

基于 TM 影像的克钦湖叶绿素 a 浓度反演

李 苗, 臧淑英*, 吴长山

(黑龙江省普通高等学校地理环境遥感监测重点实验室, 哈尔滨师范大学, 哈尔滨 150025)

摘 要: 为了研究扎龙湿地克钦湖的富营养化情况, 利用准同步实测数据和 Landsat-5/TM 数据反演整个克钦湖的叶绿素浓度。在对叶绿素光谱特征研究的基础上, 选取 TM2、TM3、TM4 单波段及其 11 种波段组合与叶绿素 a 浓度进行相关性分析, 将相关系数较大的 3 种波段组合分别建模, 得到 3 个估算叶绿素浓度的反演模型, 选择精度较高的模型 $Y=41.57 \times (TM3+TM4)-0.697$ 反演了克钦湖叶绿素 a 浓度。通过分析结果得出: 克钦湖的水体叶绿素浓度分布总体上是南湖比较低, 北湖较高, 大的趋势是由南向北递增。这与准同步水质采样数据基本吻合, 反映了克钦湖富营养化状态的实际情况。该模型可以较好地估测克钦湖水体叶绿素 a 的浓度, 可以满足该水体叶绿素 a 含量定量监测的需要, 对水体水质的动态监测和预警提供理论依据。

关键词: 叶绿素 a; 遥感技术; 克钦湖; TM 数据

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)12-2473-07

Inversion of Chlorophyll-a Concentration Based on TM Remote Sensing Image in Keqin Lake

LI Miao, ZANG Shu-ying*, WU Chang-shan

(Key Laboratory of Remote Sensing Monitoring of Geographic Environment, College of Heilongjiang Province, Harbin Normal University, Harbin 150025, China)

Abstract: The concentration of chlorophyll-a not only reflect the water plankton but also the distribution of primary productivity. The change of concentration is often used as a basic indicator to measure the extent of water eutrophication. In order to investigate the eutrophication of Keqin Lake, chlorophyll-a concentration was inversed based on the quasi-synchronous measured data and Landsat-5/TM image of Keqin Lake. By researching the spectral characteristics of chlorophyll-a, correlation analysis was made between the chlorophyll-a concentration and the 14 kinds of combinations of TM2, TM3 and TM4. Then 3 models were established by results which correlation coefficient were higher. Finally, chlorophyll-a concentration of Keqin Lake was inversed by suitable model which was $Y=41.57 \times (TM3+TM4)-0.697$. The results showed that chlorophyll-a concentration of Keqin Lake was relatively low on the whole south lake, high on the north lake and with a increasing tendency from south to north, which was consistent with the quasi-synchronous measured data, and actually reflect the eutrophication situation of Keqin Lake. Which caused by there are much cultivated land around north lake, and much reed which can purify the water nearby south lake. The model could accurately estimate chlorophyll-a concentration of Keqin Lake, and could satisfy the requirement for quantitative monitoring of chlorophyll-a concentration. This researching will provide theoretical basis to dynamics monitoring and early warning of water quality.

Keywords: chlorophyll-a; remote sensing; Keqin Lake; TM data

叶绿素 a 含量变化作为衡量水体富营养化程度的一个基本指标。通过测定叶绿素 a 浓度反应水体中藻类的现存量, 来评价水体富营养化程度是目前水环

境监测中直接有效的方法之一^[1-3]。按照叶绿素 a 浓度的常规测定方法, 首先需要采集水样, 把水样带回实验室对其进行前期处理, 再对水样进行分析测定, 才能获得水样的叶绿素浓度^[4]。这种方法的缺点是需要耗费大量的物力、人力, 而且逐点采样的测量方式无法实现大面积水域的同步测量^[5]。随着科技的发展, 利用遥感技术监测水质可以弥补常规实验方法的缺陷。本研究针对遥感技术的动态性、宏观性和实时性等特点, 利用遥感技术反演克钦湖中叶绿素 a 浓度^[6], 以便

收稿日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030743, 41171322); 黑龙江省高等学校科技创新团队建设计划项目(2010td10)

作者简介: 李 苗(1984—), 女, 汉, 博士研究生, 从事遥感与生态环境研究。E-mail: 15045132941@163.com

* 通信作者: 臧淑英 E-mail: zsy6311@163.com

及时、快速地监测整个湖水中叶绿素分布情况。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扎龙湿地位于东经 $123^{\circ}47' \sim 124^{\circ}37'$ 、北纬 $46^{\circ}52' \sim 47^{\circ}32'$ 之间,松嫩平原东北部,乌裕尔河下游,齐齐哈尔市东南部,富裕县、泰来县和杜尔伯特蒙古族自治县、林甸县境内,总面积约 2100 km^2 。克钦湖位于东经 $124^{\circ}16' \sim 124^{\circ}19'$ 、北纬 $47^{\circ}17' \sim 47^{\circ}19'$ 之间,是扎龙湿地最大的内陆湖泊,总面积 27.2 km^2 ,其中南湖面积 18.2 km^2 ,北湖面积 9 km^2 ,平均水深 3 m (图 1)。近几年随着人口的增长、社会的进步、经济的发展^[7],克钦湖上游的乌裕尔河两岸的工业废水、农业废水以及生活污水排放,使得克钦湖水体水质状况呈下降趋势,已经面临着环境问题^[8]。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 野外数据获取与处理

2010 年 7 月 25 日—8 月 20 日对克钦湖的水体进行了采样,选择了 30 个点位(其中有一个异常点),各点均使用 GPS 接收仪确定其经度和纬度。用硝酸溶液洗涤的容量为 500 mL 的聚乙烯塑料容器来盛装水样。然后将水样放至事先准备好的冰盒中,带回实验

室 4°C 冷藏,将样品送至实验室进行实验分析。在水体现场表观光谱的测量上选择的是水表面以上测量法。根据唐军武^[9]研究水体光谱测量与分析中得出的结论:为了避免绝大部分的太阳直射反射,同时减少船舶阴影的影响,在使用仪器时让仪器与海面法线方向的夹角为 $30^{\circ} \sim 45^{\circ}$,仪器观测平面与太阳入射平面的夹角控制在背向太阳方向 $90^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 。仪器在距离水面 1 m 处进行测量,水体的反射光谱曲线使用 Field-Spec HH 野外光谱辐射仪完成,波长范围为 $350 \sim 1050 \text{ nm}$,光谱分辨率为 3.5 nm 。采样间隔为 1.5 nm 。每个点位测定 10 次,然后取其平均值。

1.2.2 遥感数据预处理

本研究选用 2010 年 8 月 3 日 Landsat-5/TM 影像数据,配合准同步的实测数据,对扎龙湿地克钦湖的叶绿素 a 浓度进行遥感反演研究。当日克钦湖天气状况良好,风力微弱,天空无云,遥感影像清晰。在研究中选择了 TM 数据的 1、2、3、4、5、7、波段,空间分辨率为 30 m 。

1.2.2.1 几何校正

本研究选择一幅经过精校正的 TM 影像(投影为 UTM,椭球体为 WGS84)为底图,利用 ERDAS9.2 多项式几何校正模块(Polynomial)完成。图像重采样采用

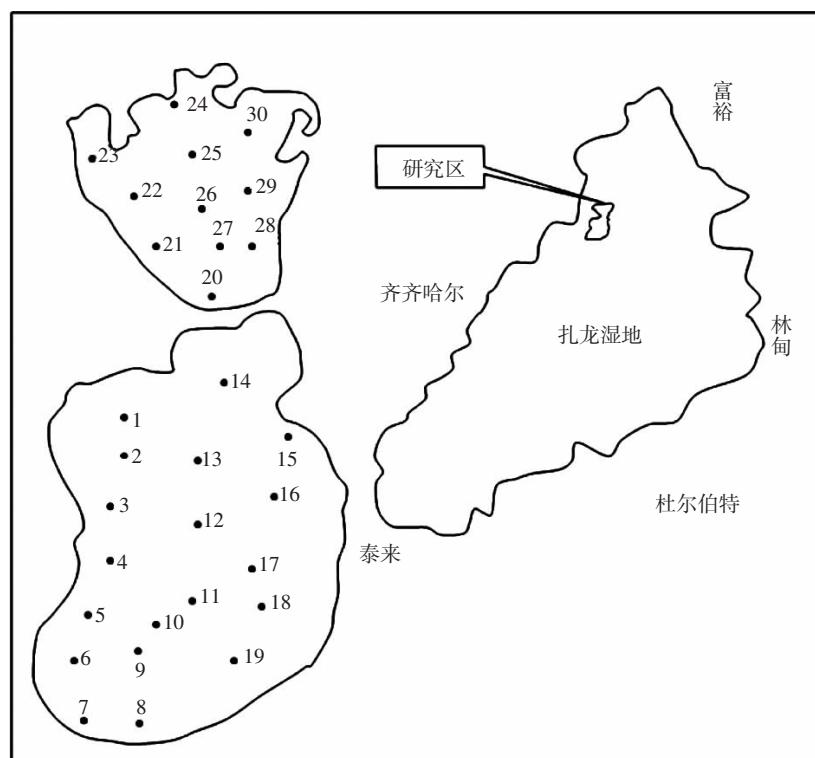


图 1 研究区位置示意图

Figure 1 Study site

最邻近点法,因为这种方法可以避免光谱信息的丢失。影像的投影选择 UTM 投影,椭球体选择 WGS84,使采样点定位坐标和遥感图像投影坐标精确匹配^[10-12]。在确定投影参数后进行 GCP 采集,本文选择 60 个 GCP,总误差 RMS 控制在 0.5 个像元之内,几何校正效果比较理想(图 2)。

1.2.2.2 辐射定标

辐射定标是将传感器记录的电压或数字量化值(DN)转换成绝对辐射亮度值(辐射率)的过程^[13],或者转换与地表(表现)反射率、表面温度等物理量有关的相对值的处理过程。本文采用 ENVI4.5 提供的专门模块 Landsat Calibration 进行辐射定标。

1.2.2.3 大气校正

采用 ENVI4.5 软件中的 FLAASH 辐射传输模型法对 TM 影像进行大气校正(表 1)。FLAASH 是目前使用效果较好的大气校正工具,它可以高保真地恢复地物波谱信息,获得地物比较准确的地表温度、反射

率以及辐射率等真实物理模型参数^[14-15]。在 ENVI4.5 软件中 FLAASH 模块基于像元进行校正,首先进行辐射亮度单位的转换;然后再进行储存顺序调整,将其调整为 BIL 格式;最后进行参数的输入^[16-17]。应用 FLAASH 模型可以校正由于漫反射引起的邻域效应。

1.3 反射率的提取

在对影像进行辐射校正的基础上,利用 ERDAS 中 Convert Pixel to Asc II 功能输出各个波段的反射率。

2 结果与分析

2.1 光谱分析

TM2 波段对应的波长范围为 520~600 nm,这一波段位于叶绿素的两个吸收带之间,可反应水下特征;TM3 波段对应的波长范围为 620~690 nm,为叶绿素的主要吸收波段,可以反应不同植物叶绿素吸收;TM4 波段对应的波长范围为 760~960 nm,为绿色植物类别差异最敏感区,为植物通用波段^[18]。

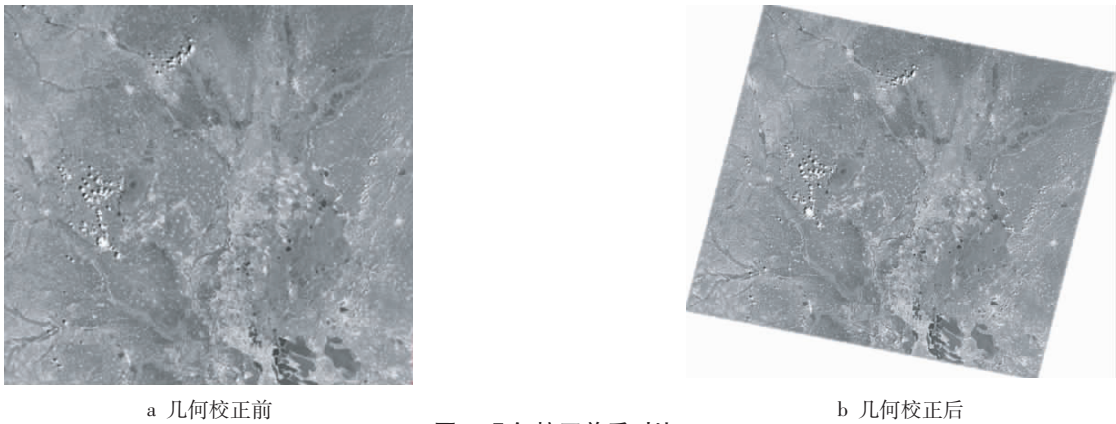


图 2 几何校正前后对比

Figure 2 Comparison of primitive image and geometric correction image

表 1 克钦湖 Landsat-5/TM 影像 FLAASH 大气校正

Table 1 Major parameters list used in FLAASH atmospheric correction algorithm for Landsat-5/ TM image of Keqin Lake

校正主要参数	参数设置
传感器类型	Landsat-5/TM
影像获取时间	2010 年 8 月 3 日
太阳高度角	60°
影像中心点经度	123°48'3.3975"
影像中心点纬度	47°26'437253"
大气模式	MLS(根据 MODTRAN 算法推荐,适用中纬度夏季模式)
气溶胶模式	Rural/Urban
气溶胶反演方法	2Band KT(Upper Channel 选 2200 nm 处的 TM7 波段,Lower Channel 选 660 nm 处的 TM3 波段)
地表平均高程	0.142 km
初始能见度	35 km
卷云检测波段	TM 波段

图 3 为原始光谱、归一化光谱、一阶微分光谱与叶绿素 a 浓度的相关性曲线。从图中可以看出,以上 3 种光谱都是在 TM2、TM3、TM4 波段与叶绿素 a 的相关性较好,这与李云亮、吕恒、杨一鹏、焦红波等研究得出的叶绿素 a 的存在主要影响 TM2、TM3、TM4 波段反射率的结果类似^[19-21]。

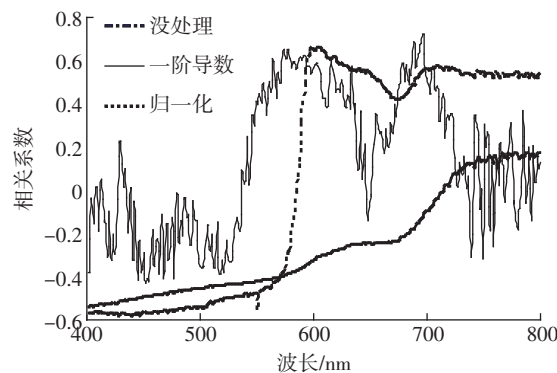


图 3 原始光谱、归一化光谱、一阶微分光谱与叶绿素 a 浓度的相关性

Figure 3 Correlation between chlorophyll-a concentration and primitive reflectance, normalized reflectance, first order differential of reflectance respectively

2.2 相关性分析

为了全面考查波段与叶绿素 a 浓度之间的关系,笔者利用 SPSS 统计学软件对反射率与叶绿素浓度进行相关性分析。根据本研究 2.1 中分析出的叶绿素 a 的光谱特征,共选取 TM2、TM3、TM4 单波段以及 3 个波段的 11 种组合与叶绿素浓度进行相关性分析。经分析得到各种波段组合与叶绿素浓度之间的相关系数,见表 2。可以看出,相关系数较高的波段组合为 X_1 、 X_9 、 X_{11} ,其相关系数分别为 0.907、0.920、0.914。

2.3 线性模型的建立与精度检验

选择这 3 个相关性较高的波段组合 TM2、TM3+TM4、TM3·TM4 与叶绿素浓度做线性回归建立模型。选取其中 21 个样本点建立了下列 3 个模型:

$$Y=53.45X_1-0.278$$
$$Y=41.57X_9-0.697$$
$$Y=614.2X_{11}+2.224$$

(1)

(2)

(3)

式中:Y 代表叶绿素 a 浓度, X_1 、 X_9 、 X_{11} 意义与表 2 中相同。

将剩余的 8 个样本点的组合波段光谱值代入上述 3 个模型中进行计算,得到 8 个样本点的各个模型的叶绿素浓度模拟值。将模拟值与实测值比较,见图 4(b)、图 5,可以看出各模型的模拟值与实测值均较为接近。

表 2 光谱值与叶绿素之间的相关系数
Table 2 Correlation between spectrum value and chlorophyll-a concentration

因 子	相关系数
$X_1=TM2$	0.907
$X_2=TM3$	0.905
$X_3=TM4$	0.900
$X_4=TM4/TM3$	-0.403
$X_5=TM3/TM4$	0.388
$X_6=TM3/TM2$	0.141
$X_7=TM4-TM3$	-0.849
$X_8=TM4-TM2$	-0.858
$X_9=TM3+TM4$	0.920
$X_{10}=TM2+TM3$	0.907
$X_{11}=TM3\cdot TM4$	0.914
$X_{12}=(TM3-TM2)/(TM3+TM2)$	0.146
$X_{13}=(TM4-TM3)/(TM4+TM3)$	-0.398
$X_{14}=(TM4-TM2)/(TM3-TM2)$	-0.356

对 3 个较高组合波段光谱值分别与叶绿素浓度做线性回归,从图 4(a、c、e)可以发现 3 个模型的 R^2 分别为 0.793、0.815、0.816,比较接近。对各个估算模型的误差进行逐一分析(表 3),3 个模型的 RMSE 分别为 0.742、0.648、0.756。由于 TM3+TM4 模型的 RMSE 为 0.648,相对其他两个模型来说比较低,与叶绿素浓度之间的相关系数为 0.920,也为 3 个波段组合中最高,而且该模型不繁琐,只用了一次加法。综合考虑,选择 TM3+TM4 作为反演叶绿素浓度的模型。

2.4 叶绿素浓度的反演

利用 ERDAS IMAGINE 中的 Modeler 模块,根据 2.3 中建立的数学模型

$$Y=41.57\times(TM3+TM4)-0.697$$

得到克钦湖的叶绿素 a 浓度的分布结果,如图 6 所示。

克钦湖北湖叶绿素浓度较高,湖面西侧叶绿素浓度为最高区域,达到 10.126~11.640 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从靠近湖心的地方到湖东侧,叶绿素浓度逐渐由大变小,叶绿素浓度下降到 8.990~9.504 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。克钦湖南湖叶绿素浓度要比北湖小,湖面大部分地区都为 3.610~4.907 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。只有靠近北湖地区和东侧较高,达到 4.907~5.286 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。克钦湖的水体叶绿素浓度分布总体上是南湖比较低,北湖较高。大的趋势是由南向北递增。造成这种趋势的原因可能是由于北湖附近耕地较多,而南湖附近多芦苇,芦苇可以对水质产生一定的净化作用。这与同步的水质采样数据基本吻合,反

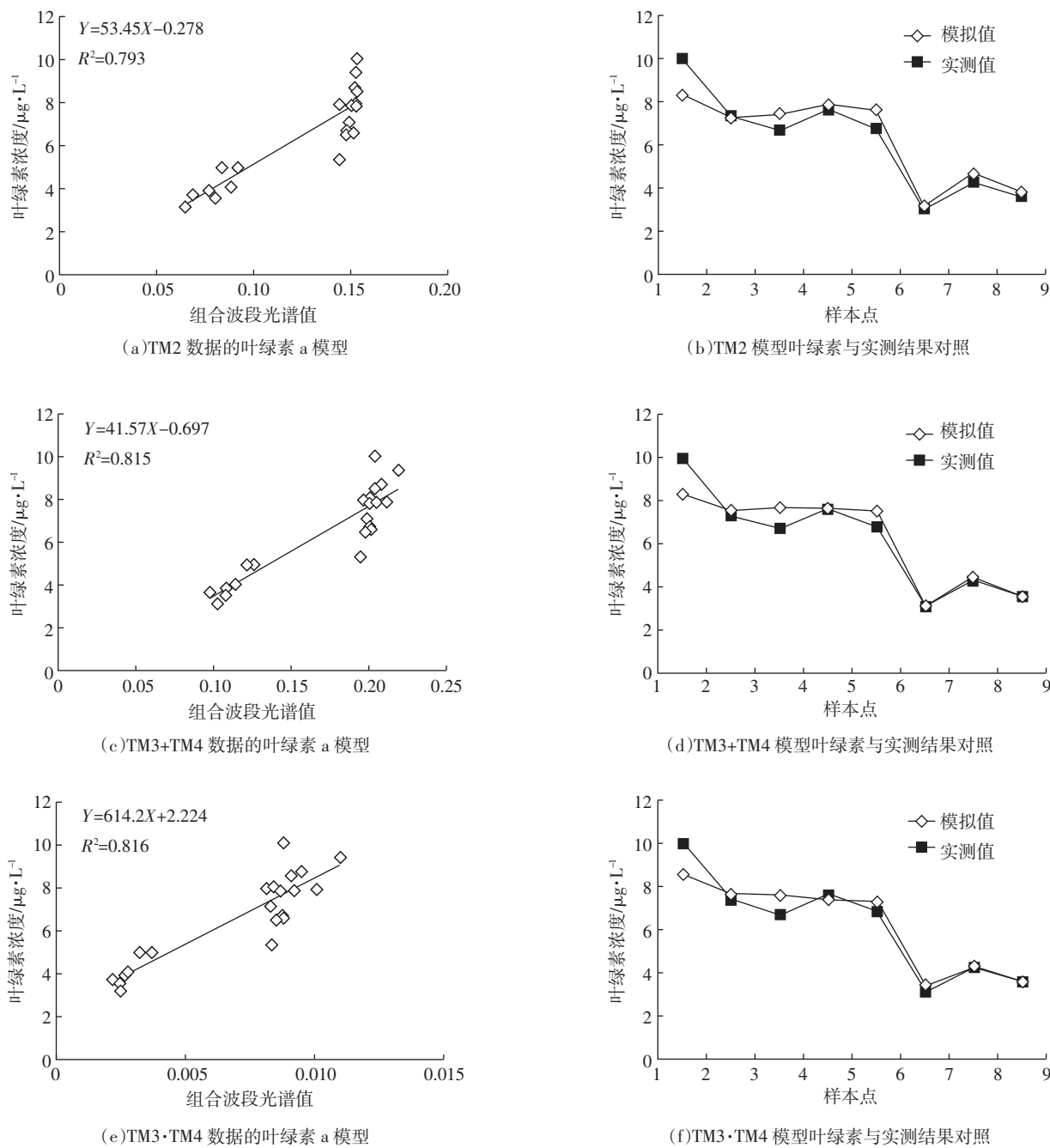


图 4 叶绿素 a 的 TM 模型与检验

Figure 4 TM model and checking chlorophyll-a concentration

映了克钦湖富营养状态的实际情况。

3 结论

总体分析,该模型可以较好地估测克钦湖水体叶绿素 a 的含量,可以满足该水体叶绿素 a 含量定量监测的需要。但是反演得出克钦北湖东部水体的叶绿素浓度低于西部,而实测的克钦湖北湖东部水体比西部水体的叶绿素 a 含量低。造成误差的原因可能是湖水

中分布着大量的挺水植物,其反射光谱特征与蓝藻极为相似,在 680 nm 存在波谷,而在 720 nm 和 810 nm 分别存在波峰,680~810 nm 对应着叶绿素 a 反演的 TM3、TM4 波段,由于 TM 影像波段数较少,波段宽度大大宽于相应的波谱特征宽度,一些波谱特征信息丢失,在判断叶绿素 a 是否存在的光谱特征附近没有对应的波段,无法区分出水华和水草。因此,不能很好的区分两者,从而造成了估测值误差。下一步工作将探讨

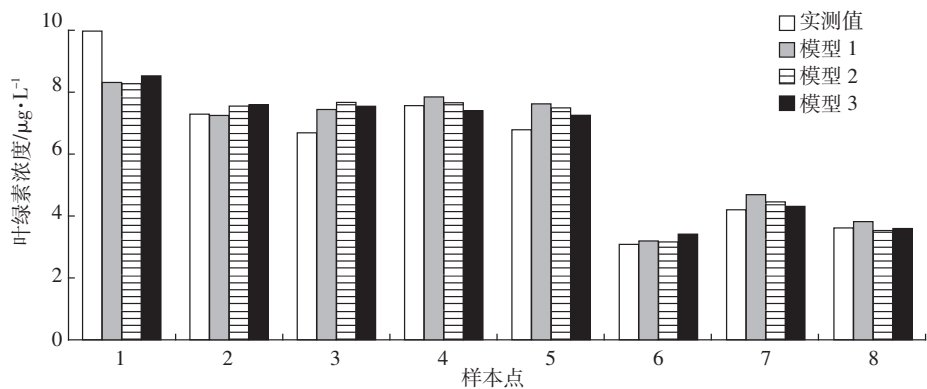


图 5 叶绿素 a 浓度实测值和预测值比较

Figure 5 Comparison of measured value and predicted value of chlorophyll-a concentration

表 3 误差分析结果

Table 3 Result of error analysis

样本点	1	5	9	13	17	21	25	29	RMSE
模型 1	1.689	0.067	-0.748	-0.278	-0.819	-0.076	-0.443	-0.199	0.742
模型 2	1.457	-0.300	-0.892	0.142	-0.465	-0.320	-0.063	0.048	0.648
模型 3	1.726	-0.239	-0.979	-0.093	-0.701	-0.038	-0.244	0.126	0.756

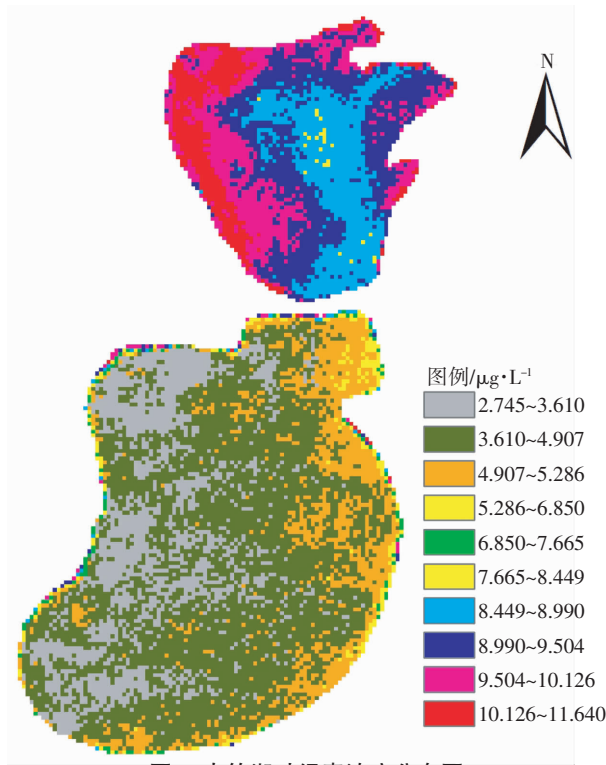


图 6 克钦湖叶绿素浓度分布图

Figure 6 Distribution of chlorophyll-a concentration in Keqin Lake

采用高光谱影像进行叶绿素 a 浓度的反演。

参考文献:

[1] 黄耀欢,江 东,庄大方. 汤逊湖水体叶绿素浓度遥感估测研究[J].

自然灾害学报, 2012, 21(2):215-222.
HUANG Yao-huan, JIANG Dong, ZHUANG Da-fang. Research on remote sensing estimation of chlorophyll-a concentration in water body of Tangxun Lake[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(2):215-222.
[2] 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, 2006.
CONG Pi-fu. Oceanic chlorophyll-a retrieval by remote sensing and ocean primary production estimate[D]. Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements of the Degree of Doctor of Philosophy at the Chinese Academy of Sciences, 2006.
[3] Coskun H G, Tanik A, Alganci U, et al. Determination of environmental quality of a drinking water reservoir by remote sensing, GIS and regression analysis[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2008, 194 (1/2/3/4):275-285.
[4] 梅安新, 绿彭望, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京:高等教育出版社, 2005: 156.
MEI An-xin, LU Peng-wang, QIN qi-ming, et al. Introduction to remote sensing[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005: 156.
[5] 陈楚群, 施 平, 毛庆文. 应用 TM 数据估算沿岸海水表层叶绿素浓度模型研究[J]. 环境遥感, 1996, 11(3): 168-176.
CHEN Chu-qun, SHI Ping, MAO Qing-wen. Study on modeling chlorophyll-a concentration of surface coastal water using TM data[J]. *Remote Sensing of Environment China*, 1996, 11(3): 168-176.
[6] 吕 恒, 江 南, 罗淑葱. 基于 TM 数据和神经网络模型的太湖叶绿素 a 浓度遥感定量监测[J]. 地理科学, 2006, 26(4):820-826.
LÜ Heng, JIANG Nan, LUO Lian-cong. Quantitative retrieval of chlorophyll-a by remote sensing in Taihu Lake based on TM data[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(4):820-826.
[7] 联合国环境规划署, 全球环境展望 2000[M]. 中国环境科学出版社,

2001.
The United Nations Environment Programme(UNEP). Global environment outlook[M]. Beijing:China Environment Science Press, 2001.
- [8] 王钰祺. 扎龙自然保护区湿地资源评价与水环境质量分析 [D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2009.
WANG Yu-qi. Evaluations of wetland resources and analysis of water environment quality in Zha Long Reserve[D]. Harbin:Northeast Forestry University, 2009.
- [9] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I : 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1):37-44.
TANG Jun-wu, TIAN Guo-liang, WANG Xiao-yong, et al. The methods of water spectra measurement and analysis I : Above-water method[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2004, 8(1):37-44.
- [10] Gyanesh Chander, Brian Markham. Revised landsat 5TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges[J]. *IEEE Transactions on Geo-science and Remote Sensing*, 2003, 41(11):2674-2677.
- [11] 杨校军, 陈雨时, 张 晔. FLAASH 模型输入参数对校正结果的影响[J]. 遥感应用, 2008, 23(6):32-37.
YANG Xiao-jun, CHEN Yu-shi, ZHANG Ye. Status and application trend of Chinese earth resources satellites[J]. *Application of Remote Sensing*, 2008, 23(6):32-37.
- [12] Markham B L, Barker J L. Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures[J]. *EOSAT Landsat Technical Notes*, 1986(1):3-8.
- [13] 梁顺林. 定量遥感[M]. 北京:科学出版社, 2009:14-16.
LANG Shun-lin. Quantitative remote sensing[M]. Beijing:Science Publishing Company, 2009:14-16.
- [14] 乔延利, 郑小兵, 王先华, 等. 卫星光学传感器全过程辐射定标[J]. 遥感学报, 2006, 10(5):616-623.
QIAO Yan-li, ZHENG Xiao-bing, WANG Xian-hua, et al. Whole-Process radiometric calibration of optical remote sensors[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5):616-623.
- [15] 陈 俊, 王 文, 李子扬, 等. Landsat5TM 数据的辐射校正与几何定位精度[J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(6):1094-1100.
CHEN Jun, WANG Wen, LI Zi-yang, et al. LANDSAT-5 TM Data radiometric correction and geospatial positioning accuracy[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2008, 13(6):1094-1100.
- [16] 程 亮, 马友华, 黄艳艳, 等. ENVI FLAASH 和 ERDAS ATCOR2 的大气校正对比研究[J]. 农业网络信息, 2011, 12:17-20.
CHENG Liang, MA You-hua, HUANG Yan-yan, et al. Comparison of atmospheric correction between ENVI FLAASH and ERDAS ATCOR2 [J]. *Agriculture Network Information*, 2011, 12:17-20.
- [17] TASSANS. Evaluation of the potential of the Thematic Mapper for marine application[J]. *INT J Remote Sensing*, 1987, 8(10):1455-1478.
- [18] 周 健. 遥感图像地物反射率反演[D]. 哈尔滨:东北师范大学, 2008.
ZHOU Jian. Ground objects' reflectance retrieval of remote sensing image[D]. Harbin:Northeast Normal University, 2008.
- [19] 焦红波, 查 勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. 遥感学报, 2006, 10(2):242-248.
JIAO Hong-bo, ZHA Yong, LI Yun-mei, et al. Modelling chlorophyll-a concentration in Taihu Lake from hyperspectral reflectance data[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(2):242-248.
- [20] 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]. 遥感应用, 2008(6):22-27.
LI Yun-liang, ZHANG Yun-lin. Mosaics algorithm of overlapped images based on distortion calibration[J]. *Application of Remote Sensing*, 2008(6):22-27.
- [21] 杨一鹏, 王 桥, 肖 青, 等. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 a 浓度定量遥感反演方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2):5-8.
YANG Yi-peng, WANG Qiao, XIAO Qing, et al. Quantitative remote sensing inversion methods of chlorophyll-a concentration in Taihu Lake based on TM data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(2):5-8.