

悬浮颗粒物和叶绿素普适性生物光学反演模型

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:基于太湖、巢湖、滇池和三峡水库水体组分生物光学特性,根据辐射传输模型和神经网络优化算法建立悬浮颗粒物和叶绿素浓度优化生物光学反演模型.利用野外实测数据对优化生物光学算法进行检验,结果表明,该优化生物光学反演模型在一定程度上可以减少测量噪声对反演精度的影响.反演结果表明,受悬浮颗粒物和叶绿素生物光学特性时空差异影响,该优化生物光学反演模型在太湖、巢湖、滇池和山峡反演精度具有一定的差异,但总体上能够较为准确地反演悬浮颗粒物和叶绿素浓度.其中悬浮颗粒物反演精度(平均绝对误差:MAPE,均方根误差:RMSE)分别能够达到23%和15.13mg/L(样本数 $N=228$),叶绿素反演精度(MAPE和RMSE)分别能够达到26%和17.68 $\mu\text{g/L}$ (样本数 $N=228$).

关键词:生物光学;遗传算法;普适性;分析模型

中图分类号:O436 文献标识码:A

Suspended particle matter and chlorophyll-a universal bio-optical retrieval model

HUANG Chang-Chun¹, LI Yun-Mei¹, WANG Qiao¹, LV Heng¹, SUN De-Yong²

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Nanjing Normal University,
Ministry of Education, Nanjing 210046, China;

2. College of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210046, China)

Abstract: Based on the bio-optical properties of water constitute in the Taihu, Chaohu, Dianchi lake and Sanxia reservoir, bio-optical retrieval model for the suspended particle matter and chlorophyll-a were established according to the radiance transfer model and genetic optimization algorithm. The measured data in situ was used to test this optimized model. The results indicate that, the model can remove the influence of noise on the final retrieval precision in a certain degree. The retrieval precision of this model in the Taihu, Chaohu, Dianchi lake and Sanxia reservoir is different due to the variation of suspended particle matter and chlorophyll-a bio-optical properties. However, in general, this model can retrieve the concentration of suspended particle matter and chlorophyll-a with a preferable precision. Two parameters, mean absolutely percentage error (MAPE) and root mean square error (RMSE) which represent the retrieval precision of suspended particle matter, can reach to a value of 23% and 15.13mg/L, respectively (the number of sampling points is 228). The retrieval precision of chlorophyll-a (MAPE and RMSE) can reach to 26% and 17.68 $\mu\text{g/L}$, respectively with the same number of sampling points.

Key words: bio-optical model; genetic algorithm; universality; analytic model

PACS: 93.85.Pq

引言

利用遥感传感器获取水面光谱,根据水色要素

与水面光谱之间的关系,定量获取水色要素信息通常有三种方法:经验模型、半经验模型(半分析模型)、分析模型.其中经验模型是基于遥感光谱数据

收稿日期:2011-12-04,修回日期:2013-07-23

Received date: 2011-12-04, revised date: 2013-07-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41201325; 41271343; 41101340);国家教育部博士点基金资助项目(20123207120017);中国科学院数字地球重点实验室开放基金(2012LDE009)

Foundation items: Supported by National Natural Science of China (41201325; 41271343; 41101340) The Ph. D. Programs Foundation of Ministry of Education of China(20123207120017); Open research fund of key laboratory of digital earth, Center for earth observation and digital earth, chinese academy of sciences (2012LDE009)

作者简介(**Biography**):黄昌春(1982-),男,江苏高邮人,讲师,博士,主要研究方向为环境污染遥感监测. E-mail:huangchangchun_aaa@163.com

与地面实测水质数据的相关性统计分析,选择最优波段或波段组合数据与水环境参数实测值建立统计回归模型,进而反演水色要素参数. 主要代表有单波段法^[1-3]、波段比值法^[4-6]、光谱微分法^[7-10]和优化算法^[11]. 半分析模型是将已知的水质参数光谱特征与统计模型相结合,选择最佳的波段或波段组合作为相关变量估算水质参数值的方法,这种方法具有一定的物理意义. 半分析方法代表主要有反射峰位置法^[12-14]、三波长因子法^[15-16]和四波段因子法^[17-18]. 分析模型是以辐射传输模型为基础,通过对辐射传输方程的近似求解,建立表观光学量(遥感反射率、漫衰减系数等)和固有光学量(吸收和散射特性)之间的关系,基于水色要素与固有光学特性之间生物光学关系利用遥感反射率反演水色要素. 分析模型的主要代表有:QAA (Quasi-Analytical algorithm)算法^[19]、LM (Linear Matrix)算法^[20]、GSM (Garver Siegel Maritorena)算法^[21]. 经验模型缺乏坚实的物理基础,模式在时间与空间上的普适性和适用性受到很大的限制;分析模型方法有明确的物理意义,反演结果可靠,适用性强,并且与生物学紧密结合.

根据太湖、巢湖、滇池和三峡水库水体组分生物光学特性,本研究建立了悬浮颗粒物和叶绿素浓度生物光学优化反演模型,并以太湖、巢湖、滇池和三峡水库实测水色要素对该算法的反演精度和普适性进行检验.

1 数据与方法

1.1 数据

研究数据包括2006年到2010年5次太湖野外实验、2009年巢湖实验、2009年滇池实验和2009年三峡实验,样点分布如图1所示,野外数据相关信息如表1所示. 测量参数包括水体高光谱遥感反射率、悬浮颗粒物浓度、叶绿素a浓度、吸收系数、散射系数和后向散射系数数据. 参数测量方法参见黄昌春^[22].

1.2 悬浮颗粒物和叶绿素生物光学模型

水表面上遥感反射率(R_{rs}),是离水辐亮度(L_w)与水面上总下行辐照度($E_d(0^+)$)之间的比值.

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+) \quad (1)$$

水面总入射辐照度 $E_d(0^+)$,通过测量标准灰板的反射得到,公式如下:

$$E_d(0^+) = L_p * \pi / \rho_p \quad (2)$$

式中, L_p 为标准灰板的辐亮度; ρ_p 为标准灰板的反射率.

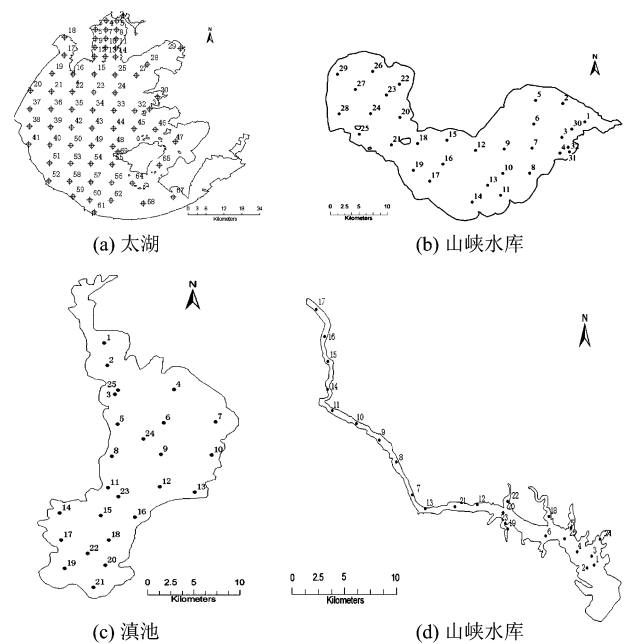


图1 野外数据采集样点分布图

Fig. 1 Distribution of sample stations in the study areas

表1 野外采样数据相关信息*

Table 1 The information of sampling in situ

	N	SPM (mgL^{-1})	Chl (μgL^{-1})	$b_{bp}(400)$ (m^{-1})	$a_{ph}(400)$ (m^{-1})	
太湖	2006	62	6.5-84.5	5.1-54.8	0.17-1.38	0.2-3.6
	2007	42	8.5-116.6	3.8-65.1	0.11-2.01	0.21-2.91
	2008	65	13.3-68.8	3.0-64.8	0.30-1.49	0.12-3.29
	2009	36	12.9-178.2	3.0-55.1	0.24-2.23	0.12-2.28
	2010	47	15.4-122.2	3.1-110.6	0.32-2.01	0.18-4.65
巢湖	2009	32	17.8-83.9	23.8-165.8	0.50-2.00	0.79-4.73
滇池	2009	26	17.1-66.6	45.5-156.7	0.34-1.98	2.23-7.24
三峡	2009	23	3.8-2.17	1.9-18.8	0.14-2.17	0.12-0.60

其中, L_w 的计算

$$L_w = L_{sw} - rL_{sky} + \Delta \quad (3)$$

式中, L_w 为离水辐亮度, L_{sw} 为水体总辐亮度信息, L_{sky} 为天空漫散射辐亮度, r 为气-水界面对天空光的反射率,其取值范围为2.1~5%^[23]. Δ 为随机反射入仪器视场的太阳直射光,对于不十分浑浊的水体,可利用760~900nm之间的波段 λ_0 ,如780nm、865nm等,由于其 $L_w(\lambda_0) \approx 0$,因此只要测得其天空光 L_{sky} ,便可得到 Δ ;对于近岸十分浑浊的水体, $L_w(\lambda_0) \approx 0$,需要对其进行剔除^[24].

$$R_{rs} = (L_{sw} - rL_{sky} + \Delta) / E_d(0^+) = R_{rs-sw} - R_{rs-sky} + R_{rs-\Delta} \quad (4)$$

R_{rs} 与水表面以下遥感反射率(r_{rs})之间具有如下关系^[19]:

$$R_{rs}(\lambda) = \xi r_{rs}(\lambda) / (1 - \Gamma r_{rs}(\lambda)) \quad (5)$$

式中, ξ 为离散作用系数 (Divergence effect), 为内反射作用 (Internal reflection effect), 在天顶观测角时的 $R_{rs}(\lambda)$ 和 $r_{rs}(\lambda)$, $\xi \approx 0.52$ 和 $\Gamma \approx 1.7$. r_{rs} 可以表示为总吸收系数 (a) 和总后向散射系数 (b_b) 之间的函数^[19]:

$$r_{rs}(\lambda) = g_1 \left(\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right) + g_2 \left(\frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \right)^2, \quad (6)$$

式中, g_1 和 g_2 为模型参数. 根据 Lee 的建议, $g_1 = 0.084$, $g_2 = 0.17$ ^[19]. 总吸收系数和总后向散射系数可以表示为各水体组份吸收系数和后向散射系数之和.

$$a(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_{CDM}(\lambda) + a_w(\lambda), \quad (7)$$

$$b_b(\lambda) = b_{bp}(\lambda) + b_{bw}(\lambda), \quad (8)$$

其中, 下标 ph, CDM, p 和 w 分别为浮游植物、CDOM (黄质) 和 NAP (非色素颗粒物) 之和, 总悬浮颗粒物和纯水. CDM (黄质) 和 NAP 吸收系数光谱形状相似, 故将两种物质的总吸收系数进行参数化^[27]. 纯水的吸收和后向散射系数采用 Pope 数据^[25]. CDM 吸收系数可以利用指数函数对其进行参数化:

$$a_{CDM}(\lambda) = a_{CDM}(\lambda_0) \text{EXP}(-S(\lambda - \lambda_0)), \quad (9)$$

其中, $a_{CDM}(\lambda_0)$ 为参考波段 λ_0 处的 CDM 吸收系数, S 为指数斜率.

新浮游植物吸收系数模型被用来对太湖野外实测浮游植物吸收系数进行参数化:

$$a_{ph}(\lambda) = a_{ph}(\lambda_0) \left(S_m a_m^*(\lambda) + (1 - S_m) a_s^*(\lambda) \right), \quad (10)$$

式中, $a_m^*(\lambda)$ 和 $a_s^*(\lambda)$ 为铜绿微囊藻和斜生栅藻的归一化比吸收系数光谱. 铜绿微囊藻和斜生栅藻为太湖浮游植物中的优势藻类. $a_{ph}(\lambda_0)$ 为参考波段 440 nm 处的浮游植物吸收系数, S_m 为铜绿微囊藻的百分比.

根据现有研究表明后向散射系数可以表示为:

$$b_{bp}(\lambda) = b_{bp}(\lambda_0) \left(\frac{\lambda_0}{\lambda} \right)^Y, \quad (11)$$

其中, $b_{bp}(\lambda_0)$ 为参考波段 λ_0 处的后向散射系数, Y 为光谱形状幂函数指数.

$a_{ph}(\lambda_0)$ 和 $b_{bp}(\lambda_0)$ 可以分别表示为悬浮颗粒物 (SPM) 和叶绿素 (Chl) 浓度乘以悬浮颗粒物和叶绿素比后向散射和比吸收系数.

$$b_{bp}(400) = b_{bp}^*(400) * \text{SPM}, \quad (12)$$

$$a_{ph}(440) = a_{ph}^*(440) * \text{Chl}. \quad (13)$$

设置 $a_{ph}(\lambda_0)$ 参考波段为 440 nm, $b_{bp}(\lambda_0)$ 参考波段为 400 nm. 400 nm 比后向散射系数为 0.019 m^{-2}g , 440 nm 浮游植物比吸收系数为 0.062 m^{-2}mg .

1.3 遗传算法和目标方程

遗传算法是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型, 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的随机优化算法. 传算法计算起始于随机产生的初始种群的数量, 进而通过选择、较差和变异产生下一代群体, 新一代的群体将取代上一代群体, 当最优个体的适应度达到给定的阈值, 或者最优个体的适应度和群体适应度不再上升时, 则算法的迭代过程收敛、算法结束. 否则, 经过选择、交叉、变异所得到的新一代群体作为初始群体进行进一步选择、交叉、变异继续循环执行. 遗传算法详细介绍可参见 Goldberg^[26] 和 Davis^[27]. 遗传算法的步骤和应用可参见 Whitley^[28]、Zhan^[29] 和 Chang^[30].

本文中, 循环迭代参数 S 和 Y , 利用遗传算法被用来求取 SPM、Chl、 $a_{CDM}(\lambda_0)$ 、 Δ 和 S_m 在特定范围内的合理值 (符合该参数应具有的物理意义), 从而使得 $f_{me}(\lambda)$ 和 $f_{mo}(\lambda)$ 在 400 ~ 900 nm 波长范围内之间的差异最小. 目标函数可以定义为:

$$F_{obj} = - \sqrt{\sum_{i=1}^n (f_{me}(\lambda_i) - f_{mo}(\lambda_i))^2 / n}, \quad (14)$$

式中 n (本文中为 501) 是遥感反射率光谱对应的波段数目, i 是波段的索引.

1.4 悬浮颗粒物比后向散射系数和叶绿素比吸收系数

悬浮颗粒物 400 nm 处的比后向散射系数时空差异是该生物光学优化模型误差的主要来源, 太湖、巢湖、滇池和三峡水库总悬浮颗粒物比后向散射系数频率分布图如下图 2(a) 所示, 可以发现, 悬浮颗粒物 400 nm 处的比后向散射系数主要分布在 0.0143 ~ 0.0323 m^2/g 之间, 平均值约为 (0.019 ± 0.008) m^2/g .

叶绿素 440 nm 处的比吸收系数时空差异是叶绿素生物光学优化模型误差的主要来源, 太湖、巢湖、滇池和三峡水库叶绿素 440 nm 处比吸收系数频率分布图如图 2(b) 所示, 可以发现, 叶绿素 440 nm 处的比吸收系数主要分布在 0.0368 ~ 0.0981 m^2/mg 之间, 平均值约为 (0.062 ± 0.018) m^2/g .

1.5 模型精度评价

均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAPE) 和相对误差 (RE) 被用来衡量反演模型的精度, 其计算公式分别为:

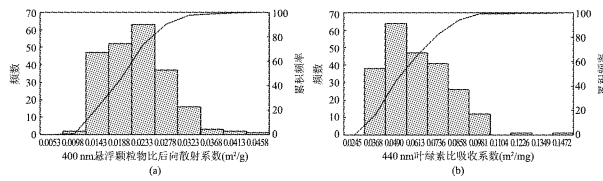


图 2 a 图为 400 nm 悬浮颗粒物比后向散射系数分布, b 图为 440 nm 叶绿素比吸收系数分布

Fig. 2 (a) The distribution of specific backscattering coefficient of suspended particle matter at 400 nm. (b) The distribution of specific absorption coefficient of chlorophyll-a at 440 nm

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{imea} - x_{imod})^2}{n}}, \quad (15)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{imea} - x_{imod}}{x_{imea}} \right|}{n}, \quad (16)$$

$$RE = \frac{x_{imod} - x_{imea}}{x_{imea}}, \quad (17)$$

其中, x_{imod} 为估算值, x_{imea} 为测量值, n 为样本数.

2 结果

2.1 悬浮颗粒物生物光学模型反演结果

为了确定该生物光学模型的普适性和模型反演精度, 分别利用具有时空差异的太湖、巢湖、滇池和三峡水库的野外实测数据对悬浮颗粒物生物光学优化算法的普适性和反演精度进行检验. 结果如图 3 所示, 该生物光学模型在 2006 ~ 2010 年太湖悬浮颗粒物反演结果中具有较高的精度, 其中 2006 年精度最高, MAPE 仅为 17.13%, RMSE 为 8.19 mg/L, 其次为 2009 年, MAPE 仅为 18.09%, RMSE 为 18.37 mg/L, 再次为 2007 年和 2008 年, MAPE 分别为 24.27% 和 24.46%, RMSE 分别为 12.87 mg/L 和 13.04 mg/L, 最后为 2010 年, MAPE 为 28.56%, RMSE 为 17.52 mg/L. 2009 年巢湖悬浮颗粒物反演结果相对较差, 大部分样点的悬浮颗粒物浓度出现被高估的情况, 但是 MAPE 仍仅为 30.25%, RMSE 为 16.11 mg/L, 这主要是由于巢湖悬浮颗粒物在 400 nm 处的比后向散射系数要高于 0.019 m⁻²g. 该模型在 2009 年滇池悬浮颗粒物反演中具有较好的应用效果, MAPE 为 21.65%, RMSE 为 13.77 mg/L. 2009 年三峡水库悬浮颗粒物反演结果表明, 该生物光学模型反演结果仍然较好, MAPE 为 25.23%, RMSE 为 23.71 mg/L. 该悬浮颗粒物生物光学模型反演精度相关统计结果如表 2 所示.

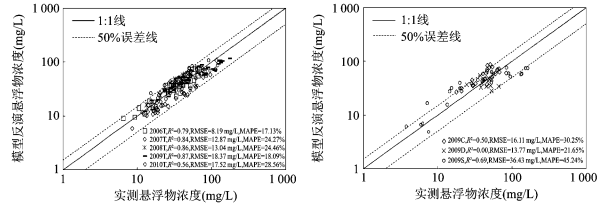


图 3 悬浮颗粒物生物光学模型反演值和实测值对照图 (T: 太湖; C: 巢湖; D: 滇池; S: 三峡)

Fig. 3 Bio-optical model retrieval result versus measured value. T indicates Taihu Lake, C indicates Chaohu Lake, D indicates Dianchi Lake, and S indicates Sanxia reservoir

表 2 悬浮颗粒物生物光学模型反演精度相关统计表
Table 2 Statistic table of retrieval precision of bio-optical retrieval model for suspended particle matter

悬浮颗粒物	MAPE	RMSE	RE					
			最大值	最小值	中值	偏差	变异系数	
太湖	2006	0.17	8.19	0.47	-0.32	-0.04	0.22	32.33
	2007	0.24	12.87	0.32	-0.49	-0.23	0.21	-1.23
	2008	0.24	13.04	0.48	-0.13	0.16	0.19	1.52
	2009	0.18	18.37	0.40	-0.37	-0.01	0.22	31.32
	2010	0.29	17.52	0.69	-0.43	0.16	0.31	1.90
巢湖	2009	0.30	16.11	0.78	-0.28	0.21	0.28	1.10
滇池	2009	0.22	13.77	0.46	-0.49	-0.10	0.28	-3.70
三峡	2009	0.22	32.85	0.58	-0.51	0.10	0.31	11.05
总		0.23	15.13	-0.51	0.58	0.01	0.27	16.72

将该生物光学模型同时应用于太湖、巢湖、滇池和三峡水库所有数据, 结果如表 2 所示, 实测值与模型反演值之间的 MAPE 仅为 22.85%, RMSE 为 15.13 mg/L. 该生物光学模型在 2006 ~ 2010 年太湖、2009 年巢湖、2009 年滇池和 2009 年三峡水库悬浮颗粒物反演的结果表明, 该生物光学模型不仅具有较好的反演精度, 同时也具有较好的普适性, 能够较好地应用于不同地区 (太湖、巢湖、滇池和三峡水库) 和季节 (2006 ~ 2010 年).

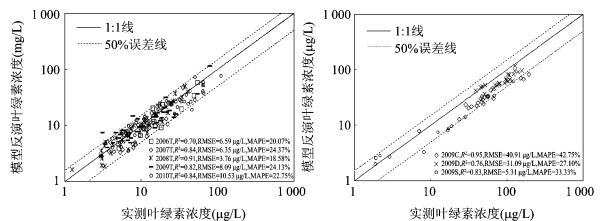


图 4 不同地区和时间叶绿素生物光学模型反演结果, 散点图为实测值和预测值对照图 (T 表示太湖; C 表示巢湖; D 表示滇池; S 表示三峡)

Fig. 4 Bio-optical model retrieval result of chlorophyll-a in different time and study areas. Scatter diagram is the retrieval value versus measured value. T indicates Taihu Lake, C indicates Chaohu Lake, D indicates Dianchi Lake, and S indicates Sanxia reservoir

2.2 叶绿素生物光学模型反演结果

叶绿素浓度生物光学反演模型的适用性和反演精度,同样分别利用具有时空差异的太湖、巢湖、滇池和三峡水库的野外实测数据进行检验.结果如图4所示,该叶绿素生物光学模型应用于2006~2010年太湖叶绿素反演中具有相对较高的精度,其中2008年精度最高,MAPE仅为18.58%,RMSE为3.76 $\mu\text{g/L}$,其次为2007,MAPE仅为20.07%,RMSE为6.59 $\mu\text{g/L}$,再次为2006年和2010年,MAPE分别为22.37%和22.75%,RMSE分别为6.35 $\mu\text{g/L}$ 和10.53 $\mu\text{g/L}$,最后为2009年,MAPE为24.13%,RMSE为8.09 $\mu\text{g/L}$.2009年巢湖叶绿素反演结果相对较差,整个叶绿素浓度出现被低估的情况,其中实测值与模型反演值之间的MAPE为42.753%,RMSE为40.91 $\mu\text{g/L}$,这主要是巢湖440 nm的叶绿素比吸收系数要小于0.062.2009年滇池叶绿素反演结果要好于2009年巢湖的叶绿素反演结果,MAPE为27.10%,RMSE为31.09 $\mu\text{g/L}$.而2009年三峡水库叶绿素反演结果表明,该生物光学模型反演结果仍然相对较好,MAPE为33.33%,RMSE为5.31 $\mu\text{g/L}$.该生物光学模型反演精度相关统计结果如表3所示.

表3 叶绿素生物光学模型反演精度相关统计表
Table 3 Statistic table of retrieval precision of bio-optical retrieval model for chlorophyll-a

叶绿素	MAPE	RMSE	RE					
			最大值	最小值	中值	偏差	变异系数	
太湖	2006	0.22	6.35	0.42	-0.51	-0.15	0.25	-1.98
	2007	0.24	5.78	0.45	-0.52	-0.04	0.32	-7.72
	2008	0.21	4.38	0.44	-0.46	0.02	0.24	-240.12
	2009	0.24	7.11	0.58	-0.49	-0.13	0.29	-6.26
巢湖	2009	0.23	10.53	0.44	-0.59	-0.10	0.26	-2.65
	2009	0.43	40.92	-0.20	-0.60	-0.42	0.10	-0.23
滇池	2009	0.27	31.09	0.08	-0.47	-0.30	0.15	-0.59
三峡	2009	0.33	5.31	0.32	-0.60	-0.24	0.36	-1.93
总	0.26	17.68	-0.60	0.58	-0.14	0.28	-2.31	

将该生物光学模型同时应用于太湖、巢湖、滇池和三峡水库所有数据,结果如图7所示,叶绿素实测值与模型反演值之间的MAPE仅为为25.83%,RMSE为17.67 $\mu\text{g/L}$.叶绿素生物光学模型在2006~2010年太湖、2009年巢湖、2009年滇池和2009年三峡水库悬叶绿素反演的结果表明,该生物光学模型不仅具有较好的反演精度,同时也具有较好的普适性,能够较好地应用于不同地区(太湖、巢湖、滇池和三峡水库)和季节(2006~2010年).

3 结论

利用具有生物光学特性时空差异的野外实测数据对本研究建立的生物光学模型进行检验,得到以下结论:

1)该生物光学模型将现场测量的遥感反射率(包括杂散光、水-气界面反射率取值等引入的测量误差)作为已知量,在一定的程度上克服了测量误差对最终水色参数反演精度的影响.

2)该生物光学模型能够较为准确地反演悬浮颗粒物和叶绿素浓度,悬浮颗粒物反演精度(MAPE和RMSE)分别能够达到23%和15.13 mg/L(样本数 $N=228$),叶绿素反演精度(MAPE和RMSE)分别能够达到26%和17.68 $\mu\text{g/L}$ (样本数 $N=228$).

3)该生物光学模型具有较好的普适性,将该模型应用于生物光学特性具有较大时空差异的数据集中(不同时期的太湖野外实测数据以及不同地区的太湖、巢湖、滇池和三峡水库实测数据)能够得到较好的反演结果.

REFERENCES

- [1] Binding C E, Bowers D G, Mitchelson-Jacob E G. An algorithm for the retrieval of suspended sediment concentrations in the Irish sea from SeaWiFS ocean colour satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(19): 3791-3806.
- [2] Verdin J P, Monitoring water quality in a large western reservoir with Landsat imagery[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1985, **51**:343-353.
- [3] Härmä P, Vepsäläinen J, Hannonen T, et al Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland[J]. *The Science of Total Environment*, 2001, **268**(1-3), 107-121.
- [4] Jiao H B, Zha Y, Gao J, et al., Estimation of chlorophyll-a concentration in Lake Tai, China using in situ hyperspectral data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4267-4276.
- [5] Gons H J. Optical teledetection of chlorophyll a in turbid inland waters [J]. *Environment Science and Technology*, 1999, **33**(7): 1127-1132.
- [6] Koponen S, Pulliainen J, Servomaa H, et al. Analysis on the feasibility of multi-source remote sensing observations for chl-a monitoring[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**(1-3), 95-106.
- [7] Fraser R N. Hyper-spectral remote sensing of turbidity and chlorophyll a among Nebraska Sand Hills lakes[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(8): 1579-1589.
- [8] Sun D Y, Li Y M, Wang Q. A unified model or remotely estimating chlorophyll a in Lake Taihu, China, based on SVM and in situ hyperspectral [J]. *IEEE Transactions on geosciences and remote sensing*. 2009, **47**(8):2957-2965.
- [9] LU Heng, LI Xinguo, ZHOU Lianyi. Quantitative estimation of chlorophyll-a concentration in the northern part of

- Lake Taihu using spectral reflectance [J]. *Journal of lake sciences* (吕恒,李新国,周连义,江南. 基于反射光谱的太湖北部叶绿素 *a* 浓度定量估算. *湖泊科学*), 2006, **18** (4): 349 - 355.
- [10] SUN Deyong LI Yunmei LE Chengfeng, *et al.* Estimating chlorophyll-*a* concentration in Lake Taihu in summer by irradiance ratio just beneath water surface [J]. *Journal of lake sciences* (孙德勇, 李云梅, 乐成峰等. 应用水表面下辐照度比估测太湖夏季水体叶绿素 *a* 浓度. *湖泊科学*), 2007, **19**(6): 744 - 752.
- [11] Gitelson A A. The peak near 700 nm on radiance spectra of algae and water: relationships of its magnitude and position with chlorophyll concentration [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 3367 - 3373.
- [12] SHU Xiao-zhou, YIN Qiu, KUANG Ding-bo. Relationship between Algal Chlorophyll Concentration and Spectral Reflectance of Inland Water [J]. *Journal of remote sensing* (疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. *遥感学报*), 2000, **4**(1): 41 - 45.
- [13] SONG qingjun, MA ronghua, TANG junwu, *et al.* Models of estimated total suspend matter concentration base on hyper-spectrum in Lake Taihu, in autumn [J]. *Journal of lake sciences* (宋庆君, 马荣华, 唐军武等. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型. *湖泊科学*), 2008, **20**(2): 196 - 202.
- [14] Dall' Olmo G, Gitelson A. Effect of bio-optical parameter variability on the remote estimation of chlorophyll *a* concentration in turbid productive waters: experimental results [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(3): 412 - 422.
- [15] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. Remote chlorophyll-retrieval in turbid, productive estuaries: Cheapeake Bay case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **109**: 464 - 472.
- [16] XU Jing-Pin, ZHANG Bai, SONG Kai-Shan, *et al.* Estimation of chlorophyll-*a* concentration in lake xinmiao based on a semi-analytical model [J]. *Infrared Millimeter Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(3): 197 - 201.
- [17] Chengfeng Le, Yunmei Li, Yong Zha, *et al.* A four-band semi-analytical model for estimation chlorophyll *a* in highly turbid lakes: The case of Taihu Lake, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, **113**(2009): 1175 - 1182.
- [18] Le Chengfeng, Li Yunmei, Zha Yong, *et al.* Remote estimation of chlorophyll *a* in optically complex waters based on optical classification [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115** (2): 725 - 738.
- [19] Lee Z P, Carder K L, Robert A A, Deriving inherent optical properties from water color: a multiband quasi-analytical algorithm for optically deep waters [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**(27): 5755 - 5772.
- [20] Hoge F E, Wright C W. Satellite retrieval of inherent optical properties by inversion of an oceanic radiance model: A preliminary algorithm [J]. *Applied Optics*, 1999, **38**: 495 - 504.
- [21] Maritorena S, Siegel D A. Optimization of a semianalytical ocean color model for global-scale applications [J]. *Applied Optics*, 2002, **41**: 2705 - 2714.
- [22] HUANG Changchun. Retrieval of water constituents by bio-optical algorithm considering the vertical distribution of suspended particle; a case study in Taihu Lake [D]. *PH. D* (黄昌春, 顾及颗粒物垂直分布的太湖水体组分生物光学模型反演研究, 南京师范大学), 2011, Nanjing.
- [23] TANG junwu, TIAN guoliang, WANG xiaoyong. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: Above-Water Method [J]. *Journal of remote sensing* (唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面上测量法. *遥感学报*) 2004, **8**(1): 37 - 44.
- [24] ZhongPing Lee, Yu-Hwan Ahn, Curtis Mobley, *et al.* Removal of surface-reflected light for themeasurement of remote-sensing reflectance from an above-surface platform [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(25): 26314 - 26324.
- [25] Pope R, Fry E. Absorption spectrum (380 - 700 nm) of pure waters: II. Integrating cavity measurements [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**: 710 - 723.
- [26] Goldberg D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1989.
- [27] Davis L. *Handbook of genetic algorithms* [M]. New York: Van Nostrand-Reinhold, 1991.
- [28] Whitley D. A Genetic Algorithm Tutorial. Computer Science Department [M]. Fort Collins, Colorado State University, 1993.
- [29] Zhan H G, Lee Z P. Retrieval of water optical properties for optically deep waters using genetic algorithms [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**: 1123-1128.
- [30] Chang C H, C C Liu. Integrating semianalytical and genetic algorithms to retrieve the constituents of water bodies from remote sensing of ocean color [J]. *Optics Express*, 2007, **15**(2): 252 - 265.