DOI: 10.5846/stxb201411152264

赵丽娜,王艳楠,金琦,冯驰,潘洪洲,张杰,吕恒,李云梅.基于 GOCI 影像的湖泊悬浮物浓度分类反演.生态学报,2015,35(16):5528-5536. Zhao L N, Wang Y N, Jin Q, Feng C, Pan H Z, Zhang J, Lü H, Li Y M.Method for estimating the concentration of total suspended matter in lakes based on goci images using a classification system. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(16):5528-5536.

基于 GOCI 影像的湖泊悬浮物浓度分类反演

赵丽娜¹,王艳楠¹,金 琦¹,冯 驰¹,潘洪洲¹,张 杰¹,吕 恒^{1,2,*},李云梅^{1,2} 1 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室,南京 210023 2 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心,南京 210023

摘要:悬浮物直接影响到光在水体中的传播,进而影响着水生生态环境,最终决定了湖泊的初级生产力。传统的遥感反演估算 模型大多是针对某一湖区进行统一建模,忽视了不同区域水体光学性质的复杂差异性,并且传统的传感器时间分辨率和空间分 辨率受到一定限制。针对太湖、巢湖、滇池、洞庭湖4个湖区利用两步聚类法将高光谱模拟到 GOCI 影像上的波段进行分类,将 水体类型分为三类,第一类水体为悬浮物主导的水体,第二类水体为悬浮物和叶绿素 a 共同主导的水体,第三类水体为叶绿素 a 主导的水体。针对不同类型水体的光学特征,分别构建了悬浮物浓度反演模型,结果表明第一类水体可以利用 B7/B4,第二和 第三类水体可以利用 B7/(B8+B4)作为波段组合因子对悬浮物浓度进行模型构建。精度验证结果表明,分类建模后第一类和 第三类水体悬浮物浓度估算精度都得到了较明显提高,第一类水体 RMSE 降低了 9.19mg/L,MAPE 降低了 3%,第三类水体 RMSE 降低了 5.63 mg/L,MAPE 降低了 13.97%,第二类水体精度稍有降低。最后将反演模型应用于 2013 年 5 月 13 日的 GOCI 影像,可知整体而言太湖西南部地区悬浮物浓度较高,东北部地区悬浮物浓度较低,并且从 9:00 到 15:00,太湖南部悬浮物浓度 较高的区域在逐渐缩小。

关键词:富营养化湖泊;悬浮物;GOCI影像;遥感反演;光学分类

Method for estimating the concentration of total suspended matter in lakes based on goci images using a classification system

ZHAO Lina¹, WANG Yannan¹, JIN Qi¹, FENG Chi¹, PAN Hongzhou¹, ZHANG Jie¹, LÜ Heng^{1,2,*}, LI Yunmei^{1,2}

1 Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, College of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

2 Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: Total suspended matter (TSM) is an important water quality indicator that can directly affect the propagation of light in water and influence the aquatic ecological environment, and ultimately determines the primary productivity of a lake. Empirical TSM concentration estimation models are often built for specific study areas, ignoring variation in the optical properties of water among diverse areas. In addition, common satellite sensors cannot be successfully used to monitor inland lakes owing to their temporal and spatial resolution. Taihu Lake, Chaohu Lake, Dianchi Lake, and Dongting Lake were selected as our study lakes, and an automatic two-step cluster method was applied for water classification based on simulated geostationary ocean color imager (GOCI) reflectance spectra. The results showed that the water samples could be classified into three types. The optical features of Water Type 1 were influenced by the TSM, the optical characteristics of Water Type 2 were influenced by both TSM and chlorophyll-a (Chl-a), and the optical properties of Water Type 3 were mainly

收稿日期:2014-11-15; 网络出版日期:2015-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41171269,41471282)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: henglu@ njnu.edu.cn

determined by Chl-a. Estimation models were then developed for each water type using a band ratio of B7/B4 for Water Type 1 and B7/(B8 + B4) for Water Types 2 and 3 to retrieve the concentration of suspended solids. The root mean-squared errors (RMSEs) and minimum absolute percentage errors (MAPEs) of Water Type 1 were 9.19 mg/L and 3%, and those of Water Type 3 were 5.63 mg/L and 13.97%, respectively, which were significantly lower than those estimated using methods that do not consider this classification. The RMSE and MAPE of Water Type 2 were slightly higher than those estimated with the general algorithm. The diurnal variation of the TSM concentration in Taihu Lake was studied based on the GOCI data acquired on May 13, 2013 using this classification method, and the results showed that the concentration of TSM was higher in the southwest than in the northeast. In addition, the area of higher TSM concentration in the southern region of the lake was reduced from 9:00 to 15:00 (Beijing Local Time).

Key Words: inland eutrophic lakes; total suspended matter (TSM); GOCI image; remote sensing retrieval; optical classification

悬浮物广泛分布于海洋、湖泊、河流等水体,其浓度是水质和水环境评价重要的参数之一,悬浮物含量的 多少直接影响到光在水体中的传播,进而影响着水生生态环境,最终决定了湖泊的初级生产力^[1]。悬浮物的 时空分布状况和运动规律的研究还直接关系到正确估算水土流失、航道港口的冲淤变化、近岸水产养殖开发 等重要问题^[2]。其次,水动力条件对悬浮颗粒物浓度分布以及悬浮和沉降过程起着非常重要的作用,通过悬 浮物的输运模拟,可以更加明确水动力条件如何变化^[3]。遥感技术因其覆盖范围广,成本低等优点被广泛应 用于悬浮物浓度时空分布监测中。用于监测总悬浮物浓度的遥感影像主要包括 TM 数据、SeaWiFS 数据、 MODIS 数据、MERIS 数据等,许多学者利用这些数据建立了多种估算总悬浮物浓度的方法^[49],并且取得了不 错的效果。

虽然 SeaWiFS, MODIS, MERIS 这些极轨海洋水色卫星可以较为准确的模拟悬浮物浓度, 但是在中低纬度 只能一天获取一景影像, 不能实现一天内悬浮物浓度变化的监测。GOCI (Geostationary Ocean Color Imager)是 韩国于 2010 年 6 月 27 日发射的全球第一颗地球同步轨道海洋水色卫星 COMS (Communication, Ocean and Meteorological Satellite)上所搭载的传感器, 其主要目的是从静止的平台上以高时间频率持续观测环朝鲜半岛 的海洋水色和研究海洋、陆地和大气迅速变化的过程。该传感器一天返回八景影像, 所以对于监测一天内悬 浮物浓度变化有着非常重要的意义^[10]。国内外已有学者利用 GOCI 影像或者 GOCI 影像与其他影像共同反 演近岸水体悬浮物浓度变化^[11-15]。而内陆湖泊与近岸水体所含物质有明显差异, GOCI 影像在监测内陆湖泊 的适用性还有待进一步验证。

在海洋遥感中,海水按其光学性质不同划分为一类水体和二类水体。但是在大多数情况下,这种分类方 法不能满足对光学特性复杂内陆浑浊水体的研究^[16],国内外诸学者均提出了许多针对不同水体的多种悬浮 物浓度反演模型,但是这些模型主要是针对特定水体,或某一水体的特定时期,对光学特征复杂多变的中国内 陆富营养化湖泊反演精度很不稳定,这就需要构建一种新方法对中国的内陆富营养化湖泊水体中悬浮物浓度 进行监测。

本研究以太湖、巢湖、滇池、洞庭湖 4 个湖区为研究区域,研究我国内陆水体光学分类特征,在此基础上基于 GOCI 影像数据建立不同光学特征的悬浮物浓度反演模型,利用光谱角匹配(SAM)方法,建立我国内陆湖 泊的悬浮物浓度先分类后反演的策略,这对于提高模型的通用性和精度具有重要的意义。

1 研究区域

本研究涉及4个湖区,分别为太湖,巢湖,滇池,洞庭湖,其类型、位置、面积、平均水深、以及采样点数如表 1所示。四大湖区均属于淡水湖,水深均小于10m,在不同的区域,湖泊的水质等级也有所差别。这4个湖泊 中,除了洞庭湖水质稍好,其他3个湖区的水质均不容乐观。 主1 研究区符合

			双I 前九匹间并				
		Table 1	Introduction to the stu	ıdy areas			
湖区名称 Name of the lake	类型 Type	位置 Location		面积/km ² Area	平均深度/m Average depth	样点数 Sample number	
太湖	淡水湖	30°55′—31°33′N	119°51′—120°36′E	2238	1.9	243	_
巢湖	淡水湖	30°25′—31°43′N	117°16′—117°51′E	760	3.0	27	
滇池	淡水湖	24°40′—25°02′N	102°36′—102°47′E	306	5.0	14	
洞庭湖	淡水湖	28°30′—30°20′N	110°40′—113°10′E	2820	6.4	47	

2 数据来源与研究方法

2.1 数据的获取

2.1.1 参数的测定

本次数据包括太湖 2006 年 11 月、2008 年 11 月、2009 年 4 月、2010 年 5 月、2010 年 8 月、2011 年 8 月、 2012 年 10 月、2013 年 5 月 8 期数据,巢湖 2009 年 6 月 1 期数据,滇池 2009 年 9 月 1 期数据,洞庭湖 2013 年 8 月 1 期数据,共 11 期数据包括 331 个样点。不同湖区的样点数如表 1 所示,对对应样点先进行光谱测量,然 后进行野外采样,将水样低温冷藏,并尽快送至实验室,测量总悬浮物浓度、无机悬浮物浓度、有机悬浮物浓 度、叶绿素浓度等指标。

总悬浮物、无机悬浮物、有机悬浮物浓度的测定采用常规称重法(GB11901-89标准)。

叶绿素浓度的测量采用热乙醇法,用 0.45μm 的 GF/F 滤膜过滤,冷冻 48h 后用 90%的热乙醇萃取,静置 4—6h 后利用分光光度计对萃取液进行测量。

测量遥感反射率光谱采用的是美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,具体做法是 将仪器在观测平面内向上旋转特定角度(使得天空光的观测天顶角等于水面测量时的观测角)。整个过程需 要测量的量包括:水体、灰板(反射率为 30%)以及天空光的辐射信息,每个参数测量 10 条的光谱信息。测量 水面反射光谱信息时,记录各采样点的坐标以及测量时的风速、风向等辅助信息^[17]。

2.1.2 遥感影像的选择及预处理

根据野外采样的时间,选择 2013 年 5 月 13 日 GOCI 影像,对影像进行辐射定标、几何校正,大气校正等操作。其中辐射定标是利用 GOCI 数据的辐射定标参数通过 ENVI 软件完成的。几何校正采用 GLT 几何校正 法。大气校正采用 6S 大气校正算法。

在经过上述预处理之后,利用太湖矢量边界对 GOCI 影像进行裁剪,然后利用 GOCI 影像第八波段(中心 波长为 865nm)和第六波段(中心波长为 680nm)求得 NDVI,结合目视解译确定大于零值的区域为水华区域, 提取出水华斑块。由于东太湖在 5 月份大部分被水草覆盖,所以将东太湖用水草区进行覆盖,不作为研究 区域。

2.2 研究方法

2.2.1 基于 GOCI 波段的水体光学分类方法

本研究包含湖区较多,水体光学特性较为复杂,在研究之前取得先验知识具有一定难度;有些学者采用的 经验常数主要是根据各自研究区的数据统计分析得到的^[18],对于其他研究区或同一研究区不同时间的采样 数据,经验常数也往往各不相同,因此监督分类方法不适合用于本研究。经过综合考虑,本研究采用较为简单 并且比较有效的非监督分类方法中两步聚类法对模拟 GOCI 波段 8 个波段进行分类,在前人研究中,有采用 聚类方法对高光谱数据进行分类,然后再将分别建立的模型应用于影像的方法^[19]。此种分类方法虽然在分 类后基本上可以应用于目前所有的遥感影像数据,但是此方法没有针对性,利用多光谱数据进行分类和利用 其中几个波段进行分类的结果一定是不同的。本文针对 GOCI 影像设置的 8 个波段进行分类,能更加有效合 理的应用于 GOCI 影像。首先利用 GOCI 影像的光谱响应函数将高光谱数据模拟到 GOCI 影像的八个波段,

5530

然后将这八个波段采用两步聚类法进行分类。之所以采用两步聚类法,是因为该方法不用提前输入分类数, 计算量小,完全根据光谱曲线大小和形状进行分类,而悬浮物浓度的大小以及悬浮物与叶绿素组合关系也反 应在光谱曲线上,所以利用该方法分类再进行建模会更加有效。

2.2.2 像元水体类别判定方法

从光谱形状和光谱亮度上对遥感影像进行分类是目前比较常用的分类方法。Kruse 1993 年提出了一种称为光谱角度匹配(SAM)的技术,通过由成像光谱数据提取的地物光谱曲线与光谱库(实验室或者野外测量的标准曲线)的光谱曲线的匹配分析而识别地物类别的技术,这种方法在区分光谱形状存在较大差异的水体类型时较为有效。常用的距离测度方法为计算一条给定的光谱曲线与标准曲线的欧氏距离。也有研究将光谱角匹配(SAM)和欧式距离结合起来有效提高分类的准确性^[20]。这种方法主要用于高光谱影像中成效显著。一般来说几种类型中,有些可以通过形状进行很好的区分,有些类型形状基本一致,但是大小存在差异的情况该方法较为适用。本研究中3种类型水体在形状上存在较大程度的差异(图1),但是在光谱亮度上的区别并不明显,尤其是第一类和第二类水体的光谱曲线有较大程度的重叠现象。综合分析,本研究采用光谱角匹配(SAM)技术对 GOCI 影像进行光学分类,将每一类型水体的平均光谱曲线作为标准光谱曲线,该方法表达如下:

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}} \qquad \theta \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]$$

式中, x_i 为第 *i* 波段平均光谱值, y_i 为第 *i* 波段遥感影像光谱值, θ 为光谱角度。

计算遥感影像光谱曲线与几种平均光谱曲线的角度,将影像水体类型归入θ值最小的一类。为了确定该 方法精度是否可靠,本研究先利用该方法对高光谱数据模拟后的 GOCI 数据进行分类,经过计算,用此类方法 错分的样点数为 26 个,占总样点的 7.9%,利用光谱角匹配(SAM)技术与欧式距离相结合的方法错分的样点 数为 32 个,占总样点的 9.7%,所以利用光谱角匹配(SAM)技术更加准确。

3 结果与分析

3.1 基于 GOCI 波段的水体分类结果

图 1 为利用 GOCI 影像八个波段进行分类后每一类水体的光谱曲线以及每一类水体光谱曲线平均值曲线,其中第一类数据 133 个,第二类数据 154 个,第三类数据 44 个。为了确定这三类水体的光谱特征主导因子,分别对 3 种水体类型的叶绿素 a 浓度和总悬浮物浓度的最大值、最小值,平均值以及有机悬浮物浓度与总 悬浮物浓度比值即 OSM/TSM 均值^[21]进行统计,结果如表 2 所示,从表中可以看出,第一类水体悬浮物浓度均 值最高,第三类水体叶绿素 a 浓度均值最高,结合 OSM/TSM 比值均值可以看出,第一类水体 OSM/TSM 最低, 为 0.20,第三类水体 OSM/TSM 最高,为 0.51。第二类水体叶绿素和悬浮物浓度都较少,但 OSM/TSM 均值介 于第一类水体和第三类水体之间,因为有机悬浮物主要是藻类,湖中藻类越多,叶绿素含量则越多,因此相对 而言可以简单认为第一类水体为悬浮物主导型,第二类水体为共同主导型,第三类水体为叶绿素主导型^[22]。

从图 1 中可以看出,3 种类型水体的遥感反射率曲线在形状和大小上都存在区别,第一类水体的光谱曲 线整体较高,第三类水体光谱曲线整体较低,第一类水体和第二类水体在 Band1—Band4 波段基本一致,区别 主要体现在 Band5—Band8,第二类水体的光谱曲线在 Band4 之后下降趋势较第一类水体下降趋势较快,第三 类水体的光谱曲线最为特殊,主要表现在 Band5—Band8,下降趋势较第一类和第二类小,这些波段特征主要 与水体中的叶绿素和悬浮物有关,悬浮物主要是以散射作用为主而叶绿素主要是以吸收作用为主,散射作用 增大遥感反射率而吸收作用降低遥感反射率,第一类水体主要受悬浮物浓度控制,因而整体反射率较高。第 三类主要受叶绿素浓度控制,在可见光主要表现出吸收特性,反射率值较低,而在近红外波段吸收降低,主要 表现为反射,所以反射率较高。水体的遥感反射率光谱曲线既能反映水体光学特性的主导因子,也能体现水



体组分浓度的大小,这为本研究中利用遥感反射率光谱曲线估算不同类型水体中悬浮物浓度奠定了基础。

图1 各类型水体的遥感反射率光谱曲线

Fig.1 Remote sensing reflectance spectrum of different water types

	表 2 3 种水体类型中悬浮物浓度及叶绿素 a 浓度以及 OSM/TSM 统计	
Table 2	Statistics of suspended solids concentration, chlorophyll-a concentration and OSM/TSM of different water	r type

水体类型 Water type	水质参数 The water quality parameters	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Average	OSM/TSM 均值 Average of OSM/TSM
1	叶绿素 a Chla/(µg/L)	2.05	85.93	20.74	0.20
	总悬浮物 TSM /(mg/L)	22.00	244.90	65.58	
2	叶绿素 a Chla/(μg/L)	0.55	140.17	19.69	0.30
	总悬浮物 TSM /(mg/L)	6.33	67.80	29.64	
3	叶绿素 a Chla/(μg/L)	13.50	270.30	92.91	0.51
	总悬浮物 TSM /(mg/L)	12.60	114.40	43.55	

OSM: Organic Suspended Matter 有机悬浮物; TSM: Total Suspended Matter 无机悬浮物

3.2 三类水体反演模型分析

本研究主要是利用 GOCI 影像对太湖悬浮物浓度进行遥感反演,因此针对 GOCI 数据特定的波段设置,参考其他学者所构建的悬浮物浓度遥感估算模型,分别从单波段、波段比值、多波段组合及经典的 TASSAN 波段 组合以及改进后的 TASSAN 线性模型等多种方法构建悬浮物浓度遥感估算模型^[23-29]。

第一类水体用 96 个数据进行建模,37 个数据进行验证;第二类水体用 103 个数据进行建模,51 个数据进 行验证;第三类水体用 32 个数据进行建模,12 个数据进行验证。3 种类型水体和全部数据的悬浮物浓度反演 模型以及 *R*²如表 3 所示。

从表 3 中可以看出,第一类水体的最佳波段组合因子为 B7/B4,第二类和第三类水体的最佳波段组合因 子为 B7/(B8+B4),这表明了 GOCI 数据的 B4、B7、B8 三个波段与悬浮物浓度有着密切的关系,B4 波段是绿 波段的反射峰,通常悬浮物浓度越高,这一波段的反射峰越高,而 B7 和 B8 波段为近红外波段,也是浑浊水体 悬浮物浓度反演最为有效的波段区间。3 种类型水体和未分类水体所利用的波段组合因子分子都是 B7,这 是由于 B7 与悬浮物浓度的相关性最高,比值模型中分母多为 555nm 或者包含 555nm,555nm 波段的选择则 可以消除水体中非悬浮物的影响。从 R²可以看出分类后第一类水体悬浮物浓度的反演精度有很大程度的提高,第三类水体 R²稍有提高,第二类水体 R²比未分类水体低,这是由于未分类水体中悬浮物浓度较高的样点明显增加了整体的相关性,造成部分样点悬浮物浓度估算结果存在较大偏差,正如分类后第一类水体的误差明显降低,所以不能仅凭 R²来评判模型的好坏。通过 RMSE 和 MAPE 的统计值(表4)可以看出,分类后第一类水体 RMSE 降低了 9.19 mg/L, MAPE 降低了 3%,第三类水体 RMSE 降低了 5.63 mg/L, MAPE 降低了 13.97%,只有第二类水体精度稍有降低,分类后 RMSE 升高了 0.17 mg/L, MAPE 升高了 0.99%。从图 2 中可以看出,虽然第一类水体在分类后反演的悬浮物浓度在高值区仍存在低估现象,但是相对于未分类数据反演的悬浮浓度精度有较大提高,第三类水体利用未分类数据所建立的模型对悬浮物浓度进行反演后,存在较大的高估现象,而分类后精度也大大提高。总体而言,悬浮物浓度和叶绿素浓度都较小的情况下,分类水体悬浮物浓度反演精度相差不大,正如第二类水体。当叶绿素浓度偏大或者悬浮物浓度偏大的情况下,分类明显有助于反演精度的提高。

_	Table 3	The estimation model of TSM estin	nation using classified and unclassified	d method	
	水体类型 Water Type	模型 Model	因子 Factor	R^2	
	1	$\log(tsm) = 1.9092x + 0.9693$	B7/B4	0.8284	
	2	log(tsm) = 3.5916x + 6346	B7/(B8+B4)	0.7180	
	3	$\log(tsm) = 2.4143x + 2.7497$	log(B7/(B8+B4))	0.7656	
	去分米 Unalagaitiad	log(tom) = 1.8488r + 2.6362	$\log(\frac{B7}{B8+B4})$	0.7465	

表 3 分类后及未分类水体悬浮物浓度最优估算模型汇总

	Table 4 Error statistics of estimation models for three water types					
	表 4 三类水体分类后误差统计					
	未分类 Unclassified	$\log(tsm) = 1.8488x + 2.6362$	log(B7/(B8+B4))	0.7465		
	3	$\log(tsm) = 2.4143x + 2.7497$	log(B7/(B8+B4))	0.7656		
$2 \qquad \log(tsm) = 3.5916x + 6346$		$\log(tsm) = 3.5916x + 6346$	B7/(B8+B4)	0.7180		

	Tuble 1 Error 5	unsues of estimation models it	of three water types	
水体类型 Water type	RMSE/(mg/L)	RMSE */(mg/L)	MAPE/%	MAPE*/%
1	15.12	24.31	18.30	21.31
2	6.05	5.88	18.26	17.27
3	11.72	17.35	21.57	35.54

*代表未分类模型反演的误差

3.3 基于 GOCI 影像数据的悬浮物浓度时空分布

本研究选取了2013年5月13日一天八景影像,对 影像进行辐射定标、几何校正、大气校正,然后进行水体 提取,水华提取。

图 3 给出的是利用光谱匹配得到的 2013 年 5 月 13 日 12 时影像的水体类型分布图,水草区已被覆盖,从图 中可以看出,2013 年 5 月 13 日当天 3 种类型的水体均 有分布,第一类和第二类水体分布最为广泛。第一类水 体主要分布于太湖西南部区域,第二类水体主要分布在 太湖中东部区域,第三类水体主要分布在竺山湾、梅梁 湾、贡湖湾,通过表 2 的统计可知,第三类水体是叶绿素 浓度较高的水体类型,从图中可以看出该区域边界正是 水华发生的区域。第三类水体以及水华斑块主要分布 在湖湾区是与湖湾的特殊条件相关联的,湖湾区受风浪 的扰动较小,藻类容易在此区域聚集并且漂浮在湖面 上层。





Fig. 2 The scatter plot of estimated TSM concentration and measured TSM concentration

图 4 为利用分类后建立的悬浮物浓度反演模型得 出的 2013 年 5 月 13 日 8:00—13:00 八景影像的悬浮 物浓度分布图,水草区已被覆盖,从图中可以看出,悬浮 物浓度在一天之内空间和时间上都发生了变化,这说明 利用高时间分辨率的影像研究悬浮物浓度在一天之中 变化是有必要的。悬浮物浓度整体西南部偏高东北部 偏低,并且随着时间变化,悬浮物浓度高的区域范围逐 渐缩小。8:00 到 9:00 悬浮物浓度变化较大,据研究 GOCI 8:00 的影像存在较大偏差,所以我们不对这幅影 像进行分析。9:00,太湖西南部悬浮物浓度大于 100mg/L,东北部悬浮物浓度大都介于 0-20 mg/L,悬 浮物浓度相差较为悬殊,在其后的时间里,悬浮物呈现 出逐渐混合的趋势,悬浮物浓度大于100 mg/L 区域范 围和悬浮物浓度小于20 mg/L的区域范围逐渐缩小,而 悬浮物浓度介于 20—80 mg/L 的区域范围逐渐扩大,到 14:00 和 15:00,太湖只有西部边界区域悬浮物浓度大 于 100 mg/L, 中部大部分区域悬浮物浓度介于 20—60 mg/L,贡湖湾以及梅梁湾湾口悬浮物浓度介于 0-20 mg/L_o



图 5 2013 平 5 月 15 日 12 时影像水体突至方布图 Fig.3 Distribution of water types on May 12, 2013

从整体来看,太湖悬浮物浓度从西北到东南呈现出递减的趋势,这是因为太湖的入湖河流如太滆运河,漕桥河、太滆南运河,烧香河、横塘河以及西氿、东氿和团氿等基本都位于太湖西部,一方面河流携带的悬浮物使 得河流入湖口处的悬浮物浓度较大,另一方面河流入湖扰动了底泥,也增大了悬浮物的浓度。另外,从实验当 天风速记录可以得知,2013 年 5 月 13 日当天风向为东风或者东南风,其中东南风居多,风速为 0.8—3.2m/s 之间,这也可以解释太湖悬浮物浓度为何从西北到东南呈现出递减趋势,风向是悬浮物迁移的重要因素。

4 结论与讨论

(1)从 GOCI 影像反演得到的 TSM 时空变化图可以得知,悬浮物在一天之中变化是非常显著的,所以如 MODIS、MERIS 等一天最多一景的影像来研究悬浮物浓度变化会存在误差,而 GOCI 影像从 8 时到 13 时返回 八景影像,对于一天内研究区内悬浮物浓度时空变化具有重要意义。尤其对于突发污染事件的监测,更加有效。但是 GOCI 的空间分辨能力为 500m,相对较低,将 GOCI 影像与高空间分辨率的影像结合应用,既发挥 GOCI 高时间分辨率的优势,又发挥其他影像如高分影像高空间分辨率的优势,可以对水色遥感反演有更加深 入的研究。

(2)本研究首先将 ASD 测得的高光谱数据利用光谱响应函数模拟到 GOCI 的 8 个波段,然后利用这 8 个 波段的数据进行分类,这样分类之后每类数据的平均值作为标准光谱曲线,可以对任何 GOCI 影像进行光谱 匹配并进行反演,比利用高光谱数据进行分类再应用到 GOCI 影像更加合理。但是标准光谱曲线在分类数据 改变的情况会发生变化,并不是固定的,只能依靠增加数据量,使得采样数据尽可能多的包含各种水体来进行 分类,这样标准光谱曲线更具有代表性。本研究利用太湖、巢湖、滇池、洞庭湖四大湖区共 331 个样点,时间跨 度也较大,颇具代表性。此外,发展其他更适合于 GOCI 影像的分类方法也是很有必要的。

(3) 遥感影像的大气校正一直是水色遥感的关键难题之一, GOCI 影像作为一种全新的水色遥感数据源, 目前还缺少比较成熟的大气校正算法, 能否对 GOCI 影像进行有效的大气校正, 直接关系到 GOCI 影像光谱匹 配的正确性及最终反演结果的准确性, 本研究虽然采用了目前常用的大气校正算法, 但有些波段校正效果仍





然不是十分理想,这可能会对最终的反演结果产生一定的影响。

参考文献(References):

- [1] 光洁, 韦玉春, 黄家柱, 李云梅, 闻建光, 郭建平. 分季节的太湖悬浮物遥感估测模型研究. 湖泊科学, 2007, 19(3): 241-249.
- [2] 陈晓翔, 丁晓英. 用 FY-1D 数据估算珠江口海域悬浮泥沙含量. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(S1): 194-196.
- [3] 江文胜,苏健,杨华,张英娟,姜华,王庆业,张凯,田恬. 渤海悬浮物浓度分布和水动力特征的关系. 海洋学报,2002,24(S1): 212-217.
- [4] 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.
- [5] 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. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(19): 3791-3806.
- [6] 吕恒,魏小鸿. 太湖悬浮物浓度的 MODIS 数据定量反演提取. 地球信息科学学报, 2008, 10(2): 151-155.

[7]	Eleveld M A, van der Wal D, van Kessel T. Estuarine suspended particulate matter concentrations from sun-synchronous satellite remote sensing:
	tidal and meteorological effects and biases. Remote Sensing of Environment, 2014, 143: 204-215.
[8]	Xi H Y, Zhang Y Z. Total suspended matter observation in the Pearl River estuary from in situ and MERIS data. Environmental Monitoring and
	Assessment, 2011, 177(1/4): 563-574.
[9]	Kaba E, Philpot W, Steenhuis T. Evaluating suitability of MODIS-Terra images for reproducing historic sediment concentrations in water bodies:
	Lake Tana, Ethiopia. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 286-297.
[10]	Ryu J H, Han H J, Cho S, Park Y J, Ahn Y H. Overview of geostationary ocean color imager (GOCI) and GOCI data processing system (GDPS).
	Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 223-233.
[11]	Choi J K, Park Y J, Lee B R, Eom J, Moon J E, Ryu J H. Application of the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) to mapping the temporal
	dynamics of coastal water turbidity. Remote Sensing of Environment, 2014, 146: 24-35.
[12]	He X Q, Bai Y, Pan D L, Huang N L, Dong X, Chen J S, Chen C T A, Cui Q F. Using geostationary satellite ocean color data to map the diurnal
	dynamics of suspended particulate matter in coastal waters. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 225-239.
[13]	Doxaran D, Lamquin N, Park Y J, Mazeran C, Ryu J H, Wang M H, Poteau A. Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids
	monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite data. Remote Sensing of Environment, 2014, 146: 36-48.
[14]	Vanhellemont Q, Neukermans G, Ruddick K. Synergy between polar-orbiting and geostationary sensors: remote sensing of the ocean at high spatial
	and high temporal resolution. Remote Sensing of Environment, 2014, 146(5):49-62.
[15]	Ruddick K, Vanhellemont Q, Yan J, Neukermans G, Wei G M, Shang S L. Variability of suspended particulate matter in the Bohai Sea from the
	geostationary Ocean Color Imager (GOCI). Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 331-345.
[16]	Arst H, Reinart A. Application of optical classifications to North European lakes. Aquatic Ecology, 2009, 43(4): 789-801.
[17]	刘忠华. 基于高分数据的太湖重点污染入湖河流叶绿素 a 浓度遥感反演[D]. 南京:南京师范大学, 2012: 1-77.
[18]	周晓宇, 孙德勇, 李云梅, 李俊生, 龚绍琦. 结合水体光学分类反演太湖总悬浮物浓度. 环境科学, 2013, 34(7): 2618-2627.
[19]	Shi K, Li Y M, Li L, Lu H, Song K S, Liu Z H, Xu Y F, Li Z C. Remote chlorophyll-a estimates for inland waters based on a cluster-based
	classification. Science of the Total Environment, 2013, 444: 1-15.
[20]	安斌,陈书海,严卫东. SAM 法在多光谱图像分类中的应用. 中国体视学与图像分析, 2005, 10(1):55-60.
[21]	Sun D Y, Li Y M, Wang Q, Le C F, Huang C C, Shi K. Development of optical criteria to discriminate various types of highly turbid lake waters.
	Hydrobiologia, 2011, 669(1): 83-104.
[22]	查桂红. 基于 GOCI 影像的内陆水体悬浮物浓度遥感估算研究[D]. 南京:南京师范大学, 2013: 1-75.
[23]	Zhang Y L, Shi K, Liu X H, Zhou Y Q, Qin B Q. Lake topography and wind waves determining seasonal-spatial dynamics of total suspended
	matter in turbid Lake Taihu, China: assessment using long-term high-resolution MERIS data. PLoS ONE, 2014, 9(5): e98055.
[24]	李渊,李云梅,施坤,吕恒,郭宇龙,周莉,刘阁.基于光谱分类的总悬浮物浓度估算.光谱学与光谱分析,2013,33(10):2721-2726.
[25]	Ma W, Xing Q, Chen C, Zhang Y, Yu D, Shi P. Using the normalized peak area of remote sensing reflectance in the near-infrared region to
	estimate total suspended matter. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(22): 7479-7486.
[26]	施坤, 李云梅, 刘忠华, 徐祎凡, 徐昕, 马万泉, 陆超平. 基于半分析方法的内陆湖泊水体总悬浮物浓度遥感估算研究. 环境科学, 2011,
	32(6): 1571-1580.
[27]	Zhang B, Li J, Shen Q, Chen D. A bio-optical model based method of estimating total suspended matter of Lake Taihu from near-infrared remote
	sensing reflectance. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 145(1/3), 339-347.
[28]	盖利亚,张继贤,刘正军.基于光谱特征的三峡坝区水色要素反演.测绘科学,2008,33(1):96-99.
[29]	宋庆君, 马荣华, 唐军武, 王晓梅. 秋季太湖悬浮物高光谱估算模型. 湖泊科学, 2008, 20(2): 196-20.
	http://www.ecologica.cn
	\mathbf{r} · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·