

MERIS 遥感图像的太湖叶绿素浓度反演研究

朱江山,王得玉

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:近年来,水体富营养化是太湖水污染面临的主要问题,而叶绿素浓度是水体富营养化的重要指标,及时、有效地对太湖水体的叶绿素浓度进行监测和评价对太湖环境保护是十分必要的。而遥感作为低成本、大面积获取水体表层水质信息的手段,有着常规监测不具备的优势。为此,利用 MERIS 数据和太湖同步水质监测数据,建立了叶绿素基线荧光高度遥感反演模型;将其应用到经过几何校正和大气校正等预处理后的 MERIS 数据,获得了太湖叶绿素浓度遥感反演分布图像,结合太湖的水文情况及水污染特征对叶绿素遥感反演图像作了分析。遥感图像分析结果表明,MERIS 数据客观地反映了太湖水体叶绿素浓度的空间分布规律,与实测的太湖叶绿素浓度空间分布情况基本吻合。由此可见,基线荧光高度模型对于反演太湖叶绿素浓度分布是可行的。

关键词:MERIS;叶绿素;基线荧光高度;反演

中图分类号:TP393

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)04-0192-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.04.043

Retrieval Investigation of Chlorophyll-a Concentration in Taihu Lake Employing MERIS Remote Sensing Image

ZHU Jiang-shan, WANG De-yu

(College of Telecommunications & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Recently, eutrophication is the main problem of Taihu Lake's water pollution, and chlorophyll-a concentration is an important index of eutrophication. It is quite necessary for the protection of the Taihu Lake's environment to evaluate and monitor efficiently the lake's chlorophyll-a concentration in time. The surface water quality of large area could be monitored using remote sensing technique with low cost, beyond the ability of regular survey technique. Based on MERIS data and synchronous water quality monitoring data in Taihu Lake, the fluorescence line height remote sensing model has been developed which reflects the relationship between chlorophyll-a concentration and fluorescence line height. Then the model has been applied to MERIS data which is pre-processed through geometric correction, atmospheric correction, etc. An image about chlorophyll-a concentration distribution of Taihu Lake has been produced. Combined with the feature of the hydrological conditions and water pollution in Taihu Lake, the image about chlorophyll-a remote sensing retrieval is analyzed. The results objectively show that the MERIS image reflects the spatial distribution pattern of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake, corresponding to the measured chlorophyll-a concentration of space distribution. Therefore, it is feasible for the fluorescence line height model to retrieval the chlorophyll-a concentration in Taihu Lake.

Key words: MERIS; chlorophyll-a; fluorescence line height; retrieval

0 引言

随着太湖流域经济的快速发展,太湖的水体污染问题日趋恶化,主要表现在水体富营养化现象严重,严重的富营养化又导致蓝藻水华的大量爆发,影响了太湖水资源的利用。而叶绿素作为藻类的重要组成部分之一,其浓度常被作为衡量水体富营养化程度的重要

指标,所以叶绿素 a 浓度的测量能够最直接、最有效地评价水体富营养化程度,同时还能监测太湖水体的空间分布情况,有助于分析并逐步解决太湖水体富营养化问题^[1]。但是叶绿素浓度的大面积动态的现场测量受到了极大限制,遥感技术的出现使许多学者对于水体叶绿素浓度遥感反演研究作了大量研究,其中有经

收稿日期:2016-06-06

修回日期:2016-09-14

网络出版时间:2017-03-07

基金项目:江苏省自然科学基金-青年基金项目(BK20140868)

作者简介:朱江山(1990-),男,硕士研究生,研究方向为图像处理与图像通信技术;王得玉,博士,副教授,研究方向为水色遥感图像处理技术。

网络出版地址: <http://jns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170307.0922.066.html>

验模型、半经验模型^[2]和分析模型^[3]。

采用 ENVISAT 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 (MERIS) 获取数据产品。ENVISAT 是欧洲航空局于 2002 年 3 月发射的一颗高级地球观测卫星,飞行在太阳同步极地轨道约 800 km 的高空,可以提供海洋、陆地和大气层的测量。ENVISAT 有非常费时和创新的 有效载荷,可以用来保证欧洲航空局卫星数据测量的连续性。ENVISAT 数据可以支持地球科学的研究和环境变化演变的动态监测。

MERIS 传感器属于被动式扫描光谱仪,用所谓的“推帚式”的方法扫描地球表面。其中有 15 个波段可以由地面控制,每一个波段在 390 ~ 1 040 nm 光谱范围内有一个可编程的宽度和一个可编程的位置。其精细的光谱波段设置、独特的轨道处理功能、可调节的空间分辨率使其在水色传感器中占据绝对优势,在水色遥感研究中应用广泛^[4]。

MERIS 数据分为 3 级,即 Level 1b 数据(经辐射校正后的大气顶辐亮度)、Level 2b 数据(经大气校正后的海洋产品数据)、Level 3b 数据(经地理校正及平均后的海洋产品数据,分辨率降低)。采用 MERIS 2b 产品,分析太湖叶绿素 a 浓度空间分布规律。

采用荧光高度法模型,两位美国学者 Neville 和 Gower 从叶绿素光谱特征中发现^[5],叶绿素在中心波长 668 nm 处有明显的峰值,这一峰值的高度与叶绿素浓度有关,称为荧光发射峰。荧光高度模型通过叶绿素荧光波段任意侧的多个波段构建基线,估算叶绿素荧光产生的辐亮度值,它的输入为归一化离水辐射率,由于瑞利散射对荧光基线波段的影响较小,气溶胶散射在各个波段的影响可以认为近似相同。因此,叶绿素荧光算法与蓝绿波段比值算法相比,只需进行简单的大气校正和观测角的变化及太阳几何的影响校正,而不需要复杂的瑞利和气溶胶校正。

以太湖为实验区,以 MERIS 数据为实验数据,经过“辐射定标、几何校正、大气校正”等预处理后,建立荧光参数遥感反演模型,对太湖叶绿素 a 浓度进行了遥感反演估算研究。

1 数据来源及其处理

太湖是长江流域境内最大的湖泊,是中国五大淡水湖之一,水域面积为 2 338.1 km²,湖泊面积 2 427.8 km²,湖岸线全长 393.2 km,位于 30°55′40″~31°32′58″N,119°52′32″~120°36′10″E 之间^[6],见图 1。向中国科学院中国遥感卫星地面站申请了 2004 年 10 月 20 日太湖 22 个测量点叶绿素 a 浓度数据,数据主要均匀地分布在太湖北部区域梅梁湾附近,梅梁湾南北长约 64 km,东西宽约 14 km,平均水深 2 m 左右。

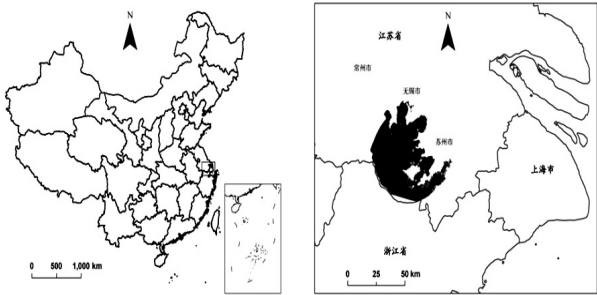


图 1 太湖位置示意图

所选用的 MERIS 遥感数据是 2004 年 10 月 20 日卫星经过太湖境内实时数据,可用于太湖叶绿素浓度的反演分析。MERIS 传感器 2b 产品是在 1b 产品基础上经过粗略几何纠正和大气校正后的数据,图像清晰度符合实验要求,但还需要进一步精校正。首先利用 BEAM5.0^[7] 软件,对影像进行预处理,具体流程如下:

- (1) 辐射量转换。将大气顶层辐射亮度转换为大气层顶的反射率。
- (2) 几何校正。选择一幅影像作为基准图像,将其他影像与基准图像进行几何配准,几何校正的同时进行投影转换。
- (3) 图像裁剪。裁剪的目的是将研究之外的区域去掉,按照太湖所在的经纬度范围进行裁剪,裁剪完成后还进行一定的掩膜处理,掩膜掉陆地和云信息。
- (4) 辐射校正。此次研究采用辐射传输模型对数据进行辐射校正。

2 叶绿素基线荧光高度模型建立与验证

2.1 模型构建

遥感反演模型的构建方法主要有 3 种:经验模型、半经验模型、分析模型。采用的基线荧光高度模型属于半经验模型,半经验模型是在已知的水色参数光谱条件下,利用最佳的波段组合数据与实测水色参数之间的统计关系进行水色参数估算。叶绿素基线荧光高度模型是指利用测量在一定光谱带中基线荧光的高度,以及高于基线附近的另外两个光谱波段的高度,并将所测量的基线荧光高度与实测叶绿素浓度的相关性建立的统计模型^[8]。叶绿素是浮游植物的重要成分之一,而一般浮游植物的叶绿素荧光测量波段为 680.5 nm,它的离水辐射率高于荧光波段附近的两个基线波段,这两个波段分别为 664 nm 和 708 nm。因此依据这三个波段,测量荧光中心波段的基线荧光高度,应用式 (1)^[9] 反演叶绿素浓度。

$$\text{Chl} - a = a + b * \text{FLH} \tag{1}$$

其中, Chl - a 为叶绿素浓度(单位为 mg/m³); FLH 为基线荧光高度(单位:dl); a、b 为系数。

而基线荧光高度的计算公式为：

$$FLH = L_2 - [L_1 + (L_1 - L_3) * \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_3}] \quad (2)$$

其中， λ_2 为中心波长， λ_1 、 λ_3 为选定的基线波长； L_1 、 L_2 、 L_3 为相应波段对应的辐射亮度值。

根据太湖叶绿素浓度实测数据与基线荧光高度建立线性回归关系,现场 22 个太湖采样点数据与卫星过境数据实时同步,用于构建基线荧光高度模型,同时计算实测叶绿素浓度与经过反演得到的叶绿素浓度的相对误差。

(1)计算太湖流域遥感数据的基线荧光高度,然后将太湖流域叶绿素浓度的实测数据与基线荧光高度进行线性回归分析,即要求实际值能够近均匀分布在回归分析模型所得到拟合值的两侧。利用 Matlab 软件^[10]求解式(1)中的参数 a 和 b ： $a = -8.242\ 4$ 、 $b = 0.002\ 1$ 。最后将所得结果代入式(1),得到太湖水域叶绿素浓度基线荧光高度算法反演公式：

$$Chl - a = -8.242\ 4 + 0.002\ 1FLH \quad (3)$$

(2)利用基线荧光高度模型对叶绿素 a 浓度进行线性回归分析,如图 2 所示。可以发现样点基本均匀分布在回归分析线的两侧,极个别样点偏离得较远,可能是受到云、泥沙等悬浮物,高等水深植物及湖泊水深的影响。

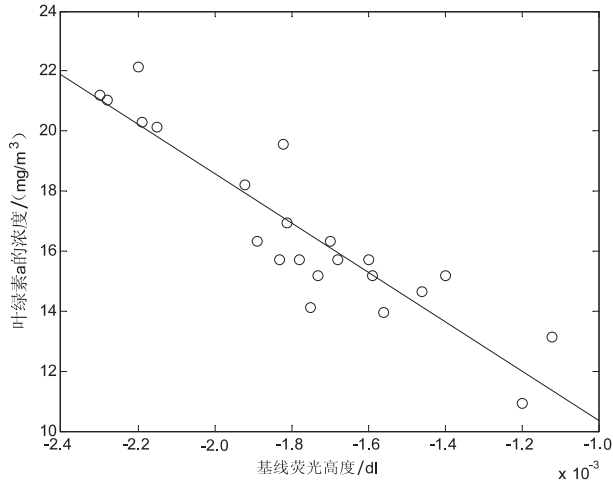


图 2 基线荧光高度法叶绿素浓度线性回归示意图

2.2 模型验证

利用 FLH 算法反演得到的叶绿素浓度与太湖 22 个样点的实测浓度进行比较,如表 1 所示。

结果表明:FLH 算法反演得到的太湖水域叶绿素浓度与太湖水域的实际浓度的相对误差在可接受范围内,但也出现了异常样点号数据,可能是因为测量点藻类大量聚集,真实数据浓度偏高,而通过 FLH 反演算法得到的叶绿素浓度是依据线性回归关系得到的数据,具有一般性,对于偶然性数据不具备准确的预测结果。 万方数据

表 1 FLH 反演算法与实测值间的相对误差

样点	经度	纬度	实测值/ (mg/m³)	反演值/ (mg/m³)	相对 误差/%
1#	120.213 9	31.398 61	10.29	10.93	6.2
2#	120.166 6	31.397 47	17.71	15.73	11.1
3#	120.133 1	31.397 01	17.66	16.32	7.6
4#	120.137 6	31.432 44	13.89	15.73	13.2
5#	120.144 8	31.461 77	18.73	15.17	19
6#	120.155 1	31.485 25	18.18	16.32	10.2
7#	120.137 6	31.500 58	22.14	21.14	4.5
8#	120.170 9	31.524 67	14.61	15.73	7.7
9#	120.197 0	31.524 25	21.79	20.14	7.5
10#	120.211 7	31.511 47	20.99	21.03	0.0019
11#	120.208 8	31.489 75	14.31	15.73	9.9
12#	120.203 2	31.440 25	15.18	15.17	0.00065
13#	120.3332	31.440 25	19.01	18.19	4.3
14#	120.367 4	31.450 75	19.81	20.28	2.3
15#	120.351 9	31.435 22	18.51	19.56	5.7
16#	120.334 3	31.415 56	12.72	13.95	9.7
17#	120.330 5	31.402 83	17.91	16.92	5.5
18#	120.294 6	31.385 94	14.79	15.17	2.6
19#	120.243 0	31.346 03	13.93	14.11	1.2
20#	120.244 6	31.376 64	10.33	13.13	27
21#	120.216 1	31.401 86	22.04	21	4.7
22#	120.198 7	31.423 01	17.54	14.63	16.5

3 太湖叶绿素 a 浓度的结果分析

3.1 反演结果

基线荧光模型反演得到的太湖水域叶绿素浓度图像如图 3 所示,其中颜色较深部分代表叶绿素分布区域,其余部分代表太湖一般水体部分。

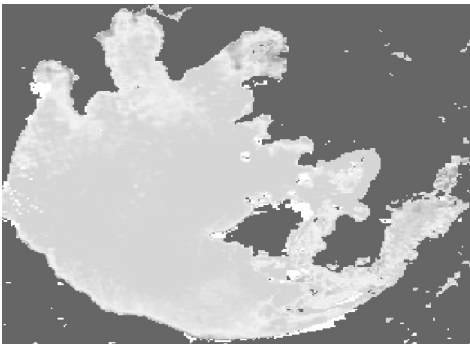


图 3 利用 FLH 算法反演太湖叶绿素浓度示意图

3.2 空间分布分析

由于太湖水域环境复杂,只选取 MERIS 数据在太湖北部区域代表叶绿素的水平。结果发现叶绿素 a 浓度在梅梁湾^[11]部分较高,湖心区和西部沿岸水域叶绿素 a 浓度也比较高,而叶绿素 a 浓度水平较低区域在贡湖水域部分。总体上太湖叶绿素浓度呈东南轻、西北重,湖心轻、沿岸水域重的分布格局。上述空间分布

特点与太湖周边污染源分布密切相关,由于太湖周边经济的快速发展,化肥、农药的大量使用,洗衣机的普及,含磷洗衣粉用量大大增加,工业废水的排放,加之围湖造田的影响,进入太湖中污染物的浓度超过了太湖自我进化的能力,导致浮游植物易于生长,藻类大量聚集,不利于生态环境循环。

所反演的叶绿素浓度的空间分布趋势与太湖流域水资源保护局^[12]提供的太湖水体质量监测结果基本一致。但是选取的测量点主要集中在北部区域,南部区域数据很少,因此反演得到的太湖叶绿素浓度与实际值之间还有一定的误差,若要减少 FLH 与太湖实测叶绿素浓度线性回归之间的误差,还必须获取大量南部区域的太湖水域叶绿素浓度实测数据值。

4 结束语

基于太湖实测叶绿素浓度数据和 MERIS 数据,构建了基线荧光高度模型,得出以下结论:

(1)利用基线荧光高度模型基本上能反演出太湖叶绿素浓度的分布格局。

(2)太湖叶绿素浓度的空间分布主要受氮、磷等营养物质排放源的分布影响。

因此,利用 MERIS 荧光高度算法进行太湖水体叶绿素 a 浓度的反演,对于太湖出现“水华”现象的监测具有重要的现实意义。今后的研究内容将侧重于对于不同季节和地域的叶绿素浓度估算进行参数校正^[13-15]。

参考文献:

[1] 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.

[2] 周冠华,柳钦火,马荣华,等. 基于半分析模型的波段最优化组合反演混浊太湖水体叶绿素[J]. 湖泊科学,2008,20(2):153-159.

[3] 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.

[4] 高中灵,汪小钦,陈云芝. MERIS 遥感数据特性及应用[J]. 海洋技术,2006,25(3):61-65.

[5] 宋 瑜,宋晓东,郭照冰,等. 利用 MERIS 产品数据反演太湖叶绿素 a 浓度研究[J]. 遥感信息,2009(4):19-24.

[6] 宋 瑜,宋晓东,江 洪. 太湖藻类的遥感监测研究[J]. 遥感信息,2008(4):102-108.

[7] Schroeder T, Schaale M, Fischer J. Retrieval of atmospheric and oceanic properties from MERIS measurements;a new Case-2 water processor for BEAM[J]. International Journal of Remote Sensing,2007,28(4):5627-5632.

[8] 赵冬至,张丰收,杜 飞,等. 不同藻类水体太阳激发的叶绿素荧光峰(SICF)特性研究[J]. 遥感学报,2005,9(3):265-270.

[9] 邢小罡,赵冬至,刘玉光,等. 叶绿素 a 荧光遥感研究进展[J]. 遥感学报,2007,11(1):137-144.

[10] 栾 颖. MATLAB R2013a 工程分析与仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2014.

[11] 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[J]. 遥感学报,2005,9(1):78-86.

[12] 太湖流域水资源保护局. 太湖流域及东南诸河省界水体水资源质量状况通报[N]. 经济日报,2007-02-09.

[13] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic state of lakes using field Spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg Lake District[J]. Remote Sensing of Environment,2000,73:227-235.

[14] Koponen S, Ruiz-Verdu A. Development of MERIS lake water algorithms[R]. [s. l.]:[s. n.],2008.

[15] Lyu H, Li X, Wang Y, et al. Evaluation of chlorophyll retrieval algorithms based on MERIS bands for optically varying eutrophic inland lakes[J]. Science of the Total Environment, 2015,530-531:373-382.

(上接第 191 页)

2013:290-294.

[7] Harold S, Vijayalakshmi A. Enhanced power control MAC protocol for wireless ad hoc networks[C]//Proceedings of the ICCSP. [s. l.]:[s. n.],2012:6-11.

[8] Vejarano G, Wang Dexiang, Dubey R, et al. Distributed throughput maximization in wireless networks using the stability region[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems,2014,25(7):1713-1723.

[9] 董荣胜,马争先,郭云川,等. 一种基于马尔可夫博弈的能量均衡路由算法[J]. 计算机学报,2013,36(7):1500-1508.

[10] 刘新华,李方敏,方艺霖,等. 一种基于链路级功率控制的

分簇路由算法[J]. 计算机科学,2012,39(9):64-70.

[11] Azad A K M, Kamruzzaman J. Energy balanced transmission policies for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing,2011,10(7):927-940.

[12] 刘 韬,李天瑞,谈文蓉,等. 基于分布式与联合优化的无线传感器网络数据汇聚机制[J]. 通信学报,2015,36(7):18-30.

[13] 牛建军,邓志东,李 超. 无线传感器网络分布式调度方法研究[J]. 自动化学报,2011,37(5):517-528.

[14] 沈 奔,秦 军,万 丽. 无线 Ad Hoc 网络中 AODV 路由算法的研究与改进[J]. 计算机技术与发展,2011,21(3):150-153.