

基于生物光学模型的二类水体光学活性物质估算：以晋江下游河段为例

李婉晖, 徐涵秋*
(福州大学环境与资源学院, 福州 350108)

摘要: 水体中各组分对光谱的吸收和散射构成了水体的固有光学特性, 是生物光学模型的重要参数, 是建立水质遥感半分析模型的基础. 目前该方法多应用于湖泊水质监测, 很少用于河流. 因此, 本研究以福建晋江下游河段为例, 探讨水面下反射率 $R(0^-)$ 与光学活性物质之间的关系, 并建立了光学活性物质的估算模型. 结果表明, 利用 $R(0^-)_{753}$ 与总悬浮物浓度、 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 与浮游植物色素浓度、 $R(0^-)_{670}/R(0^-)_{423}$ 与 CDOM 吸收系数分别建立的估算模型能取得理想的效果, 其决定系数分别是 0.953、0.820 5 和 0.621 3, 对应的相对误差分别是 6.1%、21.87% 和 22.18%. 三者中以悬浮物浓度的反演精度最高, 然后依次为浮游植物色素浓度和 CDOM. 主要原因在于浮游植物色素的浓度相对较低, 光谱信号较弱; CDOM 的特征光谱波段很窄, 而且该波段内的 $R(0^-)$ 受到其它 2 种物质存在的影响.

关键词: 光学活性物质; 吸收系数; 后向散射系数; 水面下反射率
中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)04-1008-08

Estimation of the Optically Active Substances in Case II Water of the Lower Jinjiang River Based on the Bio-optical Model

LI Wan-hui, XU Han-qi
(College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The water's Inherent Optical Properties (IOPs), including absorption and scattering coefficients of water components, are the essential parameters for bio-optical model and retrieval of water quality using the semi-analytical method. Nevertheless, the application of the bio-optical model in river water studies is still very rare. Therefore, taking the lower Jinjiang River of Fujian, SE China as an example, this study measured and calculated the bio-optical properties of river water and concentrations of optically active substances based on in situ water samples collected from river in 2007. It shows that $R(0^-)_{753}$, $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ and $R(0^-)_{670}/R(0^-)_{423}$ can be used to estimate total suspended solids (TSS) concentration, phytoplankton pigment (PP) concentration and the CDOM absorption at 440nm, respectively. The determination coefficients (R^2) of the retrieval model of TSS, PP and CDOM are 0.953, 0.820 5 and 0.621 3, respectively. The corresponding relative errors of the models (RE) are 6.1%, 21.87% and 22.18%. The results show that the model for estimating TSS can achieve the highest accuracy, the PP-estimating model has the second highest accuracy and the CDOM-estimating model has the lowest. The relatively lower concentration of phytoplankton pigments, narrow characterized spectral range of CDOM and influence of CDOM's $R(0^-)$ by TSS and PP within this spectral range contributed to their relatively lower accuracy.

Key words: optically active substances; absorption coefficient; backscattering coefficient; sub-surface irradiance reflectance

当前,我国流域水资源问题日益严峻,水资源总量匮乏和水质性缺水等问题普遍存在,水资源的短缺成为制约城市发展的一个因素.利用先进的科学手段获得水资源的信息,特别是水质分布特征,对于水资源管理的意义重大.长期以来,水质监测采用水质采样分析的方法,是一种典型的“以点代面”的监测方法,它用有限的监测点进行水质分析,得到的结果无法代表整个水体的水质分布特征,因此必须采用能全面、宏观地反映水质特征的监测方法.

遥感对地观测技术具有宏观、实时性强等特点,应用到水体的光学活性物质中具有不可替代的优势.水体中含有 4 种光学活性物质,即纯水、非色素颗粒物(或称为非藻类颗粒物)、浮游植物色素和有

色可溶性有机物等(coloured dissolved organic matter, CDOM)^[1].不同的水体由于光学活性物质的组成种类和浓度的差异,使水体表现出不同的水色,而具有不同的光谱反射特征.利用这个原理,水质遥感得到了日益广泛的应用.国内水质遥感研究经历了定性-半定量-定量的过程,虽然已经发展到量化的阶段,但是所建立的水质遥感模型目前仍然是以半经验模型为主,它通过同步的水质监测数据和卫星影像数据或者现场光谱数据建立基于统计关系的模

收稿日期: 2008-06-21; 修订日期: 2008-09-02
基金项目: 福建省重大专项前期研究项目(2005YZ1011)
作者简介: 李婉晖(1979~),女,博士研究生,主要研究方向为水质遥感, E-mail: huihuirabit@163.com
* 通讯联系人, E-mail: fdy@public.fz.fj.cn

型^[2~4]. 而从遥感的机制着手,对水中光学活性物质如何影响水下光场分布,如何影响水体遥感反射率的整个过程还未进行深入透彻的探究,其模型在时空上的应用范围仍受到较大的限制. 因此近年来水质遥感关注的焦点转向基于水体生物光学特性的生物光学模型上,它既能摆脱同步数据建模的客观限制,又可以提高模型的精度,使模型具有坚实的物理基础和更强的适用性^[5]. 但国内外在这方面的研究主要集中于湖泊和海洋,而针对河流的研究十分少见. 因此,本实验重点对河流水中的光学活性物质的光学特性进行分析,旨在揭示河流水体的生物光学模型特点,为生物光学模型在河流水体的应用提供有参考价值的案例研究. 本研究通过对福建晋江下游河段水体的吸收系数、散射系数等固有光学特性和光学活性物质浓度的测定,建立了该河段总悬浮物、浮游植物色素和 CDOM 的生物光学模型,以为晋江流域水资源保护提供科学依据.

晋江流域位于福建省东南沿海,是福建省的主要江河,流域面积5 629 km²,自西北流向东南,于丰泽浔浦处入海. 其下游流经福建省著名侨乡泉州、晋江和石狮,它们是福建省经济最发达的地区,也是全国经济最发达的地区之一. 因此,查明晋江流域的水质分布特征对于泉州地区的可持续发展意义重大.

1 材料与方法

本研究在 2007-10-23 在晋江下游河段的泉州鲤城区至泉州湾河口进行水样采集,共布设了 30 个采样点(见图 1). 所取水样的实验室分析测定项目包括:总悬浮物浓度、总色素浓度(包括叶绿素 a 和脱镁叶绿素总和)以及颗粒物吸收系数、CDOM 吸收系

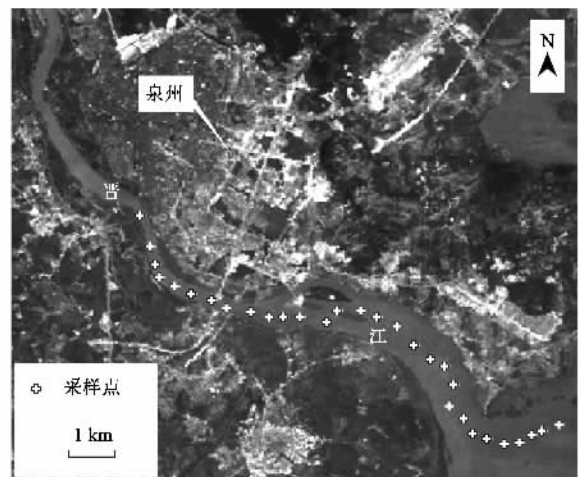


图 1 水质采样点分布
Fig. 1 Distribution of water sampling stations

数和扣除纯水后的散射系数等.

1.1 总悬浮物和色素浓度测定

总悬浮物浓度测定采用便携式悬浮物测定仪器 (Sentry M-2) 在采样点直接测定. 色素浓度(叶绿素 a 和脱镁叶绿素浓度之和)的测定采用分光光度法,用 GF/C 滤膜过滤水样,然后将滤膜置于冰箱中冷冻 48 h 以后取出,用 90% 的热乙醇萃取,最后在分光光度计上分别测定 665 nm、750 nm 处吸光度,并加入 1 滴 1% 的稀盐酸进行酸化,再分别测定 665 nm、750 nm 处吸光度,换算得到叶绿素 a (Chla) 和脱镁叶绿素 (Pa) 的浓度总和^[6].

1.2 固有光学特性测定

固有光学特性 (inherent optical properties) 是与水体组分有关,但又不随光照条件变化而变化的光学特性^[7],是水色遥感半分析模型方法中生物光学模型的重要参数,对它的研究可以更好地了解水下光场的分布,从而更为精确地对光学活性物质进行遥感反演. 表征水体固有光学特性的参数有光束衰减系数,吸收系数和散射系数,以及后向散射系数等.

颗粒物吸收系数采用 Mitchell^[8] 提出的定量滤膜技术,用直径 47 mm 的 GF/F 滤膜过滤 50 ~ 200 mL 的水样,在配有积分球的 Lambda 900 型分光光度计下测定滤膜上颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,然后通过计算获得吸收系数^[9]. CDOM 的光谱吸收系数测定首先通过 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤,然后经 0.22 μm 的 Millipore 膜过滤的水样在 Lambda 900 分光光度计下测定其光学密度,然后经换算并进行散射效应订正得到其吸收系数^[9]. 纯水吸收系数已经多人测定,随着波长的变化而变化,一般采用 Smith 等^[10] 测定的值.

根据 Lambert Beer 光吸收定律,水体总吸收系数 $a_t(\lambda)$ 为悬浮颗粒物(浮游植物色素和非色素颗粒物)、CDOM 和纯水吸收系数的线性加和.

$$a_t(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{CDOM}(\lambda) + a_p(\lambda) \quad (1)$$

式中, $a_p(\lambda)$ 、 $a_{CDOM}(\lambda)$ 、 $a_w(\lambda)$ 分别代表颗粒物、CDOM 和纯水吸收系数.

根据光的传输原理,吸收系数和散射系数之和为光束衰减系数,因此,散射系数可以用衰减系数与吸收系数的差值来表示. 其次,CDOM 的光学特性表现在对光的吸收,散射几乎可以忽略不计,因此颗粒物的散射系数 $b_p(\lambda)$ 可由式(2)获得^[11].

$$b_p(\lambda) = c_{t-w}(\lambda) - a_p(\lambda) - a_{CDOM}(\lambda) \quad (2)$$

式中, $c_{t-w}(\lambda)$ 是扣除纯水之外的光束衰减系数.

$c_{t-w}(\lambda)$ 的测定是首先用分光光度计直接测量原始水样的光学密度,以超纯水为空白参照样,如式(3)所示.

$$c_{t-w}(\lambda) = 2.303 D(\lambda)/r \quad (3)$$

式中, $D(\lambda)$ 是光学密度, r 是光程路径(m).

颗粒物后向散射系数 b_{bp} 与散射系数之间存在某种直接的关系,最常用的颗粒物的后向散射系数可用式(4)表示^[7].

$$b_{bp} = b_p \times \beta \quad (4)$$

式中, β 是比散射系数,与颗粒物粒径分布以及颗粒物中有机、无机成分的比例等有直接关系. 晋江属于典型的二类(case II)水体,根据水质分析结果看,水质较为浑浊. Petzold^[12]根据实验结果指出,针对浑浊的沿岸带和内陆水体推荐使用 $\beta = 0.019$,许多学者亦采用 0.019 计算并取得了较为合理的结果^[13,14],因此本研究采用 $\beta = 0.019$.

纯水的后向散射系数 $b_{bw}(\lambda)$ 如式(5)所示.

$$b_{bw}(\lambda) = 0.5b_w(\lambda) = 0.00144\left(\frac{\lambda}{500}\right)^{-4.32} \quad (5)$$

CDOM 对光只有吸收,没有散射,因此总后向散射系数 $b_{bt}(\lambda)$ 如式(6)所示.

$$b_{bt}(\lambda) = b_{bp}(\lambda) + b_{bw}(\lambda) \quad (6)$$

1.3 水面下反射率 $R(0^-)$ 的计算模型

水的表观光学特性(apparent optical properties)随着光照条件变化而变化,且与水体组分有关^[7],它是入射太阳光与水体固有光学特性相互作用的结果,对于特定的太阳光照条件,表观光学特性不仅可以通过现场的测量获得,还可以由固有光学特性计算得到. 水面下反射率 $R(0^-)$ (sub-surface irradiance reflectance,或译为水面下辐照度比)是与遥感反射率密切相关的一个表观光学量,二者都受到水中光学活性物质的影响,主要区别在于遥感反射率是在水面上所测到的反射率,它与水面下反射率 $R(0^-)$ 可通过公式进行换算^[14,15].

Kirk^[16]用蒙特-卡罗模型推导出 $R(0^-)$ 可用总后向散射系数和总吸收系数来表示.

$$R(0^-) = f \frac{b_{bt}(\lambda)}{a_t(\lambda) + b_{bt}(\lambda)} \quad (7)$$

其中:

$$f = 0.975 - 0.629\mu_0 \quad (8)$$

式中, μ_0 为水面下入射太阳光的折射角余弦值. 根据各采样点的具体时间和纬度以及当天赤纬即可计算出各采样点的太阳高度角,从而进一步算出 μ_0 .

1.4 数据统计分析

本研究对所取样本进行统计分析建立模型,用线性函数和非线性函数(幂函数、指数函数、多项式函数等)分别拟合水面下反射率 $R(0^-)$ 与光学活性物质之间的关系,选择决定系数 R^2 最大的函数来建立模型. 对统计分析方法做出的模型的精度采用相对误差 RE 和均方根误差 RMSE 这 2 个指标来判断,以作为模型评价的依据. 这 2 个指标的值越小,表明模型模拟精度越高. 相对误差 RE 的计算公式为:

$$RE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|c_{Est,i} - c_{Obs,i}|}{c_{Obs,i}} \right) \times 100 \quad (9)$$

均方根误差 RMSE 的计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (c_{Est,i} - c_{Obs,i})^2}{n}} / c_{ave} \quad (10)$$

式中, $c_{Est,i}$, $c_{Obs,i}$ 分别表示第 i 个点位的光学活性物质浓度的反演值和实测值, c_{ave} 表示所有样本点的均值, n 是样本总量.

2 结果与分析

2.1 吸收系数、散射系数与水面下反射率的变化趋势

从水体固有光学特性分析的结果看(见图 2),由于受悬浮物和 CDOM、浮游植物色素对光的吸收作用的影响,在 400 ~ 550 nm 之间的蓝-绿光波长部分的总吸收系数呈相对较大的下降趋势,之后变化逐渐趋缓. 从所采样点的水质分析结果来看,相比于湖泊、海湾之类的封闭式水体,晋江泉州段的浮游植物色素浓度不高. 从图 2(a)看,除了个别浮游植物色素浓度相对较高的样点以外,在 675 nm 附近总体上并未出现很明显的吸收特征. 到了 700 nm 之后由于纯水吸收明显增大,总吸收也随之比较明显的增强. 总后向散射系数基本上呈现随波长增大而逐渐降低的趋势,这与国内外同类研究的结果吻合^[13,14].

从公式(7)可以得知,水面下反射率 $R(0^-)$ 与水体的总吸收系数成反比关系,因此,由于光学活性物质在蓝光部分的吸收较强,导致 $R(0^-)$ 相对较小. 随着波长的增加, $R(0^-)$ 逐渐上升,到了绿光波长 580 nm 处出现 $R(0^-)$ 的峰值. 红光波段由于纯水的吸收, $R(0^-)$ 也相对较低. 总体来说绿光波段的水面下反射率较大,这与其他学者的研究结果一致^[9,10]. 对于浮游植物色素浓度较大的点位,在波长 680 nm 处, $R(0^-)$ 存在 1 个谷值,这主要是由于浮游植物色素在波长 680 nm 处的强烈吸收造成.

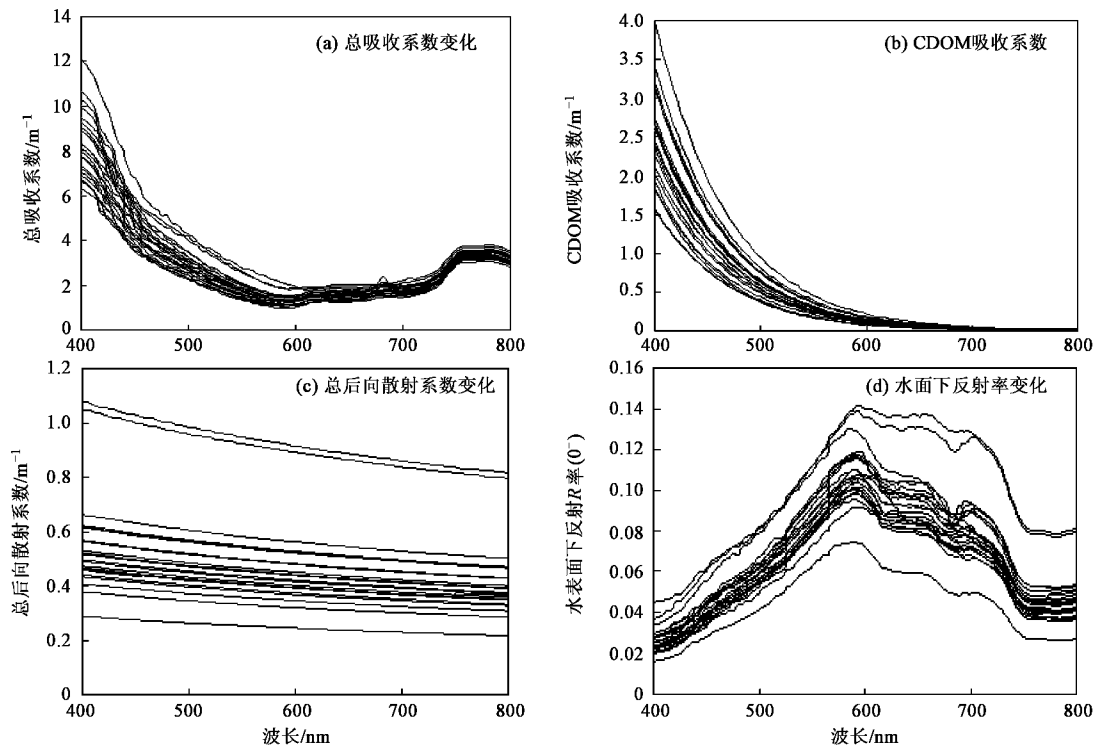


图 2 晋江水体光学特性

Fig. 2 Water optical properties of Jinjiang River

2.2 总悬浮物的反演

首先对波长 400 ~ 800 nm 之间的 $R(0^-)$ 与实测总悬浮物浓度(c_{TSS})求相关系数 r , 二者呈正相关关系. 其中, 400 ~ 580 nm 间的 r 值变化不大, 基本都在 0.6 ~ 0.7 之间; 580 nm 后的 r 值逐渐增大, 但在 670 nm 附近由于个别点位浮游植物色素的影响, 使得 r 值有所下降. 其中相关性最好的波长位于 753

nm 处. 因此, 随机选取了所有采样点中的 22 个点的 $R(0^-)_{753}$ 与悬浮物浓度作为建模数据, 剩余的点用以模型验证. 分别用线性、二次多项式、幂函数、指数函数、对数函数几种建立模型, 比较它们的决定系数 R^2 , 最后选择了 R^2 最大的幂函数对总悬浮物浓度进行反演(见表 1).

2.3 浮游植物色素的反演

表 1 各种类型函数反演光学活性物质模型

Table 1 Estimation models for each optically active substance

光学活性物质	函数类型	反演模型公式	决定系数 R^2
总悬浮物	线性函数	$c_{TSS} = 800.15x + 0.17$ ($p < 0.01$) [自变量 x 为 $R(0^-)_{753}$]	0.943 1
	二次多项式	$c_{TSS} = -2\,330.6x^2 + 1\,057.8x - 6.44$ ($p < 0.01$)	0.945 4
	幂函数	$c_{TSS} = 819.2x^{1.0067}$ ($p < 0.01$)	0.953 0
	指数函数	$c_{TSS} = 14.78e^{19.3x}$ ($p < 0.01$)	0.912 7
	对数函数	$c_{TSS} = 40.39\ln(x) + 162.46$ ($p < 0.01$)	0.922 6
浮游植物色素	线性函数	$c_{PP} = 88.42x - 79.53$ ($p < 0.01$) [自变量 x 为 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$]	0.790 3
	二次多项式	$c_{PP} = -179.29x^2 + 74.12x - 285.41$ ($p < 0.01$)	0.820 5
	幂函数	$c_{PP} = 6.6967x^{9.9008}$ ($p < 0.01$)	0.657 9
	指数函数	$c_{PP} = 0.0008e^{9.0157x}$ ($p < 0.01$)	0.623 4
	对数函数	$c_{PP} = 95.26\ln(x) + 9.02$ ($p < 0.01$)	0.802 7
$a_{CDOM}(440)$	线性函数	$a_{CDOM}(440) = 0.95x - 1.08$ ($p < 0.01$) [自变量 x 为 $R(0^-)_{670}/R(0^-)_{423}$]	0.583 8
	二次多项式	$a_{CDOM}(440) = 0.56x^2 - 1.98x + 2.68$ ($p < 0.01$)	0.621 3
	幂函数	$a_{CDOM}(440) = 0.28x^{1.6615}$ ($p < 0.01$)	0.565 7
	指数函数	$a_{CDOM}(440) = 0.24e^{0.66x}$ ($p < 0.01$)	0.582 7
	对数函数	$a_{CDOM}(440) = 2.37\ln(x) - 0.86$ ($p < 0.01$)	0.555 4

浮游植物色素的反演一般采用波段比值法能取得较好的效果,因为比值法可以避免因 f 值不同而对水面下反射率造成影响,从而消除客观环境条件不同给模型带来误差.浮游植物色素广泛存在于一类(case I)、二类(case II)水体中,一类水体中,非色素悬浮颗粒物和 CDOM 的浓度都很低,光学活性物质主要是浮游植物色素.由于浮游植物色素在 400 ~ 500 nm 的吸收较强,特别是在 440 nm 附近有 1 个吸收峰,致使此波长处的遥感反射率出现低谷,到了 550 nm 附近处浮游植物色素的吸收很小,因此会出现反射率的 1 个峰值^[17].有些研究采用 550 nm 和 440 nm 附近的反射率比值作为自变量建立反演模型^[18].相比之下,二类水体光学特性就要复杂得多,非色素悬浮颗粒物和 CDOM 的浓度远大于一类水体,二者在可见光的蓝-绿光波段也有较强的吸收,因此在这段波长内的吸收特征不能作为表征浮游植物色素的依据.但到了 650 nm 后,其它物质的吸收相对很小,浮游植物色素是水体吸收特征的主要影响因子.浮游植物色素浓度高的水体在波长 670 nm 左右处出现强烈吸收, $R(0^-)$ 出现谷值,而在波长 700 nm 左右由于浮游植物色素和水体的综合吸收较小, $R(0^-)$ 出现峰值.将峰值与谷值处的 $R(0^-)$ 建立比值关系就可很好地建立反演模型.由于不同水体浮游植物色素浓度的不同,具体出现峰谷的位置存在一定的差异.本研究将 660 ~ 710 nm 之间 $R(0^-)$ 的两两比值运算值与浮游植物色素进行相关分析,得知 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 的比值与浮游植物色素的相关性最高,其决定系数达到 0.790 3,因此选此比值关系和实测浮游植物色素浓度 (c_{PP}) 进行相关分析,同样用线性、二次多项式、幂函数、指数函数、对数函数来建立反演模型,比较它们的决定系数 R^2 ,选择 R^2 最大的二次多项式建立的模型反演浮游植物色素浓度(见表 1).

2.4 CDOM 的反演

有色可溶性有机物(CDOM)是由腐殖酸、富里酸、芳烃聚合物等溶解有机碳(DOC)组成,主要是土壤和水生植物降解的产物.对于内陆水体和沿岸带这样的二类水体,CDOM 主要以河流陆源排放为主. CDOM 的吸收在紫外光波段最强,延伸到可见光的蓝光部分后,与浮游植物色素和非色素悬浮颗粒物的吸收重叠,到了绿光波段后,吸收基本上就非常小了.因此对 CDOM 的反演难度相对较大,国内在这方面的研究不多.由于对 CDOM 浓度无法直接测定,一般用溶解性有机碳 DOC 来表示 CDOM 的含量,或者用 CDOM 在 440 nm 处的吸收系数[$a_{\text{CDOM}}(440)$]来间接地表示 CDOM 的含量^[19~21]. Bowers 等^[20] 在 Conwy 河口研究发现, $a_{\text{CDOM}}(440)$ 与 670 nm 处和 490 nm 处反射率的比值存在很好的线性相关关系. Pierson 等^[21] 则采用 > 600 nm 和 400 ~ 580 nm 波段组合找出最适合反演 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 的波段组合.本研究对 400 ~ 750 nm 波段的 $R(0^-)$ 进行波段比值组合,然后与 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 进行相关性分析,发现 $R(0^-)_{670}/R(0^-)_{423}$ 与 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 的相关性最好.同样分别用线性、二次多项式、幂函数、指数函数、对数函数进行反演,比较它们的决定系数 R^2 ,选择 R^2 最大的二次多项式函数建模(见表 1).

2.5 精度分析

为了检验上述 3 种物质反演模型的精度,用建模时随机抽取后剩余的 8 个点的各光学活性物质浓度的实测值与模拟值进行比较(图 3),并用 R^2 、RE 和 RMSE 这 3 个指标进行定量精度分析.相比而言,总悬浮物的检验点能更为集中地分布于斜率为 1 的直线两侧,且其 R^2 最大,RE 和 RMSE 最小,说明总悬浮物的模拟精度最高.相比基于实测光谱或卫星影像的经验-半经验模型方法^[3,4],本研究总悬浮物反演的精度有明显的上升.本研究的浮游植物色素

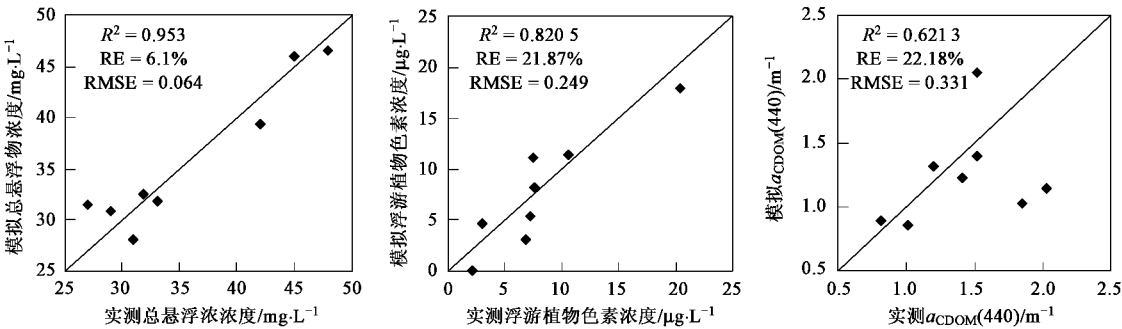


图 3 各光学活性物质浓度实测值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of estimated and measured concentration values of each optically active substances

和 CDOM 的反演精度虽然比总悬浮物较低,但是它们的 R^2 也分别达到了 0.820 5 和 0.621 3,说明二者的反演精度也是较高的,且各反演模型的显著性检验值都小于 0.01.

3 讨论

3.1 悬浮物最佳反演波段的选择

本研究的分析结果表明,近红外波长 753 nm 处的反射率最适合于反演所研究河段的悬浮物浓度,这一谱段的选择与以往有些学者的研究结果不太一致.如 Dekker 等^[7]对荷兰 Frisian 湖泊的研究结果认为,绿光、红光和近红外波段的反射率与悬浮物浓度都呈正相关关系,但是近红外波段对于悬浮物浓度变化的反应不够敏感,因此 Dekker 选取了绿光和红光波段 $R(0^-)$ 值用于反演悬浮物.另外, Binding 等^[14]对凯尔特海、爱尔兰海等海洋的研究也表明,对于悬浮物浓度在 50 mg/L 以下的水体,近红外波段不适宜用来反演悬浮物,所以他用的是红光 665 nm 处的 $R(0^-)$ 值.

造成本研究选取的波长与上述研究不同的原因主要在于所研究对象的不同. Dekker 和 Binding 的研究对象分别为湖泊和海洋,而本研究的对象是河流.由于河流处于流动过程中,自净能力比湖泊和海洋要强,因此湖泊和海洋中叶绿素(浮游植物色素)的浓度一般会高于河流.如 Binding 等^[14]研究的海洋叶绿素含量很高,达到了 2.01 mg/L,而总悬浮物平均浓度只有 6.51 mg/L,所以叶绿素的存在势必会降低悬浮物与近红外波段的相关性.因为水中叶绿素在 690 ~ 700 nm 处会出现明显的反射(荧光)峰^[22],其峰值会随着水中叶绿素含量的增加而加大,且向长波方向移动^[23,24].因此,当水中叶绿素的含量较高时就会对悬浮物在近红外波段处的反射率造成干扰,特别是当悬浮物浓度较低时,干扰更明显.而河流的情况却与湖泊和海洋不同.具体来说,晋江的总悬浮物平均浓度大大高于文献[14]所研究的海洋,而叶绿素含量却远远小于它的叶绿素浓度,所以不足以对悬浮物在近红外波段处的反射造成明显的干扰,不会明显降低悬浮物与近红外波段的相关关系.因此,晋江的悬浮物与近红外波段仍然表现出很强的相关性.本研究除了进行 $R(0^-)$ 与悬浮物浓度的相关分析外,还进行了同步采集的高光谱数据与悬浮物浓度的相关分析,结果表明在 736 nm 处二者的相关系数最高.这一最佳拟合波长与本文一样,也都位于近红外波段处.本项目组在福建闽江下

游的研究结果也表明,760 nm 处的反射率与悬浮物浓度有显著的相关性,近红外波长是悬浮物浓度的敏感波长.另外, Doxaran 等^[13]对法国 Gironde 河悬浮物光学特性的研究也同样得到了近红外波段的反射率与悬浮物浓度的相关性最强的结论,并用 SPOT XS3(近红外)波段建立了悬浮物浓度的反演模型.以上分析说明,对于河流这种以悬浮物为主的水体,其近红外波长处的反射率与悬浮物浓度可以达到很强的相关性,这一点明显有别于湖泊和海洋.

3.2 三模型精度差异的原因讨论

浮游植物色素和 CDOM 模型的反演精度相对总悬浮物低的主要原因将从以下 3 个方面进行探讨.

① 相对悬浮物和浮游植物色素而言,CDOM 的光谱信号较弱.因为悬浮物和浮游植物色素的光谱信号是吸收和散射的综合表现,而 CDOM 的光谱信号则只是吸收的表现,较弱的信号增加了反演的难度.

② 许多学者对 CDOM 光学特性研究结果表明,CDOM 对光的吸收随着波长增加呈现指数衰减的模式^[25~27],本研究实验结果也证实了这个特征[图 2(b)].由图 2(b)可知,CDOM 的吸收主要体现在对蓝光波段的吸收,CDOM 浓度越高,该波段范围内的吸收越强,因此一般选用蓝光波段的反射率建立反演模型.但悬浮物、色素颗粒物在蓝光波段内的吸收作用相对也较强,三者的吸收重叠.因此, $R(0^-)$ 在该波段内的变化并非由 CDOM 决定,而是三者共同作用的结果.这样,利用该波段范围的 $R(0^-)$ 反演 CDOM 的难度较大,建立的反演模型的精度也会相对较低.

③ 浮游植物色素的模拟精度低于悬浮物的原因主要是水体的类型不同.晋江属于二类水体,相对于湖泊来说更为开阔,水体流动性较好,而且本次水体取样时间在秋季,水温不高,这些因素都不利于浮游植物的生长繁殖.所以,浮游植物的浓度较低,反映在光谱上的信息较弱,给遥感反演增加了一定的难度.其次,本研究的实验数据(表 2)充分说明,水面下反射率 $R(0^-)$ 对悬浮物浓度变化的响应更为敏感,对浮游植物色素的响应则相对较弱,这也是浮游植物反演精度比悬浮物低的一个主要原因.表 2 比较了 5 个样点数据,反映了物质浓度变化时, $R(0^-)$ 变化的敏感差异程度.从表 2 可知,样点 1、2 的悬浮物浓度分别比样点 4、5 的悬浮物浓度大 1 倍,其 $R(0^-)$ 也分别比样点 4、5 大 0.73 倍和 0.78 倍.相对而言,浮游植物色素浓度变化时,其波谱特征的变化幅度却比较小,样点 2 色素浓度比样点 3、5 大 1

倍左右,但其 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 却只大了约 0.2 倍,样点 3 比样点 4 的色素浓度大了约 1 倍,但其 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 也只大了约 0.13 倍.由此表明,

$R(0^-)$ 对悬浮物浓度变化的响应显然比对色素变化的响应敏感,这种敏感度的差异就造成了二者之间反演精度的差异.

表 2 5 个样点的光学活性物质浓度与 $R(0^-)$ 的比较¹⁾

Table 2 Comparison of optically active substances concentration and $R(0^-)$ of five samples

样点	悬浮物浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	浮游植物色素/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	$R(0^-)$ 均值	$R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$
1	57	5.68	0.099	0.987
2	45	28.24	0.086	1.34
3	40	13.06	0.083	1.11
4	28	6.47	0.059	0.986
5	22	14.1	0.048	1.09

1)对于悬浮物,选择相关系数较大的波段 600~800 nm 为特征波段进行比较,对于浮游植物色素选择 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 进行比较

4 结论

(1)利用水面下反射率 $R(0^-)_{753}$ 与总悬浮物浓度、 $R(0^-)_{702}/R(0^-)_{680}$ 与浮游植物色素浓度、 $R(0^-)_{670}/R(0^-)_{423}$ 与 $a_{\text{CDOM}}(440)$ 分别建立的晋江下游河段的定量估算模型,具有较为理想的精度,其决定系数 R^2 分别达到了0.953 0、0.820 5和0.621 3.

(2)所获得的 3 个模型中以悬浮物浓度的反演精度最高,然后依次为浮游植物色素浓度和 CDOM 吸收系数.精度差异的主要原因在于浮游植物色素的浓度相对较低,CDOM 的光谱特征波段很窄,且在这个较窄的特征波段内还受到悬浮物和浮游植物色素的影响.显然,水质遥感反演模型的精度与水体中的光学活性物质的光学特征和浓度有很大的关系,光学特征越强,浓度越大,其模型的精度会越高.

(3)对于河流这种以悬浮物为主的水体,其近红外波长处的反射率与悬浮物浓度可以达到很强的相关性,这一点明显有别于湖泊和海洋.

参考文献:

[1] 张运林,秦伯强,杨龙元.太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J].生态学报,2006,26(12): 3969-3979.

[2] 李洪灵,张鹰,姜杰.基于遥感方法反演悬浮泥沙分布[J].水科学进展,2006,17(2):242-245.

[3] 许珺,方红亮,傅肃性,等.运用 SPOT 数据进行河流水体悬浮固体浓度的研究——以台湾淡水河为例[J].遥感技术与应用,1999,14(4):17-22.

[4] 王艳红,邓正栋,马荣华.基于实测光谱与 MODIS 数据的太湖悬浮物定量估测[J].环境科学学报,2007,27(3): 509-515.

[5] 杨一鹏,王桥,王文杰,等.水质遥感监测技术研究进展[J].地理与地球信息科学,2004,20(6): 6-12.

[6] 张运林,秦伯强,陈伟民,等.模拟水流条件下初级生产力及光动力学参数[J].生态学报,2004,24(8):1812-1819.

[7] Dekker A G, Vos R J, Peters S W M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT

sensor data [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (1): 15-35.

[8] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) [J]. Ocean Optical X, 1990, 1302: 137-148.

[9] 张运林,秦伯强,朱广伟,等.长江中下游浅水湖泊沉积物再悬浮对水下光场的影响研究[J].中国科学 D 辑 地球科学,2005,35(增刊): 101-110.

[10] Smith R C, Baker K S. Optical properties of the clearest natural waters (200-800 nm) [J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 177-184.

[11] 张运林,秦伯强.基于水体固有光学特性的太湖浮游植物色素的定量反演[J].环境科学,2006,27(12): 2439-2444.

[12] Petzold T J. Volume scattering functions for selected ocean waters [M]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography Ref, 1972. 72-78.

[13] Doxaran D, Froidefond J, Lavender S, et al. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 149-161.

[14] Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. Estimating suspended sediment concentrations from ocean colour measurements in moderately turbid waters: the impact of variable particle scattering properties [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(3): 373-383.

[15] 李云梅,黄家柱,陆皖宁,等.基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J].海洋与湖泊,2006,37(2): 171-177.

[16] Kirk J T O. Dependence of relationships between inherent and apparent optical properties of water on solar altitude [J]. Limnology and Oceanography, 1984, 29(2): 350-356.

[17] Dekker A G, Peters A W M. The use of thematic mapper for the analysis of eutrophic lakes: a case study in the Netherlands [J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(5): 799-821.

[18] Gin K Y, Koh S T, Lin I I, et al. Application of spectral signatures and colour ratios to estimate chlorophyll in Singapore's coastal waters [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2002, 55(5): 719-728.

[19] Arenz R F, Lewis W M, Saunders J F. Determination of chlorophyll and dissolved organic carbon from reflectance data for Colorado reservoirs [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17

(8): 1547-1566.

[20] Bowers D G, Evans D, Thomas D N. Interpreting the colour of an estuary [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, **59**(1): 13-20.

[21] Pierson D C, Strömbeck N. A modelling approach to evaluate preliminary remote sensing algorithms: use of water quality data from Swedish Great Lakes [J]. *Geophysica*, 2000, **36**(1-2): 177-202.

[22] Jensen J R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective [M]. Upper Saddle River, N J: Prentice Hall, 2000. 301-305.

[23] 陈楚群, 施平, 毛庆义. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究[J]. *环境遥感*, 1996, **11**(3): 168-176.

[24] 余丰宁, 李旭文, 蔡启铭, 等. 水体叶绿素含量的遥感定量模型[J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(3): 201-207.

[25] 沈红, 赵冬至, 付云娜, 等. 黄色物质光学特性及遥感研究进展[J]. *遥感学报*, 2006, **10**(6): 949-954.

[26] 张运林. 水体中有色可溶性有机物的研究进展[J]. *海洋湖沼通报*, 2006(3): 119-127.

[27] 韩宇超, 郭卫东, 程远月, 等. 海洋 CDOM 光吸收研究中若干问题的探讨[J]. *台湾海峡*, 2005, **24**(3): 289-298.