

基于高光谱数据的水体叶绿素 a 指数反演模型的建立

王金梁, 秦其明^{*}, 李 军, 林 丛, 徐若风, 高中灵

(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘 要: 水体叶绿素 a 含量是反映水体质量的重要指标之一, 利用遥感技术监测其含量具有众多优势。该研究利用 2012 年 7 月在广西壮族自治区桂林市漓江流域实地采集的水体高光谱数据和实验室化验分析数据, 借鉴陆表植被叶绿素 a 的遥感反演模型, 发展了一种新的水体叶绿素 a 提取指数 (water chlorophyll-a index, WCI)。通过与反射率敏感波段法、波段比值法和半分析方法对比分析发现, 新提出的 WCI 指数使用 650、685、696 nm 波段, 波段稳定, 决定系数 R^2 可达 0.58, 均方根误差最小为 0.24, 受水体悬浮物影响小, 在天津海河区域的验证效果也表明了该模型可以有效地提取水体叶绿素 a 含量。该方法扩展了水体叶绿素 a 监测的建模思路, 对水体叶绿素 a 监测建模有一定的指导作用。

关键词: 遥感; 光谱分析; 模型; 水体叶绿素 a; 高光谱; 漓江; 叶绿素 a 指数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.017

中图分类号: S127; TP79

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0128-07

王金梁, 秦其明, 李 军, 等. 基于高光谱数据的水体叶绿素 a 指数反演模型的建立[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 128—134.

Wang Jinliang, Qin Qiming, Li Jun, et al. Water chlorophyll-a retrieval index based on hyperspectral data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 128—134. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

叶绿素是藻类重要的组成成分之一, 其浓度高低是表征光能自养生物量的重要指标, 可用于估测浮游植物的生物量和生产力, 也是反映水体营养化程度的一个重要参数, 因此, 叶绿素 a (chlorophyll-a) 含量在一定程度上反映了水体质量的好坏。传统的水质监测方法可精确地测定出某一位置水质的各项指标, 但成本高、耗时长, 监测点范围有限, 无法反映水质指标在空间和时间上的分布状况^[1]。水质遥感监测是利用遥感技术, 研究水体表面反射光谱特征与水质指标含量之间的关系, 具有快速、大范围、低成本和周期性的特点, 在一定周期内可以有效地监测水质参数在空间和时间上的变化状况, 发现一些常规方法难以揭示的污染源和污染物迁移特征, 具有不可替代的优越性^[2]。

利用遥感技术估测水质参数的方法与遥感技术的发展紧密结合, 主要有经验半经验方法和物理机理模型方法。经验半经验模型是在水体要素光谱特征分析的基础上, 利用水体光谱的特征波段或不同波段组合与同步测量的水体要素间直接建立统计相关关系。物理模型方法通过水中辐射传输模型来确定水体各组分与水体反射率之间的关系, 然后利用建立的模型由水体反射率反向计算水体中各组分的含量^[3-5]。这些方法目前都已经被广泛使用, 在一定程度上均取得了较好的效果, 但是也存在一定缺陷。经验半经验方法算法简单, 便于操作和测试, 但建立的一些统计关系常不稳定, 可重复利用性差, 难以扩展应用和对比分析。物理模型方法的前提条件必须明确水体的表观光学特性和固有光学特性, 而内陆水体的光学特性复杂, 加上水体本身的反射率较小, 对水体表观光学特性参数的精确测量本身较为困难, 要建立完善的物理模型的难度较大, 且模型中大多数水体生物、物理、化学参量的反演一般都要引入经验关系, 使得假设条件简化后的物理模型反演精度无法保证^[6-9]。

针对水体叶绿素 a 的反演, 目前大多数研究是在水体的光谱特征进行敏感波段的选择后, 建立水体要素的反演模型, 或者通过水体辐射传输模型的分析建立较为复杂的水体参数反演模型, 缺少各种反演方法在同一地区的纵向对比分析, 同时由于叶

收稿日期: 2013-04-08 修订日期: 2013-12-31

基金项目: 国家十二五科技支撑计划课题 (2012BAC16B04, 2012BAH29B03); 国家自然科学基金项目 (41071221, 41101312); 国家自然科学基金重点项目 (41230747) 资助。

作者简介: 王金梁 (1987—), 河南南阳人, 博士生, 研究方向为定量遥感。北京 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 100871。

Email: findlay.wjl@gmail.com

※通信作者: 秦其明 (1955—), 江苏徐州人, 教授, 研究方向为空间信息智能理解。北京 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 100871。

Email: qmqinpk@163.com

绿素 a 吸收波段的相似性, 少有将陆地上植被和水体中叶绿素 a 反演研究相互借鉴的方法。本研究基于漓江流域实地采集的高光谱数据和实验室化验分析数据, 借鉴陆地植被叶绿素 a 的监测模型构建了水体叶绿素 a 的提取指数 (water chlorophyll index, WCI), 并利用波段反射率及其一阶导数法、波段比值法、半分析模型和水体叶绿素 a 的相关性进行了对比分析, 结果表明, 和其他叶绿素 a 提取方法相比, 新构建的 WCI 效果较好, 波段稳定, 实用性强, 可以为水体叶绿素 a 的提取提供一种有效方法。

1 研究区及数据获取

研究区位于广西壮族自治区东北部的漓江流域桂林段, 地理范围为 $109^{\circ}45' \sim 110^{\circ}40'E$ 和 $24^{\circ}18' \sim 25^{\circ}41'N$, 东西平均宽度约 34 km, 南北长度约 115 km, 总面积约 6 050 km²。其源头包括猫儿山、青狮潭、海洋山等 3 个水源林区, 流经兴安县、灵川县、桂林市、阳朔县、平乐县, 最后汇入桂江。桂林市区至阳朔段 84 km 水路就是漓江风景区, 其间有小东江、桃花江、宁远河、南溪河、相思江 5 条支流汇入, 整体属于珠江水系。漓江流域整体由北向南倾斜, 北部为中低山地貌和丘陵地貌, 中南部为盆地、平原碳酸盐岩溶地貌或河谷地貌, 属中亚热带湿润季风气候区, 全年光照充足, 四季分明, 年均降雨量可达 1 900 mm, 年蒸发量可达 1 857 mm, 有效保障了漓江的水源供应。

2012 年 7 月, 作者咨询了桂林市环保局的水质监测专家, 结合研究区和遥感技术的特点, 在漓江中游桂林市区及郊县附近选择了 3 个样区 (南洲大桥处、解放桥处、净瓶山大桥处), 在每个样区选择 4 个均匀分布的采样点, 采样点位置如图 1 所示。为了使采集的样本具有代表性, 在每个采样点处采集 5 条水体光谱曲线, 使用 5 条曲线的平均值作为该采样点的光谱曲线, 并记录该点地理坐标。水样的采集使用 1 000 mL 的棕色玻璃瓶并及时送往实验室化验, 样点叶绿素 a 的含量通过丙酮提取-分光光度计法在实验室分析得到 (参照《水与废水监测方法》^[10]), 悬浮物含量通过质量法获得, 即用 0.45 μm 滤膜过滤水样, 再经一定的温度和时间烘烤后获得。

水体采样点光谱数据的采集仪器为美国 ASD 公司的便携式分光辐射光谱仪 (FieldSpec Analytica Spectra Devices), 波长范围 325~1 075 nm, 采样间隔为 1.4 nm, 光谱分辨率 3 nm, 视场角 25°。在采样过程中, 采用 30% 标准板对采集到的光谱进行标定。测量光谱时天气晴朗, 水面平静, 水体光谱测量采用水表面以上测量法, 严格按照地物光谱反

射率测量规范, 使用国际水色 SIMBIOS 计划中推荐采用的观测几何, 如图 2 所示, 其中 $\Phi_v=135^{\circ}$, $\theta_i=40^{\circ}$ 。在该几何条件下进行观测可更好地避免太阳直射反射, 与剖面观测的固有差异较小^[11]。

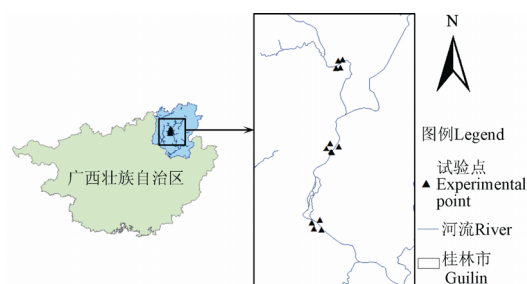
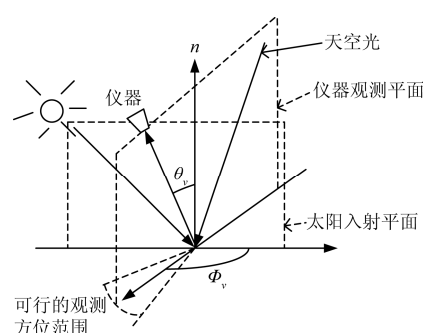


图 1 研究区位置及水体采样点示意图

Fig.1 Schematic of location of study area and water sampling points



注: 引自文献[11], n 为垂直观测面向天空的法向量, Φ_v 表示仪器观测平面与太阳入射平面的夹角, ($^{\circ}$), θ_i 为仪器与水面法线方向的夹角, ($^{\circ}$)。Note: Figure is according to citation [11]; n presents the vertical observation vector for the sky; Φ_v presents angle observation plane and plane of incidence of the sun; θ_i presents the angle between the instrument and the surface normal direction.

图 2 光谱仪水面以上观测几何

Fig.2 Above water observation geometry

通过光谱仪 (FieldSpec Analytica Spectra Devices) 测量的水体 DN (digital number) 值记为 S_{sw} , 天空光 DN 值记为 S_{sky} , ρ_p 为标准板的反射率, 使用 30% 标准板各波段的反射率为 0.30, S_p 为当时测量的标准板 DN 值, 水表反射率 r 在上述观测几何条件下, 平静水面的 r 取为 0.022^[11]。通过实地观测的 DN 值代入式 (1) 计算得到水体的反射率 R_{rs} ^[11]。

$$R_{rs} = (S_{sw} - r \cdot S_{sky}) \cdot \rho_p / \pi S_p \quad (1)$$

按照公式 (1) 计算得到水体的初始反射率光谱曲线, 并对原始采集的水体光谱数据使用 5 nm 宽的窗口进行平滑处理, 以消除光谱毛刺噪声的影响, 结果如图 3 所示。从整体来看, 光谱曲线差异较为明显, 部分光谱曲线受太阳反射的影响较大, 结合化验结果来看, 采集水样的悬浮物和叶绿素 a 含量总体都比较低, 叶绿素 a 质量浓度在 0.20~1.67 mg/m³ 内, 悬浮物质量浓度基本都在 10 mg/L 以内, 基本符合实地现场情况, 当地水质总体较好。

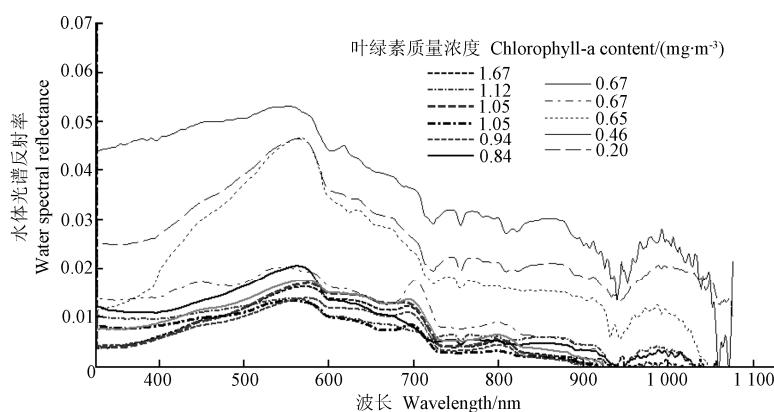


图3 采样点获取的不同叶绿素 a 含量下漓江实测光谱曲线
Fig.3 Measured spectral curve of the sampling point of different chlorophyll-a content

从图3不同叶绿素含量下的水体实测光谱曲线可以看出: 1) 在 325~400 nm 波段, 由于受仪器噪声的影响, 水体的光谱反射率波动较大。2) 在 400~550 nm 波段, 水体反射率逐渐增大, 该波段范围是叶绿素的吸收带, 但在光谱上体现不出明显的吸收谷。3) 由于受叶绿素、胡萝卜素弱吸收、细胞和总浮颗粒物的散射影响, 520~600 nm 波段范围是波谱的第一反射峰, 在 580 nm 左右峰值达到最大。4) 由于叶绿素 a 的荧光效应, 在 700 nm 左右形成第 2 个反射峰。5) 当波段大于 725 nm 时, 由于受到纯水吸收系数迅速增大的影响, 水体的光谱反射率迅速降低。综上可知, 内陆水体叶绿素 a 吸收波段通常位于 440 和 685 nm 附近, 440 nm 附近受非色素悬浮物和黄色物质的吸收作用影响较大, 而 685 nm 受其他水体要素的影响小, 所以反演水体叶绿素 a 含量时, 685 nm 附近的吸收谷和 700 nm 附近的反射峰, 以及各种演化的光谱特征最为常用^[4]。

2 水体叶绿素 a 提取指数 WCI 的构建

本研究借鉴陆地植被叶绿素监测指数 MTCI (Meris terrestrial chlorophyll index) 的构建思路, 扩展研究基于水体叶绿素 a 的监测指数 WCI (water chlorophyll-a index)。

2.1 MTCI 简介

MTCI 监测指数利用植被在 680~750 nm 上反射率的快速爬升, 也就是植被的“红边效应”构建波段差值的比值指数, 该指数计算简单, 与叶绿素 a 的相关性强, 从 2004 年开始成为欧空局 Envisat 卫星上 MERIS 传感器叶绿素产品的核心算法, 在植被叶绿素提取、NPP (net primary productivity) 估算等方面都具有广泛的应用^[12-15]。MTCI 的具体计算形式如下:

$$MTCI = (B1 - B2) / (B2 - B3) \quad (2)$$

式中: $B1$ 、 $B2$ 和 $B3$ 的中心波长分别为 754、709 和 680 nm。当叶绿素含量逐渐增加时, 709、680 nm 波段和 709、754 nm (对应 MERIS 传感器第 9、10 波段) 反射率的差值都逐步减小, 同时, 随着叶绿素含量的增加, 红边位置会向长波方向移动, 但随着叶绿素含量的不断增大, 在 680~710 nm 波长区间内, 随着波长的增加, 反射率差异的减小速率变大, 在 710~750 nm 波长区间, 反射率差异的减小速率变小, 前者波段区间的减小速率明显大于后者, MTCI 正是利用该波段区间上反射率变化速率的差异, 建立和植被冠层叶绿素含量的关系^[14]。

2.2 一种新的水体叶绿素 a 提取指数

本研究构建水体叶绿素 a 的监测指数 WCI 借鉴同样的形式和思路, $B3$ 波段选择水体叶绿素 a 的强吸收波段 685 nm, 很多研究公认该波段为叶绿素 a 的强吸收波段^[16-22], 在此基础上选择其余 2 个波段, 即 $WCI = (B1 - B2) / (B2 - R_{685})$, R_{685} 代表 685 nm 处的波段反射率。在 WCI 的构建过程中, 没有了植被光谱在近红外波段上的红边效应, 需重新确定 $B1$ 和 $B2$ 波段。

为了准确的选取 $B1$ 和 $B2$ 波段, 选择与 3 波段 (半分析) 法类似的迭代优选流程。按照 MTCI 的建模思路, $B1$ 和 $B2$ 选在和 $B3$ (685 nm) 吸收谷差异较大的波段, 针对水体而言, 可选在水体叶绿素 a 的反射峰上, 本次试验光谱反射率 2 个反射峰分别为 568 和 700 nm, 分别使 $B1$ 、 $B2$ 初始化在这 2 个反射峰上, 再优选另一波段, 考虑到该范围在 568 nm 水体光谱反射峰以外, 而且在整个 600~900 nm 范围内水体反射率都在逐渐下降 (除去在 728 nm 附近, 约 50 nm 宽的反射峰), 故 $B1$ 、 $B2$ 波段选择的范围为 600~900 nm, 其具体的优化流程见表 1。

表1 WCI 波段优化表
Table 1 WCI wavelength optimization table

波段 Wavelength/nm			决定系数 R^2 Coefficient of Determination
B1	B2	B3	
568	696	685	0.404
650	696	685	0.582
700	696	685	0.314
650	696	685	0.582
746	568	685	0.194
746	696	685	0.325
650	696	685	0.582
653	700	685	0.201
653	696	685	0.303
650	696	685	0.582

注：粗体倾斜的数字表示初始化固定的 $B1$ 、 $B2$ 波段

Note: Bold and oblique numbers represent the initialization fixed $B1$, $B2$ band.

表1为WCI中 $B1$ 、 $B2$ 波段的优化过程，首先确定 $B3$ 波段为685 nm，然后再分别确定 $B1$ 、 $B2$ 波段，分别初始化为水体的2个反射峰568和700 nm，按照构成模型和水体叶绿素a的相关关系迭代优化确定各个波段，粗体倾斜的数字表示初始化固定的 $B1$ 、 $B2$ 波段，共分4组，从表1的优化表中可以看出，每种初始化方法优化后确定的 $B1$ 、 $B2$ 波段都为650、696 nm，说明建立WCI的3个波段稳定，最终建立的WCI形式如下：

$$WCI = (R_{650} - R_{696}) / (R_{696} - R_{685}) \quad (3)$$

式中： R_i 代表中心波长为*i* nm处的波段反射率，WCI为新构建的水体叶绿素a含量反演指数。利用该指数，与实验室分析的叶绿素a含量使用最小二乘法构建线性模型，公式最终形式如下所示

$$Chl-a = 0.055WCI + 0.866 \quad (4)$$

式中：Chl-a代表水体叶绿素a含量，建立的一次线性关系决定系数 R^2 为0.58，均方根误差(root mean square error, RMSE)为0.24，线性关系显著，如图4所示。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{model} - y_{obs})^2}{n}} \quad (5)$$

式中： n 代表用于计算的采样点个数； y_{model} 代表使用模型计算的水体叶绿素a含量， mg/m^3 ； y_{obs} 代表实地化验的水体叶绿素a含量， mg/m^3 。

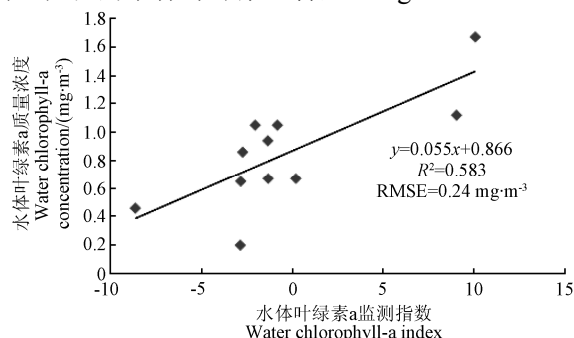


图4 WCI指数和水体叶绿素a含量相关关系

Fig.4 Relationship between WCI index and chlorophyll-a content

从选出的波段来看，696 nm波段位于水体光谱在700 nm附近的反射峰，685 nm位于水体光谱675 nm处的吸收谷上，新构建的WCI指数利用该波段范围内水体叶绿素a吸收系数的差异，并利用波段差的比值特征来代表水体叶绿素a的含量，选用3个波段类似半分析法，具有一定的物理意义。

3 模型间的验证及对比分析

为了验证新构建的WCI水体叶绿素a监测模型效果，我们将其和前人研究中常用的水体叶绿素a监测方法（水体光谱反射率法、一阶导数法、波段比值法和半分析法）进行对比分析，也同样建立和水体叶绿素a的一次线性相关关系，结果图5所示，模型和水体叶绿素a、悬浮物含量的决定系数 R^2 和均方根误差RMSE见表2。

从图5和表2中可以看出，新建的水体叶绿素a监测指数WCI模型效果最好，与水体叶绿素a的决定系数 R^2 达到0.582，RMSE为0.242，与悬浮物的决定系数 R^2 都在0.03以内，说明这些模型受水体悬浮物含量的影响小。反射率一阶导数法在本次的试验数据中与叶绿素a的决定系数 R^2 大于WCI，但在第4部分模型的验证中，882 nm波段的一阶导数和水体叶绿素a的决定系数仅为0.38，说明波段一阶导数最优波段不稳定，同时从理论上来说，882 nm波段受纯水吸收系数迅速增大的影响，水体的光谱反射率迅速降低，光谱一阶导数容易受水体其他物质的影响，故在此认为新构建的WCI指数的效果最优。

1) 使用水体反射率法、一阶导数法、波段比值法等反演水体叶绿素a含量，由于直接选择固定波段上的水体光谱反射率，虽然光滑后的水体光谱在一定程度上能够降低波段的噪声，但选择波段时容易出现偏差，光谱位置不够稳定，并且各条光谱曲线的吸收谷和反射峰具体位置有所偏差，不适宜实测光谱数据反演；同时值得注意的是很多研究中光谱的一阶导数反演效果要优于光谱本身，说明水体光谱的变化信息比水体光谱本身更能反应出水体叶绿素a的信息。

2) 半分析法从水体的光学特性出发，构建的模型具有一定的物理基础，但在进行半分析模型中3波段的选择时，受光谱波段噪声和水体中其他物质的影响，会出现被优化波段不稳定的情况，造成3波段优选出的波段位置可能并不严格符合半分析模型的物理机理。

3) 和其他方法相比，新构建的WCI指数效果较好，能够在悬浮物等其他物质含量较少的情况下

准确反演水体中叶绿素 a 含量。WCI 由陆地植被叶绿素 a 监测模型 MTCI 改造而来,选用的 3 个波段在一定程度上代表了在 685 nm 吸收谷的强烈程度,并利用波段差值的比值增大了叶绿素 a 吸收和反射的差异。在模型构建过程中,由于没有了陆地植被光谱上明显的红边效应,主要利用水体叶绿素 a 在 685 nm 左右吸收峰基本保持不变这一特性。从对比的结果来看,构建的新指数和水体叶绿素 a 的相关性高,波段较为稳定,受水体悬浮物含量的影响较小,并且计算简单,易于操作和使用。

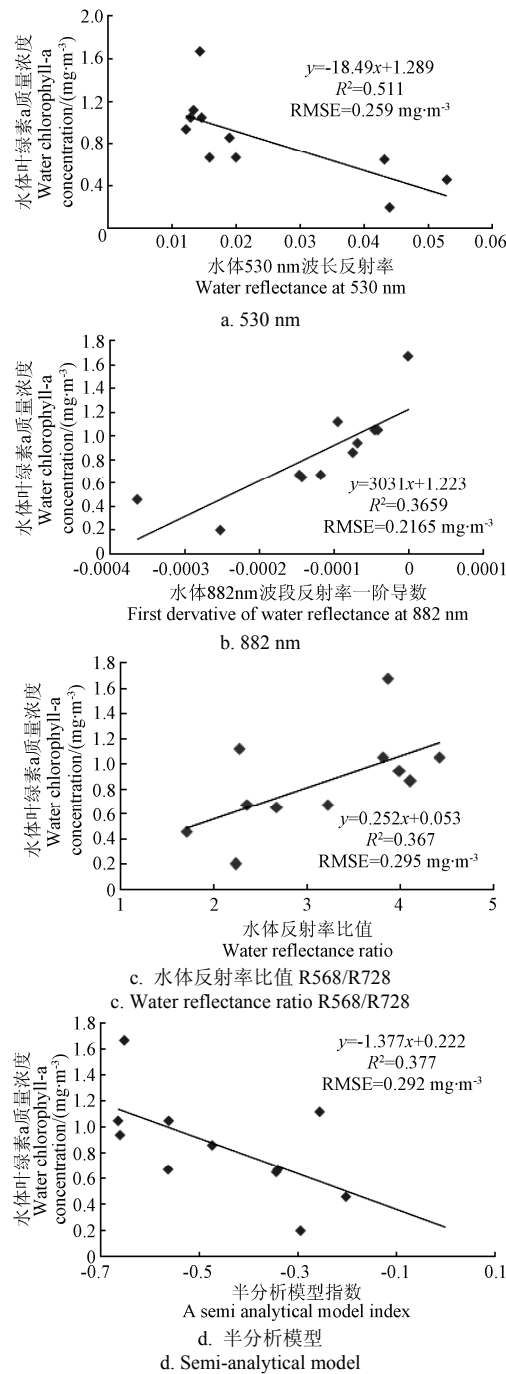


图 5 不同模型和叶绿素 a 含量关系
Fig.5 Relationship between WCI and water chlorophyll-a content using different models

表 2 模型对比分析表
Table 2 Model comparison table

使用的方法 Method	波段 Band/nm	决定系数 Coefficient of determination	均方根误差 Root mean square error	与悬浮物的决定系数 Coefficient of determination with suspended
光谱反射率法 Water reflectance	R530	0.511	0.259	0.018
反射率一阶导数法 Water first-order derivative reflectance	R882	0.659	0.216	0.02
反射率比值法 Bands ratio	R568/R728	0.367	0.295	0.001
半分析法 Semi-analytical model	(1/R666-1/R730)-R752	0.377	0.292	0.055
WCI Water chlorophyll-a index	(R650-R696)/(R696-R685)	0.582	0.242	0.001

4) 模型的验证

针对 WCI 模型,作者 2013 年 9 月 10 日、11 日在天津市区内收集了海河的水体光谱,并对水体进行了采样化验,共采集了 10 个样点,采集区域分别位于市区的海津大桥、光华桥、保定桥、永乐桥以及塘沽外滩等地,数据的采集及化验方法与模型建立时相同,WCI 和化验得到的水体叶绿素 a 含量相关关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出新构建的 WCI 指数效果很好,决定系数 R^2 达到了 0.77,均方根误差 RMSE 为 24.4,在海河附近采集的水样叶绿素 a 含量比漓江大很多,但构建的 WCI 模型依然取得了很好的效果,说明构建的 WCI 指数稳定性好。

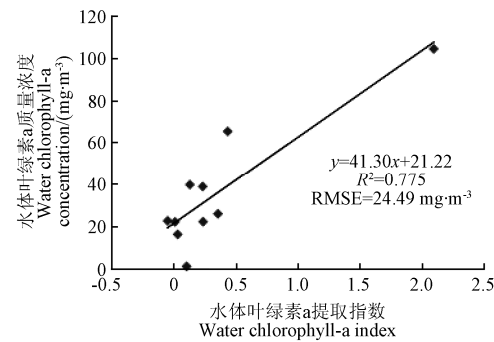


图 6 WCI 模型在海河水体叶绿素 a 监测中的应用验证
Fig.6 Validation of WCI model in Haihe River water chlorophyll-a monitoring

4 结论与讨论

本文在分析漓江水体光谱特征的基础上,通过对采集的水体高光谱数据与叶绿素 a 含量进行定量分析,从陆地植被叶绿素 a 监测模型 MTCI 出发,

扩展应用建立了水体的叶绿素 a 反演指数 WCI。并将该方法与光谱反射率法、一阶导数法、波段比值法和半分析法进行对比分析, 验证结果表明, 新构建的 WCI 监测指数效果最好, 与水体叶绿素 a 含量的相关关系高, 验证模型的决定系数达到 0.77, 受水体悬浮物含量的影响小。

但是, 内陆河流等 II 类水体是受人类活动影响最强烈的水域, 光学特性复杂多变, 水体光谱受浮游植物、悬浮物质、有色可溶性有机溶质等的复杂交互作用, 限制了利用遥感技术反演水质参数的精度。由于本次采集的水体光谱有限, 新构建的水体叶绿素 a 反演指数 WCI 还需要更多的验证: 1) 漓江水体的叶绿素 a 含量较其他河流、湖泊水体普遍偏低(漓江采样水体的叶绿素 a 含量最大值仅为 1.87 mg/m^3), 虽然模型验证时使用了较高的叶绿素 a 含量, 但仍需扩大水体采样点的数据量和采样范围, 利用更多水体样本验证模型; 2) WCI 指数仍属于经验方法, 得到的估测模型可能仅适用于当时的条件, 对不同水体而言模型是否具有时间和空间上的通用性, 需要在今后的工作中开展进一步应用验证。

参 考 文 献

- [1] 张渊智, 聂跃平, 蔺启忠, 等. 表面水质遥感监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(4): 214—219.
Zhang Yuanzhi, Nie Yueping, Lin Qizhong, et al. Surface water quality monitoring using remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(4): 214—219. (in Chinese with English abstract)
- [2] 尹改, 王桥, 郑丙辉, 等. 国家环保总局对中国资源卫星的需求与分析(上)[J]. 中国航天, 1999(9): 3—7.
Yin Gai, Wang Qiao, Zheng Binghui, et al. Demand and analysis of China resources satellite of the state environmental protection administration[J]. China Aerospace, 1999(9): 3—7. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张兵, 李俊生, 王桥, 等. 内陆水体高光谱遥感[M]. 科学出版社, 2012.
- [4] 杨一鹏, 王桥, 肖青, 等. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量遥感反演方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2): 5—8.
Yang Yipeng, Wang Qiao, Xiao Qing, et al. Quantitative remote sensing inversion methods of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake based on TM data[J]. Geography and Geo-Information Science, 2006, 22(2): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [5] Kevin George Ruddick, Herman J Gons, Rijkeboer M, et al. Optical remote sensing of chlorophyll a in case water by use of an adaptive two-band algorithm with optimal error properties[J]. Applied Optics, 2001, 40(21): 3575—3585.
- [6] Koponen S, Ullinen J. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data[J]. Remote sensing of Environment, 2002, 79(1): 51—59.
- [7] 疏小舟, 汪骏发, 沈鸣明, 等. 航空成像光谱水质遥感研究[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(4): 273—276.
Shu Xiaozhou, Wang Junfa, Shen Mingming, et al. Remote sensing of water quality monitoring using an airborne imaging spectrometer[J]. J Infrared Millim Waves, 2000, 19(4): 273—276. (in Chinese with English abstract)
- [8] 段洪涛, 张柏, 刘殿伟, 等. 查干湖水体光谱荧光峰特征与叶绿素 a 响应关系研究[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(5): 355—359.
Duan Hongtao, Zhang Bo, Liu Dianwei, et al. Relationship between fluorescence peak spectral features and chlorophyll-a lake Chagan[J]. J Infrared Millim Waves, 2006, 25(5): 355—359. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐京萍, 张柏, 宋开山, 等. 基于半分析模型的新庙泡叶绿素 a 浓度反演研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(3): 197—201.
Xu Jingping, Zhang Bo, Song Kaishan, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in lake Xinmiao based on a semi-analytical model[J]. 2008, 27(3): 197—201. (in Chinese with English abstract)
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第四版[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [11] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I—水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37—44.
Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I: Above water method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37—44. (in Chinese with English abstract)
- [12] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(12): 5003—5013.
- [13] 董恒, 孟庆野, 王金梁, 等. 一种改进的叶绿素提取植被指数[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(8): 336—341.
Dong Heng, Meng Qingye, Wang Jinliang, et al. A modified vegetation index for crop canopy chlorophyll content retrieval[J]. J Infrared Millim Waves, 2012, 31(8): 336—341. (in Chinese with English abstract)
- [14] Harris A, Dash J. The potential of the MERIS terrestrial chlorophyll index for carbon flux estimation[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8): 1856—1862.
- [15] Clevers J G P W, Anatoly A Gitelson. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edge bands on Sentinel-2 and-3[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23(8): 344—351.
- [16] 李素菊, 王学军. 内陆水体水质参数光谱特征与定量遥感[J]. 地理学与国土研究, 2002, 18(2): 26—30.
Li Suju, Wang Xuejun. The spectral features analysis and quantitative remote sensing advances of inland water quality parameters[J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(2): 26—30. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王婷, 刘良云, 李存军, 等. 基于实测光谱估测密云水库水体叶绿素 a 浓度[J]. 地理空间信息, 2007, 5(4): 64—66.
Wang Ting, Liu Liangyun, Li Cunjun, et al. Chlorophyll-a concentration estimation with field spectra of water in miyun reservoir[J]. Geospatial information, 2007, 5(4): 64—66. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨硕, 王世新, 周艺, 等. 叶绿素反演三波段模型的多时相应用[J]. 遥感应用, 2010, 5: 98—104.
Yang Shuo, Wang Shixin, Zhou Yi, et al. Multi temporal applications of chlorophyll-a estimation using three band model[J]. The Application of Remote Sensing, 2010, 5: 98—104. (in Chinese with English abstract)
- [19] Anatoly A Gitelson, Giorgio Dall'Olmo, Wesley Moses, et al. A simple semi-analytical model for remote estimation

- of chlorophyll-a in turbid waters: Validation[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(9): 3582—3593.
- [20] Anatoly A Gitelson, Yuri Gritz, Mark N Merzlyak. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271—282
- [21] 李云亮, 张运林, 李俊生, 等. 不同方法估算太湖叶绿素 a 浓度对比研究[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 680—686.
Li Yunliang, Zhang Yunlin, Li Junsheng, et al. Comparison of chlorophyll-a concentration estimation in Taihu Lake using different methods[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 680—686. (in Chinese with English abstract)
- 杨婷, 张慧, 王桥, 等. 基于 HJ-1A 卫星超光谱数据的太湖叶绿素 a 浓度及悬浮物浓度反演[J]. *环境科学*, 2011, 32(11): 3207—3214.
Yang Ting, Zhang Hui, Wang Qiao, et al. Retrieving for chlorophyll-a concentration and suspended substance concentration based on HJ-1A HIS image[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(11): 3207—3214. (in Chinese with English abstract)

Water chlorophyll-a retrieval index based on hyperspectral data

Wang Jinliang, Qin Qiming^{*}, Li Jun, Lin Cong, Xu Ruofeng, Gao Zhongling

(*Institutes of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Water chlorophyll-a is one of the most important indices for water quality monitoring. Remote sensing technology has strong advantages in monitoring both water and vegetation chlorophyll-a concentrations. Most of the current study on water chlorophyll-a monitoring chose the sensitive band based on the water chlorophyll-a spectral characteristics, and then established the inversion model. Some researchers established the water parameters inversion model based on an analytical physical mechanism, which are more complex and difficult to use in practice. And we also noticed that a vertical comparative analysis was needed for all these different inversion methods in the same area, and a few researchers used the water chlorophyll-a absorption similarity with leaf to build the water chlorophyll-a retrieval model. In this paper, a new water chlorophyll-a retrieval index WCI (Water Chlorophyll-a Index) was built from the land surface vegetation chlorophyll retrieval index MTCI (MERIS terrestrial chlorophyll index), based on the in-situ water hyperspectral data and water chlorophyll-a content results in the laboratory in July 2012 in the Lijiang River, Guangxi Zhuang Autonomous Region. The MTCI was based on the fast climbing vegetation reflectance in 680-750 nm also called the “red edge.” The MTCI was easy to calculate, and had a strong correlation with leaf chlorophyll-a content. From the beginning of 2004, the MTCI has become the core algorithm of the land chlorophyll-a product on ESA Envisat satellite’s MERIS sensor. This index is now widely used in land leaf chlorophyll-a retrieval and net primary productivity (NPP) estimation. The WCI index also uses the different ratio of characteristic bands to represent the water chlorophyll-a content. The WCI index uses hyperspectral water reflectance at 650, 685, and 696 nm. We used the traditional method at the same location to verify all these models’ effect. The traditional methods consist of the reflectance model, reflectance ratio model, and the semi-analytical model (three bands model). The three traditional methods directly selected the water spectral reflectance at certain bands. Spectral smoothing can reduce the band noise at certain extent, but is easy to select the wrong band for the measured hyperspectral data because the absorption and reflection peak of water spectrum has big differences in different water spectrum curves. Our research also noticed that the change information of water spectrum was more useful compared with the water spectrum itself. Our results indicated that the new WCI index showed the best coefficient of determination 0.58 and the least RMSE 0.24 compared with the reflectance model, reflectance ratio model, and semi-analytical model. The test results also showed that the WCI model can retrieve the water chlorophyll-a content effectively at Tianjin City Haihe River. This method extended the idea of water chlorophyll-a content modeling from the view of the terrestrial vegetation chlorophyll-a monitoring, and has certain instructive effect on water chlorophyll-a content monitoring. More situ data of different water bodies is needed to verify the new model’s robustness and effectiveness.

Key words: spectrum analysis; remote sensing; models; water chlorophyll-a; hyperspectral data; Lijiang River; water chlorophyll-a index

(责任编辑: 刘丽英)