

应用 MODIS 遥感数据监测巢湖水质*

吴敏, 王学军

(北京大学环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要:以巢湖为研究对象, 对 MODIS 的各个波段辐射率与水质参数叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和透明度进行拟合, 分析了 MODIS 各个波段辐射率的拟合在监测大型内陆湖泊水质中的可行性. 结果表明: MODIS 波段辐射率的组合能与巢湖水质参数进行较好的匹配, MODIS 波段 1 - 4 和 10 - 11 对于监测巢湖中叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和透明度有重要意义.

关键词: MODIS; 波段; 叶绿素 a; 悬浮物; 透明度; 巢湖

Application of Satellite MODIS in Monitoring the Water Quality of Lake Chaohu

WU Min & WANG Xuejun

(College of Environmental Sciences; Key Laboratory for Surface Processes, Ministry of Education; Peking University, Beijing 100871, P. R. China)

Abstract: Reliable, spatially covering and cost-efficient monitoring techniques of lakes are generally growing in importance as a consequence of increasing symptoms of the on-going eutrophication process. The Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) is significant in water monitoring because of free getting, high spectrum resolution and short observation periods. Lake Chaohu is one of the largest freshwater lakes of China and its pollution problem has attracted broad attentions. This research attempts to explore the possibility of predicting water quality using MODIS. In this paper, the water quality parameters such as the concentration of chlorophyll-a, suspended solids and secchi disk depth of Lake Chaohu have been studied. Simple regression and multivariate regression analysis were conducted to establish the relationship of water quality parameters with MODIS bands radiance. Results indicated that significant relationships were found between them ($p < 0.01$). Bands 1 - 4 and 10 - 11 are very important in monitoring the water quality.

Keywords: MODIS; bands radiance; chlorophyll-a; suspended solids; secchi disk depth; Lake Chaohu

巢湖流域位于我国长江中下游的安徽省中部, 湖泊形态呈鸟巢状, 面积 775 km², 平均湖深 2.69 m, 最大湖深 3.77 m, 是全国富营养化最为严重的淡水湖泊之一.

长期以来, 湖泊水质数据采集都依赖于常规监测, 耗时费力, 对于大面积的水域则难以进行同步测量, 难以满足监测要求. 遥感技术作为一种区域性水环境监测手段, 由于其快速、连续、动态、范围广、相对成本低等优点, 已广泛应用于大洋开阔水体、沿海以及湖泊水库的水质监测中. 到目前为止, TM 数据是内陆水体卫星遥感最常用的数据, 国内外利用 TM 数据对内陆水体水质遥感进行了大量的研究.

近年来, 高光谱技术发展迅速, 特别是中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 数据具有全球免费获取、光谱分辨率高、观测周期短等优势, 其在水质研究中越来越多的受到重视. Lefélier 等^[1]使用传统的叶绿素荧光通道的辐射率来估算叶绿素浓度, 研究结果显示在最适宜的观测条件下 MODIS 的荧光波段 13 - 15 可以很灵敏的检测到叶绿素在海洋表面 0.5mg/m³ 的浓度变化. Harma 等^[2]运用半经验法对 MODIS 与 MERIS 进行波段拟合, 来监测芬兰的 85 个湖泊和 105 个沿海水体监测点的水质状况, 发现 MODIS 数据波段组合 (L488 - L748)/(L667 - L748)、L667 - L748、(L531 - L748)/(L551 - L748)、L748 - L870 与叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和透明度等水质参数之间有着很好的相关性. Carder 等^[3]的研究结果显示, 来源于 MODIS 的半经验法

* 高等学校优秀青年教师教学科研奖励计划和国家自然科学基金项目 (40021101) 联合资助. 2004 - 11 - 01 收稿; 2005 - 01 - 28 收修改稿. 吴敏, 女, 1980 年生, 硕士研究生.

析算法 Chl. a3 相对于经验算法 Chl. a2 而言,与实测叶绿素浓度有更好的线性关系和一致性. Darecki 等^[4]在本质上保留 MODIS 的叶绿素经验产品的公式,将实测波罗的海的特殊参变量代入其中,对二类水体叶绿素浓度的反演进行了改良.

本文应用 MODIS 遥感数据结合巢湖水质实际测定数据,对 MODIS 在湖泊水质监测中的应用进行初探.

1 MODIS 数据介绍

中分辨率成像光谱仪(MODIS)是由 NASA 联合美国和国际多个科研机构历时 8 年、耗资 13 亿美元研制. 它是一种综合型探测器,共有 36 个观测通道,波谱从 0.4 μm 到 14 μm,其空间分辨率 1-2 波段为 250 m,3-7 波段为 500 m 和 8-36 波段为 1000 m,搭载在 Terra 和 Aqua 两颗卫星上的 MODIS 可以实现一天覆盖全球一次^[5]. MODIS 的综合性能超越了包括 AVHRR 在内的卫星观测系统.

图 1 列出了 0.4-0.9μm 波段范围内 MODIS 与 TM、AVHRR 的光谱参数,从中可以看出 MODIS 光谱分辨率与其它两种卫星相比有了很大提高.

2 数据获取与分析

2.1 实测数据获取

于 2002 年 8 月 31-9 月 2 日,在巢湖水面布置了 35 个采样点(图 2),进行了水质采样分析. 水质采样使用标准采样器,从水面至水下 30cm 处采集水样,现场进行水体透明度 SD 的测量,由合肥市环境监测中心站在采样当天进行了叶绿素 a、悬浮物分析. 叶绿素 a 采用丙酮萃取及分光光度计分析的方法进行测定,悬浮物浓度采用重量法测量. 在本文中,对 35 个采样点实行随机分组,25 个建模,10 个检验.

2.2 卫星数据获取

本文中所用 MODIS 数据是从 NASA 网站上下下载的 L-1B 数据,是与巢湖采样时间同步的 2002 年 9 月 2 日的 Terra-MODIS 数据. 对数据的选取要求湖泊上空晴朗无云,能见度高. 对数据进行前处理的过程中,对 MODIS 数据采用数据中自带的经纬度信息进行几何校正,校正后的位置精度大约为 0.5 个像素,具体的校正方法参见文献^[6].

2.3 数据分析

取 MODIS 各波段辐射率值($W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$)进行组合;讨论各波段辐射率组合与巢湖水质参数之间的相关性,对相关性好的建立一元线性回归模型;在此基础上,进行了多元线性回归分析,对于显著相关($\alpha = 0.05$)的波段辐射率组合不在同一个方程式中出现,以排除多重共线性影响,对水质参数和波段辐射率组合建立了多元线性回归模型;最后对所建模型进行检验.

3 结果

在内陆湖泊水质研究中,通常选择光学波长在可见光到近红外范围能比较好的反映水质参数^[7]. 本文根据文献对 TM、AVHRR、SPOT、IRS-1B、CASI 等多种图像各波段数据与水质参数的关系研究中,选取 MODIS 中与上述图像波长范围相对应的常用的波段组合,来研究 MODIS 波段辐射率组合与水质参数的关系.

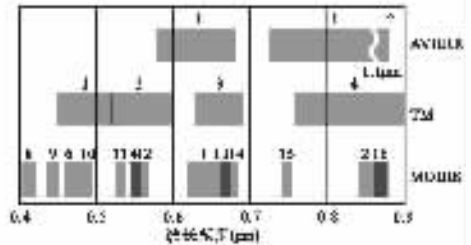


图 1 MODIS 与 TM、AVHRR 卫星的光谱范围
Fig. 1 Spectral range of satellites MODIS and TM、AVHRR

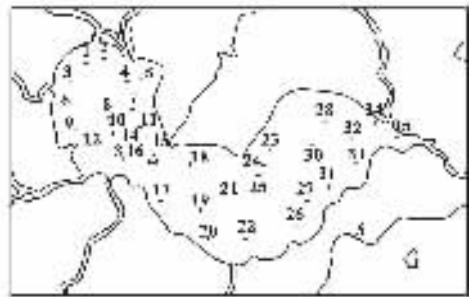


图 2 2002 年 9 月巢湖采样点分布
Fig. 2 Sampling locations in Lake Chaohu on Sept. 2002

3.1 水质参数与波段辐射率拟合的相关关系和一元线性回归模型

尝试了水质参数叶绿素 a 浓度、悬浮物浓度和透明度与 90 余种波段辐射率组合之间相关关系分析, 表 1 中列出了相关性较为显著的 26 种. 表中显示 $\ln(B_{11}/B_3)$, $(B_3 - B_1)/B_2$, $\ln(B_1 + B_2)$, $B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11})$, $\ln[B_3/(B_1 + B_3 + B_4)]$ 与叶绿素 a 浓度的自然对数值的相关系数达到 0.75 以上 ($p < 0.01$); $\ln(B_4/B_3)$, $\ln(B_{11}/B_3)$, $\ln(B_{11}/B_{10})$, $(B_3 - B_4)/B_3$, $B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11})$ 与悬浮物浓度自然对数值的相关系数大于 0.70 ($p < 0.01$); 透明度的自然对数值与 $\ln(B_1 + B_2)$, $B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11})$ 的相关系数达到 0.90 以上 ($p < 0.01$) (B_i 为第 i 波段辐射率值). 式 (1) - (3) 分别为三个水质参数与波段辐射率之间最好的拟合关系:

$$\ln(\text{Chla}) = 41.362 - 95.677 B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11}) \quad (R^2 = 0.61) \quad (1)$$

$$\ln(\text{SS}) = 13.296 \ln(B_{11}/B_3) + 5.418 \quad (R^2 = 0.53) \quad (2)$$

$$\ln(\text{SD}) = 54.337 B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11}) - 17.851 \quad (R^2 = 0.86) \quad (3)$$

表 1 巢湖水质参数与波段辐射率组合间的相关分析

Tab. 1 Combinations of MODIS bands radiance correlation with water quality parameters of Lake Chaohu

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	S_{13}
lnChla	0.632	0.646	0.506	0.740	0.503	0.744	0.552	0.509	-0.706	0.653	0.737	0.715	0.770
sig.	0.001	0.000	0.010	0.000	0.010	0.000	0.004	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
lnSS	0.555	0.581	0.441	0.695	0.438	0.683	0.531	0.503	-0.686	0.575	0.713	0.698	0.731
sig.	0.004	0.002	0.028	0.000	0.029	0.000	0.006	0.010	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000
lnSD	-0.775	-0.769	-0.607	-0.864	-0.611	-0.873	-0.664	-0.615	0.806	-0.806	-0.850	-0.816	-0.893
sig.	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}	S_{19}	S_{20}	S_{21}	S_{22}	S_{23}	S_{24}	S_{25}	S_{26}
lnChla	0.733	-0.752	-0.735	-0.736	-0.708	0.718	0.756	0.679	-0.779	0.537	-0.752	0.560	0.698
sig.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.004	0.000
lnSS	0.702	-0.654	-0.709	-0.664	-0.679	0.654	0.684	0.613	-0.712	0.451	-0.695	0.586	0.627
sig.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.024	0.000	0.002	0.001
lnSD	-0.836	0.898	0.845	0.890	0.802	-0.861	-0.916	-0.810	0.927	-0.685	0.894	-0.611	-0.859
sig.	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000

表中: $S_1 = \ln B_1$; $S_2 = \ln B_2$; $S_3 = \ln B_3$; $S_4 = \ln B_4$; $S_5 = \ln B_{10}$; $S_6 = \ln B_{11}$; $S_7 = \ln B_{16}$; $S_8 = B_{12} * B_{12}$; $S_9 = B_3 - B_4$; $S_{10} = \ln(B_1/B_3)$; $S_{11} = \ln(B_4/B_3)$; $S_{12} = \ln(B_4/B_{10})$; $S_{13} = \ln(B_{11}/B_3)$; $S_{14} = \ln(B_{11}/B_{10})$; $S_{15} = (B_3 - B_1)/B_2$; $S_{16} = (B_3 - B_4)/B_3$; $S_{17} = (B_3 - B_1)/B_{11}$; $S_{18} = (B_{10} - B_{11})/B_{10}$; $S_{19} = \ln(B_1 * B_4/B_3)$; $S_{20} = \ln(B_1 + B_2)$; $S_{21} = \ln(B_1 + B_3 + B_4)$; $S_{22} = B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11})$; $S_{23} = \ln[B_1/(B_1 + B_3 + B_4)]$; $S_{24} = \ln[B_3/(B_1 + B_3 + B_4)]$; $S_{25} = \ln[B_4/(B_1 + B_3 + B_4)]$; $S_{26} = \ln[(B_1 + B_2)/(B_3 + B_4)]$.

3.2 水质参数与波段辐射率拟合之间的多元回归模型

对进行多元回归的各项做相关分析, 排除自相关波段辐射率组合后, 对水质参数和波段辐射率组合建立了多元回归模型:

$$\ln(\text{Chla}) = 23.959 \ln(B_{11}/B_{10}) + 7.989 \ln[B_1/(B_1 + B_3 + B_4)] + 16.802 \quad (R^2 = 0.63) \quad (4)$$

$$\ln(\text{SS}) = 3.765 \ln B_{10} + 12.18 \ln(B_{11}/B_{10}) - 12.727 \quad (R^2 = 0.54) \quad (5)$$

$$\ln(\text{SD}) = -12.517 \ln(B_{11}/B_{10}) - 5.325 \ln[B_1/(B_1 + B_3 + B_4)] - 5.059 \quad (R^2 = 0.88) \quad (6)$$

3.3 模型检验

将 10 个检验点代入以上回归方程中, 对三个水质参数在一元线性回归模型及多元回归模型中的预测值与实测值进行相关性分析 (图 3). 对于叶绿素 a 浓度的自然对数值, 模型 (1) 与模型 (4) 的预测值与实测值的相关系数分别为 0.87 和 0.91 ($p < 0.01$); 对于悬浮物浓度的自然对数值, 模型 (2) 与模型 (5) 的预测值对于实测值的相关系数分别为 0.92 和 0.93 ($p < 0.01$), 对于透明度的自然对数值, 模型 (3) 与模型 (6) 的预测值对于实测值的相关系数分别为 0.92 和 0.93 ($p < 0.01$), 表明了以上各模型良好的预测能力.

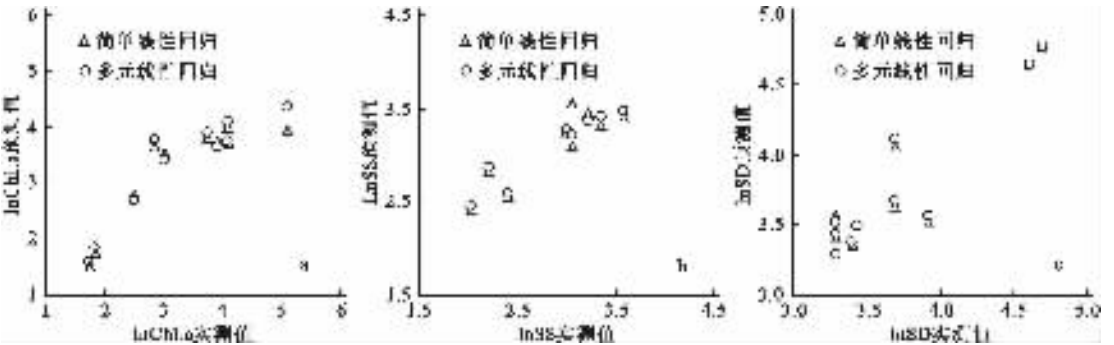


图3 应用两种回归方法对叶绿素 a 浓度(a)、悬浮物浓度(b)和透明度(c)的自然对数值的预测值与实测值的比较
Fig.3 Relationships between measured and predicted water quality parameters

4 结语

波段辐射率的拟合研究表明,MODIS 数据不仅可以用于海洋,而且可以用于内陆水体水质监测. 由于 MODIS 的高光谱分辨率,对水质参数的反应比较灵敏;而且观测周期短,数据可以免费获得,可以对对象进行快速连续的监测;但是由于空间分辨率相对较低,对中小型湖泊适用性较差,比较适用于大型湖泊. 总之,MODIS 遥感有能力提供综合信息和建立一个相关的数据库系统来监测大型湖泊水质参数.

由于遥感波长在可见光到近红外范围内能比较好的反映水质参数,本文选取了 MODIS 数据在此波长范围内的 1-4 波段和 8-16 波段进行研究. 本研究显示:在 MODIS 的波段选择上,1,3,4,10,11 波段辐射率之间的组合与湖泊的水质参数能表现出很好相关性,Baban 在使用 TM 图像监测水质参数时,也得到类似结论^[8]. 波段 2,8-9,13-16 之间的组合没有显示出显著的相关性,可能是由于:波段 2,15,16 对水体的穿透能力较低;波段 8,9 是黄色物质的吸收波段,其他信息受到很大影响;波段 13,14 是测量叶绿素的荧光波段,但是在获取到的数值中该波段反映的辐射率值基本没有变化.

研究表明, $B_{10}/(B_1 + B_{10} + B_{11})$ 显示出与叶绿素 a 浓度和透明度的自然对数值有显著的相关性. 在 TM 相关方面的研究中,Ekstrand 发现 $T_1/(T_1 + T_2 + T_3)$ 与叶绿素 a 浓度有着显著的相关性^[9],正好与文中 MODIS 对应波长范围的波段辐射率组合相对应.

5 参考文献

- [1] Lefélier R M, Abbott M R. An analysis of chlorophyll fluorescence algorithms for the moderate resolution imaging spectrometer (MODIS). *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 215 - 223.
- [2] Harma P, Vepsäläinen J, Hannonen T, et al. Detection of water quality using simulated satellite data and semi-empirical algorithms in Finland. *The Science of the Total Environment*, 2001, **268**: 107 - 121.
- [3] Carder K L, Chen F R, Cannizzaro J P, et al. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-a. *Advances in Space Research*, 2004, **33**: 1152 - 1159.
- [4] Darecki M, Stramski D. An evaluation of MODIS and SeaWiFS bio-optical algorithms in the Baltic Sea. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **89**: 326 - 350.
- [5] 刘玉洁, 杨忠东. MODIS 遥感信息处理原理与算法. 北京: 科学出版社, 2001.
- [6] 郭广猛. 关于 MODIS 卫星数据的几何校正方法. *遥感信息*, 2002, (3): 26 - 28.
- [7] Brivio P A, Giardino C, Zilioli E. Determination of chlorophyll concentration changes in Lake Garda using an image-based radiative transfer code for Landsat TM images. *Int J Remote Sensing*, 2001, **22**(2&3): 487 - 502.
- [8] Baban S J. detecting water quality parameters in the Norfolk Broads, U. K., using Landsat imagery. *Int J Remote Sensing*, 1993, **14**(7): 1247 - 1267.
- [9] Ekstrand S. Landsat TM based quantification of chlorophyll-a during algae blooms in coastal waters. *Int J Remote Sensing*, 1992, **13**(10): 1913 - 1926.