

基于水动力学的水体组分垂直结构对遥感信号的影响

黄昌春¹ 李云梅¹ 王 桥¹ 吕 恒¹ 孙德勇²

(¹ 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)
(² 南京信息工程大学遥感学院, 江苏 南京 210046)

摘要 基于水动力模型和辐射传输模型,模拟不同风速条件下水体组分(浮游植物和悬浮颗粒物)垂直分布对遥感反射率的影响,对比分析现有的两种水体光学均一函数(Zaneveld 权重函数和 Gordon 权重函数)在不同层化程度水体中的应用。结果表明,悬浮颗粒物垂直分布对 500~650 nm 范围内的遥感反射率(R_{rs})影响较大,随着参考深度悬浮颗粒物质量浓度增加(由 5~70 mg/L),悬浮颗粒物垂直分布对 R_{rs} 的影响不断减小(变异系数由 27.46% 减小到 3.38%),同时 R_{rs} 受到悬浮颗粒物影响的最大波长位置向长波方向移动(由 585nm 逐渐移动到 685 nm);在浮游植物垂直分布影响下,400~725 nm 范围内的 R_{rs} 值随着风速的增加呈现先增加再逐渐减小趋势,400~450 nm 范围内的 R_{rs} 受浮游植物垂直分布影响较小,变异系数仅为 1%;500~600 nm 范围内的 R_{rs} 受浮游植物垂直分布影响较大,最大变异系数可达 27.18%。在水体组分层化较弱水体中,Zaneveld 与 Gordon 权重函数对水体光学均一处理效果较为相似;但在水体组分层化较为严重的水体中,Zaneveld 权重函数光学均一处理效果要好于 Gordon 权重函数。

关键词 海洋光学;水动力学;垂直结构;遥感

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0201005

Influence of Vertical Distribution of Water Consistuent on the Remote Sensing Based on Hydrodynamics

Huang Changchun¹ Li Yunmei¹ Wang Qiao¹ Lü Heng¹ Sun Deyong²

¹ Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education,
Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210046, China

² College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210046, China

Abstract Based on the models of hydrodynamics and radiation transfer, the remote sensing reflectance (R_{rs}) affected by different water constituents' vertical distribution under the condition of different wind speeds is simulated. The calibration effect of two different water optical homogeneous functions (Zaneveld and Gordon weight function) in the stratified water mass is compared and analyzed. The results indicate that the R_{rs} in the range of 500~650 nm is significantly affected by the vertical distribution of suspended particle. With the increasing of suspended particle concentration (5~70 mg/L) at reference depth, the influence of suspended particle matter vertical distribution to the R_{rs} becomes smaller and smaller (the variation coefficient induced by suspended particle decreases from 27.46% to 3.38%). And the biggest influencing wavelength position on R_{rs} moves to the long wavelength (585~685 nm). With the increasing of wind speed, the influence of phytoplankton vertical distribution on R_{rs} in the range of 400~725 nm increases firstly and then decreases. The influence of phytoplankton vertical distribution on R_{rs} in the range of 400~450 nm is the smallest. The variation coefficient induced by phytoplankton vertical distribution is only 1%. The influence of phytoplankton vertical distribution on R_{rs} in the range of 500~600nm is the biggest. The variation coefficient induced by phytoplankton vertical distribution can reach 27.18%.

收稿日期: 2011-06-14; 收到修改稿日期: 2011-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(50908116,41030751,40971215)、国家科技重大专项(E0203/1112/JC01)、江苏省属高校自然科学基金重大项目(11KJA170003)和江苏高校优势学科建设工程资助课题。

作者简介: 黄昌春(1982—),男,讲师,博士,主要从事环境污染遥感监测方面的研究。

E-mail: huangchangchun_aaa@163.com

The effect of optical homogeneous calibration by the Zaneveld weight function is similar with Gordon weight function when the stratification of water mass is insignificant. However, the effect of optical homogeneous calibration by the Zaneveld weight function is better than Gordon weight function when the stratification of water mass is significant.

Key words oceanic optics; hydrodynamics; vertical distribution; remote sensing

OCIS codes 010.4450; 010.1110; 010.0280

1 引 言

水体遥感反射率是光线入射到水面进入水体后,经过水体及其组分的吸收和散射作用最终溢出水面形成的离水辐亮度与总入射辐照度之间的比值。它包含了水体中垂直各水层光学特性信息^[1]。遥感反射率是遥感技术能够获取的最直接的数据、是反演水体组分相关信息的基础。然而遥感反射率除受水体组分及其生物光学、太阳天顶角、水体深度和水体底质等影响之外还受水体组分垂直分布影响。表观光学量(遥感反射率、漫衰减系数等)和固有光学量(吸收和散射系数)之间的定量关系是水环境遥感监测机理之所在,同时也是水色要素生物光学反演模型算法的基础。目前,表观光学量与固有光学量之间的定量关系主要是基于水体光学特性均一条件下建立的,在此基础之上,已有学者进行了关于水体层化对遥感反射率影响的研究, Haltrin 等^[2]基于光学闭合原理解决了混浊水体任意深度和水气界面状况条件下的辐射传输问题,对由固体悬浮物的非均一性所导致的水体反射光谱形状特征的变化进行分析。Forget 等^[3]利用双层辐射传输模型,研究了水体反射光谱对不同水深处悬浮物质量浓度变化的敏感性。Nanu 等^[4]研究了不同悬浮物、叶绿素和 CDOM 垂直分布形式对遥感反射率的影响,认为水色垂直分布对遥感反射率的影响是难以忽略的。曹文熙^[5]认为遥感反射率受叶绿素垂直结构影响较为敏感的区域为 400~600 nm 之间。Gordon^[6]建议在水色层化条件下需要引入剖面权重函数,研究水体光学特性垂直分布对遥感反射率的影响,该函数是以漫衰减系数为自变量的指数函数。Piskozub 等^[7]、Zaneveld 等^[1,8]对遥感反射率的垂直依赖性的研究表明现有的 Gordon 权重方程在严重层化的水体中是难以使用的。然而现有的层化作用定量研究中水色要素垂直结构独立于水动力模型,使得水色要素垂直分布模型是静态的,缺乏动力学物理依据。

太湖属于典型的大型浅水湖泊,地处东亚季风

区,面积为 2338 km²,最大水深不足 3 m,平均水深仅 1.89 m,动力比(湖泊面积的平方根与平均湖深的比值)高达 25.6^[9]。Bachmann 等^[10]认为当湖泊的动力比大于 0.8 时,整个湖泊的沉积物都有可能受波浪影响而发生再悬浮。太湖全年 90% 时间处于盛行季风和台风的影响下,风浪影响了水体组分垂直分布,从而改变了水体的遥感反射率。因此处于季风区太湖水体的遥感反射率受水动力过程影响较大。但是,目前水动力对遥感反射率影响机理并不明确。本文基于水动力和辐射传输理论,结合水体组分生物光学模型将水体组分垂直分布嵌入辐射传输模型,模拟不同风速条件水体组分垂直分布影响下的遥感反射率,进而定量描述水体组分垂直分布对遥感反射率的影响。

2 理论与方法

2.1 技术路线

Hydrolight 是利用 Fortran 语言编写的辐射传输模型。它采用不变嵌入法(Invariant imbedding)求解辐射传输方程获得辐亮度随水深、天顶角、方位角和波长的分布变化情况^[11~13]。Hydrolight 需要输入的参数为大气状况、水-气边界条件和水体固有光学量,模拟结果为表观光学量。根据水动力模型求解浮游植物和悬浮颗粒物垂直分布模式,输入参考深度的叶绿素(C_{Chla})(5~75 $\mu\text{g/L}$)和悬浮物(SPM)(5~70 mg/L)的质量浓度;根据浮游植物和悬浮颗粒物比吸收和比散射系数^[14~16],得到不同背景质量浓度和风速条件下悬浮颗粒物和浮游植物固有光学量垂直分布。假设黄质(CDOM)质量浓度垂直均一(参考波段 440 nm 处吸收系数为 1 m^{-1} ,斜率指数为 -0.014 nm^{-1})。根据 Mobley 等^[17~19]的研究的结果,选用 Fournier-Forand 散射函数。依据多年太湖野外和室内藻类固有光学量实验,叶绿素后向散射率选用 0.006,悬浮物后向散射率选用 0.022。忽略水体底质影响。详细技术路线如图 1 所示。

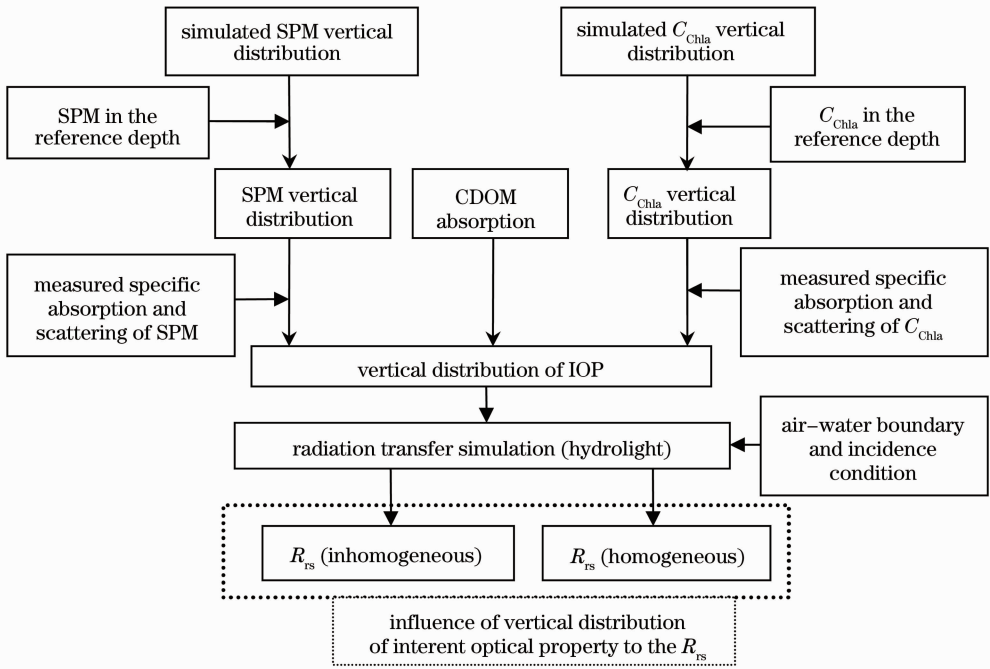


图1 本研究技术路线图

Fig. 1 Flow chart of simulative data by hydrolight

2.2 悬浮颗粒物垂直分布模型

根据波浪作用下三维泥沙扩散方程^[20,21],只考虑垂直方向和平均时间的泥沙质量浓度,同时忽略垂直方向上水质点流速,悬浮颗粒物垂直分布可以表述为

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + w_s \frac{\partial c}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

深度上对(1)式积分得到: $C_1 = E_z \frac{\partial c}{\partial z} + w_s c$, C_1 为积分常数。根据水面没有泥沙跳出或下沉这一边界条件, C_1 为0。对(1)式积分,可以得到底泥再悬浮垂直分布:

$$\frac{c(z)}{c(z_r)} = \exp\left(-\int_{z_r}^z \frac{w_s}{E_z} dz\right), \quad (2)$$

式中 z_r 为参考深度, $c(z_r)$ 为参考深度质量浓度。因此确定沉积物垂直分布需要确定扩散系数 E_z 和沉降速度 w_s 。根据斯托克斯(Stokes)给出的滞粘状态下的沉速公式^[22],经张金善等^[23~25]根据室内外

试验,得到太湖水体中悬浮物的沉降速度公式。根据陈建华^[26]假设:紊动水流的漩涡长度分布为正态分布,紊动掺混长度是各种尺度的漩涡长度的均值;利用窦国仁^[27]脉动流速分布公式,得到悬浮颗粒物垂向扩散系数。

2.3 浮游植物垂直分布模型

根据浮游植物垂直分布动力模式^[28,29],只考虑平均时间的生物量,同时为了简化求解过程,认为浮游植物的沉降速度(w_p)和垂直扩散系数(E_{zp})不随深度变化而变化,则(2)式可以写为

$$w_p \frac{\partial(P)}{\partial z} = (G_p - D_p)P + E_{zp} \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (3)$$

式中 G_p, D_p 为浮游植物生长量和消亡量,对其求解首先需要满足

$$\Gamma = \frac{4(G_p - D_p)E_{zp}}{w_p^2} > 1, \quad (4)$$

结合浮游植物动力学边界^[30~32]:

$$\begin{cases} w_p P_1 - E_{zp} \frac{\partial P_1}{\partial z} = 0, & z = 0 \\ w_p P_1 - E_{zp} \frac{\partial P_1}{\partial z} = w_p P_2 - E_{zp} \frac{\partial P_2}{\partial z}, & z = D_k, P_1 = P_2 \\ P_2 \rightarrow 0, & z \rightarrow +\infty \end{cases} \quad (5)$$

式中 P_1 为真光层生物生长量, P_2 为真光层以下生物生长量, D_k 为真光层深度,求解得到浮游植物垂直分布模式。

3 结果与分析

由风引起的水表面的波浪,使得水表面粗糙度发生变化,从而改变水表面的斜率。Hydrolight 采用 Cox-Munk 毛细重力波的海表面斜率统计,经过模拟认为其平均值对遥感反射率影响较小^[33],因此在此处的遥感反射率中,风浪引起表面波变化而导致的遥感反射率变化暂不考虑。在浅水湖泊,风浪对遥感反射率的影响主要体现在风浪作用下叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布对遥感反射率的影响。野外水样采集的深度主要集中在水表面(20~30 cm),故设置表层水样采集深度(20~30 cm)为参考深度。在不同风速(水动力)条件下,浮游植物和悬浮颗粒物不仅垂直分布存在一定的差异,而且参考深度上质量浓度相同条件下的整个水柱上的质量浓度总量也存在一定的差异。不同风速条件下叶绿素和悬浮颗粒物垂直分布如图 2 所示。低风速条件下,浮游植物呈现近似高斯分布,而高斯峰值的位置随着真光层深度的变化而变化,随着风速的增加,高斯峰值不断减小,且不断下移,最终浮游植物达到垂直均一分布[图 2(a)]。随着深度的增加,悬浮颗粒物呈现近似指数形式增加,随着风速的增加,悬浮

物质量浓度随深度指数增加的速度逐渐减小,最终悬浮颗粒物垂直均一分布[图 2(b)]。本研究中叶绿素垂直分布模式近似为浮游植物垂直分布模式。不同风速条件下,参考深度上质量浓度相同,整个水柱上叶绿素和悬浮颗粒物总质量浓度归一化(以 3 m/s 垂直分布条件为归一化基准)如图 3 所示。由图 3 可见,参考深度上浮游植物质量浓度相同时,风速为 3 m/s 时,整个水柱上的浮游植物质量浓度总和最小,7 m/s 时,水柱上浮游植物质量浓度总和达到最大值,8~9 m/s 时总质量浓度出现下降趋势,10 m/s 时,浮游植物垂直分布近似均一,即随着风速的增加总质量浓度不再变化(如 11 m/s 与 10 m/s 时浮游植物总质量浓度几乎相等)[图 3(a)]。悬浮颗粒物在风速为 3 m/s 条件下,整个水柱上的总质量浓度最高,随着风速的增加,垂直水柱上悬浮颗粒物质量浓度和总质量浓度不断降低,最终悬浮颗粒物垂直分布趋于均一,总质量浓度趋于不变。这表明,在低风速条件下的悬浮颗粒物在水柱上的总质量浓度要远高于实际测量值,而随着风速的增加,实际质量浓度与测量值之间的差异会越来越小[图 3(b)]。

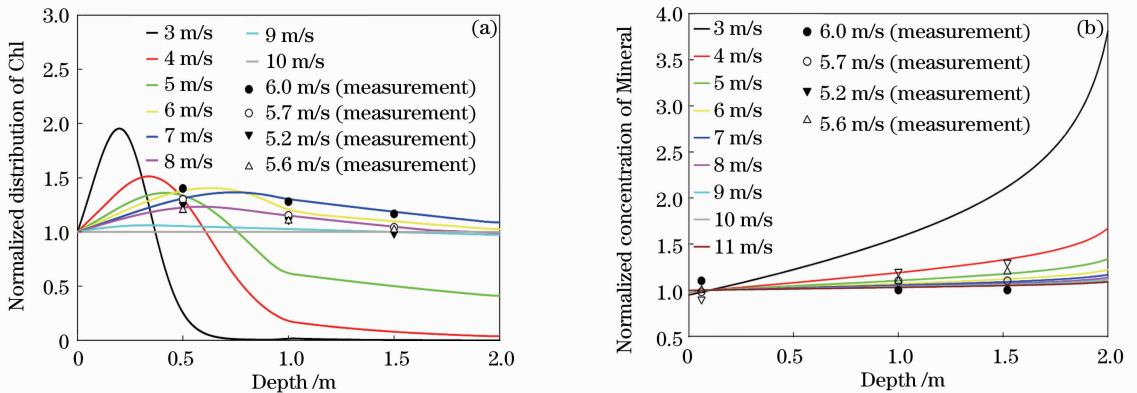


图 2 浮游植物(a)和悬浮颗粒物(b)归一化垂直分布状况

Fig. 2 Normalized vertical distribution of phytoplankton (a) and suspended particle (b)

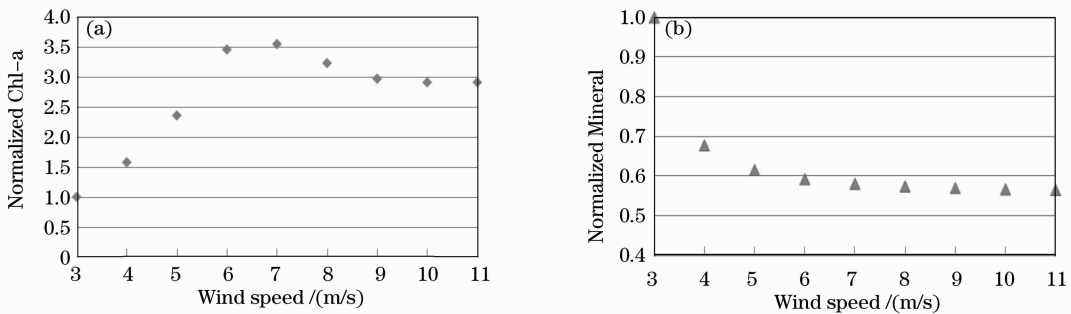


图 3 归一化垂直水柱叶绿素(a)和悬浮颗粒物(b)总质量浓度随风速变化

Fig. 3 Normalized total mass concentration of phytoplankton (a) and suspended particle (b) in the vertical water mass varies with wind speeds

3.1 悬浮颗粒物垂直分布对遥感反射率的影响

分别设置参考深度处的悬浮颗粒物质量浓度为 5, 10, 15, 20, 30, 40, 55, 70 mg/L。模拟风速在 3~11 m/s 条件下的遥感反射率 (R_{rs})，结果如图 4 所示。500~650 nm 范围内的 R_{rs} 受垂直分布影响最大，随着参考深度悬浮颗粒物质量浓度由 5 mg/L 增加到 70 mg/L 时，悬浮颗粒物垂直分布对 R_{rs} 的影响不断减小 [最大变异系数为 27.46% 减小到 3.38%，如图 4(f) 所示]，同时最大影响波长位置向长波方向移动 (由 585 nm 逐渐增加到 685 nm)。由此表明，当水体中悬浮颗粒物质量浓度较低时，在低风速条件

下 (严重层化)， R_{rs} 实际测量值要显著高于模型模拟值，在高风速条件下 (近似均一)，实际测量值与模型模拟值之间差异较小。这主要是由于悬浮颗粒物随深度呈指数增加，在离水表面较近水柱内，悬浮颗粒物随深度变化较小，该深度范围内悬浮颗粒物质量浓度垂直近似均一，因此在悬浮颗粒物质量浓度较高情况下，光线穿透深度较小，此时悬浮颗粒物垂直分布结构对遥感反射率影响较小；而在悬浮颗粒物质量浓度较低情况下，光线穿透深度较大，而较深的地方悬浮颗粒物质量浓度随深度变化较剧烈，该条件下，悬浮颗粒物垂直分布对遥感反射率影响较大。

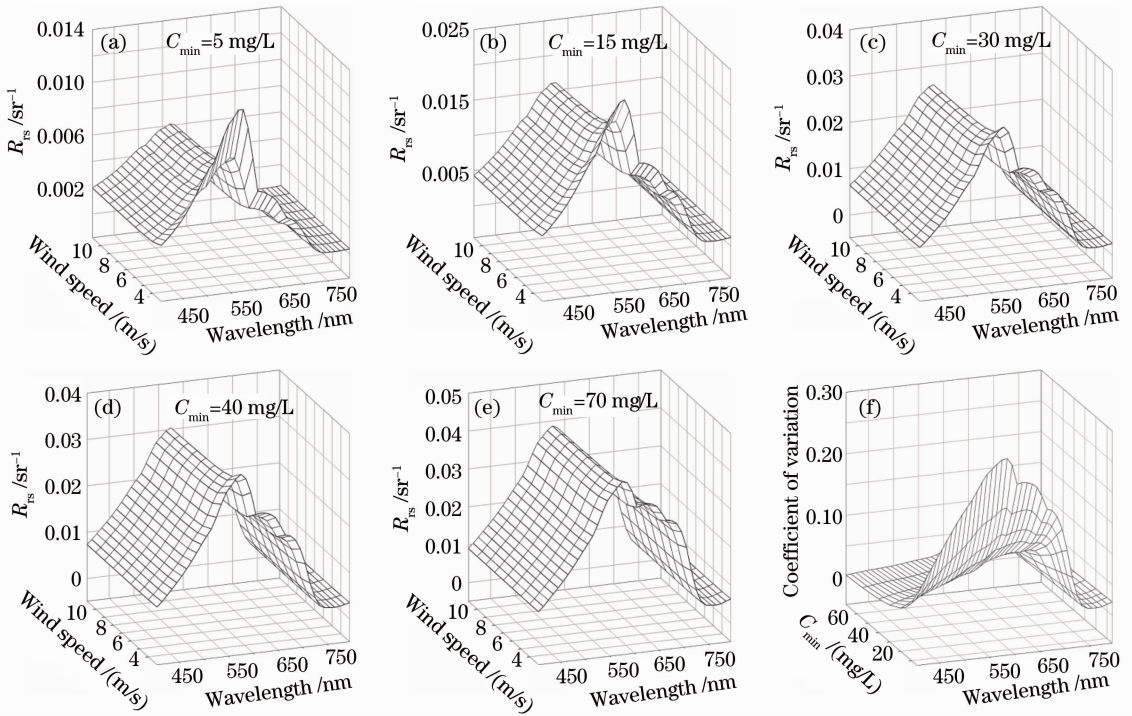


图 4 (a)~(e) 不同悬浮颗粒物质量浓度和风速条件下遥感反射率；(f) 不同悬浮颗粒物质量浓度条件下由风速引起的遥感反射率变异系数

Fig. 4 (a)~(e) remote sensing reflectance in different suspended particle mass concentrations and wind speeds; (f) variation coefficient induced by wind speeds in different suspended particle mass concentrations

3.2 浮游植物垂直分布对遥感反射率的影响

分别设置参考深度处浮游植物质量浓度为 5, 9, 14, 19, 25, 31, 39, 45, 60, 75 $\mu\text{g/L}$ 。模拟风速在 3~11 m/s 条件下的遥感反射率 (R_{rs})，结果如图 5 所示。400~725 nm 范围内， R_{rs} 的光谱值大小幅度随风速的变化总体趋势与垂直水柱浮游植物总质量浓度随风速变化相一致：3 m/s 时 R_{rs} 的光谱值最小，7 m/s 时， R_{rs} 的光谱值达到最大值，8~9 m/s 时 R_{rs} 的光谱值出现下降趋势，10 m/s 与 11 m/s 时 R_{rs} 的光谱值完全相同。725~800 nm 范围内的 R_{rs} 的

光谱值大小幅度随风速的增加而逐渐减小。各个波长的 R_{rs} 变化程度存在一定的差异，如图 5(f) 中变异系数所示，差异最小波长主要集中在 400~450 nm 之间，变异系数最小值仅为 1%；差异最显著波长范围主要在 500~600 nm 之间，最大变异系数可以达到 27.18%。 R_{rs} 光谱变异系数将随着参考深度处的叶绿素质量浓度的增加在 400~725 nm 之间呈现逐渐减小的趋势 (波长 565 nm 处最大变异系数由 27.18% 减小到 13.33%)，而在 725~800 nm 之间呈现增加趋势。

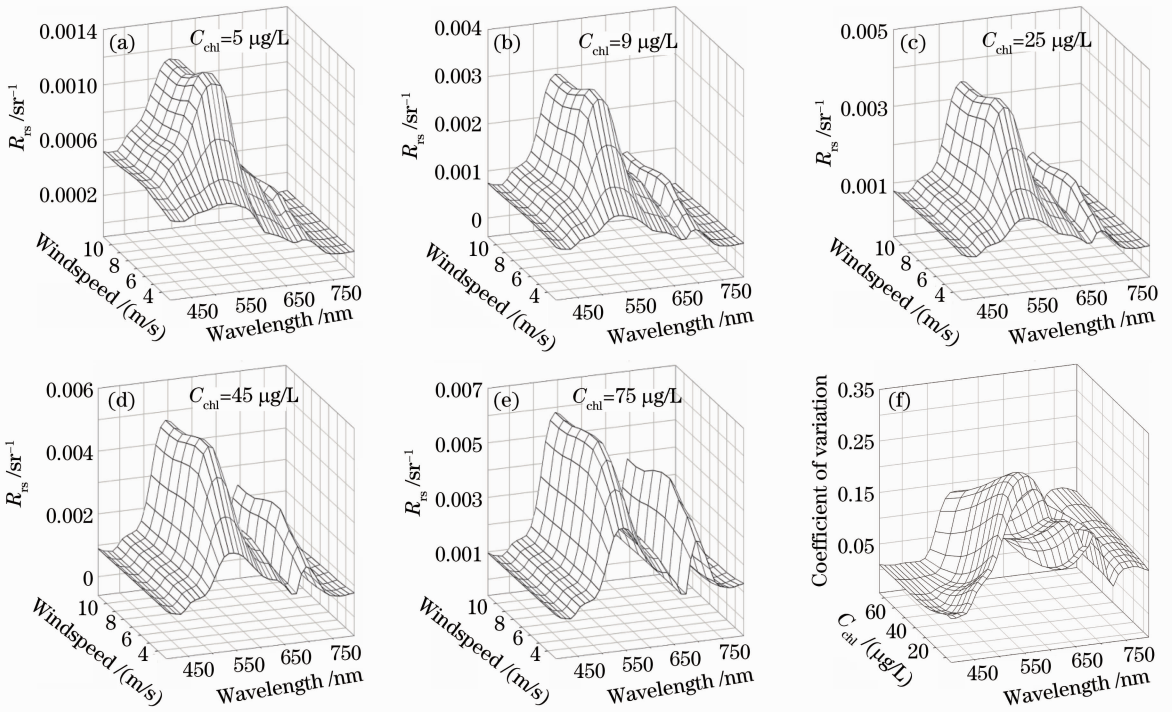


图 5 (a)~(e)不同叶绿素质量浓度和风速条件下遥感反射率;(f)不同叶绿素质量浓度条件下由风速引起的遥感反射率变异系数

Fig. 5 (a)~(e) Remote sensing reflectance in different phytoplankton concentrations and wind speeds; (f) variation coefficient induced by wind speeds in different phytoplankton concentrations

3.3 悬浮颗粒物和浮游植物垂直分布对等效垂直均一的影响

现有的水体表观光学量与固有光学量之间的定量关系是建立在水体光学属性垂直均一条件下的,而水体层化需要选择正确的权重方程对其进行光学均一校正(光学均一是利用光学权重函数使得水色垂直非均一达到光学属性上是垂直均一)^[7]。Gordon^[6]和 Zaneveld^[1]分别给出了权重方程将层化水体进行光学均一校正。两权重方程分别为

$$\langle b_b/a \rangle_{\text{Gordon}} = \frac{\int_0^{z_{90}} \frac{b_b(z)}{a(z)} \exp\left[-\int_0^z 2K_d(z') dz'\right] dz}{\int_0^{z_{90}} \exp\left[-\int_0^z 2K_d(z') dz'\right] dz}, \quad (6)$$

$$\langle b_b/a \rangle_{\text{Zaneveld}} = \int_0^{z_{90}} \frac{b_b(z)}{a(z)} \frac{d \exp\left[-\int_0^z 2K_d(z') dz'\right]}{dz} dz, \quad (7)$$

式中 a 为总吸收系数, b_b 为总后向散射系数, K_d 为下行漫衰减系数, z_{90} 为真光层深度。

图 6 为权重函数中下行漫衰减系数 (K_d) 在深

度上的变异系数, 变异系数越大代表水体垂直均一性越低。随着风速的增加和参考深度处悬浮颗粒物质量浓度的降低, K_d 的变异系数不断减小, 即 K_d 垂直分布约接近垂直均一。然而在悬浮颗粒物质量浓度降低情况下, 悬浮颗粒物垂直分布对遥感反射率影响相对较大[如图 4(d)所示], 这主要是由于随着悬浮颗粒物质量浓度的增加, 光线穿透深度降低, 即(6)式和(7)式中的 z_{90} 将会降低, 能够影响水表面遥感反射率的悬浮颗粒物主要分布在离水表面较近的水体, 该深度范围内悬浮颗粒物垂直分布相对变化较小。 K_d 光谱曲线同样受到悬浮颗粒物垂直分布影响, 悬浮颗粒物质量浓度较小条件下(如图 6 中 5 mg/L), 随着风速的增加 K_d 最大变异系数位置将向长波方向移动(红移), 但变异系数逐渐减小; 随着悬浮颗粒物质量浓度的增加, 变异系数不断增大, 且增大范围不断向长波方向移动。由此可见, 悬浮颗粒物垂直分布对近红外-红外波段遥感反射率影响相对较小; 对可见光范围内的遥感反射率影响较大。

图 7 为浮游植物垂直分布权重函数中下行漫衰减系数 (K_d) 在深度上的变异系数, 与悬浮颗粒物垂直分布权重函数相似, 变异系数越大代表水体垂直均一性越低。随着风速的增加和参考深度处浮游植

物质量浓度的降低, K_d 的变异系数不断减小, 即 K_d 垂直分布约接近垂直均一。由图 7 可见, 浮游植物垂直结构对 K_d 光谱曲线影响主要在浮游植物吸收波段 440 nm 和 675 nm 附近和藻蓝蛋白吸收波段 620 nm 附近, 随着这浮游植物质量浓度的增加, 影

响程度不断增大。与悬浮颗粒物垂直结构对光谱曲线影响相比, 浮游植物 K_d 光谱曲线受垂直分布影响的最大位置相对固定。由于浮游植物吸收系数和后向散射系数在近红外-红外波长范围内极小, 其垂直结构对 700 nm 以后的 K_d 影响较小。

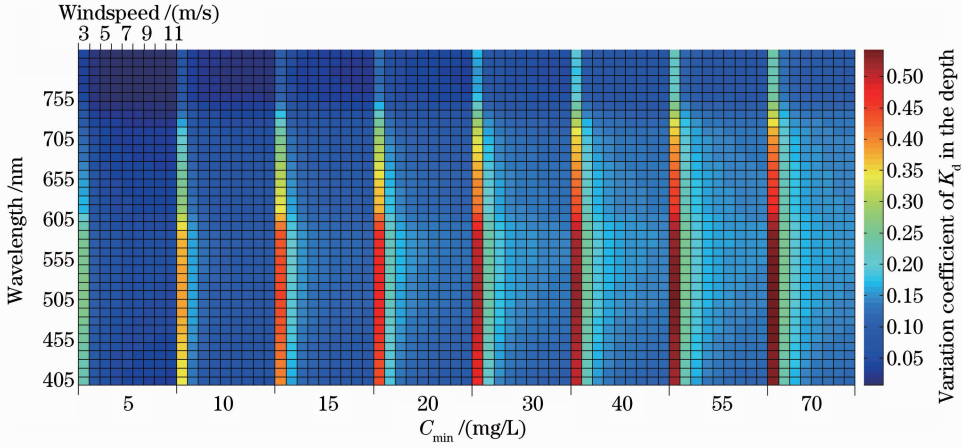


图 6 悬浮颗粒物垂直结构权重函数参数 K_d 在深度上变异系数分布

Fig. 6 Variation coefficient distribution of weight function parameter (K_d) in the depth induced by vertical distribution of suspended particle

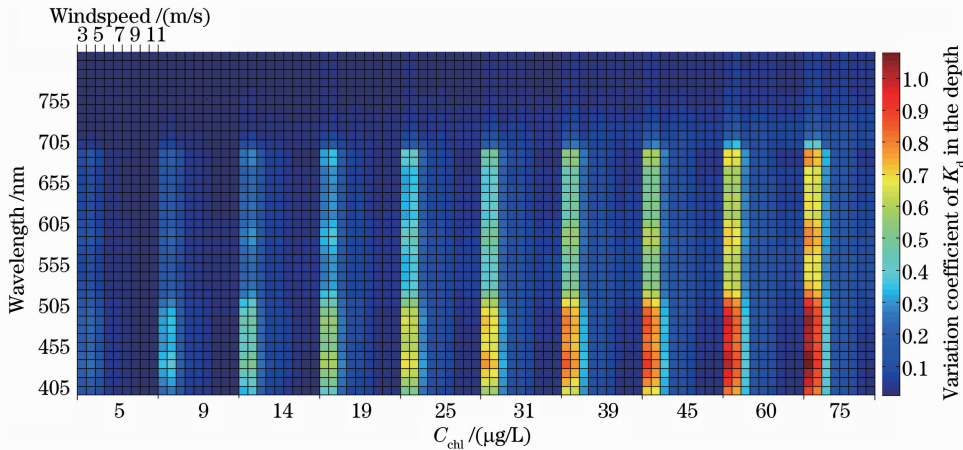


图 7 浮游植物垂直结构权重函数参数 K_d 在深度上变异系数分布

Fig. 7 Variation coefficient distribution of weight function parameter (K_d) in the depth induced by vertical distribution of phytoplankton

3.4 两种权重方程下固有光学量与表观光学量之间关系

3.4.1 悬浮颗粒物垂直分布

在悬浮颗粒物垂直分布影响下, 分别计算由 Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数得到 $b_b(\lambda) / [b_b(\lambda) + a(\lambda)]$ (记为 U_o 和 U_{co}) 之间差异的百分比, 结果如图 8 所示。在悬浮颗粒物质量浓度垂直均一或接近均一条件下, Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数计算得到的 U 之间几乎没有差异; 但是在悬浮颗粒物垂直结构影响下, 两种权重函数计算得

到的结果存在一定的差异, 这种差异随着悬浮颗粒物质量浓度的增加呈现先增加后减小的趋势; 同时这种差异在光谱曲线上也得到较为显著的体现, 在低悬浮颗粒物质量浓度条件下, 垂直结构使得短波段 U_o 和 U_{co} 存在较大的差异, 随着悬浮颗粒物质量浓度的增加, 该最大差异波段向长波方向移动, 并且影响的波长范围在不断减小。

图 9 分别为在悬浮颗粒物垂直结构影响下, U_o 和 U_{co} 与水表面以下遥感反射率 (R_{rs}^-) 对应散点。可以发现, U_o 与 R_{rs}^- 之间呈现近似二次函数的关系, 而

U_{∞} 与 R_{rs}^- 之间呈现近似线性函数关系; U_0 与 R_{rs}^- 之间的散点图的离散程度要高于 U_{∞} 与 R_{rs}^- 之间散点图的离散程度。由此可见,悬浮颗粒物垂直分布对固有光学量与表观光学量之间的表达关系具有一定

的影响,但是 Zaneveld 权重函数能够较好地剔除悬浮颗粒物垂直分布对固有光学量与表观光学量之间的表达关系的影响,而 Gordon 权重函数对该影响的剔除能力要小于 Zaneveld 权重函数。

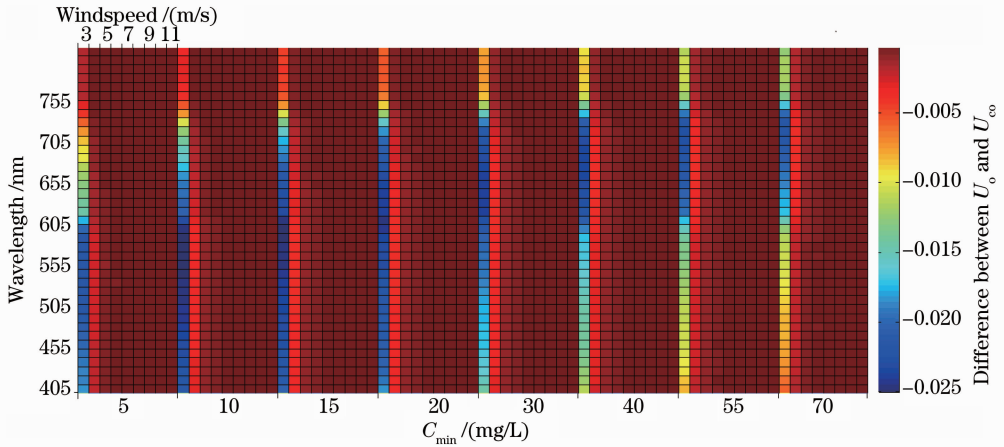


图 8 悬浮颗粒物垂直结构影响下 Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数计算的 U 差异
Fig. 8 Difference between weight function of Gordon and Zaneveld under the condition of suspended particle vertical distribution

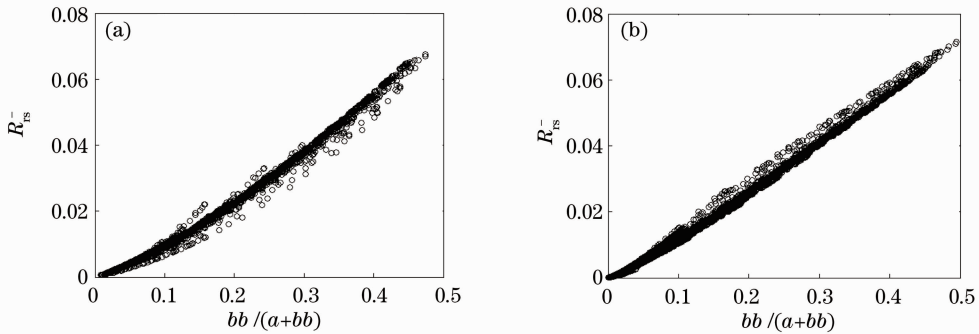


图 9 悬浮颗粒物垂直结构影响下 Gordon 权重函数(a)与 Zaneveld(b)权重函数计算的 U 与 R_{rs}^- 之间关系
Fig. 9 Relation between R_{rs}^- and U calculated by Gordon and Zaneveld weight function respectively under the condition of suspended particle vertical distribution

3. 4. 2 叶绿素垂直分布

在叶绿素垂直影响下,分别计算由 Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数得到 $b_b(\lambda)/[b_b(\lambda) + a(\lambda)]$ (记为 U_0 和 U_{∞})之间差异的百分比,结果如图 10 所示。与悬浮颗粒物相似,在浮游植物垂直均一或接近均一条件下,Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数计算得到的 U 之间几乎没有差异。但是在浮游植物垂直结构影响下,两种权重函数计算得到的结果之间的差异迅速增加;随着背景浮游植物的增加,两种权重函数计算得到的结果之间的差异显著增加,影响的波长范围也不断扩大。两种权重函数计算得到的 U 在光谱形状上也存在较大的差异,差异最显著的波段为浮游植物吸收波段 440 nm 和 675 nm 附近和藻蓝蛋白吸收波段 620 nm 附近。

图 11 分别为在浮游植物垂直结构影响下, U_0 和 U_{∞} 与水表面以下遥感反射率(R_{rs}^-)对应散点。由图可见,浮游植物垂直结构使得 U_0 和 U_{∞} 与水表面以下遥感反射率(R_{rs}^-)之间关系产生一定的偏移。这主要是由于浮游植物具有强吸收能力,自吸收效应较强,因此,随着浮游植物质量浓度的增加,自吸收效应越强, U 与 R_{rs}^- 之间的截距越大。这与 Gordon 方程中由多次散射引起的 R_{rs}^- 增量具有相反的效应。由 Gordon 权重函数计算得到 U_0 与 R_{rs}^- 之间的关系相对较差,除由浮游植物自吸收效应引起的截距变化外,其斜率(即 Gordon 方程中的参数 f)具有较大的变化。而由 Zaneveld 权重函数计算得到 U_0 与 R_{rs}^- 之间的关系相对较为稳定,其斜率几乎没有较大的变化。由此可见,Zaneveld 权重函数

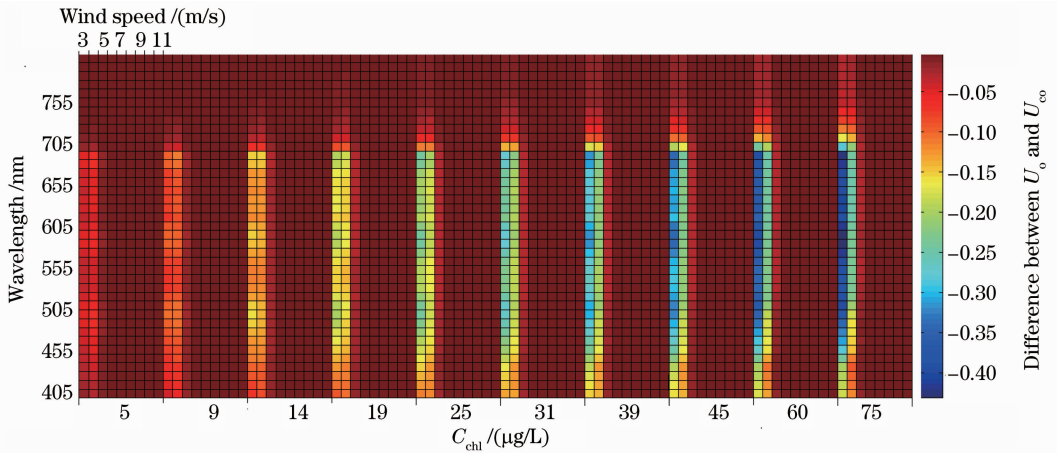


图 10 浮游植物垂直结构影响下 Gordon 权重函数与 Zaneveld 权重函数计算的 U 差异
 Fig. 10 Difference between Gordon and Zaneveld weight function under the condition of phytoplankton vertical distribution

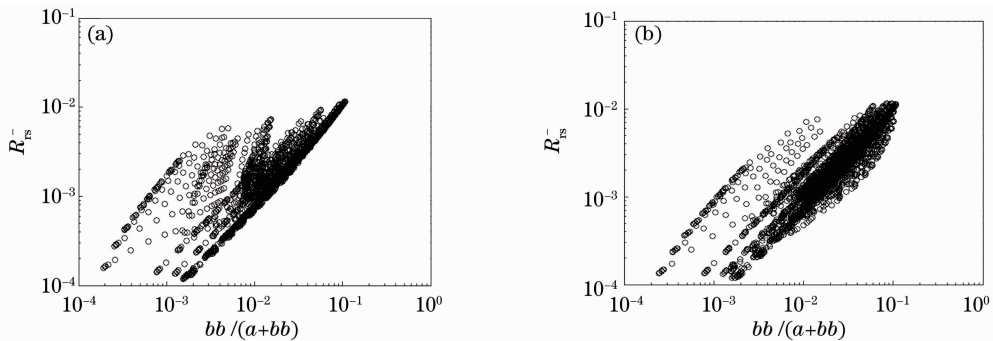


图 11 浮游植物垂直结构影响下 Gordon 权重函数(a)与 Zaneveld 权重函数(b)计算的 U 与 R_{rs}^- 之间关系
 Fig. 11 Relation between R_{rs}^- and U calculated by Gordon (a) and Zaneveld (b) weight function respectively under the condition of phtoplankton vertical distribution

水体光学均一处理效果要好于 Gordon 权重函数。

4 结 论

水动力对水色要素垂直分布具有决定性的作用,水动力引起的水色要素垂直分布条件下的遥感反射率与水色要素垂直均一分布条件下的遥感反射率具有显著的差异。通过水动力模型对水色要素垂直分布模式进行模拟,进而利用辐射传输模型模拟垂直分布结构下遥感反射率,确定动力条件下垂直分布结构对遥感反射率的影响,得到以下结论:

- 1) 受叶绿素垂直分布影响最大的 R_{rs} 波长范围为 500~600 nm,最小的波长范围为 400~450 nm 和 700~800 nm;随着叶绿素浓度的增加,叶绿素垂直分布对 400~725 nm 之间的 R_{rs} 影响逐渐减小,而对 725~800 nm 之间的 R_{rs} 影响逐渐增加;
- 2) 受悬浮颗粒物垂直分布影响最大的 R_{rs} 波长范围为 500~650 nm,随着悬浮颗粒物浓度的增加,

悬浮颗粒物垂直分布对 R_{rs} 的影响不断减小,同时受悬浮颗粒物垂直分布影响, R_{rs} 最大影响波长位置向长波方向移动(由 585 nm 逐渐增加到 685 nm);

- 3) 在水体组分层化较弱水体中,Zaneveld 权重函数光学均一处理效果与 Gordon 权重函数较为相似;在水体组分层化较为严重的水体中,对水体组分垂直分布进行光学均一化处理时,Zaneveld 权重函数光学均一处理效果要好于 Gordon 权重函数。

参 考 文 献

- 1 J. R. Zaneveld, A. Barnard, E. Boss. Theoretical derivation of the depth average of remotely sensed optical parameters[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(22): 9052~9061
- 2 V. I. Haltrin. Self-consistent approach to the solution of the light transfer problem for irradiances in marine waters with arbitrary turbidity, depth, and surface illumination; I: case of absorption and elastic scattering[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 3773~3784
- 3 P. Forget, P. Broche, J. J. Naudin. Reflectance sensitivity to solid suspended sediment stratification in coastal water and inversion; a case study[J]. *Remote Sensing of Environment*,

- 2001, **77**(1): 92~103
- 4 L. Nanu, C. Robertson. The effect of suspended sediment depth distribution on coastal water spectral reflectance: theoretical simulation[J]. *Int. J. Remote Sensing.*, 1993, **14**(2): 225~239
- 5 Cao Wenxi. Influence of vertical Chlorophyll structure on water-leaving radiance[J]. *Marine Sci. Bull.*, 2000, **19**(3): 30~37
曹文熙. 叶绿素垂直分布结构对离水辐亮度光谱特性的影响[J]. *海洋通报*, 2000, **19**(3): 30~37
- 6 H. R. Gordon, D. K. Clark. Remote sensing optical properties of a stratified ocean: an improved interpretation [J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(20): 3428~3430
- 7 J. Piskozub, T. Neumann, L. Woźniak L. Ocean color remote sensing: choosing the correct depth weighting function[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(9): 14683~14688
- 8 J. R. V. Zaneveld, S. W. Pegau. Robust underwater visibility parameter[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(23): 2997~3009
- 9 Qin Boqiang, Hu Weiping, Chen Weimin. Process and Mechanism of Environment Changes of the Taihu Lake [M]. Beijing: Science Press, 2004
秦伯强, 胡维平, 陈伟民等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2004
- 10 R. W. Bachmann, M. V. Hoyer, D. E. Canfield. The potential for wave disturbance in shallow Florida lakes[J]. *J. Lake and Reserv. Manage.*, 2000, **16**(4): 281~291
- 11 C. D. Mobley. Light and Water, Radiative Transfer in Natural Waters[M]. Elsevier Academic Press, 1994
- 12 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4. 1 Technical Documentation Sequoia Scientific. Wash. Inc, Redmond, 2010b, see : www.sequoiasci.com
- 13 C. D. Mobley, L. K. Sundman. Hydrolight 4. 1 Users' Guide Sequoia Scientific. Wash. Inc. Redmond, 2010a, see : www.sequoiasci.com
- 14 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Research of bio-optical model of microcystis aentginosa and scenedesmus obliquus[J]. *J. Lake Sci.*, 2010, **22**(3): 357~366
黄昌春, 李云梅, 王 桥等. 铜绿微囊藻和斜生栅藻生物光学模型研究[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(3): 357~366
- 15 Shi Kun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Study of scattering coefficients model in inland eutrophic lake [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2477~2485
施 坤, 李云梅, 王 桥等. 内陆湖泊富营养化水体散射系数模型研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2477~2485
- 16 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
- 17 C. D. Mobley. Phase function effects on oceanic light field[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(6): 1035~1050
- 18 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Wang Qiao *et al.*. Interaction of influencing factors to bidirectional and air-water interface parameter in turbid water body[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 625~632
黄昌春, 李云梅, 王 桥等. 水-气界面参数和二向性影响因素交互作用研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 625~632
- 19 Huang Chuangchun, Li Yunmei, Sun Deyong *et al.*. Analysis of Q value influencing factors and its parametrization [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2059~2066
黄昌春, 李云梅, 孙德勇等. Q值的影响因素分析及其参数化[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2059~2066
- 20 P. Nielsen. Suspended sediment concentrations under waves[J]. *Coastal Engineering*, 1986, **10**: 23~31
- 21 P. Nielsen. Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport[M]. New York: World Scientific Publish, 1992
- 22 Qian Ning, Wang Zhaohui. Sedimentation Hydrodynamic[M]. Beijing: Science Press, 1983. 240~244; 45~47; 316~326
钱 宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. 240~244; 45~47; 316~326
- 23 Zhang Jingshan, Lu Peidong. Research of hydrostatic setting of suspended matter in Taihu Lake [R]. Report of Nanjing Hydraulic Research Institute, 2002
张金善, 陆培东. 太湖泥沙静水沉降特性的初步实验研究[R]. 南京水利科学研究院报告, 2002
- 24 Chen Jian, Gao Guang, Li Yiping *et al.*. Hydrostatic setting of suspended matter of Taihu Lake[J]. *J. Lake Sci.*, 2006, **18**(5): 528~534
陈 鉴, 高 光, 李一平等. 太湖水体中悬浮物的静沉降特征[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 528~534
- 25 Luo Liancong, Qin Boqiang, Zhu Guangwei. Calculation of total and resuspendable sediment volume in lake Taihu [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, **35**(6): 491~496
罗激葱, 秦伯强, 朱广伟. 太湖底泥蓄积量和可悬浮量的计算[J]. *海洋与湖沼*, 2004, **35**(6): 491~496
- 26 Chen Jianhua. Vertical distribution of suspended sediment concentration-solving Fick's second theorem[J]. *Sichuan Water Conservancy*, 2005, **20**(2): 5~10
陈建华. 悬移质质量浓度垂线分布-求解费克第二定理[J]. *四川水利*, 2005, **20**(2): 5~10
- 27 Dou Guoren. Theory of Sedimentation Kinetic[M]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1963
窦国仁. 泥沙运动理论[M]. 南京: 南京水利科学研究所, 1963
- 28 P. L. Donaghay, T. R. Osboun. Toward a theory of biological-physical control of harmful algal bloom dynamics and impacts[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, **42**(5): 1283~1296
- 29 P. J. S. Franks. Models of harmful algal blooms[J]. *Limnol. Oceanogr.*, 1997, **42**(5): 1273~1282
- 30 G. A. Riley, H. Stommel, D. F. Bumpus. Quantitative Ecology of the Plankton of the Western North Atlantic [M]. Bull. Bingham Oceanogr. Coll. XII(3), 1949
- 31 J. L. Schnoor, D. M. Di Toro. Differential phytoplankton sinking and growth rates: an eigenvalue analysis [C]. *Ecol. modelling*, 1980, **9**: 233~245
- 32 S. Ghosal, M. Rogers, A. Wray. The turbulent life of phytoplankton [C]. Center for Turbulence Research, 2000, 31~45
- 33 Wang Lizhen. Study on the Effect of Water Components and Environment Factors on Remote Sensing Reflectance [D]. Nanjing: Nanjing Normal University Master Degree Thesis, 2009
王利珍. 基于辐射传输模拟的遥感反射率影响因素研究[D]. 南京: 南京师范大学硕士学位论文, 2009