

文章编号: 0253-2239(2010)03-0625-08

水-气界面参数和二向性影响因素交互作用研究

黄昌春 李云梅 王 桥 施 坤 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 基于光学辐射传输软件 HYDROLIGHT, 模拟不同外界和水质条件下水气界面透射率 T , Gordon 模型参数 f 和二向性因子 Q , 研究风速、太阳天顶角、单次反照率和拉曼散射对 T 、 f 和 Q 及其组合 f/Q 的影响和交互作用, 确定 T 、 f 、 Q 和 f/Q 的主导影响因子, 以期确定为水色反演算法误差来源以及减小反演误差提供定量的依据。研究表明, T 、 f 和 Q 的主导影响因素为太阳天顶角, 单次反照率和风速对 T 、 f 和 Q 的影响相对较小, 而对 f/Q 影响最大是单次反照率, 其次是太阳天顶角, 风速最小, 且各影响因素之间具有较强的交互作用。高散射特性水体中, 拉曼散射对 f 、 f/Q 和 T 的影响可忽略不计; 黄质(CDOM)和叶绿素的荧光特性对 f 和 f/Q 的影响随着叶绿素和 CDOM 浓度的增加不断减小, 但在高 CDOM 和叶绿素浓度的富营养化水体中该影响仍难以忽略。

关键词 海洋光学; 透射率; 交互作用; 二向性

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0625

Interaction of Influencing Factors to Bidirection and Air-Water Interface Parameter in Turbid Water Body

Huang Chuangchun Li Yunmei Wang Qiao Shi Kun Jin Xin Wang Yanfei

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

Abstract In order to provide a quantitative evidence that confirms the error source and reduce the retrieved error in the retrieved model of water color, transmissivity, parameter of Gordon model, bidirectional factor under the different conditions of environment and water quality are simulated based on the software of optical radiative transfer model HYDROLIGHT. The interactions of wind speed, solar zenith and single reflectivity to T , f , Q and f/Q are analyzed, the primary influencing factors of T , f , Q and f/Q are determined. The primary influencing factor of T , f and Q is solar zenith relatively, the influences of single reflectivity and wind speed to T , f and Q are much smaller. The leading influencing factor of f/Q is single reflectivity, the second is solar zenith, and the third is wind speed, the interaction among the influencing factors is much stronger. The influence of Raman scattering on T , f and f/Q can be neglected in the high-scattering water. The effects of colored dissolved organic matter (CDOM) and chlorophyll's fluorescence on f and f/Q are decreasing with the increase of concentration of CDOM and chlorophyll, but the effects cannot be ignored in eutrophic water body with high concentration of CDOM and chlorophyll.

Key words oceanic optics; transmissivity; influencing factors; bidirectivity

1 引 言

目前水色要素反演的的方法主要有经验算法^[1,2]、半

分析算法^[3~5]和分析算法^[6~11], 其中半分析算法和分

析算法主要基于 Gordon^[7]在 1975 年的研究, 在水体各

收稿日期: 2009-03-20; 收到修改稿日期: 2009-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(40971215), 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, CX09B_301Z)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, 博士生导师, 主要研究方向为环境污染遥感监测与 GIS 等方面的研究。

E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

向均匀这一假设条件利用蒙特卡罗方法推导一类大洋水体固有光学量与表观光学量之间的关系为:水表面以下辐照度比 $R(0^-)$ 可以表示为后向散射系数与吸收系数和后向散射系数之和的比值乘以一个模型参数,该模型参数目前取值一般为 0.33。测量到的数据是遥感反射率 R_{rs} ,而 R_{rs} 与 $R(0^-)$ 之间主要是由水-气界面状况(透射率 T , 折射系数 n)和二向性因子 Q (目前取值一般为 4.5)决定,通常 R_{rs} 可以近似地表达为: $R(0^-)$ 与水-气界面状况参数组合 $T/(Qn^2)$ 的乘积, Lee^[5] 在他的 QAA 算法中给出了其经验形式: $R(0^-) = R_{rs} / (0.52 + 1.7 R_{rs})$ 。水-气界面参数、二向性因子和 Gordon 参数是目前水色遥感分析模型算法中的主要误差因素,同时也是辐射定标、星载数据验证的重要参数^[12~14]。Morel 等^[15] 对 Q 值以及 f/Q 进行了系统的理论性研究,认为 Q 值的变化范围在 0.3~6.5 之间, f/Q 为太阳天顶角的弱函数;唐军武^[16] 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,认为要满足海视宽视场传感器(SeaWiFS)现场测量规范的绝对误差小于 5% 的精度要求,需要通过 Morel 和 Gentili^[17] 提出的迭代方法对水表面以上测量方法进行二向性校正。然而对于混浊的二类水体,由于缺乏可靠的固有光学参数模型,对其二向性进行校正是极为困难的,因而对 Q 值影响因素的分析及其参数化极为重要。目前对于由水-气界面状况通常是采用大尺度的风浪波面法,利用几何光学折射和反射定律进行求解^[18,19],然而随着遥感影像分辨率的提高(像元尺度减小)该方法的限制性越来越高,因此需要针对 T 和 n 进行研究。而内陆湖泊二类水体光学特性极为复杂,因而在简化折射系数 $n=1.34$ 的基础之上研究 T , f 和 f/Q 主导影响因素及其各因素之间的交互作用。

本研究借鉴国内海洋光学专家唐军武^[20]、国外海洋光学专家 Gordon^[21,22]、Morel^[23~25]、Kirk^[26,27] 和 Mobley^[28~32] 等的方法^[33],利用辐射传输模拟方法对以上参数进行研究。首先,采用 Mobley^[30,31] 开发的辐射传输模拟软件 HYDROLIGHT 对以上参数进行模拟,然后研究外界条件对以上参数的影响规律,以期发现其主导影响因子及其影响机制,拟为水色反演模型提供较为精确的模型参数,减小模型反演误差。

2 材料与方 法

2.1 参数模拟的原理

HYDROLIGHT 是基于水体固有光学属性或

水色要素浓度,根据边界条件对水体表观光学量进行模拟的水体光学辐射传输软件。本研究主要基于水色要素浓度进行模拟,输入的参数为叶绿素(Chlorophyll)浓度(0.5~12 $\mu\text{g/L}$)、黄质(CDOM)浓度用参考波段处的吸收系数表示为(0.5~6.5 m^{-1})和悬浮物(Mineral)浓度梯度(0.5~33 mg/L);根据 Mobley 等的研究的结果^[26],选用 Fournier-Forand 散射函数,叶绿素后向散射率选用 0.006^[34],悬浮物后向散射率选用 0.018。忽略水体底质的较小影响。

2.2 模型参数的设置

现有的一类水体生物光学模型是较为成熟的,而针对二类水体,特别是内陆湖泊二类水体生物光学模型较为缺乏,本课题组虽然积累有 3 年的太湖水体固有光学量数据,但是以这些数据建立广泛的二类水体生物光学模型显然是不足的。因此本文中叶绿素的比吸收系数选用室内实测分离藻类实测吸收系数与叶绿素浓度比值的平均值,比散射系数为实测分离藻类的散射系数与叶绿素浓度比值的平均值。

CDOM 吸收模型采用常用的指数函数形式,参考波段为 440 nm,指数斜率为 -0.016(用实测 CDOM 吸收系数回归得到);无机物(Mineral)的比吸收系数为室内实测分离出来的非藻类颗粒物吸收系数与其浓度比值的平均值,比散射系数为实测分离出来的非藻类颗粒物散射系数与其浓度比值的平均值。虽然平均比吸收和比散射系数不能够完全表达内陆湖泊二类水体的光学特性,但其具有一定的代表性,同时可以去一类水体模型参数对二类水体模拟结果的影响,数据模拟流程图如图 1 所示。

2.3 相关参数计算

根据输入的叶绿素、CDOM 和 Mineral 浓度和生物光学模型,可以计算得到水体固有光学量,通过 HYDROLIGHT 模拟,得到相关表观光学量,利用其模拟的 $R(0^-)$, R_{rs} , $E_u(0^-)$ 和 $L_u(0^-)$ 分别计算 Q , T 和 f/Q , 计算公式如下:

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

$$M = R_{rs} / [b_b / (a + b_b)] = (f T) / (Q n^2), \quad (2)$$

$$f = R(0^-) / [b_b / (a + b_b)], \quad (3)$$

$$T = (M Q n^2) / f, \quad (4)$$

式中 $E_u(0^-)$ 为水表面以下上行辐照度, $L_u(0^-)$ 为水表面以下上行辐亮度, a 为总吸收系数, b_b 为总后向散射系数。

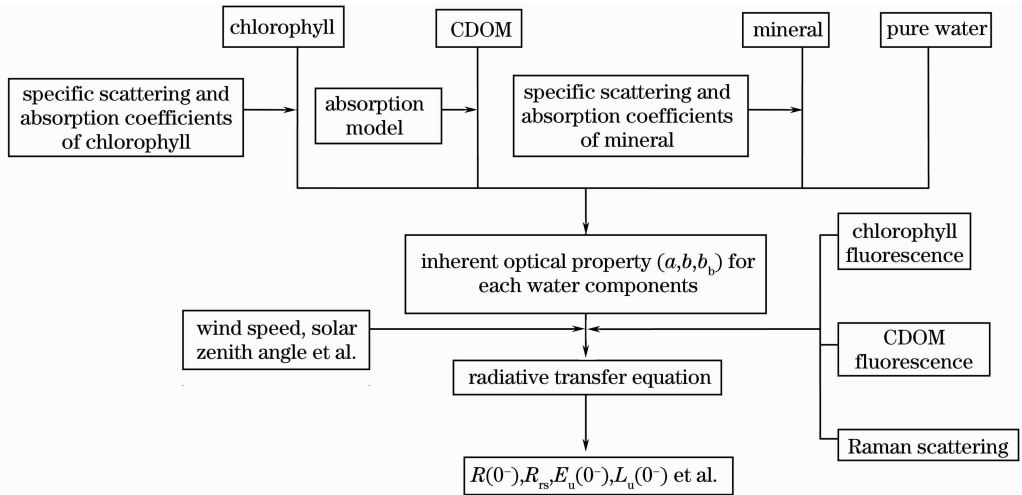


图1 HYDROLIGHT 模拟数据流程图

Fig. 1 Flow chart of simulative data by HYDROLIGHT

3 结果与分析

f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响因素较多, 并且各个影响因素之间具有复杂相互关联性, 因而选择其三大主要影响因素太阳天顶角、风速和单次反照率作为分析对象, 分析其对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响程度以及各个因素之间的交互作用; 基于内陆富营养化水体中的高叶绿素、CDOM 浓度的特征, 同时分析非弹性散射(叶绿素和 CDOM 荧光特性、拉曼散射)对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响。

3.1 单次反照率对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响

为便于讨论 f 、 Q 、 T 和 f/Q 与单次反照率、太阳天顶角和风速变化的响应关系, 选用单波段 440 nm 处的 f 、 Q 、 T 和 f/Q 进行讨论。根据现有研究, 在高散射水体(混浊水体)中 f 、 Q 、 T 和 f/Q 不但受太阳天顶角和风速的影响, 同时受水体固有光学特性影响, 利用单次反照率(W_0) 在 0.182 ~ 0.842 范围内的 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的变异系数(标准差比平均值)表征 W_0 对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响程度, 该影响程度同时也受到风速 V 和太阳天顶角 θ 的交互作用。在风速为 0 ~ 8 m/s, 太阳天顶角为 0 ~ 85° 范围内, f 变异系数范围为 5.372% ($V=8, \theta=85^\circ$) ~ 6.198% ($V=1, \theta=15^\circ$); Q 变异系数范围为 0.551% ($V=8, \theta=30^\circ$) ~ 1.431% ($V=8, \theta=75^\circ$); f/Q 变异系数范围为 5.30% ($V=4, \theta=0$) ~ 6.77% ($V=3, \theta=75^\circ$); T 变异系数范围为 0.589% ($V=0, \theta=0$) ~ 0.944% ($V=8, \theta=75^\circ$)。因此可见, 在该 V 和 θ 范围内, 固有光学量对 T 影响相对最小, 其次是 Q , 对 f 和 f/Q 的影响较为接近并且最大。

如图 2 所示, 单次反照率对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响随着 V 和 θ 的变化存在较大的差异。随着 θ 的增大, f 的变异系数逐渐减小。当 θ 范围为 0 ~ 40° 和 $\theta > 70^\circ$ 时, 风速对 f 的变异系数影响较大, 此时风速在 0 ~ 1.5 m/s 时, 随着风速的增大, f 的变异系数逐渐减小; 在 1.5 ~ 8 m/s 时, 随着风速的增大, f 的变异系数逐渐增大。当 θ 范围为 40° ~ 70° 时, 风速对 f 的变异系数影响较小。随着 θ 的增大, Q 的变异系数呈现以 40° 为分界点先增大后减小。当 θ 范围为 30° ~ 45° 和 $\theta > 70^\circ$ 时风速对 θ 的变异系数影响较大, 影响特征与对 f 的影响较为相似; 当 θ 范围为 0 ~ 30° 和 45° ~ 70° 时, 风速对 Q 的变异系数几乎没有影响。当 θ 在 0 ~ 70° 时, 随着 θ 的增大, f/Q 的变异系数逐渐增大, 在 70° ~ 85° 时, 随着 θ 的增大, f/Q 的变异系数逐渐减小。而在整个 θ 范围内, 风速对 f/Q 变异系数几乎没有影响。 T 的变异系数随着 θ 的增大逐渐增大, 风速对其影响主要在 0 ~ 30° 和大于 75° 时, 影响规律与对 f 的影响较为相似, 但是影响强度相对要弱。

3.2 太阳天顶角对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响

如图 3 所示, 太阳天顶角(θ)变化引起 f 、 Q 和 T 的变化程度要大于单次反照率的影响, 而对 f/Q 的影响程度要小于单次反照率。风速和单次反照率对该影响程度的作用具有一定的差异性, 在本研究范围内(W_0 : 0.182 ~ 0.842; V : 1 ~ 8 m/s), θ 引起 f 的变异系数范围为 10.78% ($V=0; W_0=0.842$) ~ 14.06% ($V=8; W_0=0.526$), Q 的变异系数范围为 7.37% ($V=0; W_0=0.842$) ~ 11.71% ($V=8; W_0=0.182$); f/Q 的变异系数范围为 1.57% ($V=0; W_0=$

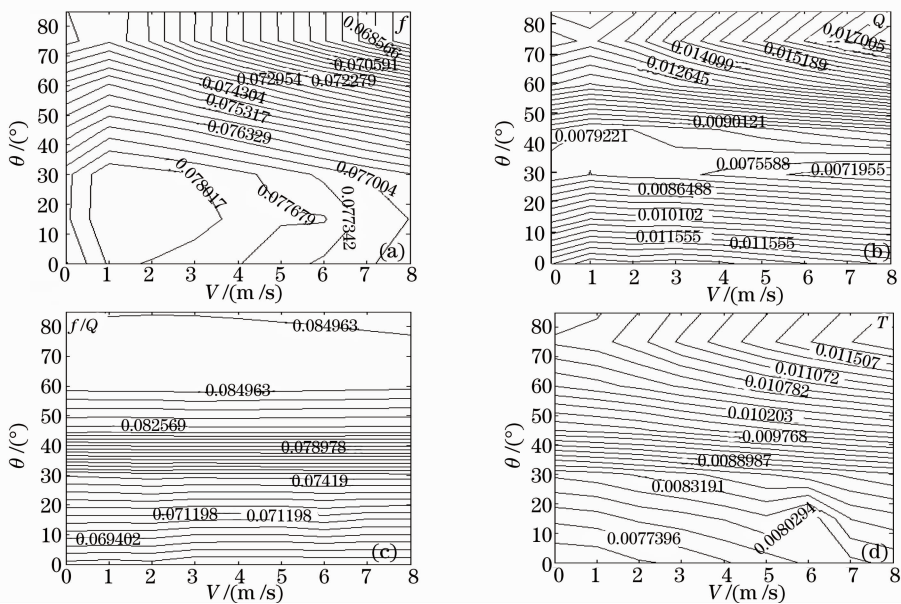


图 2 V 和 θ 对由 W_0 引起的 f 、 Q 、 f/Q 和 T 变异系数的影响

Fig. 2 Affection of V and θ to the variation coefficient of f 、 Q 、 f/Q and T caused by W_0 .

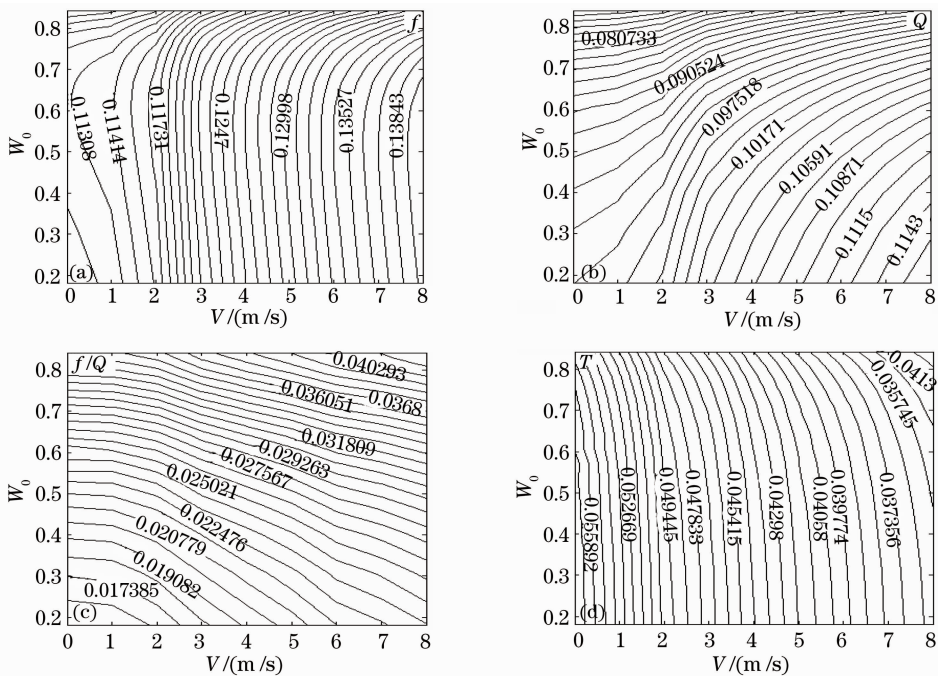


图 3 V 和 W_0 对 θ 引起的 f 、 Q 、 f/Q 和 T 变异系数的影响

Fig. 3 Affection of V and W_0 to the variation coefficient of f 、 Q 、 f/Q and T caused by θ

0.182)~4.20%($V=8;W_0=0.842$); T 的变异系数范围为0.589%($V=8;W_0=0.842$)~0.944%($V=0;W_0=0.182$)。可见,太阳天顶角对 f 影响程度最大,其次是 Q ,再次为 f/Q ,而对 T 的影响程度相对最小。

θ 对 f 的影响程度主要受风速的影响,随着风速的增大, f 的变异系数逐渐增大;但是在低风速(1~2 m/s)、高单次反照率(0.75~0.842)区间,单

次反照率为主要影响因子,随着 W_0 的增加, f 变异系数逐渐减小。 θ 对 Q 的影响程度由 W_0 和 V 共同作用,在低 W_0 (0.182~0.6)区间内, W_0 和 V 作用强度相当,但作用方式相反,随着 W_0 的增加, Q 的变异系数逐渐减小,而随着 V 的增加, Q 的变异系数逐渐增大;在高 W_0 (0.6~0.842)区间内, W_0 为主要影响因子。 θ 对 f/Q 的影响程度受 W_0 作用要明显略高于 V 的作用, W_0 和 V 作用方式相同,随着 W_0

和 V 的增加, f/Q 的变异系数逐渐增大。

3.3 风速对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响

如图 4 所示, 风速 (V) 变化引起 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的变化程度相对于太阳天顶角和单次反照率要小得多, 决定风速对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 影响程度大小的主导因素是太阳天顶角, 而单次反照率为次要因素。在 (W_0 : 0.182~0.842; θ : 0~85°) 范围内, V 引起 f 的变异系数范围为 0.21% ($\theta=15^\circ$; $W_0=0.842$)~3.24%

($\theta=0$; $W_0=0.182$), Q 的变异系数范围为 0.16% ($\theta=15^\circ$; $W_0=0.842$)~2.43% ($\theta=0$; $W_0=0.182$); f/Q 变异系数范围为 0.06% ($\theta=15^\circ$; $W_0=0.842$)~0.89% ($\theta=75^\circ$; $W_0=0.667$); T 的变异系数范围为 0.07% ($\theta=15^\circ$; $W_0=0.842$)~2.20% ($\theta=0$; $W_0=0.182$)。可知, 风速对 f 影响程度最大, 其次是 Q , 再次为 f/Q , 而对 T 的影响程度相对最小。

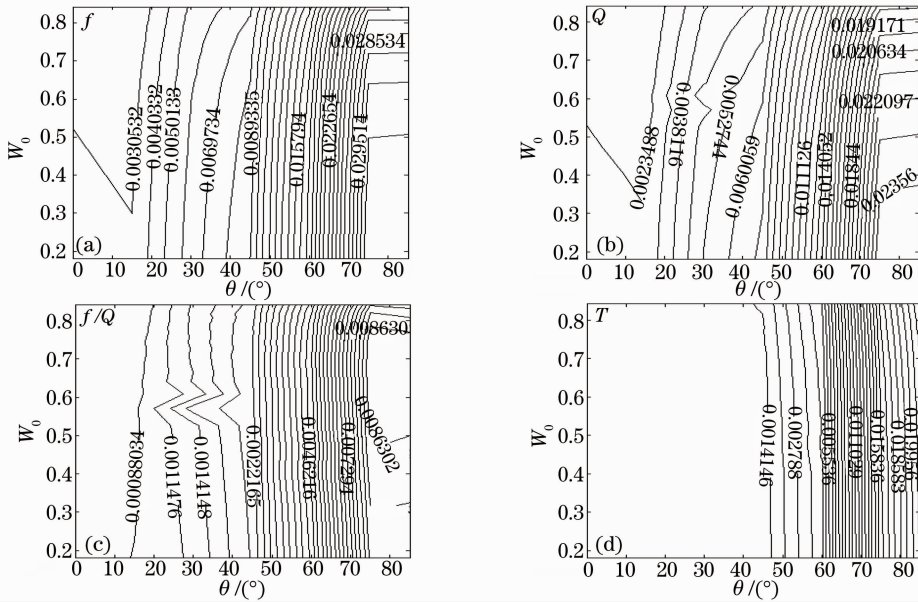


图 4 θ 和 W_0 对由 V 引起的 f 、 Q 、 f/Q 和 T 变异系数的影响

Fig. 4 Affection of θ and W_0 to the variation coefficient of f 、 Q 、 f/Q and T caused by V

V 对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响程度主要取决于太阳天顶角的大小, 随着太阳天顶角的增大 V 对 f 、 Q 、 T 和 f/Q 的影响程度迅速增加。在低和高太阳天顶角范围内 ($\theta < 20^\circ$ 和 $\theta > 75^\circ$), V 对 f 的影响随单次反照率的增加逐渐减小, 而在整个太阳天顶角范围内, V 对 f 的影响随着 θ 的增加迅速增加。 V 对 Q 的影响程度随 θ 和 W_0 的变化与 f 的影响受 θ 和 W_0 的作用较为相似, 但 V 对 Q 的影响强度较 V 对 f 的影响要小。 V 对 f/Q 的影响程度在 $\theta > 75^\circ$ 范围内主要受 W_0 的影响, 以 $W_0 = 0.65$ 为分界线, V 对 f/Q 的影响程度随 W_0 的增大先增大后减小。 V 对 f/Q 的影响程度受 W_0 的影响较小, 可以忽略。当 $\theta < 50^\circ$, 风速对 T 的影响几乎为 0, 该范围内, V 对 T 的影响程度受 W_0 和 θ 的作用几乎为 0; 当 $\theta > 50^\circ$, V 对 Q 的影响程度随 θ 的增加急速升高。

3.4 非弹性散射的影响

内陆湖泊富营养化水体含有较高浓度的叶绿素、悬浮泥沙和 CDOM, 因而具有较强的荧光和拉曼散射特性, 从而使得荧光和拉曼散射对 f 、 f/Q 和 T 的影响程度极

为显著。选用太阳天顶角为 0, 风速为 0 条件下, 研究非弹性散射对 f 、 f/Q 和 T 的影响, 如图 5 所示, 图中 no 表示无非弹性散射, chl 表示含有叶绿素荧光效应, CDOM 表示含有 CDOM 的荧光效应, Raman 表示含有拉曼散射效应。在较清洁水体中 (chl: 0.5 $\mu\text{g/L}$; CDOM: 0.5 m^{-1} ; mineral: 0.5 mg/L), CDOM 的荧光对 f 和 f/Q 的影响主要在 400~550 nm 范围内, 大于以 CDOM 荧光发射波长为 460 nm 为中心; 而叶绿素的荧光对 f 和 f/Q 的影响主要以 667 nm 为中心波长的 650~725 nm 范围内, 550~650 nm 范围内受 CDOM、叶绿素荧光影响, 整体有所提升, 但强度较小; 拉曼散射对 f 、 f/Q 的影响表现在整个可见光范围内, 450~600 nm 范围内要比其他波长范围内稍强些。随着水体混浊度的增加 (chl: 6 $\mu\text{g/L}$; CDOM: 6 m^{-1} ; mineral: 11 mg/L), 叶绿素、CDOM 的荧光和拉曼散射强度有所升高, 但是受 CDOM 和叶绿素特征波段 (以 440 nm 和 675 nm 为中心的吸收范围) 的高吸收影响, CDOM 和叶绿素荧光影响范围内 400~550 nm 和 650~725 nm 较清洁水体有所减小, 而吸收较弱了 550~650 nm 范围较清洁水体有较大的增加。随着

水体混浊度的进一步增加(chl: $10 \mu\text{g/L}$; CDOM: 6.5 m^{-1} ; mineral: 27 mg/L),叶绿素、CDOM 的荧光和拉曼散射强度进一步增强,然而高强度的散射作用掩盖了拉曼散射对 f , f/Q 的影响,CDOM 和叶绿素的高吸收强度使得 CDOM 和叶绿素荧光影响范围内 $400\sim 550 \text{ nm}$ 和 $650\sim 725 \text{ nm}$ 再次减小。由此可以发现,随着水体散

射强度的增加,拉曼散射对 f 和 f/Q 的影响逐渐减小,直到完全被高强度散射作用掩盖;虽然 CDOM 和叶绿素的荧光特性对 f 和 f/Q 的影响随着叶绿素和 CDOM 浓度的增加不断减小,但是该影响在高 CDOM 和叶绿素浓度的富营养化水体中仍是难以忽略的。

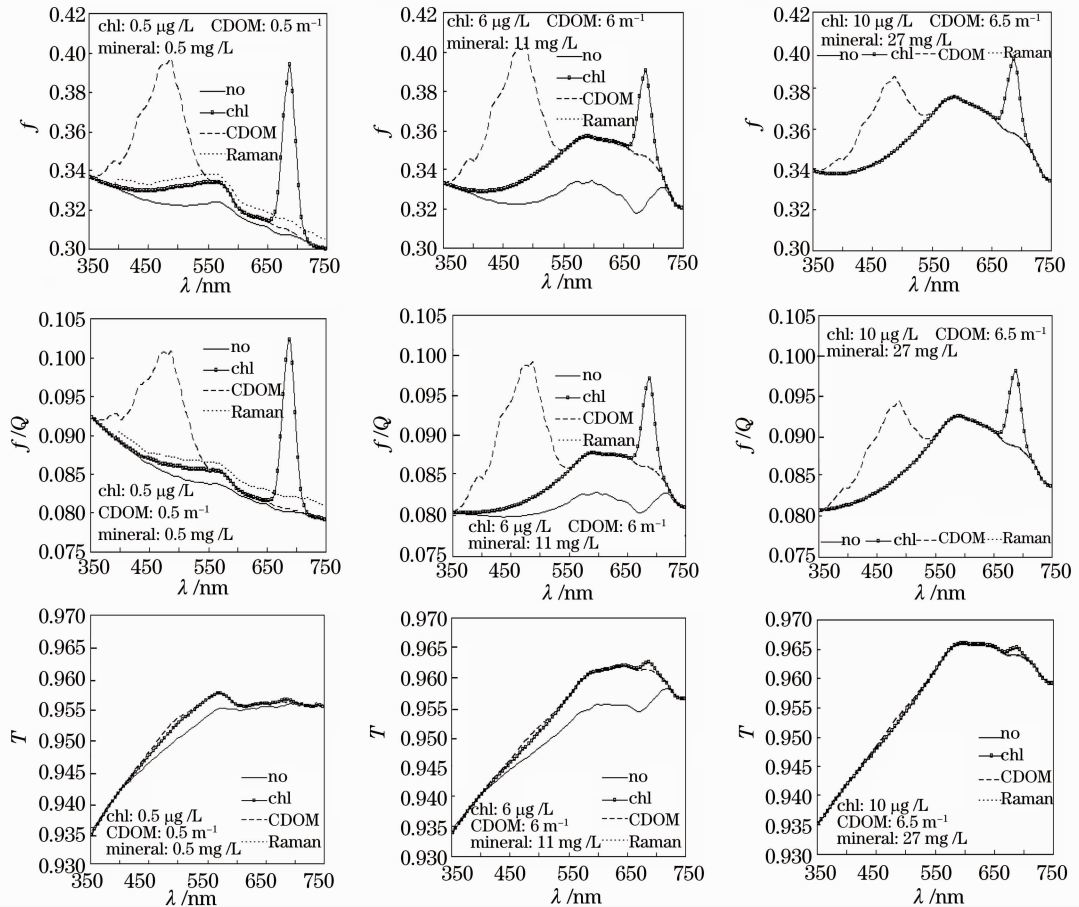


图 5 非弹性散射对 f , f/Q 和 T 的影响

Fig. 5 Affection of inelastic scattering to f , f/Q and T

非弹性散射对 T 的影响相对于对 f 和 f/Q 的影响要小,清洁水体中,CDOM 的荧光对 T 的影响主要集中在 $450\sim 500 \text{ nm}$ 范围内,叶绿素荧光对的影响主要在 667 nm 左右,拉曼散射的影响范围约在 $400\sim 700 \text{ nm}$ 内,CDOM、叶绿素的荧光特性和拉曼散射对 T 的影响几乎重叠在一起。随着混浊度的增加,非弹性影响程度加剧,但 CDOM、叶绿素的荧光特性和拉曼散射对 T 的影响的重合度更高。在高混浊水体中,叶绿素的荧光特性和拉曼散射对 T 的影响几乎可忽略不计。由此可见,拉曼散射对 f , f/Q 和 T 的影响在高混浊水体中是可以忽略不计的。

4 讨 论

风速、太阳天顶角和单次反照率对 f , Q 和 T 的

影响具有正负两种效应,遥感反射率 R_{rs} 与 $b_b/(a + b_b)$ 之间的参数 M 是 f , Q , T 和 n 的函数,由于 f , Q 和 T 主导影响因素的差异,使得风速、太阳天顶角和单次反照率对 M 的影响与对 f , Q 和 T 的影响具有一定的差异。由图 6 可见,单次反照率引起的 M 变异系数最大[图 6(a)],太阳天顶角对该变异系数具有主导性影响,随着太阳天顶角的增加该变异系数不断增大,当太阳天顶角增大到 70° 以后,该变异系数随太阳天顶角的增加不断减小;太阳天顶角引起的 M 变异系数较单次反照率引起的要小的多[图 6(b)],风速对 M 变异系数的作用要大于单次反照率,但是随着风速和单次反照率增加,风速和单次反照率对 M 变异系数的作用地位发生转变,当 $W_0 > 0.7$, $V > 5 \text{ m/s}$ 时,单次反照率对 M 变异系数

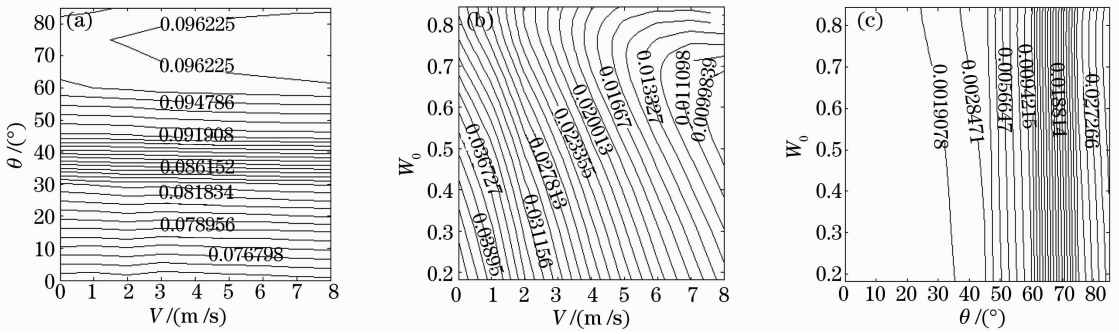


图 6 θ, W_0 和 V 分别对由 θ, V 和 W_0 引起的 M 变异系数的影响

Fig. 6 Affection of θ, V and W_0 to the variance coefficient of M aroused by W_0, θ and V

的作用要大于风速;风速引起的 M 变异系数相对最小[图 6(c)],太阳天顶角为该变异系数的主要影响因素,单次反照率对该变异系数影响较小。

如图 7 所示,无论是在较清洁水体中(chl: $0.5 \mu\text{g/L}$; CDOM: 0.5 m^{-1} ; mineral: 0.5 mg/L),混浊度较高(chl: $6 \mu\text{g/L}$; CDOM: 6 m^{-1} ; mineral: 11 mg/L)和高混浊水体(chl: $10 \mu\text{g/L}$; CDOM: 6.5 m^{-1} ; mineral: 27 mg/L),叶绿素、CDOM 荧光和拉

曼散射对 M 的影响要比对参数 f 的影响要小,在三种水体中,叶绿素荧光引起 M 增量分别为 27.77%, 20.00%和 10.43%,而引起的 f 增量分别为 28.22%, 21.33%和 10.14%;CDOM 荧光引起 M 增量分别为 19.08%,23.48%和 11.00%,而引起的 f 增量分别为 23.23%,25.23%和 10.51%;拉曼散射引起 M 增量分别为 3.49%,7.98%和 0.08%,而引起的 f 增量分别为 4.56%,9.49%和 0.06%。

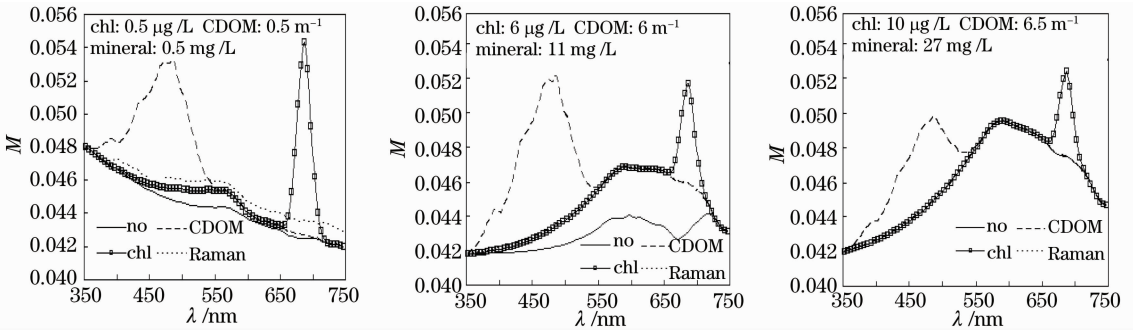


图 7 非弹性散射对 M 的影响

Fig. 7 Affection of inelastic scattering to M

单次反照率对 M 的影响要大于对 f 的影响,太阳天顶角、风速和非弹性散射对 M 的影响要小于对 f 的影响。可见模型 $R_{rs} = M[b_b/(a + b_b)]$ 要比 $R(0^-) = f[b_b/(a + b_b)]$ 受外界条件影响要小,用于水色反演等应用相对会更加稳定。

要影响因子,风速的影响相对最小,当 $\theta > 60^\circ$,风速为次要影响因子,单次反照率的影响最小。

高散射特性水体中,拉曼散射对 $f, f/Q$ 和 T 的影响可忽略不计;CDOM 和叶绿素的荧光特性对 f 和 f/Q 的影响随着叶绿素和 CDOM 浓度的增加不断减小,但是该影响在富营养化水体中仍是难以忽略的。

5 结 论

f 的主要影响因素为太阳天顶角,其次为单次反照率,风速影响相对最小; Q 的主导影响因素为太阳天顶角,风速和单次反照率对其影响较为复杂,当 $\theta < 45^\circ$,单次反照率为次要影响因子,风速影响最小,当 $\theta > 45^\circ$,风速为次要影响因子,单次反照率影响最小; f/Q 的主导影响因素为单次反照率,太阳天顶角为次要影响因子,风速影响最小; T 的主要影响因素为太阳天顶角,当 $\theta < 60^\circ$,单次反照率为次

模型参数 M 受外界条件影响程度要小于 f ,遥感反射率与 $b_b/(a + b_b)$ 之间的关系相对于水表面以下辐照度比与 $b_b/(a + b_b)$ 之间的关系更加稳定。

参 考 文 献

- 1 F. A. Vertucci, G. E. Likens. Spectral reflectance and water quality of adirondack mountain region lakes [J]. *Limno Oceanogr.*, 1989, **34**(8): 1656~1672
- 2 H. B. Jiao, Y. Zha, J. Gao *et al.*. Estimation of chlorophyll-a

- concentration in lake tai, China using in situ hyperspectral data [J]. *International J. Remote Sensing*, 2006, **27**(9): 4267~4276
- 3 A. Gitelson. The peak near 700 nm on radiance spectral of algae and water relationships of its magnitude and position with chlorophyll[J]. *International J. Remote Sensing*, 1993, **13**(17): 3367~3373
- 4 Z. P. Lee, K. L. Carder, S. K. Hawes *et al.*. Model for interpretation of hyperspectral remote-sensing reflectance [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(24): 5721~732
- 5 Z. P. Lee, K. L. Carder, A. A. Robert. Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 6 Z. P. Lee, K. L. Carder, K. P. Du. Effects of molecular and particle scatterings on the model parameter for remote-sensing reflectance [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(25): 4957~4964
- 7 H. R. Gordon, O. B. Brown, M. M. Jacobs. Computed relationships between the inherent and apparent optical properties of a flat homogeneous ocean [J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(2): 417~427
- 8 H. R. Gordon, O. B. Brown, R. H. Evans. A semianalytic radiance model of ocean color [J]. *J. Geophys. Res.*, 1988, **93**(D3): 10909~10924
- 9 J. T. O. Kirk. Dependence of relationship between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1984, (2): 350~356
- 10 Z. P. Lee, K. P. Du, A. Robert. A model for the diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance [J]. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, C02016
- 11 Lee, Z. P., K. L. Carder *et al.*. Deriving inherent optical properties from water color: a multi-band quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(27): 5755~5772
- 12 Gan Shuyi, Liu Zhengkun, Xu Xiangdong, *et al.*. Error analysis for reflectometer in national synchrotron radiation laboratory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2136~2142
干蜀毅, 刘正坤, 徐向东 等. 国家同步辐射实验室反射率计误差分析 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2136~2142
- 13 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1655~1658
李学彬, 徐青山, 魏合理 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1655~1658
- 14 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun *et al.*. Optical radiometric calibration based on parametric down-conversion effect [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2325~2329
李健军, 郑小兵, 卢云君 等. 基于参变下转换效应的光辐射定标方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2325~2329
- 15 A. Morel, B. Gentili. Diffuse reflectance of oceanic waters II. Bi-directional aspects [J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(32): 6864~6879
- 16 Tang Junwu, Tian Guoliang, Chen Qinglian. Bidirectionality of water-leaving radiance: simulation results and its correction [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, **22**(2): 48~57
唐军武, 田国良, 陈清莲. 离水辐射非朗伯特特性的 Monte Carlo 模拟及分析 [J]. *海洋学报*, 2000, **22**(2): 48~57
- 17 A. Morel, B. Gentili. Diffuse reflectance of oceanic waters III. Implication of bidirectionality for the remote-sensing problem [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(24): 4850~4862
- 18 Cai Qiming, Yang Ping. A model of PAR transfer in atmosphere-water system and primary productivity of lake [J]. *Advances in Water Science*, 1993, **4**(3): 171~178
蔡启铭, 杨平. 大气-水体系统中 PAR 传输模式及湖泊初级生产力 [J]. *水科学进展*, 1993, **4**(3): 171~178
- 19 Cai Qiming, Yang Ping. Model of irradiance transfer in wavy water of lake taihu [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, **24**(3): 286~293
蔡启铭, 杨平. 有风浪太湖水体的光照传输模式 [J]. *海洋与湖沼*, 1993, **24**(3): 286~293
- 20 Tang Junwu. The simulation of marine optical properties and color sensing model [D]. Beijing: Institute 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
- 21 H. R. Gordon. Dependence of the diffuse reflectance of natural waters on the sun angle [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1989, **34**(8): 1484~1489
- 22 H. R. Gordon. Absorption and scattering estimates from irradiance measurements; Monte Carlo simulations [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1991, **36**(4): 769~777
- 23 A. Morel, B. Gentili. Diffuse reflectance of oceanic waters; its dependence on sun angle as influenced by the molecular scattering contribution [J]. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(30): 4427~4438
- 24 A. Morel, J. K. Voss, B. Gentili. Bidirectional reflectance of oceanic waters; a comparison of modeled and measured upward radiance fields [J]. *J. Geophys. Res.*, **100**(27): 13143~13150
- 25 A. Morel, D. Antoine, B. Gentili. Bidirectional reflectance of oceanic waters: accounting for Raman emission and varying particle scattering phase function [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(30): 6289~6306
- 26 J. T. O. Kirk. Characteristics of the light field in highly turbid waters: a Monte Carlo study [J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1994, **39**(3): 702~706
- 27 J. T. O. Kirk. Monte Carlo Modelling of Radiative Transfer in the Ocean. CSIRO Land & Water, Canberra [M]. ACT and Kirk Marine Optics, Murrumbateman, NSW, Australia
- 28 R. A. Leathers, C. D. Mobly, Monte Carlo Radiative Transfer Simulations for Ocean Optics; A Practical Guide [M]. 2004, Washington, DC 20375-5320, Naval Research Laboratory, NRL/MR/5660-04-8819
- 29 C. D. Mobly. Light and Water-Radiative Transfer in Natural Waters [M]. New York: Academic Press, 1994
- 30 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4.1 Users' Guide [S]. Sequoia Scientific, Wash. Inc. Redmond, 2000; www.sequoiasci.com
- 31 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4.1 Technical Documentation [S]. Sequoia Scientific, Wash. Inc, Redmond, 2000; www.sequoiasci.com
- 32 C. D. Mobley. Phase function effects on oceanic light field [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1035~1050
- 33 A. Macke, D. L. Mitchell, L. V. Bremen. Monte Carlo radiative transfer calculations for inhomogeneous mixed phase clouds [J]. *Phys. Chem. Earth (B)*, 1999, **24**(3): 237~241
- 34 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