

秋季太湖悬浮物高光谱估算模型*

宋庆君¹, 马荣华², 唐军武¹, 王晓梅¹

(1: 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 2004年10月, 在太湖设置67个采样点, 现场测量了水体遥感反射比、后向散射系数和辅助参数, 实验室分析了水体的悬浮物浓度和水色要素吸收系数。本文在对遥感反射比光谱分析的基础上, 比较了几种水体遥感反射比光谱估算悬浮物浓度的方法, 结果发现广泛应用的带比值项的算法, 虽然可以应用于太湖总悬浮物浓度估算, 但是普遍存在相对误差较高的弱点。通过对光谱的分析, 确定了750nm单波段算法的参数, 并提出了利用近红外812nm波峰高度来估算水体悬浮物的方法。文中还详细阐述了为什么比值算法等在太湖水体悬浮物浓度估算中相对误差比较高, 并解释了利用近红外估算精度高的原因, 并指明以上算法在遥感应用中的优点和不足, 以及现实水体(水质)遥感对现有遥感器配置和遥感算法的需求。

关键词: 遥感反射率; 总悬浮物; 太湖

Models of estimated total suspended matter concentration base on hyper-spectrum in Lake Taihu, in autumn

SONG Qingjun¹, MA Ronghua², TANG Junwu¹ & WANG Xiaomei¹

(1: *National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, P.R.China*)

(2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China*)

Abstract: In situ measurements of remote sensing reflectances (R_{rs}), backscattering coefficients (b_b) as well as other related parameters had been acquired in 67 stations in Lake Taihu, in October, 2004. The total suspended matter (TSM) concentrations and absorption coefficients (a) by ocean color elements had been derived from Laboratory analysis. Based on the analysis of in situ R_{rs} spectrum, several methods have been compared for TSM concentrations retrieval from R_{rs} . The results show that the methods by means of spectral ratios applied widely in ocean color remote sensing were basically applicable in TSM retrieval in Lake Taihu, whereas which all give a little high relative errors. Furthermore, the empirical coefficients for the algorithm only by use of 750nm band is also determined. The method by use of 812nm spectrum peak line height is provided in this article. The possible reasons that the methods by use of spectral ratios have higher relative errors in Lake Taihu have been explained in detail, as well as the reasons that the method using near infrared band information would be more accurate. At the same time, the advantages and disadvantages of above methods in the applications of ocean color remote sensing have been pointed out, as well as the requirements in terms of sensors and retrieval methods in current applications.

Keywords: Remote sensing reflectance; total suspended matter; Lake Taihu

水体总悬浮物浓度是表征水生生态环境的一个重要参数, 直接影响到水体的光场分布, 进而影响初级生产力^[1]。这一参数除了决定水体固有光谱特性(水体吸收系数和散射系数)外, 也同时影响到水体的表观光谱特性, 因而可以通过水体的光谱特性对总悬浮进行估算。通过光谱特征估算悬浮物浓度有两个主要途径, 一个是光学遥感, 另一个是现场实测光谱估算。光学遥感具有感知面积大, 价格低廉、时效性较好等优点, 但该途径是建立在已有波段、已有模型基础上的, 故此方法针对某一时空范围内的水体有比较

* 国家自然科学基金(40671138)资助。2007-09-05 收稿; 2007-11-06 收修改稿。宋庆君, 男, 1975年生, 助理研究员; E-mail: kingdream@mail.nsoas.gov.cn.

好的效果. 实测光谱估算悬浮物浓度具有方法灵活, 波段可选择性强等优点, 但是其与常规监测相同, 受人力、物力以及自然条件(气候、风、波浪和湖流)影响比较大, 不能长期跟踪监测, 且悬浮浓度的变化受时空影响比较大, 因此该途径主要用于建立监测模型和遥感算法以及水质的现场跟踪研究.

二类水体成分反演仍然是目前水色反演的难点和热点, 水体总悬浮浓度是表征二类水体的主要参数, 因此其反演模型无论是国内还是国外都有大量算法公布, 但大部分都是局部区域的经验算法. 在海洋二类水体中比较经典算法是Tassan针对地中海水体公布的比值算法^[2], 方法得到了广泛应用和改进, 唐军武等人成功的将改进的方法用于我国黄海、东海的二类水体悬浮物浓度反演中^[3-4]. 韩国的Ahn针对西海(中国的黄海外海)提出了利用625nm反演泥沙浓度的单波段模型^[5], 国内的马荣华针对比较典型的太湖二类水体, 也提出了单波段算法^[6], 都获得了比较好的结果. 随着水体悬浮物浓度升高, 近红外光谱引起了关注, 法国的Doxaran等人美国的Myint 等人分别通过比较spot、NOAA AVHRR和SeaWiFs的波段配置发现了近红外光谱对悬浮体浓度更敏感, 针对悬浮泥沙提出了865nm与555nm波段比值算法, 并成功应用于spot反演悬浮物浓度和AVHRR的宽波段反演悬浮物浓度算法中^[7-9]. 国内吕恒也发现对悬浮物敏感波段为580nm和810nm^[10]. 本文比较了Tassan算法和改进后的线性算法以后, 对近红外波段光谱的比值算法进行了验证, 提出近红外单波段和812nm高度估算悬浮物浓度的方法, 并对几种算法做了分析和讨论.

1 数据获取与分析

1.1 试验测量

2004年10月, 根据太湖平均水质情况, 共布置了67个采样点(图1). 使用双通道地物光谱仪ASD FieldSpec 931(美国ASD公司生产, 光谱350-1050nm, 8度视场角观测, 仪器在试验前对两个探头以及标准反射板进行了定标)采用水面之上法, 选择[40, 135]观测几何测量了66个站点的遥感反射比光谱 R_{rs} ^[11](天气原因, 缺测48号站); 使用HydroScat-6(美国Hobi labs公司生产, 波段配置为442、488、532、589、676和852nm)测量了水体后向散射系数 b_b ; 实验室利用分光光度计测量了水体成分的吸收系数(包括总颗粒物、色素颗粒物、非色素颗粒物和黄色物质的吸收系数), 同时测量了叶绿素a浓度、总悬浮物浓度、无机悬浮物和有机的悬浮物浓度以及DOC含量等, 总悬浮物浓度(C_{TSM})测量值范围为3.1-169.47mg/L; 另外也测量了水深和透明度以及风速和风向等辅助参数. 并依据水深与透明度的关系, 将整个湖区分为 R_{rs} 受太湖底质的影响、可能影响与非影响区^[12-13].

1.2 光谱分析

光谱行为是估算水体总悬浮物的基础. 400-900nm范围内的实测遥感反射比光谱(共65条, 删除17号点)(图2), 在400-900nm光谱范围内, 遥感反射比 R_{rs} 都体现了一个比较好的随浓度的相关特性, 即表现在大部分 R_{rs} 曲线没有交叉, 平行性比较好. 选取典型水色波段的 R_{rs} 作为研究对象, 删除2个点(21号点和57号点)后共63个样本, 发现各波段与总悬浮物浓度都有比较好的如式(1)的幂乘关系, 各波段相关性见表1.

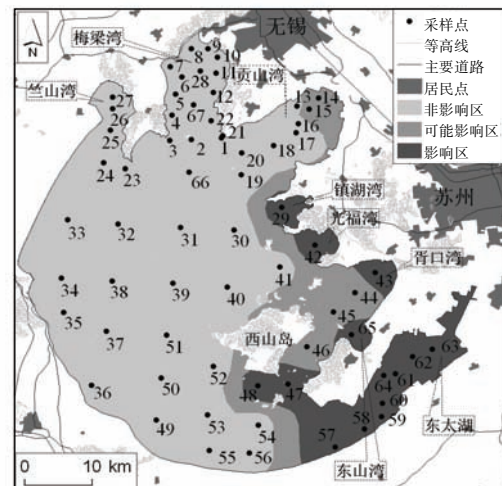


图1 样点位置及湖底对遥感反射率的影响区域分布
Fig.1 Spatial distribution of 67 samples in Lake Taihu

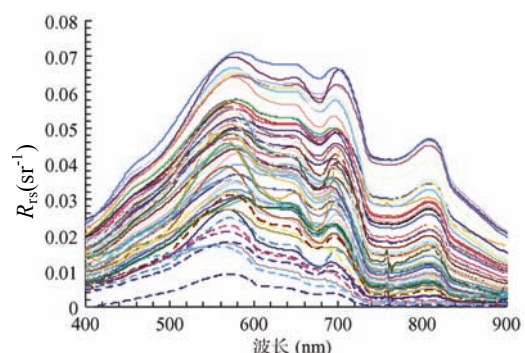


图2 太湖水体实测遥感反射比光谱
Fig.2 The remote sensing reflectance *in situ*

$$C_{TSM}=a \cdot R_{rs}(\lambda)^b \tag{1}$$

图2中可见光谱的最大值在绿谱段, 约在565nm处; 值得注意的是, 在680nm附近有波谷, 在700nm处有个波峰, 与海洋二类水体光谱有明显区别, 这峰与谷的表现体现了叶绿素浓度的变化^[14], 这是由于海洋类二类水体中总悬浮物多为无机颗粒, 而湖泊水体中有机颗粒占总悬浮物的比重相对要大的多; 在810nm附近有一波峰, 这与海洋型二类水体吻合, 是颗粒物散射与水体吸收系数共同作用的结果.

表1 各波段遥感反射比与总悬浮物的相关性

Tab. 1 Relativity between $R_{rs}(\lambda)$ and TSM concentration

波长 (nm)	a	b	R^2
488	48236	1.9959	0.7464
510	47191	2.0823	0.7455
532	47586	2.1886	0.7367
555	39421	2.2098	0.7271
650	11840	1.7385	0.845
676	8120.3	1.5478	0.8576
750	2760.1	0.9697	0.9458
865	2195.2	0.8031	0.8925

2 估算方法

2.1 TASSAN 模型

Tassan 等人针对地中海提出了比值模型, 在海岸带水体得到了很好的效果, 并为现今最先进的水色处理软件 SeaDAS 采用, 该模型如下:

$$\lg(C_{TSM})=s_0+s_1 \lg(X_s) \tag{2}$$

式中, $X_s=[R_{rs555}+R_{rs670}][R_{rs490}/R_{rs555}]^b$, b 为区域待定常数.

考虑到本研究中的 R_{rs} 光谱数据与总悬浮物浓度的相关性比较好, 仍然采用模型原来选择的波段. 全部数据 65 个站, 回归结果为 $s_0=3.641$, $s_1=1.771$, $b=0.178$, 相关系数 $R^2=0.813$, 平均相对误差为 35.4%. 本文的平均相对误差 = $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (|x_i^e - x_i^m| / x_i^m)$ 其中 N 为样本数, x^e 为模型估算值, x^m 为实测值. 可以看出, 该模型效果还是比较理想.

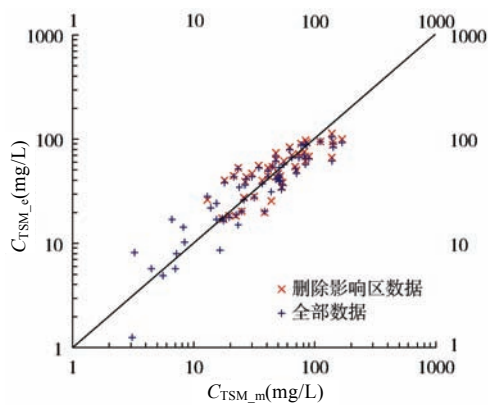


图3 删除有底质影响的数据后估测结果的对比
Fig. 3 Contrast of estimation result between all R_{rs} data and data non-influenced by lake bottom

考虑到湖底对遥感反射比的影响, 对数据进行筛选, 删除遥感反射比受底质影响的数据后, 共 48 站, 重新对式(2)参数化, 结果为 $s_0=3.741$, $s_1=1.731$, $b=0.57$, $R^2=0.66$, 平均相对误差为 31.7%. 通过比较发现, 平均相对误差有所提高, 但是相关系数由 0.813 减小到 0.66, 这是由于删除的数据主要集中在 10mg/L 以下的数据, 使得数值范围变小, 造成相关系数降低, 由于数值的绝对值变大, 所以平均相对误差会有所降低, 因此删除影响区的数据对估算模型的精度提高并不明显. 图中可见删除数据后对估算结果的影响(图 3), C_{TSM_m} 为实测悬浮物浓度, C_{TSM_e} 为估算悬浮物浓度. 可以看出, 在悬浮物浓度 10mg/L 以上区域, 两者的估算结果非常接近, 并且不删除受底质影响的数据估算的结果更好一些. 因此再次说明, 删除影响区的数据对估算算法的建立并没有多大帮助.

2.2 线性模型

唐军武等人针对我国黄海、东海的典型近岸二类水体提出了一种线性模型, 该模型实际上是 Tassan 波段比值模型的变种, 将 Tassan 模型的相关系数由 0.79 提高到了 0.92, 平均相对误差由 53% 变为 30%, 在悬浮物浓度 300mg/L 以下达到了 19% 的平均相对误差^[3-4]. 该估算模型:

$$\lg(C_{TSM})=s_0+s_1(R_{rs555}+R_{rs670})+s_2(R_{rs490}/R_{rs555}) \quad (3)$$

全部样品共 65 站, 按式(3)形式确定其参数, 回归结果为 $s_0=0.358$, $s_1=12.749$, $s_2=0.312$, 相关系数 R^2 为 0.816, 平均相对误差 36.1%. 采用与 TASSAN 模型一样的分析方法, 删除受底质影响的数据后重新对式(3)参数化, 结果为 $s_0=0.282$, $s_1=9.063$, $s_2=0.960$, 相关系数 $R^2=0.688$, 平均相对误差 29.8%. 与 Tassan 模型相比, 线性模型虽然有所改进, 但效果不明显, 同时也进一步确认了删除受底质影响的数据对估算模型的建立并没有太大影响.

2.3 R_{865}/R_{555} 比值模型

该算法为 Doxaran 针对河口的以悬浮泥沙为主导的总悬浮物水体提出的算法, 由于 865nm 和 555nm 是许多水色卫星的通用波段, 因此该算法具有一定的普遍应用意义. 采用该算法对太湖遥感反射比和总悬浮物浓度回归, 删除两个异常点, 结果为:

$$C_{TSM}=342.52(R_{rs865}/R_{rs555})-10.868 \quad (4)$$

相关系数 $R^2=0.9476$, 平均相对误差为 26.4%. 可以看到, 该算法在太湖悬浮物浓度估算中效果比较理想, 有非常高的相关系数, 但是平均相对误差与前两种方法比提高并不明显.

2.4 近红外单波段模型

单波段模型适用与波段强烈相关的情况, 韩国的 Ahn 成功的利用了 625nm 波段估算了我国黄海外海的悬浮物浓度^[5]. 从表 1 中可以明显看出, 随着波长的增加, R_{rs} 与悬浮物浓度的相关系数也在增大, 因为随着波长的增加, 水体中各组分(包括颗粒物和黄色物质)的吸收系数占总吸收系数的比例在逐渐减小. 考虑到近红外波段颗粒物与黄色物质的吸收系数都近似为零, 因此选择 750nm 和 865nm 分别尝试了单波段模型, 各波段相关关系按相关性排列, 结果发现 750nm 遥感反射比与悬浮物浓度关系为乘幂关系, 而 865nm 为线性关系, 分别如下:

$$C_{TSM}=2760.1R_{rs750}^{0.9697} \quad (5)$$

$$C_{TSM}=5152R_{rs865}+3.8946 \quad (6)$$

结果两个单波段模型的相关系数都比较高, 分别为 0.95 和 0.94, 平均相对误差为 16.4% 和 20.5%. 可以看出, 效果非常理想, 尤其是 750nm 单波段模型. 因此在本文所研究的范围内, 太湖的水体悬浮物浓度与遥感反射比之间的最敏感波段为 750nm.

2.5 近红外 812nm 高度估算模型

表观光学参数 R_{rs} 直接受到水体固有光学特性(包括吸收系数 a 和后向散射系数 b_b)的影响, 具体表现为:

$$R_{rs}=f\frac{b_b}{a+b_b} \quad (7)$$

式中, f 是受太阳天顶角、水面粗糙度等影响的常数^[15]. R_{rs} 光谱在 810nm 附近有个波峰(图 2), 这波峰是由于水体的吸收系数在个波段近似为常数引起的. 图 4 给出 8 号站点测量的吸收系数 a (分光法分别测量了各水色组分的吸收系数)、后向散射系数 b_b (HydroScat-6 测量)和遥感反射比 R_{rs} 的曲线, 其中纯水吸收系数 a_w 选于 NASA 光学观测规范推荐的数值^[16-17]. 现行的吸收系数测量分析中, 无论是颗粒物的吸收系数 a_p 还是黄色物质吸收系数 a_g , 都是假设在 850nm 处吸收系数为零, 因此在近红外波段, a_p 和 a_g 几乎为 0. 颗粒物吸收 a_p 、黄色物质吸收系数 a_g 和纯水的吸收系数 a_w 共同构成了总吸收系数 a , 因此在 810nm 附近总系数系数几乎恒为常数, 即纯水的吸收系数 a_w , R_{rs} 曲线形状才表现为与 a_w 倒数形状一致. 此时式(7)中, 影响遥感反射比 R_{rs} 的因子仅为后向散射系数 b_b , b_b 的变化直接影响到 R_{rs} 的数值大小. 812nm 处波峰的高度反映的是后向散射系数与吸收系数的比值关系, 通过吸收系数近似常数的原则, 该高度直接反映的是后向散射系数的大小, 而后向散射系数对颗粒物非常敏感, 与总悬浮浓度有比较好的相关性^[18-19], 因此在遥感反射比 R_{rs} 曲线选择 812nm 处波峰高度估算总悬浮物.

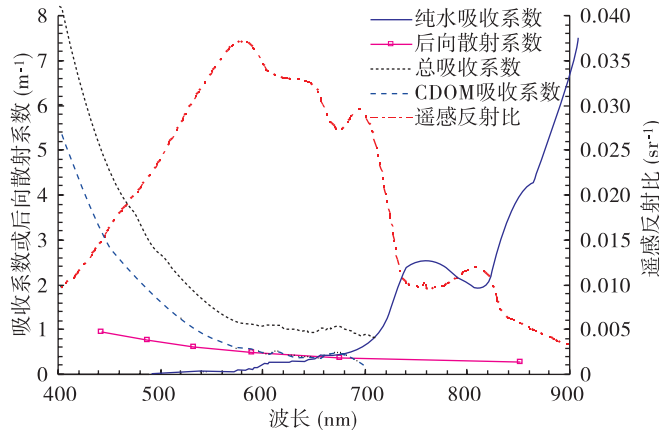


图 4 8 号站位吸收系数、后向散射系数以及遥感反射比光谱
Fig.4 Spectrum of a , b_b and R_{rs} about 8[#] station

考虑到现有水色卫星用于大气校正的波段, 因此利用 750nm(765nm), 812nm 和 865nm 波段确定 812nm 高度 H_{812} , 由于 750nm 和 865nm 的中值非常接近 812nm, 且高度只是一个相对值, 故 812nm 的高度基准选择了 R_{rs750} 和 R_{rs865} 的平均值(图 5), 结果如式(8).

$$H_{812} = R_{rs812} - 1/2(R_{rs750} + R_{rs865}) \quad (8)$$

为了避免模型中的系数过大(H_{812} 的数值比 C_{TSM} 小几个量级), 对总悬浮物浓度 C_{TSM} 取对数, 分别采用线性、对数和乘幂方式建立回归关系, 相关系数 R^2 分别为 0.883、0.909 和 0.941, 最后择优选择乘幂模型如式(9).

$$\lg(C_{TSM}) = 11.405 H_{812}^{0.3803} \quad (N=65, R^2=0.941) \quad (9)$$

该模型平均相对误差为 17.3%, 比起利用波段比值法有明显改善.

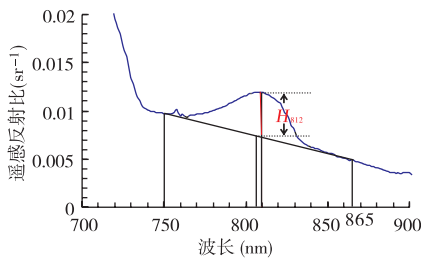


图 5 812nm 波峰高度示意图

Fig.5 Sketch map of 812nm spectrum peak line height

3 讨论

3.1 估算模型对比

图 6 给出了几种模型估算结果. 总体来讲几种模型都能实现估算总悬浮物浓度的工作. 其中 Tassan 模型和线性模型的结果相对来说比较差, 但是两者比较起来, 线性模型在总悬浮物浓度高或低时估算结果要好. 虽然 865nm 比值算法有很高的相关系数, 但是仍然可以看出来, 其估算结果不如单波段和 812nm 高度法, 尤其在悬浮物浓度小的区域, 865 比值算法对总悬浮物浓度估算过低. 812nm 波峰高度法和单波段 750nm 估算结果的估算结果最好, 平均相对误差达到了 17.3%和 16.4%, 两者比较发现, 在悬浮物浓度较低区域($C_{TSM} < 60\text{mg/L}$), 812nm 高度法好于 750nm 单波段法; 而在悬浮物浓度比较高的区域, 750nm 单波段法比 812nm 高度法估算结果好. 这是由于随着悬浮物浓度的提高, 750nm 的 R_{rs} 测量会更

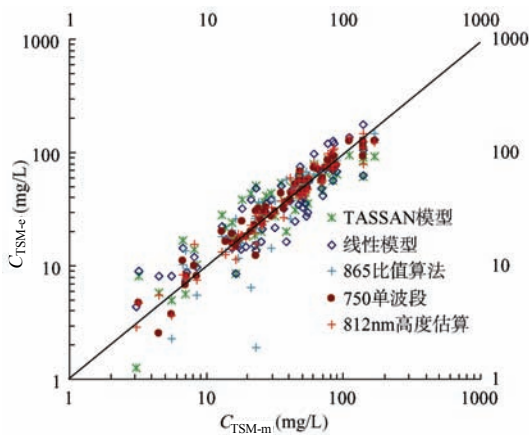


图 6 几种估算模型的比较

Fig.6 Comparison of estimation models

准确. 虽然 750nm 单波段法与 812nm 高度法都可用于总悬浮物浓度的估算, 遗憾的是 812nm 在一般的水色卫星中并没有设置该通道. 其它高光谱卫星, 涵盖这个波峰区域大部分也是宽波段, 因此该算法并不太适合卫星反演算法, 这需要以后卫星通道选择上给予关注. 表 2 给出几种算法的参数和结果.

表 2 几种估算模型的参数和结果比较

Tab. 2 Comparison of estimation result and models parameter

模型	波段选择(nm)	R^2	平均相对误差(%)
Tassan 模型	490, 555(565)和 670	0.813	35.4
线性模型	490, 555(565)和 670	0.816	36.1
R_{865}/R_{555} 模型	865 和 555	0.948	26.4
单波段模型	750 (865)	0.946 (0.940)	16.4 (20.5)
812nm 高度模型	750(765), 812 和 865	0.941	17.3

3.2 蓝绿波段选择对估算结果的影响

值得注意的是, 上述模型中只要涉及到带比值项的, 估算的结果相对误差都比较大. 而这些比值项中, 分母又多为 555nm. 作为分母的 555nm 波段选择本是为了消除水体中非悬浮物的影响, 这一影响主要来自于水中黄色物质. 这些模型能在海岸带以及河口型二类水体得到比较好的应用, 主要是这些水体与内陆湖泊水体有比较大的区别, 主要区别在于黄色物质占总吸收吸收的比重不同. 在 400–600nm 之间黄色物质吸收系数 a_g 几乎占总吸收系数 a 的 50%, 在这一光谱范围内, 纯水的吸收系数 a 远远小于颗粒物吸收系数 a_p 和黄色物质系数吸收 a_g , 故在可见光区域 a_p 和 a_g 大约相等. 另外 a_p 曲线在 400–600nm 的斜率主要取决于无机颗粒物的吸收系数 a_d , 而 a_d 与 a_g 两者的光谱行为都如式(10), 极其相似(图 4).

$$a(\lambda) = a(\lambda_0)e^{-s(\lambda-\lambda_0)} \quad (10)$$

因此选择蓝、绿波段波段估算 C_{TSM} , 无论采用比值法还是线性都无法区分无机颗粒和黄色物质的影响, 即估算的悬浮物浓度 C_{TSM_est} 会比实测值 C_{TSM_m} 偏大, 这在图 6 中有所体现.

3.3 近红外波段在估算悬浮物中的应用

内陆水体, 尤其是比较浑浊的内陆水体, 由于可见光波段在估算 TSM 具有一定的局限性, 因此将注意力集中在近红外波段的光谱特征. 由式(7)和图 4 知道, 浑浊水体的近红外波段光谱, 后向散射系数对近红外的遥感反射比光谱起决定作用, 吸收系数在此波段范围内主要描述了遥感反射比曲线形状. 由于后向散射系数是与散射体粒径和相对折射指数密切相关, 因此后向散射系数的变化表征着 TSM 的变化, 两者有非常好的相关关系^[18-19], 才能在近红外波段如此好的估算模型. 但是该模型适用的是浑浊水体, 相对较清澈的水体由于受到仪器信噪比和数据处理方法的影响, 得不到相对准确的水体近红外光谱, 则无法用于 C_{TSM} 的估算, 因此 750nm 单波段算法才会在 C_{TSM} 较小区域估算结果不如较大区域.

3.4 需要解决的难题

二类水体算法中有两个主要难关, 一个是水色算法, 另外一个就是大气校正算法. 传统的大气校正算法都是从近红外波段入手, 一类水体近红外离水辐亮度近似为 0, 中低浑浊二类水体采用近红外光谱关系进行迭代算法或者采用邻点替代. 然而在内陆湖泊中, 找不到邻点替代, 这为大气校正工作带来了极大的困难. 通过卫星遥感来反演 C_{TSM} , 如果选择近红外波段来估算, 则在算法中无法区分悬浮物还是大气气溶胶, 即在算法中估算的总悬浮物无法确定其来自水里还是来自空中.

通过以上分析, 必须寻找一个适合的途径进行大气校正, 在图 2 中还有一点值得注意, 在 400–565nm 波段, 光谱的斜率变化非常小, 尤其在 $R_{rs}(490)$ 大于 0.02 sr^{-1} , 相当于 TSM 大于 15 mg/L 时, 400–565nm 的 R_{rs} 斜率几乎不变, 而此时的近红外波段却随 R_{rs} 的增大发生着比较明显的变化, 也许蓝波段是将来特别浑浊水体大气校正的契机. 在无准确大气校正算法时, 只能求助于神经网络模型^[20].

4 结论

本文在分析水体遥感反射比光谱的基础上, 比较了几个遥感反射比估算总悬浮物浓度的方法, 结果

表明:常用的比值算法(Tassan 模型)和线性算法,相关系数都达到 0.81 左右,相对误差在 35%左右,并解释了几种方法结果比较接近的原因;比较了近红外光谱的两种算法,并分析了两者在相近的相关性下,估算的相对误差不同的原因;在对近红外光谱详细分析的基础上,提出了利用近红外 812nm 遥感反射比波峰高度估算总悬浮物浓度的算法,结果表明,该方法使得结果得到很大的提高,相关系数达到 0.94,平均误差达到 17%.

本文提出的利用 812nm 遥感反射比波峰高度估算悬浮物浓度的算法虽然结果比较理想,但是也为卫星反演算法提出了新的要求,首先现有卫星很少有设置 812nm 的窄波段,另外在卫星反演中大气校正算法也出现挑战,因此想要将此算法应用到卫星遥感 TSM 浓度还需要得到新的支持和突破.另外,悬浮物受季节的影响比较大,因此本研究中的算法也需要进一步的验证.

致谢:试验过程中得到了张运林、朱建华、高飞和李刚的鼎力相助,杨安安在光谱数据测量和数据分析中付出了辛勤劳动,在此谨表谢意.

5 参考文献

- [1] 光 洁, 韦玉春, 黄家柱等. 分季节的太湖悬浮物遥感估算模型研究. 湖泊科学, 2007, 19(3): 241-249.
- [2] Tassan S. Local algorithm using SeaWiFS data for the retrieval of phytoplankton, pigments, suspended sediment and yellow substance in coastal waters. *Applied Optics*, 1994, 33(12): 2369-2378.
- [3] 唐军武, 王晓梅, 宋庆君等. 黄、东海二类水体水色要素统计反演模式. 海洋科学进展, 2004, 22(B10): 1-7.
- [4] Tang Junwu, Wang Xiaomei, Song Qingjun *et al.* The statistic inversion algorithms of water constituents for the Huanghai Sea and the East China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 23(4): 617-626.
- [5] Yu-Hwan Ahn, Jeong-Eun Moon, Sonia Gallegos. Development of suspended particulate matter algorithms for ocean color remote sensing. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2001, 17(4): 285-295.
- [6] 马荣华, 戴锦芳. 结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量. 湖泊科学, 2005, 17(2): 97-103.
- [7] Doxaran D, Froidefond JM, Lavender S. Spectral signature of highly turbid waters Application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81: 149-161.
- [8] Myint SW, Walker ND. Quantization of surface suspended sediments along a river dominated coast with NOAA AVHRR and SeaWiFS measurements: Louisiana, USA. *Int J Remote Sensing*, 2002, 23(16): 3229-3249.
- [9] Doxaran D, Froidefond JM, Castaing P. Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters. Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2623-2634.
- [10] 吕 恒, 李新国, 江 南. 基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型. 湖泊科学, 2005, 17(2): 104-109.
- [11] 唐军武, 田国良, 汪小勇等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上法. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.
- [12] Ma Ronghua, Tang Junwu, Dai Jinfang. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Lake Taihu in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27: 4303-4326.
- [13] Ma Ronghua, Tang Junwu, Dai Jinfang *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Lake Taihu, China: absorption. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27: 4275-4302.
- [14] 马荣华, 戴锦芳. 应用实测光谱估测太湖梅梁湾附近水体叶绿素浓度. 遥感学报, 2005, 9(1): 78-86.
- [15] Gordon HR, Brown OB, Evans RH *et al.* A semi-analytical radiance model of ocean color. *J Geophys Res*, 1988, 93: 10909-10924.
- [16] Pope and Fry. Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. *Applied Optics*, 1997, 36(33): 8710-8722.
- [17] Kou L, Labrie D, Chylek P *et al.* Refractive indices of water and ice in the 0.65 to 2.5 μ m spectral range. *Applied Optics*, 1993, 32: 3531-3540.
- [18] 宋庆君, 唐军武. 黄海、东海海区水体散射特性研究. 海洋学报, 2006, 28(4): 56-63.
- [19] 马荣华, 宋庆君, 唐军武等. 太湖秋季水体遥感反射率的简单经验估测模型. 湖泊科学, 2007, 19(3): 227-234.
- [20] 唐军武, 丁 静, 田纪伟等. 黄东海二类水体三要素浓度反演的神经网络模型. 高技术通讯, 2005, 15(3): 83-88.