

近红外波段二类水体悬浮物生物光学反演模型研究

徐京萍^{1,2}, 张 柏¹, 宋开山¹, 王宗明¹, 段洪涛^{1,2}, 陈 铭^{1,2}, 杨 飞^{1,2}, 李凤秀^{1,2}

1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130012

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 通过野外高光谱仪对二类混浊水体进行光谱测量, 分析了 400~1 200 nm 范围内的水体光谱特性。显示高浓度悬浮物含量对水体总的反射率贡献较大, 在近红外波段处的 808 和 1 067 nm 存在较为明显的悬浮物反射峰。基于对水体固有光学特性参数在近红外波段范围内的简化条件, 建立了反演悬浮物浓度的生物光学模型经验公式, 并通过与线性和指数反演公式的对比, 进行了模型反演精度评价。分析结果表明, 基于近红外波段的生物光学模型反演精度较高, 可有效地提取二类混浊水体的悬浮物浓度信息。

关键词 遥感; 二类水体; 悬浮物浓度; 生物光学模型; 近红外波段

中图分类号: X87 **文献标识码**: A **DOI**: 10. 3964/j. issn. 1000-0593(2008)10-2273-05

引 言

遥感技术作为一种水环境调查和监测手段, 具有监测范围广、速度快、成本低和便于进行长期动态监测等优势, 日益受到人们的重视^[1]。通常利用遥感传感器记录的辐射值或光谱反射率估测水质参数有三种方法, 即经验方法、分析方法和半分析方法。经验方法应用简便, 但模型具有很强的区域性, 通用性较差。分析方法虽然具有较好的物理意义, 但目前其理论基础研究还不完善。随着海洋和湖泊野外光学仪器的发展, 半分析方法被越来越多的应用。其中较为著名的是 Gordon 于 1975 年提出的水体生物光学模型^[2], 它以水色传输机理为基础, 将水体表现光学特性和固有光学特性有机地结合在一起, 并能够通过独立于遥感影像的野外数据进行校正, 降低了对地面实测数据的依赖度, 因此适合于水质遥感监测^[3]。虽然生物光学模型最初起源于一类水体的海洋遥感应用, 但也有不少学者将其成功地应用于二类水体^[4-6]。

然而当前对于这类半分析方法所依赖的二类水体表现光学特性的测量计算方法还不成熟, 数据质量难以保证, 并且缺乏包含各类特征水体的相关数据, 在一定程度上限制了这一方法的广泛应用。此外, 由于天然水体对近红外波段的吸收明显高于对可见光波段的吸收, 几乎吸收了全部的能量^[7], 因此大多数的研究工作主要集中于可见光范围内。而对于特定水体, 尤其是高浑浊度水体而言, 则不尽然。针对研究区水体的特点, 本文将光谱分析范围延伸到 1 200 nm,

在该范围内的近红外波段处研究水体悬浮物(total suspended matter, TSM)的光谱特性, 并借助对纯水和各水色物质吸收、散射特性的简化处理, 通过回归分析得到各经验参数, 建立反演悬浮物浓度的生物光学模型, 以降低由于水体表现光学特性数据测量计算不精确所带来的模型精度不高的影响。

1 研究方法

本研究选定吉林省长春市石头口门水库为研究对象。石头口门水库坐落于饮马河中游, 为长春市的重要水源地。该水库地处北温带大陆半湿润季风性气候区, 面积约 73 km², 总库容 7.02 亿 m³, 控制流域面积为 4 975.6 km³。总体而言, 石头口门水库水质情况较好, 适宜做城市饮用水源, 但水库上游严重的水体流失使得水体悬浮泥沙含量偏高。

1.1 野外光谱测量及相关数据获取

分别于 2006 年 8 月 17 日、9 月 12 日和 10 月 13 日对石头口门水库代表点位进行水体光谱实地测量, 同步测量水体透明度和采集水样。光谱测量时间在 10:00~14:00, 天空基本晴朗无风。所用仪器为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec FSR VNIR 野外光谱仪, 可在 350~2 500 nm 波长范围内进行连续测量, 采谱间隔 1 nm, 分辨率在 350~1 000 nm 间为 3 nm, 在 1 000~2 500 nm 间为 10 nm, 视场角 25°。仪器操作严格按照说明书进行, 并采用具有一定观测角度进行测量^[8]。水质参数悬浮物浓度的测定是在野外采样后, 立即返

收稿日期: 2007-10-06, 修订日期: 2008-01-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-356)和吉林省与中国科学院科技合作资金项目资助

作者简介: 徐京萍, 1982 年生, 中国科学院东北地理与农业生态研究所在读博士 e-mail: xjingping@gmail.com

回实验室对水样用 0.45 μm 的 Whatman GF/C 滤纸过滤, 采用电子天平称重法完成。同时利用分光光度计法测量水体叶绿素含量。本次研究共计 58 个采样点, 其中随机选取 39 个采样点数据用来建模, 剩下 19 个采样点数据用以模型验证。

1.2 水体生物光学模型

对于均质水体, 遥感反射率 R_{rs} 可由描述水体的固有光学特性参数来反映, 即总吸收系数 a 和总后向散射系数 b_b

$$R_{rs} = \frac{f}{Q} \frac{b_b(\lambda)}{[a(\lambda) + b_b(\lambda)]} \quad (1)$$

其中, λ 为波长, f 为受太阳高度角和水体散射影响的参数, Q 为光场分布参数, 用以描述水下光场的异质性, 其取值在 1.7~7 之间^[9]。Morel 等^[10]指出对同一水体, f 和 Q 在同样的光照条件下具有协同变化的效应, 因此对于它们的比值, 可忽略太阳高度角等因素的影响, 将其视为定值。

水体总吸收主要受纯水 (a_w)、叶绿素 a ($a_{chl a}$)、悬浮物 (a_{tsm})、有色溶解性有机物质 (a_{cdom}) 的影响, 因此

$$a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_{chl a}(\lambda) + a_{tsm}(\lambda) + a_{cdom}(\lambda) \quad (2)$$

由于叶绿素 a 和有色溶解有机物的后向散射非常弱, 可忽略, b_b 可表示为

$$b_b = b_{b,w} + b_{b,tsm} \quad (3)$$

其中, $b_{b,w}$ 和 $b_{b,tsm}$ 分别为纯水和悬浮物的后向散射系数。各物质的吸收、后向散射系数均可分别写成比吸收系数、比后向散射系数和相应物质浓度的乘积^[11]。

2 结果与分析

2.1 反射光谱特性分析

石头口门水库水体悬浮物含量在 13.13~472.19 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 99.61 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 而叶绿素 a 浓度在 0.45~15.72 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 平均值为 4.33 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。表明石头口门水库水体悬浮泥沙含量偏高, 对水体反射光谱影响较大, 而藻类污染不是很严重, 对水体反射光谱影响较小。针对石头口门水库水体特征, 将光谱分析范围延伸到近红外波段处的 1200 nm, 这不同于传统的研究范围 (400~900 nm)。从图 1 可以看出, 其光谱反射率呈现出典型的内陆二类水体特征。反射率值在 0.03%~19.19% 之间, 其平均值普遍高于类似研究中的结果。随着悬浮物浓度的增加, 曲线在整个光谱范围内都会有不同程度的抬升。在 580~700 nm 之间存在一较宽的反射峰。其间, 由于高悬浮物浓度、低叶绿素 a 浓度的影响, 使得叶绿素 a 在 680 nm 左右的吸收峰和在 700 nm 左右的荧光峰不是很明显, 其峰谷间距离随着悬浮物浓度的增加而降低。曲线从 700 nm 处迅速下降, 直到在 808 nm 附近出现一悬浮物反射峰。900 nm 以后曲线的粗糙不平表明近红外波段处较强的噪声干扰。尽管如此, 在 1067 nm 处又出现一明显的悬浮物反射峰, 其中, 悬浮物含量为 472.19 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 所对应的那条曲线在该处的峰值尤为突出, 这在以往类似研究中鲜有报道。但该处的反射率值较前两个反射峰小。

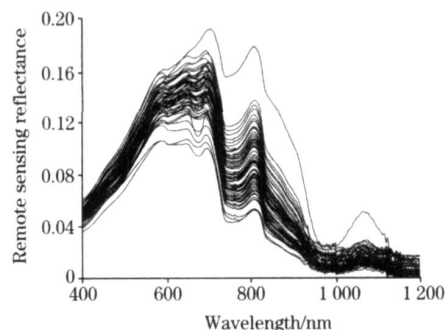


Fig 1 Remote sensing reflectance over 400~1200 nm

对各波长反射率值和悬浮物浓度进行相关分析, 结果如图 2。受有色溶解有机物等在可见光低波段处强吸收的影响, 相关系数在 400~556 nm 间为负值。556 nm 以后各波段相关系数均为正, 这是由于随着悬浮物浓度的增加, 水体浊度增加, 因此表现出较强的散射^[12]。在整个研究波段内, 存在两个相关系数较高的区域 (相关系数大于 0.6): 一个是从 675~948 nm 较宽的范围, 其中 873 nm 的相关系数 (0.95) 为整个研究波段的最大值; 另一个是从 1029~1105 nm 较窄的范围。这两个区域正好分别对应悬浮物两个明显的反射峰位置。

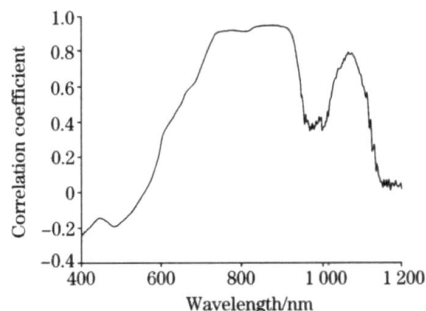


Fig 2 Correlation between TSM concentration and reflectance over 400~1200 nm

2.2 悬浮物生物光学反演模型

基于以上光谱分析和相关分析, 选定近红外波段范围内的光谱反射率值建立反演石头口门水库悬浮物浓度的生物光学模型。根据 Lee 等^[13]的研究结果, 当波长超过 780 nm 时, 叶绿素 a 的吸收系数可近似为零。由于有色溶解有机物和悬浮物的吸收特性均符合负指数函数关系式^[14, 15], 即他们的吸收系数随波长的增加而迅速递减, 在近红外波段处, 其值相对于纯水的强吸收可忽略不计。因此, (1) 式在近红外波段处可简化为

$$R_{rs} = \frac{f}{Q} \frac{b_{b,w}(\lambda) + b_{b,tsm}(\lambda)}{[a_w(\lambda) + b_{b,w}(\lambda) + b_{b,tsm}(\lambda)]} \quad (4)$$

式中 $b_{b,tsm}(\lambda)$ 可进一步改写为比后向散射系数 $b_{b,tsm}^*$ 与悬浮物浓度的乘积。对于来自同一水体的不同水样, 在某一特定波长处, $b_{b,tsm}^*$, $b_{b,w}$ 和 a_w 可视为定值。因此, 将 (4) 改写为悬浮物浓度的反演公式, 可如下表示

$$y = \frac{ax - b}{c - x} \tag{5}$$

式中, y 为悬浮物浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), x 为 R_{rs} , a , b , c 为 3 个常数项系数, 分别等于 $\frac{a_w + b_{b,w}}{b_{b,tsm}}$, $\frac{fb_{b,w}}{Qb_{b,tsm}}$, $\frac{f}{Q}$ 。利用 39 个随机选取的样点数据通过最小二乘法得到 a , b , c 的值, 分别建立以 808, 873 和 1 067 nm 特征波长处的反射率值 (R_{808} , R_{873} 和 R_{1067}) 为自变量的悬浮物浓度反演模型。873 nm 为遥感反射率与悬浮物浓度相关系数最大处, 而 808 和 1 067 nm 对应悬浮物的 2 个反射峰。

各公式参数如表 1 所示。基于 R_{1067} 的生物光学反演公式具有与其他两式差别较大的 a , b , c 值, 尤其是 b 出现了负值。这是由于 900 nm 以后, 水体反射率受噪音干扰较严重, 致使公式中参数估测有偏差。因此, 当不考虑该公式的参数估测结果时, 基于 R_{808} 和 R_{873} 的两个生物光学反演公式中近

似的 b , c 值即可验证 $\frac{f}{Q}$ 为常量的假设, 并表明该水体的 $\frac{b_{b,w}}{b_{b,tsm}}$ 在这两波段处的差异不大 (b 除以 c 得该比值分别为 45. 75 和 46. 12)。但后者的 a 值明显高于前者的, 是由于水在近红外的吸收 (a_w) 随着波长的增加而增加。图 3 显示了模型估测的 39 个建模样本悬浮物浓度与实测浓度值之间的关系, 而图 4 为应用剩余 19 个样本对模型的验证结果。

Table 1 Values of a , b and c in bio-optical models

x	a	b	c
R_{808}	303. 131 5	12. 270 7	0. 268 2
R_{873}	785. 152 4	13. 779 4	0. 298 8
R_{1067}	319. 690 0	- 1. 818 1	0. 089 0

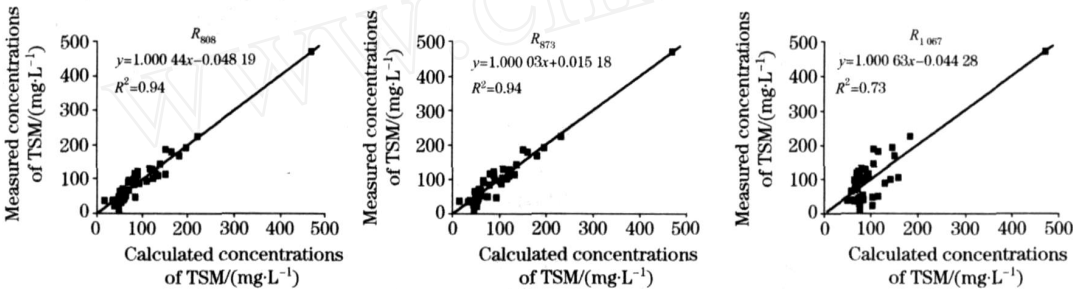


Fig. 3 Scatter plots between calculated TSM concentrations and observed ones based on the modeling data set

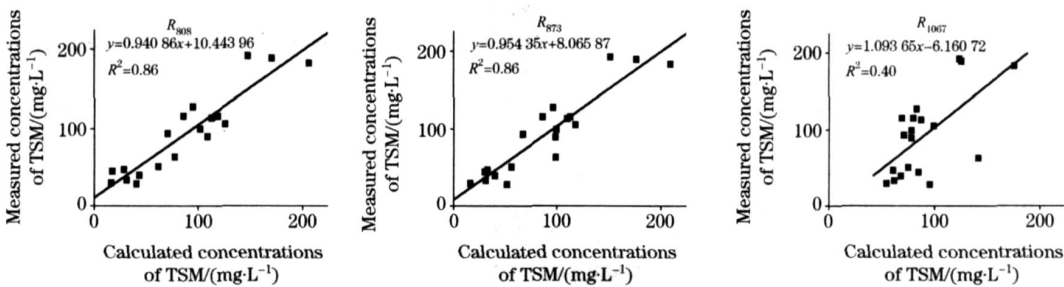


Fig. 4 Scatter plots between calculated TSM concentrations and observed ones based on the test data set

Table 2 Comparison of different models

模型类型	变量	建模样本			检验样本		
		样本量/ 个	R^2	RMSE/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	样本量/ 个	R^2	RMSE/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
生物光学模型	R_{808}	39	0. 94	19. 45	19	0. 86	20. 38
	R_{873}	39	0. 94	19. 64	19	0. 86	20. 07
	R_{1067}	39	0. 73	40. 62	19	0. 40	40. 65
线性模型	R_{808}	39	0. 86	29. 80	19	0. 84	30. 48
	R_{873}	39	0. 91	23. 03	19	0. 86	23. 32
	R_{1067}	39	0. 68	44. 35	19	0. 41	41. 24
对数模型	R_{808}	39	0. 83	150. 38	19	0. 80	33. 61
	R_{873}	39	0. 62	357. 49	19	0. 75	36. 00
	R_{1067}	39	0. 61	2 599. 89	19	0. 31	91. 65

2. 3 模型的精度评价及比较

为了比较分析生物光学模型的反演精度, 分别建立反射

率与悬浮物含量的线性关系模型和指数关系模型, 并推导出以 R_s 为自变量的反演公式, 分别如下

$$y = a + bx, y = e^{(ax+b)} \quad (6)$$

式中 x, y 的含义同公式 (5); a, b 为各模型的经验参数。计算各类模型的决定系数 (R^2) 和均方根误差 (RMSE), 结果参见表 2。总体而言, 利用近红外波段处的生物光学模型反演混浊水体的悬浮物浓度精度较高, 其效果明显优于对数模型, 虽然针对检验样本的模型评价参数与线形模型相当, 但建模样本参数也要明显优于线型模型。就 3 个波段比较而言, 由于 1 067 nm 处有较强的信息干扰, 信噪比相对较低, 使得以 $R_{1\,067}$ 为自变量的各类模型反演精度普遍低于以 R_{808} 和 R_{873} 为自变量的模型反演精度, 但就光谱特性而言, 该波段不失为一个较好的在近红外处提取混浊水体悬浮物含量的波段。

3 结 论

本文通过分析 400~1 200 nm 波段范围内高悬浮物含量二类水体的光谱特性, 结果表明, 整个研究波段范围内高浓

度悬浮物含量对水体总的反射率贡献较大。尤其是在近红外波段处表现出较为明显的悬浮物反射特性, 分别在 808 和 1 067 nm 有一悬浮物反射峰, 虽然后者的信噪比小于前者, 但不失为又一新的表征混浊水体悬浮物光谱特性的波段, 充分挖掘该波段的水色信息对水色遥感具有重要意义。

基于对水体固有光学特性参数在近红外波段范围内的简化条件, 分别以 808, 873 和 1 067 nm 处的光谱反射率为自变量建立了反演悬浮物浓度的生物光学模型经验公式。通过与线性模型和对数模型的对比分析, 结果表明生物光学模型基于水体辐射传输理论, 具有一定的物理意义, 反演公式的形式较接近于真实情况。而线性模型和对数模型则是基于遥感信息与悬浮物浓度的经验关系, 是真实情况的粗略近似, 尤其是当悬浮物浓度动态范围较大时, 对数模型的误差会很大。虽然基于水体辐射传输理论的反演研究是趋势所在, 但现如今仍需大量的基础理论研究来实现其适用性, 和大量的试验数据对其进行模型参数的校正以提高其精度的稳定性。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Yi, ZHOU Wei-qi, WANG Shi-xin, et al (周 艺, 周伟奇, 王世新, 等). Advances in Water Science (水科学进展), 2004, 15 (3): 312.
- [2] Gordon H R, Brown O B, Jacobs M M. Applied Optics, 1975, 14(2): 417.
- [3] MA Rong-hua, TANG Jur-wu (马荣华, 唐军武). Advances in Water Science (水科学进展), 2006, 17(5): 720.
- [4] Pierson D C, Strömbäck N. Geophysica, 2000, 36: 177.
- [5] Feng H, Campbell J W, Dowell M D, et al. Remote Sensing of Environment, 2005, 99: 232.
- [6] Ma R, Tang J, Dai J. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(19): 4305.
- [7] TONG Qing-xi (童庆禧). Spectra and Analysis of Typical Earth Objects of China (中国典型地物波谱及其特征分析). Beijing: Science Press (北京: 科学出版社), 1990.
- [8] TANG Jur-wu, TIAN Guo-liang, WANG Xiao-yong, et al (唐军武, 田国良, 汪小勇, 等). Journal of Remote Sensing (遥感学报), 2004, 8(1): 37.
- [9] Gordon H J. Environmental Science and Technology, 1999, 33(7): 1127.
- [10] Morel A, Gentili B. Applied Optics, 1996, 35: 4850.
- [11] Morel A, Prieur L. Limnology and Oceanography, 1977, 22(4): 709.
- [12] ZHAO Nan-jing, LIU Wen-qing, LI Hong-bin, et al (赵南京, 刘文清, 李宏斌, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(9): 1460.
- [13] Lee Z P, Carder K L. Remote Sensing of Environment, 2004, 89: 361.
- [14] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Limnology and Oceanography, 1981, 26: 43.
- [15] Bricaud A, Stramski D. Limnology and Oceanography, 1990, 35: 562.

Bio-Optical Model of Total Suspended Matter Based on Reflectance in the Near Infrared Wave Band for Case- II Waters

XU Jing-ping^{1,2}, ZHANG Bai¹, SONG Kai-shan¹, WANG Zong-ming¹, DUAN Hong-tao^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, YANG Fei^{1,2}, LI Feng-xiu^{1,2}

1. Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract From August to October, 2006, reflectance spectra were measured in a turbid Case- II waters condition with an ASD FieldSpec spectrometer for a total of 58 samples. Based on the observation of reflectance curves, spectral analysis was carried out over 400-1 200 nm. Showing the typical character of Case- II waters, the reflectance values were generally higher than those in other similar studies. Strong backscattering of high concentration total suspended matter (TSM) contributed considerably to the total reflectance spectra in water. Two obvious TSM reflectance peaks were observed in the near infrared wave bands, i. e. 808 and 1 067 nm, especially the latter one that was never reported before. The highest correlation coefficient between reflectance and concentrations of TSM existed at 873 nm. Based on the simplification of water inherent optical parameters in the near-infrared wave band, including absorption of TSM, Chlorophyll-a (Chl-a) and chromophoric dissolved organic matter (CDOM), and backscattering of pure water, Chl-a and CDOM, three empirical equations of the bio-optical model using reflectance at 808, 873 and 1 067 nm respectively were established to estimate the concentrations of TSM. Compared with linear and exponential models, the bio-optical model showed fairly good performance with comparatively high determination coefficient (r^2) and low root mean squared error (RMSE), which confirmed the applicability of the bio-optical model to retrieve concentrations of TSM effectively in turbid Case- II waters.

Keywords Remote sensing; Case- II waters; Concentrations of total suspended matter (TSM); Bio-optical model; Near infrared wave band

(Received Oct. 6, 2007; accepted Jan. 8, 2008)

敬告读者 ——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpfx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2006 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。

光谱学与光谱分析期刊社