DOI:10.19789/j.1004-9398.2015.02.016

基于线性回归分析的东平湖叶绿素含量监测*

王贵臣 刘田田
(首都师范大学 资源环境与旅游学院,北京 100048)

摘 要

利用2007年5月27日中巴资源卫星遥感数据与该日同步湖面多点观测资料,对东平湖水体叶绿素a含量与不同波段遥感值的关系进行了定量分析,发现B1 – B3以及B5与叶绿素a含量有正幂次关系,B4则与叶绿素a含量有较好的线性相关性;据此选择B3和B5等敏感波段值作为自变量,通过对它们的线性变换,进行叶绿素a定量指标的组合和筛选试验;在此基础上,建立了叶绿素a含量的遥感定量模型.并且利用这一模型计算得到的2007年5月27日东平湖水域多点叶绿素a含量很好地拟合了实测结果.本文给出的东平湖水体叶绿素浓度估算模型,为东平湖水体叶绿素浓度反演监测提供了一定的理论基础,另外,当天气条件相似时,该模型可应用于其它湖区和其他时相的遥感定量分析.

关键词: 叶绿素a含量,东平湖,遥感,水质监测
中图分类号: TP79

1 前 言

1.1 研究背景及意义

东平湖是山东省内第二大淡水湖泊和重要的淡水渔业生产基地,该湖自然资源丰富,渔业产量较高.由于养殖面积较大、密度过高,养殖方式不科学,大量外源营养物质输入,水体自净能力减弱,再加之湖区上游流域的面源性污染、大汶河流域水质的严重污染,造成湖水水质恶化较为严重.目前东平湖既是黄河下游的重要滞洪区,又是南水北调东线工程的最后一级蓄水水库,具有防洪、调蓄、灌溉、供水、养殖等多种功能,因此东平湖水质必须达到III类水质标准.

要解决这些问题首先需要对湖泊水质进行有效的监测.虽然中国的常规水质监测能力已经有了长足的进步,对湖泊也一直在进行长期的监测,但是由于人力财力的限制,常规监测在时间和空间维度上都存在着取样点少的不足,难以反映湖泊水质全面、动态的信息.利用遥感技术对湖泊水质进行监测,有着快速、动态、范围广、相对成本低的优势.

叶绿素a浓度作为表征水质状况的重要参数之一,是决定水体的反射光谱特征的重要因素,也是水质遥感领域研究较多的一项水质参数[1].研究叶绿素a浓度的遥感定量反演可以为湖泊水质监测与评价提供新的思路和方法.

1.2 研究现状

自20世纪70年代以来,利用常规卫星宽通道遥感数据进行水质监测的研究已陆续展开,国内外学者经过多年努力,利用MSS或TM数据监测水体的叶绿素a浓度取得很多研究成果,确定藻类叶绿素a浓度反演的多种经验或者半经验的相关模式及用于估算海洋、湖泊和河流叶绿素a含量多重算法[2].早期的卫星遥感监测内陆水体水质研究以彩色合成图像为主,信息量十分有限,因此,人们开始尝试从分析水环境指标的光谱响应特征入手,进而根据卫星遥感器对应通道的遥感数据反演水质状况.比如Thiemann S等利用实测光谱和IRS – 1C卫星数据对德国Mecklenburg湖的叶绿素a浓度进行了探测,并对湖泊的富营养状态进行了评价[3];Pulliainen等认为悬浮物浓度和叶绿素a浓度有很大的相关性,提出先根据悬浮物浓度对监测水体进行分类,再对不同的类别选择合适的算法计算叶绿素a的浓度,可提高算法的精度[4];Giorgio等利用高光谱数据模拟了MOD IS数据的波段设置,分析

收稿日期:2013-03-24

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

并确认了其红光到红外波段在定量反演混浊水体叶绿素 a 浓度方面的潜力[5].

国内一些学者也对遥感数据在水质监测方面的应用有所研究,太湖是其中研究较多的区域. 雷坤等利用中巴地球资源卫星高分辨率 CCD 相机第 3 波段(630 nm ~ 690 nm)、第 4 波段(770 nm ~ 890 nm)的组合(DB3 + DB4) /lnDB3 对太湖叶绿素 a 浓度进行了定量估算[6]. 李云亮、吕恒、马荣华、杨一鹏等人均利用了常规陆地卫星遥感数据 Landsat TM/ETM 定量反演太湖叶绿素 aa 浓度,并分别提出了反演精度最佳的波段组合: TM4-TM3,TM4/TM3,TM3/TM1,TM3/(TM1 + TM4)[7-10]. 祝令亚等应用 MOD IS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究表明 MOD IS 影像可用于太湖的水质监测中,并认为其中 250 m 分辨率波段 1、2 的比值组合 r2/r1 与叶绿素 a 浓度实测值相关性最好[11].

1.3　研究区概况

东平湖位于黄河下游南岸,鲁西南东平、梁山、汶上、平阴 4 县交界处,处在黄河下游河道由宽变窄、鲁中山区西部向平原过渡的边缘地带,为山前平原型内陆湖泊,总面积 62 700 hm. 湖区分为一级湖(老湖区面积 20 900 hm)、二级湖(新湖区 41 800 hm),一级湖常年有水,平均水深一般在 1 ~ 2 m,平均水面面积 12 400 hm,是典型的内陆浅水型湖泊. 东北部为低山丘陵,一般高程为 250 ~ 350 m,北部和西部分布着一系列孤山残丘,高度多在 200 m 以下. 湖区西南为黄河冲积平原,东部是汶河冲积平原,形成了本区域由山地、丘陵、平原、湖洼交错的地貌,构成微弱切割沉积盖层丘陵型地貌形态[12,13].

该流域位于温带季风区,属大陆性气候,四季分明,降水有显著的季节性. 东平湖区域多年平均降雨量 601 mm,折合降水总量 7.62 亿 m.,且年际、年内降水分布不均,汛期降水占全年的 70% 以上,其中 7 ~ 8 月份降水量占汛期降水量的 70% 多. 东平湖是汶河水系的客水汇集中心,是黄河的滞洪水库,是"南水北调"及"西水东送"的枢纽工程. 近年来,由于人口和经济的急剧增长,大汶河流域水体污染较为严重. 据泰安水环境监测中心监测统计资料表明,流域内排污量较大,污染物质严重超标. 受流域内各种污染源的排污影响,大汶河流域及东平湖水体质量状况较差. 1995 ~ 2004 年,大汶河流域大部分排污口断面属劣 Ⅴ 类水质标准,2002 年以后趋势向好. 2003 ~ 2004 年是连续丰水年,东平湖水质综合评价为Ⅲ类 ~ Ⅳ类水.

1.4　数据简介

1999 年 10 月 14 日我国和巴西共同研制的中巴地球资源 1 号卫星(CBERS-1)发射. 中巴地球资源一号卫星采用太阳同步回归轨道,轨道平均高度 778km,倾斜角 98.5°,轨道回归周期 26 天,降交点地方时 10:30a. m,卫星重量 1 540 kg. CBERS-1 搭载有高分辨率 CCD 相机,空间分辨率为 19.5,共分 5 个谱段,主要用于资源与环境遥感. CBERS-1 的 CCD 相机在谱段设置上 1、2、3、4 波段同 Landsat7 TM 的前 4 个波段相当,但地面分辨率高于 Landsat7 的 TM[14].

本文所用数据来源于中国资源卫星应用中心,时相为 2007 -05 -27,轨道/像幅为 373/59,CCD 相机,投影采用 UTM,WGS-84 坐标系. 校正级别为 L2,是经过辐射校正、系统几何校正的二级光盘产品,数据包括 B1,B2 ,B3 ,B4 ,B5 共 5 个谱段.

2　影像预处理

影像的预处理是进行水体信息提取的前提,为了提高精度保证分析的科学性,在进行水体叶绿素 a 信息提取之前,需对原始影像进行必要的预处理,主要包括辐射校正和几何配准.

2.1　辐射校正

利用传感器观测目标的反射或辐射能量时,传感器的测量值与目标的光谱反射率或光谱辐亮度等物理量是不一致的,这是因为测量值中包括了大气条件或传感器性能不完备等条件引起的失真. 为了正确评价目标的反射或辐射特性,必须清除这些失真,消除图像数据中依附在辐亮度中的各种失真的过程称为辐射校正. 大气散射是引起辐射畸变的重要因素,可以利用辐射传递方程、地面实况数据、辅助数据进行大气校正. 由于影响数据在遥感所已做过一定的辐射校正处理,若要对图像进行精确校正,需要知道数据拍摄当时的天气状况、空气湿度、太阳高度角等一系列数据[15],而回归分析法、直方图法. 这些相对辐射校正方法仅利用图像像元灰度值的统计特征,不需要其它参数,操作简便,尤其适合用于历史遥感数据.

2.2　几何校正

当遥感图像在几何位置上发生了变化,产生诸如行列不均匀,像元大小与地面大小对应不准确,地物形状不规则变化等畸变时,即说明遥感影像发生

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

了几何畸变.

采用的几何位置变换方法有多项式变换、共线变换和随机场插值变换等方法. 本文采用基于二次多项式的坐标拟合[16]. 其表达式为

$$X_0 = A + BX + CY + DX^2 + EXY + FY^2$$

$$Y_0 = G + HX + IY + JX^2 + KXY + LY^2$$

根据控制点的坐标,可以计算 A、B……L 的值,构建几何校正表达式,对影像进行配准.,本文配准中总共选取 12 个控制点进行校正.

几何配准的另外一个问题是重采样,经过空间变换后,其输出图像的像元亮度值,尚需利用原来输入的图像的像元亮度值重新采样给定. 重新采样有 3 种方法,常用的有最邻近法和双线性内插法和三次卷积法. 三次卷积法的内插精度高且带有边缘增强的效果,但是运算量大; 双线形内插法的精度和计算量适中,并带有低通滤波效果,边缘受到一定的平滑作用: 最近邻法计算量小,内插精度在几何变形不太严重时可以得到保证. 本文选择最邻近法. 它取与内插点距离最近的相邻像元的灰度值作为内插点的灰度值.

3 叶绿素 a 遥感定量分析模型

3.1 水体叶绿素 a 与遥感数据的关系

利用对湖区 16 个点实测的叶绿素 a 含量资料,配台各观测点的遥感数据,分析了叶绿素 a 与各波段遥值的相互关系及回归曲线如下图 1:

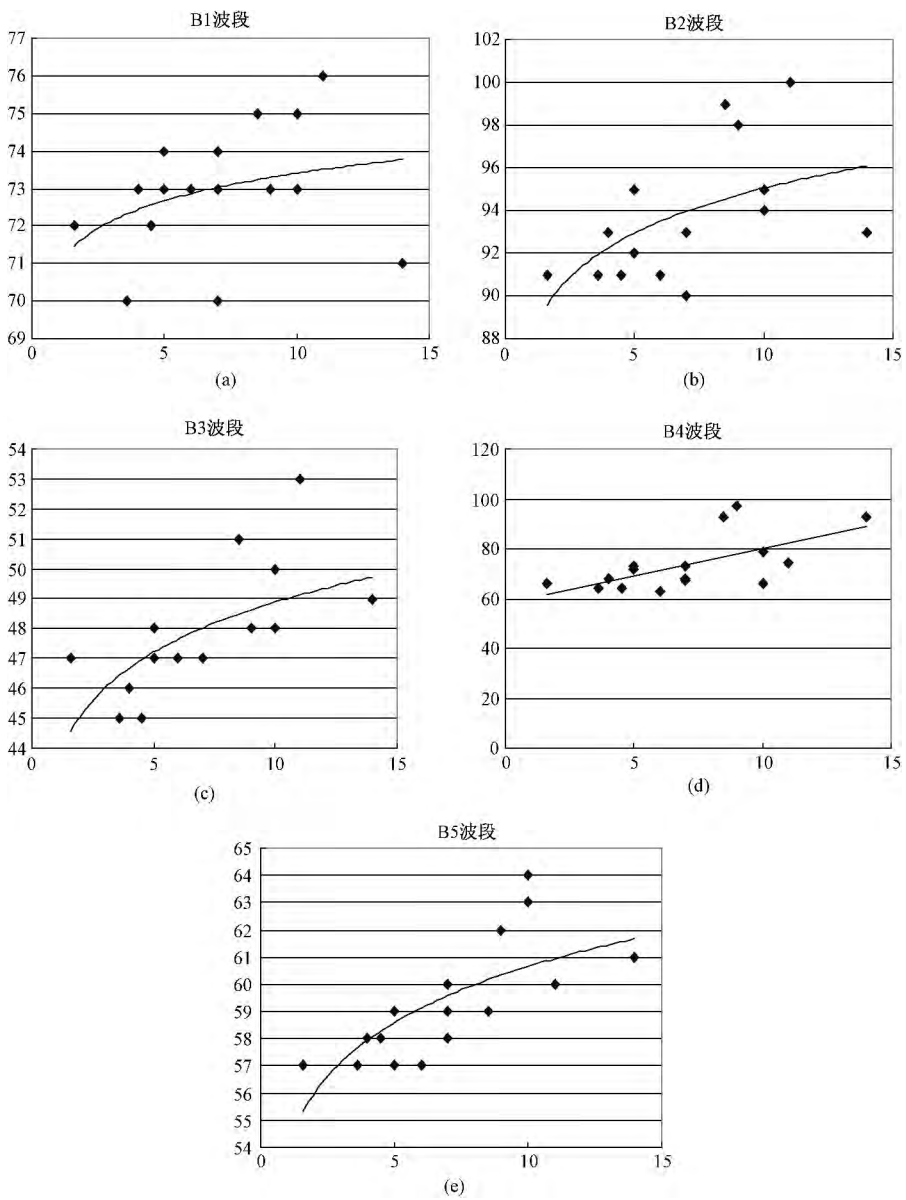


图 1 叶绿素 a 含量与各波段遥感值的关系拟台曲线

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

各波段遥感数据与叶绿素 a 的浓度的具体回归拟合方程以及相关指数如下表 1:

表 1　各波段遥感值与叶绿素 a 关系的回归拟合方程及相关指数

波段	拟合方程	相关指数
B1	$y=70.991x^{0.015}$	0.332 9
B2	$y=88.241x^{0.323}$	0.537 9
B3	$y=43.534x^{0.050}$	0.620 6
B4	$y=2.18x+58.327$	0.629 0
B5	$y=54.086x^{0.0197}$	0.718 5

由此发现各波段的遥感值均与叶绿素 a 含量有一定的关系,对照藻类及绿色植物反射光谱(图 2)和遥感影像波段分析得到:

1) 波段 1、2、3、5 与叶绿素 a 含量呈幂次关系(图 1a、b、c、e),且它们之间有很好的相关性,另外 B1 和 B2 易受大气的干扰.

2) B2 波段对应着藻类的绿色反射峰,叶绿素 a 含量高时. 反射应增加,但由于水体自身水色的影响以及大气的干扰,这一波段的数据不能有效反映水体的叶绿素 a 含量.

3) B3 波段在一定程度上能反映叶绿素 a 在可见光区 680 nm 附近的吸收情况. 叶绿素 aa 含量越高,对入射光吸收越显著,B3 值则较低. 分析发现 B3 与叶绿素 a 含量呈幂次关系.

4) B4 波段对应了藻类叶绿素 a 的近红外反射峰,叶绿索 a 含量越高. 对入射光反射越显著,B4 值增高.

5) B5 波段是全色波段,认为除了水体对入射光的吸收外,还有明显的藻类吸收,B7 波段叶绿素 a 含量有较好的线性负相关.

由此选定 B3、B5 为水体叶绿素 a 含量定量分析的主要变量.

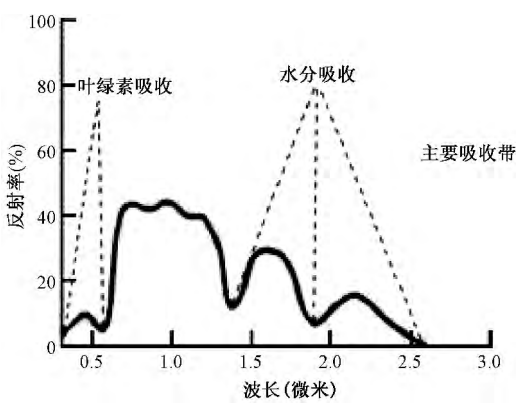


图 2　绿色植物反射光谱曲线

3.2　遥感定量分析模型的建立

以东平湖实测的 16 个点的叶绿素 a(ug/l)数据为因变量,首先以各测点的 B3、B5 两个波段的图像数据为自变量,进行了多种线性组合和多元回归分析,进行相关分析并筛选定量指标. 最后选定叶绿素 a 遥感定量指标为:

$$Z = b3 + b5$$

根据同步观测的叶绿素 a 含量(单位 ug/l)与遥感定量指标 z 建立回归模型:

$$\text{叶绿素 a 含量} = 0.7413z - 72.333$$

其回归拟合情况见图 3:

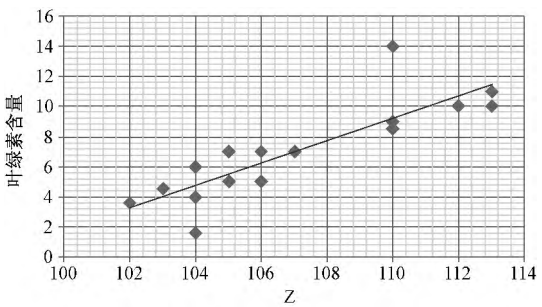


图 3　叶绿素 a 含量实测值与遥感定量指标的回归拟合

利用这一定量模型和遥感图像数据计算得到该日东平湖水域的叶绿素 a 含量,与几个采样点的实测值比较(如图 4),可见两者量级相当,趋势相同相关系数达 0.8 481. 叶绿素 a 遥感定量分析模型较好地拟合了实测情况. 但由图 4 也可见,计算值偏高呈系统误差,这可能是由于湖体泥沙等悬浮值的变化、气象状况的变化或水样分析时的系统偏差所致.

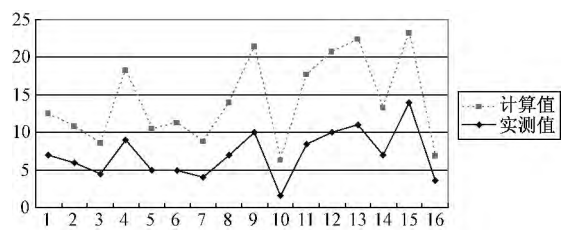


图 4　同步观测实测值与模型计算值比较

4　结果分析

目前公认的标准叶绿素 a 含量与水质状况关系[17]如下表 2:

利用得到的定量分析模型计算整个东平湖区域的叶绿素 a 含量,根据以上标准对东平湖区域叶绿素 a 含量进行分级,得到的结果如图 5:

黄色(0.95 ~ 2.6)及绿色区域(2.6 ~ 7.3)为陆地或植被,叶绿素 a 含量符合要求. 红色区域显示的

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 叶绿素 a 含量与水质的关系

叶绿素 a 浓度(ug/l)	湖泊营养化程度
<0.95	贫营养: 水体清澈,湖泊的均温层氧气充足
0.95 ~2.6	贫营养: 浅水湖泊的均温层氧气不足
2.6 ~7.3	中营养: 水体清澈,湖泊的均温层在夏季缺氧
7.3 ~20	富营养: 均温层缺氧,大型水生植物繁殖
20 ~56	富含藻类和绿藻,存在水华问题
56 ~155	极富营养: 藻类和大型水生植物密集
>155	大面积水华,几乎没有大型水生植物

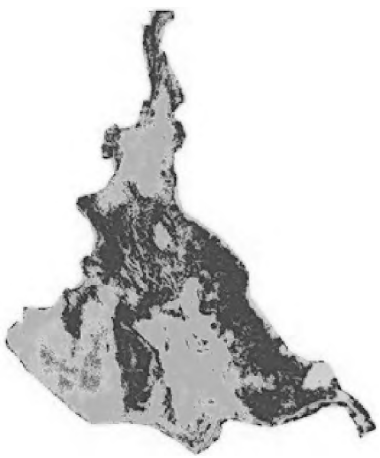


图 5 东平湖叶绿素 a 含量等级图

叶绿素 a 含量在 7.3 ~20(ug/l) 之间的为富营养区域,图像拍摄日期为 5 月份正是蓝藻生长时期,由于是大汶河流域内的工业废水、生活污水和地面径流等所携带的营养物质通过大汶河进入东平湖及湖区范围内的工业废水、生活污水和地面径流中的营养物质直接流人东平湖[18],导致这部分叶绿素 a 含量较高.

5 结 论

根据该定量分析模型可以精确计算水体中的叶绿素 a 含量并知道水体的富营养化程度,为实现对东平湖实时在线监测高精度检测水质分析提供了基础. 随着治理湖泊水体富营养化工作的迫切需要,使用遥感方法进行水体叶绿素浓度监测已成为水体富营养化监测重要方法之一. 实验选取东平湖水体样本,对水体光谱反射率与叶绿素浓度进行相关性分析. 结果表明: 水体叶绿素浓度与各波长点处反射率相关性不大,而与多个波段几何特征具有较好的相关性,文中给出东平湖水体叶绿素浓度估算模型,为东平湖水体叶绿素浓度反演监测提供了一定的理论基础与参考,为东平湖水质监测提供了依据.

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 顾亮,张玉超,钱新,钱瑜. 太湖水域叶绿素 a 浓度的遥感反演研究[J]. 环境科学与管理,2007,6: 25 -29.

[3] 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,Germany[J]. Remote Sensing of Environment,2000,73(2): 227 -235.

[4] Pulliainen J,Kallio K,Eloheimo K et al. A semi-operative approach to lake water quality retrieval from remote sensing data[J]. The Science of the Total Environment,2001,268: 79 -93.

[5] Giorgio Dall'Olmo. Isolation of optical signatures of phytoplankton pigments in turbid productive waters_ Remote assessment of chlorophyll-a[M]. University of Nebraska-Lincoln,2006.

[6] 雷坤,郑丙辉,王桥. 基于中巴地球资源 1 号卫星的太湖表层水体水质遥感[J]. 环境科学学报,2004,24(3): 376 -380.

[7] 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,2008,22 -80.

[8] 吕恒,江南,罗潋葱. 基于 TM 数据的太湖叶绿素 A 浓度定量反演[J]. 地理科学,2006,26(4): 472 -476.

[9] 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[J]. 湖泊科学,2005,17(2): 97 -103.

[10] 杨一鹏,王桥,肖青,闻建光. 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.

[11] 祝令亚,王世新,周艺,阎福礼,杨龙元. 应用 MOD IS 监测太湖水体叶绿素 a 浓度的研究[J]. 遥感信息,2006(2): 25 - 28.

[12] 喻宗仁,窦素珍,赵培才,刘桂成,张成,裴放. 山东东平湖的变迁与黄河改道的关系[J]. 古地理学报,2004,6(4): 469 -479.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[13] 任燕，郑昭佩. 东平湖生态系统服务功能价值评估 [J]. 水土保持研究，2007，14(3)：131－133.
[14] 梅安新，彭望琭，秦其明，刘慧平. 遥感导论 [M]. 北京: 高等教育出版社，2001.
[15] 韦玉春，汤国安，杨昕. 遥感数字图像处理教程 [M]. 北京: 科学出版社，2007.
[16] 宋小宁，赵英时. 应用 MODIS 卫星数据提取植被－温度－水分综合指数的研究 [J]. 地理与地理信息科学，2004，3(2)：13－17.
[17] 贺俊华，程永进，张昊. 内陆水体叶绿素 a 含量定量检测的研究 [J]. 光学与光电技术，2007，5(5)：17－19.
[18] 庞清江，葛慧敏，纪玲，王伟锋. 东平湖水体营养状况主要影响因子研究 [J]. 人民黄河，2008，6：50－52.

Chlorophyll a Concentration Monitoring of Dongping Lake Based on Linear Regression Analysis

Wang Guichen　Liu Tiantian

(Optical Dating Laboratory，Capital Normal University，Beijing 100048)

Abstract

Remote sensing data from China-Brazil LANDSAT on May 27，2007 were used together with concurrent measurement of Chlorophyll a concentration in Dongping Lake to quantitative analysis the relationship between different values of remote sensing and chlorophyll a content. The study showed that B1－B3 and B5 data current an exponential relationship with the increase of chlorophyll a，while B4 data shows the positive linear correlations with the chlorophyll a concentration. The sensitive bands (B3 and B5) were selected as in dependent variables，whose optimum combinations were examined through their linearly alterations in order to obtain a new quantitative index for chlorophyll a estimation. Based on this interrelation，the final chlorophyll a estimation model was developed in this paper. The chlorophyll a values measured at several sample sites in Dongping Lake on May 27，2007 were coincident with the caleulated ones using this model. The chlorophyll a estimation model of Dongping Lake offered theoretical basis of inverting and monitoring chlorophyll a concentration and it also could be applied to images of different dates and areas on similar weather condition.

Key words: chlorophyll a concentration，Dongping Lake，remote sensing，water quality monitoring.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net