

基于 GOCI 影像反演湖泊悬浮物和叶绿素 a 含量的研究述评

胡耀躲, 窦同宇, 杨波

(湖南师范大学 资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410006)

摘要: 悬浮颗粒物和叶绿素 a 是两个重要的湖泊水质参数, 常用来衡量湖泊的富营养化程度。阐述了基于 GOCI 数据的湖泊悬浮颗粒物和叶绿素 a 浓度反演的研究现状, 分析了几种大气校正方法对于 GOCI 数据的适宜性, 发现基于 6S 模型的大气校正取得的效果最好。对比了 GOCI 的几种用于叶绿素 a 和悬浮颗粒物反演的模型, 发现基于经验方法的反演虽然简单易行, 但缺乏物理依据; 基于分析方法的反演机制明确, 但较难实现; 基于半分析方法的反演是统计水质参数的光谱特征, 建立遥感数据的波段组合与水质参数值之间的定量关系, 进而估算水质参数含量, 此方法较易实现且有一定物理意义。最后, 通过总结现状, 对利用 GOCI 反演水体指标的发展提出了一些自己的见解。

关键词: 湖泊; GOCI 影像; 反演; 叶绿素 a; 悬浮颗粒物

中图分类号: X87; X524

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0026-07

A review of research on retrieving the concentration of suspended particulate matter and chlorophyll a in lake based on GOCI images

HU Yaoduo, DOU Tongyu, YANG Bo

(College of Resource and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410006, China)

Abstract: The suspended particulate matter and chlorophyll - a, two important parameters of lake water quality, are often used to measure lake eutrophication extent. This paper introduced the research progress of estimating the concentration of suspended particulate matter and chlorophyll - a in lakes based on GOCI images, analyzed the suitability of several atmospheric correction methods for GOCI data, and found that the atmospheric correction based on 6S model had the best effect. Several inversion models of GOCI for chlorophyll a and suspended particulate matter were compared. The results showed that the inversion based on empirical method was simple and easy to implement, but it was lack of physical basis; the inversion based on the analysis method had clear mechanism, but was difficult to realize; the inversion based on semi-analysis method was to do the statistics for the spectral features of water quality parameters, to establish a quantitative relationship between water quality parameters and band combination of remote sensing data values, and then estimate the content of water quality parameters. This method was easy to realize and had certain physical meanings. Finally, the status quo was summarized and some own opinions about the development of the water indicators retrievals from GOCI data were put forward.

Key words: lake; GOCI (Geostationary Ocean Color Imager); retrieving; Chlorophyll a; suspended particulate matter

湖泊是重要的淡水资源存储地, 是人类生存和发展的
重要资源, 它与经济、社会可持续发展以及人

们的生活息息相关^[1]。近年来, 随着经济、社会的
不断发展, 湖泊水生态环境也遭到了严重的破坏, 导

收稿日期: 2016-12-17; 修回日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171342、41325001); 湖南省水利厅专项项目

作者简介: 胡耀躲(1993-), 男, 湖南安化人, 硕士研究生, 研究方向: 湖泊水色遥感。

通讯作者: 杨波(1974-), 男, 湖南张家界人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 从事资源环境遥感与灾害遥感方面的研究。

致湖泊富营养化过程加剧。不合理的湖泊资源开发以及湿地生态环境恶化都影响着人们的日常生活,同时也制约了社会、流域经济的可持续发展。要实现湖泊水资源的可持续利用,需要全面了解湖泊水体的各个指标以及动态变化,才能加快湖泊水体的综合治理^[2]。

悬浮颗粒物(Suspended Particulate Matter, SPM)和叶绿素 a(Chlorophyll - a, Chla)是湖泊水体的重要水质参数^[3]。SPM 是水中的重要的光学敏感物质之一,对湖泊环境、水体物质迁移转化,沉积物埋藏动力具有重要的意义。水中悬颗粒物含量的多少直接决定水体透明度、浑浊度、水色等光学性质^[4],进而影响湖泊水体初级生产力以及水生植被的生长^[5]。浮游藻类的长势能够反映湖泊的富营养化水平,一是藻类中 Chla 含量较高,Chla 浓度的高低可以反映出水中藻类物质含量的多少;二是 Chla 对光较敏感,在 440nm 附近的波段有明显的吸收峰,因此 Chla 浓度可以作为衡量湖泊富营养化的重要指标^[6]。定量反演 Chla 浓度能有效研究湖泊富营养化,对湖泛、有毒藻类疯长等有害湖泊生态系统的现象进行监测治理及预警^[7],对水生系统的初级生产力的估算以及水气界面碳循环的研究都具有重要意义^[8-9]。传统的湖泊 SPM 和 Chla 浓度估算主要依赖于实地水样监测与分析得到的数据,这种手段耗费的人力物力较大,并且只能对特定时间段某一有限区域进行观测,通过这种方法获取的 SPM 与 Chla 浓度值相对精确,但由于采样点的局限性,导致实验结果难以反映整个区域的水质情况,同时这种方法也难以实现水体 SPM 和 Chla 浓度的同步动态监测。遥感数据本身具有观测周期短,覆盖范围广和同步观测的优势。基于遥感数据的 SPM 和 Chla 浓度监测能够反映不同时空尺度的浓度动态变化。因此,利用遥感影像和实测数据建模定量反演 SPM 和 Chla 浓度的研究成为水色遥感领域研究的热点问题^[10]。

1 悬浮物和叶绿素 a 研究进展

研究早期,即在专门用于水色研究的传感器未研发之前,人们最初使用气象卫星(NOAA/AVHRR)和陆地卫星(Landsat MSS, SPOT)对海洋水体及内陆湖泊水体进行探测研究。随着科技的发展,目前已有很多机构在发射的卫星上装载了针对水色遥感的传感器,如 1978 年 NASA 发射的 Nimbus-7 卫星搭载的海岸带水色扫描仪(CZCS)^[11]、

1996 年日本的海洋水色和温度扫描仪(OCTS)以及 1997 年美国的 SeaStar 卫星搭载的海洋宽视场(SeaWiFS)等,这些传感器的数据被广泛应用于海洋水体的研究,且利用以上数据进行 SPM 浓度和 Chla 浓度反演时都取得了较高精度的结果。然而内陆湖泊水体面积相对较小,且湖泊水体的水质受人类生活废水和工业废水排放的影响较大,降雨也在一定程度上影响了湖泊水体的水质,所以在研究与人类生活密切相关的复杂的湖泊水体时,由于以上海洋水色传感器空间分辨率的局限性,这些传感器无法精确监测到湖泊水体的 SPM 浓度和 Chla 浓度空间细节信息,无法捕捉到湖泊局部的蓝藻水华爆发等水体污染事件^[12-13]。

近年来,随着研究的深入,国外用于湖泊 SPM 和 Chla 浓度反演的主流传感器有 Landsat TM/ETM^[14-15]、MODIS^[16-17]、MERIS^[18-19]以及 Landsat 8 OIL^[20-21]等,国内的水色遥感探测技术起步较晚,但是发展迅速,如今神舟 3 号上的中分辨率光谱成像仪(CMODIS)、HY-1A/1B 上的水色水温扫描仪(COCTS)及海岸带成像仪(CZI)等都是当前国际主流的水色遥感器^[22]。Landsat MSS 是最早用于内陆湖泊水质监测的数据^[23],Kloiber 等^[24]学者的研究表明 Landsat MSS 数据能够用于湖泊 SPM 和 CHL 浓度的监测,这为今后的内陆湖泊水质监测奠定了里程碑。

杨伟等^[25]在实验室内培养了绿藻后在暗室内测定了不同叶绿素和非藻类悬浮物浓度的水样的反射光谱,结合测定结果与 Landsat TM 数据,提出了一种基于生物光学模型的二类水体叶绿素浓度反演算法,结果表明利用 Landsat TM 数据的第 2、3、4 波段反射率数据的组合进行叶绿素浓度的反演得到的效果最好;Ma Ronghua^[26]等运用函数曲线,结合 Landsat ETM 数据的单波段以及不同波段组合与叶绿素、悬浮物含量分别进行回归分析,并选取两个精度最好的模型对叶绿素和悬浮物含量分别进行估测,实验结果表明对多光谱遥感而言,Landsat TM/ETM 数据能较精确的估测叶绿素和悬浮物浓度,但不是最适合的数据源;Moses 等^[27]结合 MERIS、MODIS 影像利用三波段模型对一些内陆湖泊、近岸海域的 Chla 浓度进行了估算,估算结果较为可靠;丘仲锋等^[28]发展了一种针对 MODIS 传感器的赤潮水体分布信息的提取方法,提取了东海部分海区赤潮水体遥感信息,并采用基于 MODIS 数据的 OC3 算法反演了 Chla 浓度,反演结果与实测数据接近,研

究发现赤潮水体提取结果与遥感反演的 Chla 浓度有较强的线性相关关系,与实际观测记录结果接近,结果表明定量反演 Chla 能确定赤潮可能发生的位置及范围;张毅博等^[29]利用 Landsat 8 OIL 数据,结合实地水质采样数据,构建了新安江水库总悬浮颗粒物浓度遥感估算模型,反演结果表明基于 Landsat 8 OIL 数据的总悬浮物反演模型是可行的;黄昌春等^[30]利用 MERIS 数据的第 1、3 波段进行了基于生物光学模型的太湖水体悬浮颗粒物反演,反演结果与实测结果较为一致,能较好地反映太湖总悬浮颗粒物的空间分布特征。

以上研究所用遥感数据都能很好地反演出湖泊水体的悬浮物和叶绿素 a 浓度,并较为准确地分析了湖泊水体的悬浮物和叶绿素的空间分布特征。但是其时间分辨率太低,MODIS 在中低纬度只能 1 天获取 1 景影像,其他传感器要多天才能获取 1 景影像,故不能实现在 1 天内对悬浮物浓度的变化进行监测,难以及时扑捉湖泊水体的污染事件,对整个污染过程不能形成有效监测及预警,实用性受到很大的限制^[13]。

2 GOCI 的研究进展

2.1 GOCI 数据简介

GOCI(Geostationary Ocean Color Imager)是搭载在 EADS Astrium 为韩国制造的全球第一颗多用途静止轨道卫星 COMS(Communication, Ocean and Meteorological Satellite)上的传感器,于 2010 年 6 月 27 日发射,2011 年 4 月开始提供数据,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。相比于其他可用于水色遥感的传感器影像,GOCI 获取的影像有着更高的时间分辨率以及信噪比。GOCI 卫星的观测中心为(130°E,36°N),空间分辨率为 0.5 km,覆盖范围达 2 500 km×2 500 km,覆盖了我国黄海、渤海、东海部分海域及东部沿海部分陆地(GOCI 覆盖范围见图 1)。

GOCI 可获取从可见光到近红外共 8 个波段的遥感物理量(GOCI 的波段信息及参数见表 1),每天可以提供获取的 8 景影像数据,时间分辨率为 1h,增加了数据获取的机会,大大降低了云层干扰造成误差和数据缺失的概率^[31]。所以利用 GOCI 监测 1d 内悬浮物浓度和叶绿素 a 浓度的变化有着非常重要的意义,使实时监测蓝藻等有害藻类爆发及后续治理成为可能^[32]。

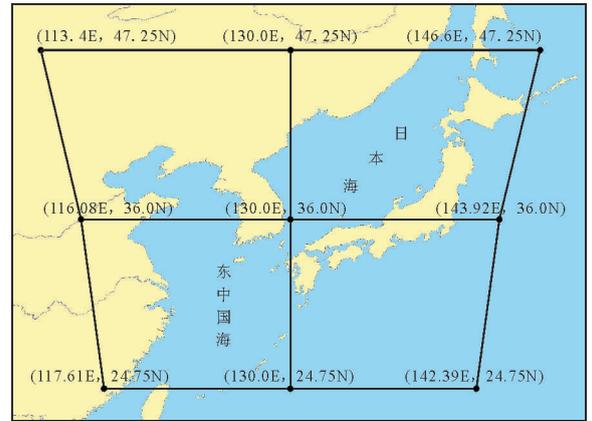


图 1 GOCI 覆盖范围

表 1 GOCI 的波段信息

波段	波段中心/nm	类型	信噪比	用途
B1	412	可见光	1077	黄色物质、浊度
B2	443	可见光	1199	叶绿素最大吸收
B3	490	可见光	1316	叶绿素及其他色素
B4	555	可见光	1223	浊度
B5	660	可见光	1192	荧光信号、悬浮泥沙
B6	680	可见光	1093	大气校正、荧光信号
B7	745	近红外	1107	大气校正、荧光信号基线
B8	865	近红外	1009	气溶胶光学厚度、水蒸气量

2.2 国内外研究动态

迄今为止,诸多学者利用 GOCI 数据对湖泊进行了研究。Ruddick 等^[33]利用 GOCI 数据对渤海的悬浮颗粒物浓度进行了反演,研究表明除了在当前数据集内没有进行掩膜的非常浑浊的海水外,GOCI 数据已经能够定性地研究泥沙动力学;冯驰等^[34]基于波段比值法利用 1 天 8 景 GOCI 影像数据反演得到了太湖叶绿素 a 浓度的日变化情况,实验结果的变化趋势与实测变化一致,结果表明利用 GOCI 卫星进行湖泊水体富营养化及蓝藻爆发过程的动态监测成为可能;Doxaran 等^[35]利用 GOCI 数据对中国东海的 SPM 浓度进行了估算,并用 MODIS 及 SeaWiFS 数据进行了验证,结果表明利用 GOCI 数据能较好地估算整个水域的 SPM 浓度;Duan Hongtao 等^[36]利用 GOCI 数据对中国太湖和东九湖等湖泊的 Chla 浓度进行了反演,反演结果与实测结果相符。以上研究表明,对于水体的 Chla 以及 SPM 浓度,利用 GOCI 数据反演都能得到较好的结果,加上 GOCI 数据的高时间分辨率,以及出于对新数据的充分利用,使得 GOCI 数据成为研究水体的热点数据源。

2.3 GOCI 大气校正方法

GOCI 数据用于湖泊水体研究的适用性得到了很多专家学者的肯定,但在数据的获取过程中,由于水体的吸收性强,导致反射率较低,GOCI 传感器接收到的水体信号仅占总辐射量的 10%,其余 90% 均受到来自于大气的瑞利散射、溶胶散射等因素的影响,故 GOCI 数据的大气校正效果对水体指标反演精度的高低起着关键性作用^[37]。目前常用的 GOCI 大气校正方法有 QUAC 模型、FLAASH 模型、6S 模型以及神经网络大气校正方法。QUAC 是 ITT Visual Information Solutions 公司开发的植入 ENVI 中的不需要配套信息的快速大气校正方法,QUAC 的优点是简单、运行速度快、方便实现^[38]。江彬彬等^[39]基于 QUAC 大气校正模块对 GOCI 数据进行了快速大气校正,并实现对杭州湾及邻近海域的悬浮物浓度反演。结果表明经 QUAC 大气校正后 GOCI 数据各波段的水面归一化离水辐射度的变化趋势与实测数据基本一致,研究发现当水体的悬浮泥沙含量普遍达到 200 ~ 400 mg/L 时,使用 QUAC 进行快速大气校正能够取得较好的实验结果^[39]。然而湖泊水体中悬浮泥沙含量不均匀,受外界影响因素较大,使用 QUAC 难以得到较好的结果。FLAASH 是波谱科学研究所在美国空气动力实验室的支持下所研发的一种适用于多光谱影像和高光谱影像的大气校正模块,该模块直接移植了 Modtran 中的辐射传输计算方法,能够根据不同类型的传感器设定其相应的参数,可以选取与研究区接近的大气模型和气溶胶模型,如今此模块已植入 ENVI 中。6S 模型是法国大气光学实验室在 5S 模型的基础上改进的,用 6S 模型进行大气校正时需要用户自定义输入 GOCI 影像的一些几何参数,可操作性相对于其他模型要复杂。查桂红^[40]基于太湖北部实测值对 2 天 6 景遥感影像的 FLAASH 和 6S 大气校正结果进行比较,研究发现 6S 模型的大气校正效果明显优于 FLAASH,但是用 6S 模型校正后 GOCI 影像的前 3 个波段的值误差较大,在构建水体指标的反演模型时避开这 3 个波段,对水体指标的反演精度产生的影响甚微;Son 等^[41]以及郭宇龙等^[42]利用 6S 模型进行大气校正估算瑞利反射率,从而对水体指标浓度进行反演,都得到了较好的结果。

2.4 GOCI 数据的反演模型

水质参数反演模型的构建对反演结果的精度起着决定性作用。现有的反演方法主要分为 3 类:基于经验的、基于分析的以及基于半分析的方法。经

验方法是通过建立遥感数据与地面监测的水质参数之间的统计关系来实现对水体 Chla 和 SPM 浓度等水质参数的遥感定量反演。Ostlund 等^[43]建立了小型机载光谱成像仪数据与悬浮物浓度之间的线性相关模型;曾银东等^[44]基于 SeaWiFS 数据利用 3 种标准经验算法对近珠江口的南海东北部海区进行了 Chla 浓度遥感反演,反演结果都能反映 Chla 的空间分布特征。经验的方法往往较为简单,由于缺乏机制研究,模型的区域性和季节性较强,很难得到较为统一的反演模型,模型的构建需要大量的实测水样数据,并且水质参数与遥感数据之间的事实相关性不能保证,所以该方法缺乏物理依据^[45-46]。分析方法是利用生物光学模型模拟得到水体中各组分吸收系数和后向散射系数与遥感反射率之间的关系,运用辐射传输模型模拟光在大气和水体中的吸收和散射过程,从而得到 Chla 和 SPM 的含量,此方法的机制较为明确,但实现起来较为复杂,目前湖泊研究应用此模型比较少^[47]。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,建立遥感数据的最佳波段或波段组合与水质参数值之间的定量关系,从而估算水质参数含量的方法,这种方法具有一定的物理意义^[48]。随着光学仪器的发展与 GOCI 数据的投入使用,使得基于半分析方法的 GOCI 数据遥感反演得到了广泛应用。Kim 等^[49]对 GOCI 数据的叶绿素反演方法进行了研究,研究发现对于光复杂的水域使用半分析方法的生物光学模型进行叶绿素反演时有较高的精度,并且可以同时估计叶绿素、悬浮颗粒物以及有色可溶性有机物(CDOM)。包颖等^[50]及施坤等^[45]分别利用 GOCI 数据对研究区的 Chla 浓度进行了基于半分析方法的分类建模反演,结果显示分类建模后的反演精度都得到了提高。以上研究表明,在实测光谱精度较高的情况下,基于半分析方法的 GOCI 数据水质参数遥感反演可以得到更稳定的结果,而基于半分析方法的 GOCI 数据分类建模反演得到的结果精度更高。

3 GOCI 研究态势及展望

3.1 研究态势

为了探索 GOCI 的研究态势,本文以 Web of Sciences 所有数据库为资料来源,用检索式 TS = GOCI AND TS = (chlorophyll a OR suspended matter) 进行文献主题关键字提取,提取了基于 GOCI 数据估算叶绿素 a 或悬浮物浓度的论文共 80 篇,其中外文文献 73 篇,中文文献 7 篇。利用 Web of Sci-

ences 的结果分析工具,以机构为关键字对一级机构 出现频次及所占百分比进行统计(表2)。

表2 基于 GOCI 的叶绿素 a 及悬浮物含量研究的高频研究机构统计(频次 ≥ 3)

研究机构	频次	频率/%	研究机构	频次	频率/%
KOREA INSTITUTE OF OCEAN SCIENCE TECHNOLOGY KIOST	22	27.50	EAST CHINA NORMAL UNIVERSITY	5	6.25
韩国海洋科学技术研究所			华中师范大学		
CHINESE ACADEMY OF SCIENCES	15	18.75	CHINESE UNIVERSITY OF HONG KONG	5	6.25
中国科学院			香港大学		
NANJING NORMAL UNIVERSITY	12	15.00	XIAMEN UNIVERSITY	3	3.75
南京师范大学			厦门大学		
UNIVERSITY OF WISCONSIN SYSTEM	9	11.25	UNIV S FLORIDA	3	3.75
威斯康星大学系统			南佛罗里达州大学		
STATE OCEANIC ADMINISTRATION	7	8.75	SEOUL NATIONAL UNIVERSITY	3	3.75
国家海洋局			首尔大学		
UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS SYSTEM	6	7.50	NATIONAL OCEANIC ATMOSPHERIC ADMIN NOAA USA	3	3.75
麻省大学系统			美国国家海洋大气管理		
NANJING UNIVERSITY	5	6.25	COLORADO STATE UNIV	3	3.75
南京大学			科罗拉多州立大学		

统计发现目前基于 GOCI 的叶绿素 a 及悬浮物估算研究以韩国海洋科学技术研究所、中国科学院及南京师范大学发文最多,也是研究最为前沿的机构。由于 GOCI 遥感器的成像范围限制,使得基于 GOCI 数据进行叶绿素 a 及悬浮物估算的研究机构主要集中在韩国和中国,与统计结果相符。基于表 2 统计结果发现中国利用 GOCI 数据研究叶绿素 a 及悬浮物含量的机构有 7 个,频次共计达 52 次,占总频次的 65%,说明了中国的科研能力在不断提高,处于世界领先地位。

核心作者对学科的发展动向以及研究领域的深度和广度都起着决定性的作用^[51]。通过系统分析该领域作者的发文情况,以确定核心作者,实现对该领域的跟踪研究。

统计发现(表 3),发文 5 篇及以上的作者有 7 位,共 60 篇,占发文总数的 75%,说明基于 GOCI 的悬浮物及叶绿素 a 含量的研究相对集中,研究领域已经形成了核心作者群。但是目前研究者较少,发文篇数达 4 篇的仅有 15 位作者,可见 GOCI 数据的利用率较低。

表3 作者发文篇数及所属机构的国家(发文篇数 ≥ 4)

编号	作者	篇数	国家	编号	作者	篇数	国家
1	RYU JOOHYUNG	14	韩国	9	MOON JEONGEON	4	韩国
2	PARK YOUNGJE	11	韩国	10	MIN JEEJUN	4	韩国
3	LI YUNMEI	11	中国	11	HUANG HAIQING	4	中国
4	CHOI JONGKUK	8	韩国	12	VANHELLEMONT QUINTEN	4	比利时
5	LU HENG	6	中国	13	HUANG CHANGCHUN	4	中国
6	AHN JAE HYUN	5	韩国	14	HAN HEEJEONG	4	韩国
7	RUDDICK KEVIN	5	比利时	15	AHN YUHWAN	4	韩国
8	YANG HAO	4	中国				

3.2 展望

GOCI 传感器自投入使用至今,获取的数据质量日趋稳定。GOCI 的出现,不仅给科研者带来了新数据,为湖泊研究提供了新的视觉角度,其高时间分辨率也使得湖泊的实时监测成为可能。基于 GOCI 影像的湖泊 TSM 和 Chla 浓度反演,能逐时监测湖泊水色变化,对湖泊水体的污染能得到及时治理及预警。迄今为止,国内利用 GOCI 数据对内陆湖泊进行研究的并不多,出于对新数据的充分利用,结合 GOCI 数据的高时间分辨率的优势,应该合理利用 GOCI 数据对国内内陆湖泊进行研究。

(1)从统计结果来看,目前基于 GOCI 数据的水色研究并不广泛,这是由 GOCI 传感器成像范围的局限性及 GOCI 数据大气校正效果的不确定性导致的。虽然基于 6S 模型的 GOCI 数据大气校正能得到较好的结果,但校正结果不稳定,精度有一定的局限性,每次使用 6S 模型时都需要输入许多参数,使用起来很复杂且易出错。目前 GOCI 数据的大气校正问题亟待解决,为了更好地实时监测湖泊水体的富营养化及蓝藻爆发,建立一个专门针对 GOCI 数据的大气校正模型尤为重要,不仅能简化大气校正过程,也能得到更优的大气校正效果,为今后湖泊水体污染的及时治理及预警提供精确的基础数据。

(2)对于 GOCI 数据的反演模型,用半分析模型能得到精度较高、较稳定的结果,但是半分析模型分析起来较复杂。目前很多学者选择使用经验模型进行研究,由于各研究区域的水文气象条件有差异,使得经验模型有区域局限性。是否可以建立一种适用范围广、精度较高且稳定的模型,有待进一步研究。

(3)虽然 GOCI 数据可以动态研究悬浮物长时间序列的变化,但沉积物再悬浮的过程与湖泊形态、风速以及持续的时间具有较强的关联性,因此不同湖区的沉积物再悬浮效果,以及 GOCI 对其监测能力的大小还不得而知,需要进一步的研究。同时,GOCI 悬浮颗粒物监测的结果与水动力模拟沉积物再悬浮监测结果之间相对较为割裂,需要进行深入的研究,将两者结果进行关联、结合,如利用数据同化的方法将卫星监测结果与水动力模型进行耦合等,仍需要进行大量的研究。

参考文献:

[1] Giardino C, Pepe M, Brivio P A, et al. Detecting chlorophyll, Secchi disk depth and surface temperature in a sub-alpine lake using Landsat imagery[J]. Science of the

Total Environment, 2001, 268(1-3): 19-29.

[2] 陈荷生. 太湖生态修复治理工程[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(2): 173-178.

[3] 李云亮, 张运林. 基于 TM 影像的太湖夏季悬浮物和叶绿素 a 浓度反演[J]. 遥感信息, 2008(6): 22-27+80.

[4] Cole B E, Cloern J E. An empirical model for estimating phytoplankton productivity in estuaries[J]. Marine Ecology Progress, 1987, 36(3): 299-305.

[5] Zhang Yunlin, Wu Zhixu, Liu Mingliang, et al. Thermal structure and response to long-term climatic changes in Lake Qiandaohu, a deep subtropical reservoir in China[J]. Limnology & Oceanography, 2014, 59(4): 1193-1202.

[6] Ritchie J C, Cooper C M, Schiebe F R. The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 33(2): 137-148.

[7] 尹球, 疏小舟, 徐兆安, 等. 湖泊水环境指标的超光谱响应特征分析[J]. 红外与毫米波学报, 2004, 23(6): 427-430+435.

[8] 于浩, 李宁. 湖泊碳循环及碳通量的估算方法[J]. 环境科技, 2008, 21(S2): 1-5.

[9] 丛丕福. 海洋叶绿素遥感反演及海洋初级生产力估算研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.

[10] Miller R L, Mckee B A. Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(1-2): 259-266.

[11] Hovis W A, Clark D K, Anderson F, et al. Nimbus-7 coastal zone color scanner: system description and initial imagery[J]. Science, 1980, 210(4465): 60-63.

[12] Arst H, Reinart A. Application of optical classifications to North European lakes[J]. Aquatic Ecology, 2009, 43(4): 789-801.

[13] 马荣华, 唐军武, 段洪涛, 等. 湖泊水色遥感研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(2): 143-158.

[14] Vincent R K, Qin Xiaoming, Mckay RML, et al. Phycocyanin detection from LANDSAT TM data for mapping cyanobacterial blooms in Lake Erie[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 89(3): 381-392.

[15] Han Luoheng, Jordan K J. Measuring algal chlorophyll concentration in Pensacola Bay, Florida using Landsat ETM+ data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(23): 5245-5254.

[16] Kubryakov A, Stanichny S, Zatsepin A. River plume dynamics in the Kara Sea from altimetry-based lagrangian model, satellite salinity and chlorophyll data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016(176): 177-187.

- [17] Zhang Minwei, Tang Junwu, Dong Qing, et al. Retrieval of total suspended matter concentration in the Yellow and East China Seas from MODIS imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(2): 392–403.
- [18] Ruddick K, Park Y, Nechad B. MERIS imagery over belgian coastal waters; Mapping of suspended particulate matter and chlorophyll – A [C]// . Proceedings of MERIS User Workshop (ESA SP – 549) , Frascati, Italy, 2003.
- [19] Zhang Yunlin, Shi Kun, Liu Xiaohan, et al. 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[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(5): e98055.
- [20] Watanabe F S Y, Alcántara E, Rodrigues T W P, et al. Estimation of Chlorophyll – a concentration and the trophic state of the Barra Bonita Hydroelectric Reservoir using OLI/Landsat – 8 Images[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2015, 12(9): 10391–10417.
- [21] Lymburner L, Botha E, Hestir E, et al. Landsat 8: Providing continuity and increased precision for measuring multi-decadal time series of total suspended matter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 185: 108–118.
- [22] 刘良明, 祝家东. 海洋水体遥感器发展趋势初探[J]. *遥感信息*, 2011(2): 111–119.
- [23] 周艺, 周伟奇, 王世新, 等. 遥感技术在内陆水体水质监测中的应用[J]. *水科学进展*, 2004, 15(3): 312–317.
- [24] Kloiber S M, Brezonik P L, Olmanson L G, et al. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 82(1): 38–47.
- [25] 杨伟, 陈晋, 松下文经. 基于生物光学模型的水体叶绿素浓度反演算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(1): 38–42.
- [26] Ma Ronghua, Dai Jinfang. Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurement in Taihu Lake, China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 26(13): 2779–2795.
- [27] Moses W J, Gitelson A A, Berdnikov S, et al. Estimation of chlorophyll – a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data-successes and challenges [J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 549–567.
- [28] 丘仲锋, 崔廷伟, 何宜军. 基于水体光谱特性的赤潮分布信息 MODIS 遥感提取[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(8): 2233–2237.
- [29] 张毅博, 张运林, 查勇, 等. 基于 Landsat 8 影像估算新安江水库总悬浮物浓度[J]. *环境科学*, 2015, 36(1): 56–63.
- [30] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 太湖水体悬浮颗粒物生物光学模型及 MERIS 数据反演[J]. *红外与毫米波学报*, 2012, 31(4): 367–374.
- [31] Gumsil Kang, Songdoug Kang, Sangsoon Yong, et al. Korea geostationary ocean color imager (KGOCI) [C]// . Geoscience and Remots Sensing Symposium, 2004.
- [32] 李冠男, 王林, 王祥, 等. 静止水色卫星 GOCI 及其应用进展[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(6): 966–971.
- [33] Ruddick K, Vanhellemont Q, Yan Jing, et al. Variability of suspended particulate matter in the Bohai Sea from the Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 331–345.
- [34] 冯驰, 金琦, 王艳楠, 等. 基于 GOCI 影像和水体光学分类的内陆湖泊叶绿素 a 浓度遥感估算[J]. *环境科学*, 2015, 36(5): 1557–1564.
- [35] Doxaran D, Lamquin N, Park Y J, et al. Retrieval of the seawater reflectance for suspended solids monitoring in the East China Sea using MODIS, MERIS and GOCI satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 146(5): 36–48.
- [36] Duan Hongtao, Ma Ronghua, Hu Chuanmin. Evaluation of remote sensing algorithms for cyanobacterial pigment retrievals during spring bloom formation in several lakes of East China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 126(11): 126–135.
- [37] Gong Shaoqi, Huang Jiazhu, Li Yunmei, et al. Comparison of atmospheric correction algorithms for TM image in inland waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(8): 2199–2210.
- [38] Gregor B, Adlergolden S M. Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11): 1371–1379.
- [39] 江彬彬, 张霄宇, 黄大松, 等. 基于 GOCI 的近岸高浓度悬浮泥沙遥感反演——以杭州湾及邻近海域为例[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2015, 42(2): 220–227.
- [40] 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.
- [41] Son Y K, Min J E, Ryu J H. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data [J]. *Ocean Science Journal*, 2012, 47(3): 359–375.
- [42] 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 等. 一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型[J]. *环境科学*, 2015, 36(9): 3175–3185.

- [6] 别玉静,杨乐,唐梦君,等. 三峡水库春季调度对香溪河水动力场的影响[J]. 人民黄河, 2013, 35(7): 63 - 65.
- [7] 余真真,王玲玲,戴会超,等. 三峡水库香溪河库湾水温分布特性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(1): 84 - 89.
- [8] 申宏伟. Delft3D 软件在水利工程中的数值模拟[J]. 水利科技与经济, 2005, 11(7): 440 - 441.
- [9] 王翠,孙英兰,张学庆. 基于 EFDC 模型的胶州湾三维潮流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 833 - 840.
- [10] 李洋,潘明祥,陈燕. 数值模型在长江流域一级河网中的模拟应用[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12F): 531 - 534.
- [11] 廖庚强. 基于 Delft3D 的柳河水动力与泥沙数值模拟研究[C]//. 清华大学水利水电工程系硕士毕业论文论集,北京:清华大学水利系, 2013.
- [12] 叶麟,黎道丰,唐涛,等. 香溪河水质空间分布特性研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1959 - 1962.
- [13] 范翻平. 基于 Delft3D 模型的鄱阳湖水动力模拟研究[D]. 南昌:江西师范大学, 2010.
- [14] Huybrechts N, Villaret C, Lyard F. Optimized predictive two-dimensional hydrodynamic model of the Gironde Estuary in France [J]. Journal of Waterway Port Coastal & Ocean Engineering, 2012, 138(4): 312 - 322.
- [15] Park S S, Lee Y S. A multiconstituent moving segment model for the water quality predictions in steep and shallow streams [J]. Ecological Modelling, 1996, 89(1 - 3): 121 - 131.
- [16] 李兴. 内蒙古乌梁素海水质动态数值模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2009.
- [17] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护, 2003, 19(3): 5 - 9.
- [18] Parinet B, Lhote A, Legube B. Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management - application to a tropical lake system [J]. Ecological Modelling, 2004, 178(3 - 4): 295 - 311.

(上接第 32 页)

- [43] Ostlund C, Flink P, Strömbeck N, et al. Mapping of the water quality of Lake Erken, Sweden, from imaging spectrometry and Landsat Thematic Mapper [J]. Science of the Total Environment, 2001, 268(1 - 3): 139 - 154.
- [44] 曾银东,商少凌,张彩云,等. 南海东北部基于标准经验算法的遥感叶绿素 a 反演结果比较分析[J]. 海洋科学, 2004, 28(8): 14 - 18.
- [45] 施坤,李云梅,刘忠华,等. 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[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1571 - 1580.
- [46] 吕恒,江南,李新国. 内陆湖泊的水质遥感监测研究[J]. 地球科学进展, 2005, 20(2): 185 - 192.
- [47] 李渊. 基于数据同化的太湖叶绿素浓度遥感估算[D]. 南京:南京师范大学, 2014.
- [48] 李云梅,黄家柱,陆皖宁,等. 基于分析模型的太湖悬浮物浓度遥感监测[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(2): 171 - 177.
- [49] Kim W, Moon J E, Park Y, et al. Evaluation of chlorophyll retrievals from Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) for the North - East Asian region [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 482 - 495.
- [50] 包颖,田庆久,陈旻,等. 基于 GOCI 影像分类的太湖水体叶绿素 a 浓度日变化分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2562 - 2567.
- [51] 程慧荣,张晓阳,孙坦,等. 基于 Web of Science 的本研究论文定量分析[J]. 现代图书情报技术, 2006, (11): 46 - 50.