

文章编号:1004-8227(2009)12-1181-06

利用中巴地球资源卫星数据反演 武汉市湖泊营养状态指数

何报寅¹, 梁胜文², 丁超¹, 杨小琴¹, 胡柯²

(1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉环境监测中心站, 湖北 武汉 430051)

摘要:以武汉市主要湖泊为例,研究了利用中巴地球资源卫星(CBERS-2)数据反演水体营养状态指数(TLI)。研究旨在评估利用中巴地球资源卫星数据来估算内陆水体富营养化程度的可能性。首先利用地面水质监测数据计算武汉市某些湖泊监测点的“真实的”营养状态指数(包括综合营养状态指数和修正的 Carlson 营养状态指数),同时,在事先经过辐射校正和几何校正的 CBERS-2 图像上,以 9 × 9 像元为采样窗口,提取各个对应地点的灰度值均值(从波段 1 至波段 4);然后,采用多元逐步回归分析,以各波段灰度值均值为自变量,建立营养状态指数经验遥感反演模型;最后,利用模型对整个湖泊水体的营养化状态指数进行反演,并绘制了其空间分布图。结果显示,营养状态指数的自然对数值与 CBERS-2 图像各波段灰度值之间存在较好相关关系,回归系数平方值(R^2)为 0.51。利用反演模型反演得到的湖区水质分布与实际情况基本相符。由于 CBERS-2 图像数据可以从我国许多数据分发中心免费获取,这为低成本的水质遥感监测提供了一条途径。

关键词: 营养状态指数; 遥感; 湖泊; 中巴地球资源卫星
文献标识码: A

随着卫星遥感技术的发展,卫星遥感数据被越来越多地用来监测和评价海洋和内陆水体的水质状况。卫星监测具有快捷、经济和覆盖范围广等地面监测所不具备的优点^[1~3]。许多卫星遥感数据可用于水质反演,常用的数据源包括 Hyperion、MODIS、MERIS、AVHRR 等高光谱数据以及 Landsat 卫星系列(MSS、TM、ETM+)、ASTER 和 CBERS^[4]等多光谱卫星遥感数据。水质遥感反演的精度依赖于遥感数据的辐射分辨率、光谱分辨率、空间分辨率和时间分辨率。但分辨率越高,往往数据量也越大,意味着购买数据的花费也越高。本文试图利用中巴地球资源卫星(CBERS-2)多光谱遥感数据反演武汉市主要湖泊水体的营养状态指数。由于该数据可以免费获取,故在成本上有优势,对于低成本监测评价水环境质量有一定的实际意义。

1 数据源

1.1 地面数据

本实例采用的地面水质监测数据由武汉市环境

监测站提供。武汉市现有水质监测网的常规水质监测时间多为每月上、中、下旬各 1 次,监测的具体日期也不是完全统一,部分只是双月监测。所以在数据选择上受到一定限制,不容易做到地面监测数据与卫星完全同步。经综合考虑,这里采用 2007 年 7 月上旬(主要为 7 月 3 日,部分为 7 月 10 日)的地面监测数据。这是因为这个时间与下面的中巴资源卫星的过境时间最接近,同时能保证足够的样本点。

1.2 遥感数据源

本实例利用中巴地球资源卫星(CBERS-2)获取的影像数据。该卫星是我国和巴西共同研制的,主要用于资源与环境遥感。CBERS-2 分辨率为 19.5 m,波谱设置与 Landsat 7 ETM 的前 4 个波段相同。本例采用的武汉区域 CBERS-2 影像数据由中国资源卫星应用中心提供^[5],卫星轨道 373、像幅 66,是经过辐射校正和系统几何校正的二级光盘产品,时相为 2007 年 7 月 18 日。

资源 2 号卫星的相关参数参见文献^[5],波段设置见表 1,其中 1 至 4 波段的设置与 Landsat 卫星的 TM1 至 TM4 的相近,可以用于水质监测。

收稿日期:2008-11-26;修回日期:2008-12-11

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-141);武汉市环保局课题“武汉市地表水环境质量监测优化布点研究”(0703);武汉市建委课题“遥感技术在武汉市生态环境质量监测中的应用研究”(200728)

作者简介:何报寅(1964~),男,广西玉林人,研究员,主要从事资源环境遥感、水文地质和全球变化记录研究。E-mail:heby@whigg.ac.cn

表 1 CBERS-2 卫星传感器的基本参数

Tab. 1 Parameters of CCD on CBERS-2

传感器名称	CCD 相机
传感器类型	推扫式
可见/近红外波段	1: 0.45 ~ 0.52 μm 2: 0.52 ~ 0.59 μm 3: 0.63 ~ 0.69 μm 4: 0.77 ~ 0.89 μm 5: 0.51 ~ 0.73 μm
辐射量化	8 bit
扫描带宽	113 km
每波段象元数	5 812 象元
空间分辨率(星下点)	19.5 m
具有侧视功能	(-32° ~ +32°)
视场角	8.32°

2 方法

2.1 湖泊营养状态的评价方法

湖泊富营养化评价是对湖泊富营养化发展进程中某一阶段营养状态的定量描述。富营养化状态指数法的评价模型很多,卡尔森指数(TSI)^[6]和修正的卡尔森指数(TSIM)^[7]就是其中最常用的两种,在国外的许多水体中都有成功的应用。同时,金相灿等^[8]人在对全国 24 个典型湖泊研究的基础上,提出将这两种营养状态指数法定为适合我国水体富营养化评价的基本方法之一,已经得到广泛的应用。

但是,这两种方法都只是以某一参数为基准的单参数营养状态指数,其余参数的营养状态指数都是基于与基准参数之间的相关关系(单变量回归)得到的,所以根据这两种方法很难对水体的营养状况进行精确的判断。为克服上述方法的不足,我国的监测单位一般采用国家环保总局中国环境监测总站颁布的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规范》中的综合营养状态指数法。

综合营养状态指数计算公式为:

$$TLI(\quad) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TLI(j) \quad (1)$$

式中: $TLI(\quad)$ 表示综合营养状态指数; W_j 表示第 j 种参数的营养状态指数的相关权重; $TLI(j)$ 表示第 j 种参数的营养状态指数。

以叶绿素 a 浓度 Chla 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化相关权重计算公式为:

$$W_j = \frac{R_j^2}{\sum_{j=1}^m R_j^2} \quad (2)$$

式中: R_j 表示第 j 种参数与基准参数 Chla 的相关系数; m 表示评价参数的个数。

湖泊(水库)营养状态分级:采用 0~100 的一系列连续数字对湖泊(水库)营养状态进行分级: $TLI(\quad) < 30$, 贫营养; $30 < TLI(\quad) < 50$, 中营养; $50 < TLI(\quad) < 60$, 轻度富营养; $60 < TLI(\quad) < 70$, 中度富营养; $TLI(\quad) > 70$, 重度富营养。

本文把修正的卡尔森指数 $TSIM$ 与综合营养状态指数法结合起来进行评价。用武汉市 2007 年 7 月上旬的实际监测数据建立叶绿素 a (Chla) 与总磷 (TP)、总氮 (TN)、透明度 (SD)、高锰酸盐指数 (COD_{Mn}) 的相关式,可以使得评价更适合本地区。Chla 与各因子之间的相关关系由表 2 所示。

表 2 武汉市湖泊各监测点 $\ln(\text{Chla})$ 与其它水质参数的线性相关关系Tab. 2 Linear Correlations Between $\ln(\text{Chla})$ and Other Water Quality Parameters from Monitoring States of Lakes in Wuhan

	相关关系式	相关系数 R^2
与总磷	$\ln(\text{Chla}) = 0.8672 \ln(\text{TP}) + 0.2599$	0.4969
与总氮	$\ln(\text{Chla}) = 1.2004 \ln(\text{TN}) + 0.2665$	0.4732
与透明度	$\ln(\text{Chla}) = -1.9423 \ln(\text{SD}) + 1.6965$	0.7242
与高锰酸钾指数	$\ln(\text{Chla}) = 2.4046 \ln(\text{COD}_{Mn}) - 1.8207$	0.3777

引用日本学者相崎守弘提出的修正富营养化指数 $TSIM$ 法^[7],以叶绿素 a 浓度为基准,分为 0~100 的连续值:假定 $TSIM = 100$ 时,Chla 的浓度为 1 000 mg/m^3 ,而 $TSIM = 0$ 时,Chla 的浓度为 0.1 mg/m^3 ,且 Chla 浓度每增加 2.5 倍时,对应的 $TSIM$ 指数值增加 10,其结果可用如下公式表示:

$$TSIM(\text{Chla}) = 10 \times (2.46 + \ln(\text{Chla}) / \ln(2.5)) \quad (4)$$

把表 2 中各相关关系式代入式(4)并整理可得到总氮、总磷及高锰酸钾指数的 $TSIM$ 指数计算公式:

$$TSIM(\text{Chla}) = 10 \times (2.46 + 1.091 \ln(\text{Chla})) \quad (5)$$

$$TSIM(\text{TP}) = 10 \times (7.109 + 0.946 \ln(\text{TP})) \quad (6)$$

$$TSIM(\text{TN}) = 10 \times (4.934 + 1.310 \ln(\text{TN})) \quad (7)$$

$$TSIM(\text{SD}) = 10 \times (4.311 - 2.120 \ln(\text{SD})) \quad (8)$$

$$TSI_M(\text{COD}_{Mn}) = 10 \times (0.473 + 2.624 \ln(\text{COD}_{Mn})) \quad (9)$$

$$TSI_M(\quad) = \sum_{j=1}^m W_j \cdot TSI_M(j) = 0.3255 TSI_M(\text{Chla}) + 0.1618 TSI_M(\text{TP}) + 0.1540 TSI_M(\text{TN}) + 0.2357 TSI_M(\text{SD}) + 0.1229 TSI_M(\text{COD}_{Mn}) \quad (10)$$

表 3 武汉市湖泊 ln(Chla) 与各水质参数的相关系数 R_j^2 及权重值 W_j

Tab. 3 Correlation Coefficients R_j^2 and Weight Values W_j Between ln(Chla) and Each Water Quality Parameters of Lakes in Wuhan

参数	ln(Chla)	ln(TP)	ln(TN)	ln(SD)	ln(COD _{Mn})
R_j^2	1	0.496 9	0.473 2	0.724 2	0.377 7
W_j	0.325 5	0.161 8	0.154 0	0.235 7	0.122 9

把表 3 中的 W_j 值代入(1)式,得到营养状态指数计算式:

结算结果见表 4。

修正后的评价结果和修正前相比,综合营养状态指数总体上略有降低,对少数营养状态指数在界限附近的湖泊,分级结果可能不一样。

表 4 武汉市主要湖泊(监测点)营养状态指数

Tab. 4 Trophic State Index of Lakes in Wuhan

湖泊名称	点位名称	采样日 (2007-07)	TLI (Chla)	TLI (TP)	TLI (TN)	TLI (SD)	TLI (COD _{Mn})	TLI ()	营养状态 分级
东湖	水果湖	3	68.90	51.34	51.06	60.04	57.60	59.83	轻度富营养
东湖	汤菱湖	3	65.12	47.66	42.20	55.78	50.40	54.75	轻度富营养
东湖	郭郑湖	3	62.75	50.46	45.57	55.78	52.18	55.17	轻度富营养
东湖	后湖	3	58.32	47.43	47.06	57.80	46.96	53.30	轻度富营养
东湖	庙湖	3	74.62	84.42	64.82	60.04	63.53	69.89	中度富营养
沙湖	沙湖北端	3	78.90	60.60	60.75	72.50	61.77	69.52	中度富营养
沙湖	沙湖湖心	3	79.19	66.72	61.81	72.50	59.72	70.52	重度富营养
沙湖	沙湖南端	3	76.83	64.34	61.81	72.50	56.78	69.00	中度富营养
严东湖	湖心	3	24.60	41.54	27.58	35.98	37.90	32.11	中营养
严西湖	湖心	3	60.56	47.31	62.30	56.97	67.17	58.65	轻度富营养
青山北湖	湖心	3	35.23	46.46	68.45	57.80	62.18	50.79	轻度富营养
杨春湖	湖心	3	43.20	43.48	51.17	47.06	58.19	47.22	中营养
涨渡湖	湖心	4	49.72	47.08	53.08	32.62	42.20	44.85	中营养
南湖	南湖 1 #	3	54.14	66.18	62.83	64.19	69.58	61.69	中度富营养
南湖	南湖 2 #	3	60.15	67.36	65.71	65.37	69.27	64.52	中度富营养
南湖	野芷湖	3	54.14	73.42	75.58	59.57	69.91	63.78	中度富营养
青菱湖	湖心	3	44.15	45.09	42.86	50.67	47.48	46.04	中营养
黄家湖	湖心	3	59.72	55.58	55.50	62.54	69.00	60.20	中度富营养
柴泊湖	湖心	4	53.39	47.88	50.35	35.68	44.43	46.75	中营养
鲁湖	出口	3	36.59	44.79	40.00	43.11	40.10	40.40	中营养
鲁湖	湖心 1 #	3	36.59	32.54	38.88	35.98	38.05	36.32	中营养
鲁湖	湖心 2 #	3	32.16	32.54	37.98	35.98	37.22	34.64	中营养
斧头湖	湖心	3	32.16	41.32	39.17	31.86	41.82	35.84	中营养
梁子湖	梁子湖湖心	3	32.16	32.54	34.41	26.39	35.41	31.61	中营养
梁子湖	牛山湖湖心	3	32.16	33.09	35.96	25.45	36.06	31.79	中营养
汤逊湖	外汤逊湖湖心	3	32.16	54.33	45.04	41.09	51.22	42.17	中营养
汤逊湖	内汤逊湖湖心	3	32.16	44.79	38.59	37.55	49.89	38.64	中营养
汤逊湖	内汤观音像	3	32.16	43.30	40.77	37.55	43.43	37.94	中营养
汤逊湖	内汤工业园	3	32.16	43.99	40.00	37.55	42.76	37.85	中营养
汤逊湖	内汤洪山监狱	3	32.16	43.30	44.09	39.24	44.49	38.98	中营养
汤逊湖	外汤武大分校	3	36.59	44.79	39.73	43.11	44.31	40.88	中营养
汤逊湖	外汤焦石咀	3	32.16	54.76	57.61	41.09	49.89	44.02	中营养
后湖	湖心	10	56.72	52.15	55.90	39.24	41.11	49.81	中营养
后湖	湖边	10	44.15	60.01	56.67	44.20	47.58	49.07	中营养
南太子湖	湖心	3	64.85	55.28	56.67	62.54	43.00	58.80	轻度富营养

续表 4

湖泊名称	点位名称	采样日 (2007-07)	TLI (Chla)	TLI (TP)	TLI (TN)	TLI (SD)	TLI (COD _{Mn})	TLI ()	营养状态 分级
墨水湖	夹河	9	69.97	69.06	60.19	70.10	57.53	66.81	中度富营养
墨水湖	中心岛	9	68.71	69.33	59.73	71.67	57.81	66.78	中度富营养
墨水湖	湖北出口处	9	70.95	59.86	67.43	65.37	57.11	65.59	中度富营养
西湖	老官渡	4	42.59	45.38	44.67	50.67	47.99	45.92	中营养
知音湖	后官湖	3	49.61	44.63	46.58	50.67	47.99	48.38	中营养
知音湖	皮泗海	3	55.18	49.02	49.60	49.21	59.62	52.46	轻度富营养
知音湖	高湖	3	46.44	49.02	49.08	57.80	49.94	50.37	轻度富营养
知音湖	南湖	3	48.45	44.63	45.92	47.84	45.89	46.98	中营养
东大湖	严家渡	2	61.71	53.93	62.35	65.37	51.48	60.15	中度富营养
东大湖	工棚山	2	69.27	55.96	61.86	61.50	60.07	63.01	中度富营养
东大湖	李家墩	2	69.80	55.08	54.65	67.27	56.82	62.89	中度富营养
金银湖	湖心	2	63.70	54.10	63.73	62.54	52.48	60.49	中度富营养

2.2 遥感模型

2.2.1 遥感数据采集

为了有效的消除卫星传感器的噪音对单个像元的干扰,在遥感数据样本采集时,一般的做法是在地面监测点位相同坐标上采集多个像元,然后取灰度值平均值作为该点的灰度值。通过试验发现,当在采样区域达到 9×9 像元时,灰度平均值趋于稳定,达到一个常量。因此,这里采用 9×9 像元作为采样窗口大小,其平均值作为该水质监测点对应的遥感波段灰度值,为下一步建立反演模型做准备。

在波段选择上,我们选择中巴卫星 1~4 波段进行建模。虽然在反演叶绿素和悬浮物时采用前 3 个波段(即可见光波段)通常已经足够,但许多研究表明,第四波段红外波段也是十分有用的,而我们的实验中也证明用 4 个波段的效果比用 3 个波段的效果有显著提高。

2.2.2 反演模型

采用与地面实测时间几乎同步的中巴资源卫星遥感影像,将同一水体监测点处的 TLI() 指数同各波段灰度值进行回归分析,为了提高反演精度,对波段 1 至波段 4 的灰度值进行了比值变换、对数变换、指数变换等各种代数变换和组合,将这些因子作为自变量与根据实测值计算得到的综合营养指数进行多元逐步回归分析,以建立水质遥感模型。通过大量的对比计算发现,采用波段 1~4 灰度值的自然对数值作为自变量可以取得较理想的结果,这时模型既简单又有效。而采用复杂的波段组合,如波段和、波段差等,虽然可以在一定程度上提高回归精度,但是自变量增加到了 7 个,模型较复杂。考虑到本次实验的样本数只有 46 个,而多元逐步回归一般要求样本量是参与分析的变量(自变量 + 因变量)个

数的 5~10 倍,故采用简单的单波段自然对数多元逐步回归分析。

3 结果与讨论

3.1 修正的综合营养状态指数的遥感反演模型

修正的综合营养状态指数的多元逐步回归结果和方差分析列于表 5。回归模型为:

$$TLI()^* = 197.45 \ln B1 + 242.43 \ln B2 - 407.98 \ln B3 + 81.00 \ln B4 - 639.59 \quad (11)$$

方差分析表明相关关系显著。相关系数 $R^2 = 0.513$, $P < 0.0001$ 。

表 5 TLI() * 多元逐步回归和方差分析结果

Tab.5 Results of Multivariate Regression and Variance Analysis

参数	值	残差 r	r 值	显著性概率 ($> t $)
γ -截距	- 639.59	205.31	- 3.115	0.003
$\ln(B1)$	197.45	78.59	2.513	0.016
$\ln(B2)$	242.43	76.95	3.151	0.003
$\ln(B3)$	- 407.98	80.31	- 5.080	<0.0001
$\ln(B4)$	81	27.76	2.918	0.006
R^2	校正 R^2	估计的标准差		
0.513	0.467	8.541		
项	自由度	平方和	均方	F 值
模型	4	3 231	808	11
残差	42	3 064	73	
总计	46	6 295		

P 值 ($Prob > F$) < 0.0001

3.2 利用遥感反演模型进行反演的结果

利用建立的 TLI() * 遥感反演模型对监测点综合营养状态指数进行反演,结果与实测值的评价

结果进行对比。结果如图 1 所示。

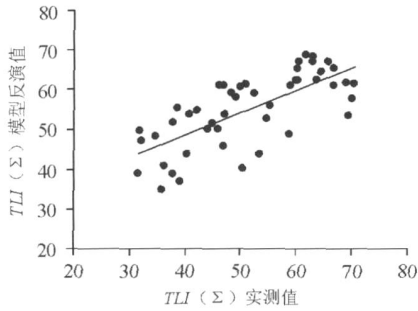


图 1 监测点综合营养状态指数的遥感反演结果和实测结果对比

Fig. 1 Comparison of in Situ TLII () and TLII () Retrieved by Model (11)

用模型式(11)对该景主要水体进行反演,可得到武汉市主要湖泊的综合营养状态指数分布图(图 2)。

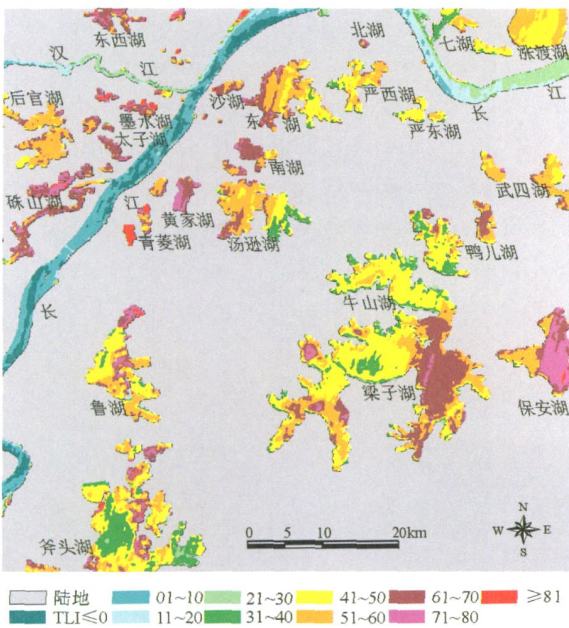


图 2 武汉市湖泊综合营养状态指数的遥感反演图

Fig. 2 TLII () Distribution of Lakes in Wuhan Derived by Model (11)

注:该图像是这样得到的:首先利用反演公式进行波段计算,然后对计算结果进行 3 次卷积,一次低通滤波加一次高斯低通滤波,再加一次低通滤波,移动窗口均为 13 × 13 像元,把图像转化为整数,再对 TLII 指数进行分级而得到。其中,东梁子湖和保安湖水体受薄雾的影响,结果可能失真。

4 结论

本实例研究表明,采用中巴资源卫星数据可以在一定精度上反演湖泊营养状态指数。由于中巴资源卫星数据可免费获取,这样就可以获取不同地区、不同时期的大量遥感数据,与其他卫星数据相比,具有成本低廉上的优势,因而适用于大范围 and 长期动态的水质监测。不过,与 Landsat5 和 Landsat7 卫星相比,就目前的中巴资源卫星数据而言,影像质量略差,有较多的条带噪声。由于湖泊水质在平面空间上的变化一般都是渐变的,因而可以通过高频滤波的影像处理技术滤除和平滑掉这些高频噪声。在经费不多和要求精度不太高情况下,这些数据是可以用于湖泊的水质监测和评价的。地面监测数据与卫星影像在获取的时间上不完全同步,可能也是影响本实例反演精度的一个主要原因。在采用历史监测数据的时候,通常很难满足时间同步这个条件。下一步,如能选择晴好天气,在卫星过境时进行地面同步采样监测,相信将能获得更好的结果。

参考文献:

- [1] 刘灿德,何报寅.水质遥感监测研究进展[J].世界科技研究与发展,2005,27(5):40~43.
- [2] ZHANG H L, HE B Y. Evaluation lake eutrophication with Enhanced Thematic Mapper data in Wuhan[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2006, 24(3):285~290.
- [3] 张海林,何报寅,丁国平.武汉湖泊富营养化遥感调查与评价[J].长江流域资源与环境,2002,11(1):36~39.
- [4] 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.
- [5] 中国资源卫星应用中心.资源 01/02 卫星介绍[EB/OL]. [2009]. http://www.cresda.com.
- [6] CARLSON R F. A trophic state index for lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2):361~369.
- [7] AIZAKI M, OTSUKI A, KURUSHIMA T, et al. Application of Carlson's trophic state index to Japanese lakes and relationships between the index and other parameters[J]. Verh International Verein Limnology, 1981, 21:675~681.
- [8] 金相灿,刘树绅,章宗涉.中国湖泊环境[M].北京:海洋出版社,1995.

ESTIMATING TROPHIC LEVEL INDEXES OF LAKES IN WUHAN BY USING CBERS-2 IMAGE

HE Bao-yin¹, LIANG Sheng-wen², DING Chao¹, YANG Xiao-qin¹, Hu Ke²

(1. Institute of Geodesy & Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China;

2. Wuhan Environmental Monitoring Center, Wuhan 430051, China)

Abstract : A study case for retrieving trophic level index of water body of lakes in Wuhan, Hubei Province, using CBERS-2 images data was presented. The aim of this study is to evaluate the probability of CBERS-2 images data on estimating the eutrophic level of inland water. At first step, the "real" TLI (both aggregative trophic level index (TLI) and revision carlson index (TSIM)) at the observation spots of some lakes in Wuhan were calculated using the monitoring water quality data. In the mean time, the mean grey values of a 9 × 9 pixels sampling window for band1-band4 at the corresponding spots were obtained and calculated from the CBERS-2 image which had been taken radiometric calibration and geometric correction beforehand. After that, an experience inversion model for TLI had been built through multivariate regression using the mean grey values of each band as independent variables. Finally, the TLI of all water bodies were inversed with this model and a map for its spatial distribution was drawn up. Results demonstrate that there are good correlation relationships between the natural logarithm values of TLI and spectral reflectance of CBERS-2 image, the square regression coefficients (R^2) is about 0.51. The distribution of inversed TLI of the lakes fixes the reality quite well. This might provide us a cheap way for monitoring inland water quality since CBERS-2 images data can be obtained freely from many data delivering centers in China.

Key words : trophic level index ; remote sensing ; lake ; CBERS-2