亮度下行漫衰减系数3个参数建立风速为0时的2种Q值参数模型,第1种类型因子为太阳天顶角和单次散射反照率,第2种类型为太阳天顶角和上行辐亮度下行漫

衰减系数;利用HYDROLIGHT模拟数据对Q值进行参数化,结果如下。

4.1 第1种类型

依据单次散射反照率和太阳天顶角对Q值的影响,综合考虑典型高散射特征水体(太湖水体)的单次散射反照率范围 $0.6535 \sim 0.999$,在该范围内

利用固有光学量单次散射反照率和太阳天顶角两个影响因素对 Q 值进行参数化,平均 $R^2 \geq 0.999$,得到的模型如下所示:

$$Q = \sum_{n=0}^3 A_n \omega_0^n = A_3 \omega_0^3 + A_2 \omega_0^2 + A_1 \omega_0 + A_0$$

其中参数 A_0, A_1, A_2, A_3 表达式如表 2 所示:

表 2 参数 A_0, A_1, A_2, A_3 表达式

Table 2 Expression of parameters A_0, A_1, A_2 and A_3

Parameter	Expression	R^2
A_0	$-4.6579\cos^2\theta + 1.9453\cos\theta + 9.6061$	0.9946
A_1	$13.088\cos^2\theta - 5.4996\cos\theta - 20.176$	0.9946
A_2	$-20.548\cos^2\theta + 8.6657\cos\theta + 31.168$	0.9947
A_3	$11.397\cos^2\theta - 4.845\cos\theta - 16.147$	0.9947

4.2 第 2 种类型

根据 Q 值与太阳天顶角和上行辐亮度下行漫衰减系数之间的关系,利用表观光学量 k_{L_u} 和太阳天顶角对其参数化,平均 $R^2 \geq 0.995$,得到的结果如下所示:

$$Q = \sum_{n=0}^3 B_n k_{L_u}^n = B_3 k_{L_u}^3 + B_2 k_{L_u}^2 + B_1 k_{L_u} + B_0$$

其中参数 B_0, B_1, B_2, B_3 表达式如表 3 所示:

表 3 参数 B_0, B_1, B_2, B_3 表达式

Table 3 Expression of parameters B_0, B_1, B_2 and B_3

Parameter	Expression	R^2
B_0	$-2129.1\cos^3\theta + 1562.9\cos^2\theta - 305.3\cos\theta - 71.581$	0.9927
B_1	$721.2\cos^3\theta - 601.21\cos^2\theta + 141.02\cos\theta + 13.083$	0.9924
B_2	$-79.33\cos^3\theta + 71.97\cos^2\theta - 18.592\cos\theta - 0.4675$	0.9937
B_3	$2.8524\cos^3\theta - 2.7514\cos^2\theta + 0.7554\cos\theta - 0.0081$	0.9937

分别利用固有光学量 W_0 和表观光学量 k_{L_u} 对 Q 值进行参数化,并且引入太阳天顶角这一影响因素,由于表观光学量测量受观测条件的限制,测量准确性难以把握,而固有光学量相对受测量条件限制较小,只要仪器足够精确,测量数据准确性较容易把握,因而推荐使用第一种参数模型。

5 结 论

1) 影响双向性函数 $Q[\theta', \theta_0, \Delta\varphi, \tau, V, \omega_0, \beta(\theta)]$ 的因素较多,但是在高散射特性的近岸水体或内陆湖泊水体中,由于散射次数的增加,使得风速、散射相函数等影响因素对 Q 值影响相对减小,使得单次散射反照率和太阳天顶角成为 Q 值的主要决定因素。

2) 不同深度的双向性函数 Q 表征了不同深度

上行辐亮度的角度分布信息,并且随着深度的增加双向性函数 Q 受边界条件和光线入射状况影响的程度逐渐减少,直至不受其影响,而成为只与固有光学量相关的内秉光学量。

3) 在高散射特性水体中,双向性函数 Q 对单次散射反照率 W_0 的变化较为敏感,特别是在高太阳天顶角区域 $\theta \geq 50^\circ$, Q 对单次散射反照率 W_0 的变化极为敏感;当 $W_0 \geq 0.9$, 太阳天顶角十分大或漫射光比例十分高时,双向性函数 Q 接近 π , 此时上行辐亮度趋向于各向同性性质。

4) 基于 Q 第一类型参数化模型计算该参数化 2 种极端情况下的 Q 值分别为 3.997 ($\theta = 0, W_0 = 1$) 和 5.274 ($\theta = 85, W_0 = 0.65$), 该结果介于 Morel 的 0.3~6.5 之间,该参数化模型较为可信。

参 考 文 献

- 1 A. Morel, B. Gentili. Diffuse reflectance of oceanic waters III. Implication of bi-directionality for the remote-sensing problem [J]. *Applied Optics*, 1996, **24**(35): 4850~4862
- 2 G. Zibordi, J. Franc, O. Berthon. Relationships between Q-factor and seawater optical properties in a coastal region [J]. *Limnol Oceanogr*, 2001, **46**(5): 1130~1140
- 3 A. Morel, B. Gentili. Diffuse reflectance of oceanic waters II. bi-directional aspects [J]. *Applied Optics*, 1993, **33** (32): 6864~6879
- 4 Tang Junwu. The simulation of marine optical properties and color sensing model [D]. *Beijing, Insitute of remote sensing applications Chinese academy of sciences*, 1999. 72~89
唐军武. 海洋光学特性模拟与遥感模型 [D]. 北京: 中国科学院遥感应用研究所, 1999. 72~89
- 5 C. D. Mobley, L. K. Sundman. *Hydrolight 4.1 Users' Guide* [S]. Sequoia Scientific. Wash. Inc. Redmond, 2000
- 6 C. D. Mobley, L. K. Sundman. *Hydrolight 4.1 Technical Documentation* [S]. Sequoia Scientific. Wash. Inc. Redmond, 2000
- 7 C. D. Mobley. Phase function effects on oceanic light field [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(6): 1035~1050
- 8 N. G. Jerlov. *Marine optical* [M]. New York: Elseier Scientific Publishing Company, 1976. 5~6
- 9 H. R. Gordon, O. B. Brown, R. H. Evans. A semi-analytic radiance model of ocean color [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1988, **93**: 10909~10924
- 10 K. L. Carder, R. G. Steward. A remote sensing reflectance model of a red tide dinoflagellate off west florida [J]. *Limnol Oceanogr*, 1985, **30**: 286~298
- 11 A. Morel, K. J. Voss, B. Gentili. Bidirectional reflectance of oceanic water: a comparison of modeled and measured upward radiance fields [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, **100**(15): 13143~13150
- 12 A. Morel, H. Loisel. Apparent optical properties of oceanic water: dependence on the molecular scattering contribution [J]. *Applied Optics*, 1998, **37**: 4765~4776
- 13 V. I. Haltrin. Two-term henye-greenstein light scattering phase function for seawater [J]. *IEEE, Piscataway, NJ, USA*, 1999. 1423~1425
- 14 I. Michael, Mishchenko, Li Liu. Conditions of applicability of the single scattering approximation [J]. *Optics Express*, 2007,

15(12): 7522~7527

15 Zhou Wen, Cao Wenxi, Li Cai *et al.*. Spectral scattering property of phytoplankton calculated by absorption coefficient and size distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1429~1433

周 雯, 曹文熙, 李 彩等. 由吸收系数和粒度分布计算浮游植物的散射光谱特征[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1429~1433

16 Ma Yong, Liang Kun, Lin Hong *et al.*. Study on simultaneous measurement of temperature and salinity based on Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1508~1512

马 泳, 梁 琨, 林 宏等. 基于布里渊后向散射的海水温度与

盐度同步测量研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1508~1512

17 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass density algorithm based on average mass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1707~1710

顾 芳, 杨 娟, 卞保民等. 基于平均质量的悬浮颗粒物的质量密度算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1707~1710

18 Deng Yong, Luo Qingming, Lu Qiang. Analyses of single backscattering spectra for a two-layer scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 596~599

邓 勇, 骆清铭, 鲁 强. 双层散射介质的单次后向散射光谱分析[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 596~599

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009年9月30日

投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《中国激光》编辑部