

基于 MODIS 影像的洞庭湖枯水期 总磷营养状况监测研究

张鸿键, 杨波, 李德平, 邬丹, 廖丹霞, 李景保

(湖南师范大学 GIS 研究中心, 湖南长沙 410081)

摘要: 为了解洞庭湖区枯水期的水体总磷的污染情况, 利用 MODIS 反射率与同步的总磷 (TP) 浓度实测数据进行相关性分析, 得出最优波段组合 $b_1 - b_5$ 。建立了三次多项式反演模型, 并运用模型反演得到 2005、2009 及 2013 年枯水期 3 期洞庭湖区总磷的分布图, 湖区水体主要以 IV 类水质和 V 类水质为主, 进一步采用以 TP 为基准的修正营养指数 (TSIM) 公式得出洞庭湖区的营养状态分布情况。结果表明: 2005–2013 年洞庭湖水体营养指数呈现略下降又上升的趋势。洞庭湖区湖水趋于富营养化状态, 且东洞庭湖最严重, 南洞庭湖次之, 西洞庭湖最轻, 洞庭湖湖体水质劣于入湖口水质。

关键词: 水污染; 总磷; 富营养化; MODIS; 洞庭湖

中图分类号: X824; X87

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)03-0062-06

Research on monitoring total phosphorus nutritional status of Dongting lake based on MODIS image

ZHANG Hongjian, YANG Bo, LI Deping, WU Dan, LIAO Danxia, LI Jingbao

(Research Centre of GIS, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In order to understand the status of TP pollution of water body in Dongting Lake in dry season, the paper used the (MODIS) data and measured TP data to conducted correlation analysis. The research indicated that the best band combination is $b_1 - b_5$. The paper set up a cubic polynomial model for retrieval of TP concentration. Furthermore, It obtained TP concentration map at Dongting lake area in 2005, 2009 and 2013 by use of model retrieval. Results showed that TP concentration in most area of Dongting Lake belong to class IV and class V. Finally, the trophic state index model (TSIM) was used to make eutrophication map of Dongting lake. Results suggest that the nutritional status of Dongting lake tends to eutrophication. The trophic index of water body in Dongting Lake dropped slightly and then rose from 2005 to 2013. The most serious area of eutrophication is the east of Dongting Lake, then the south of Dongting Lake, the west of Dongting Lake is relatively the best one. The water quality in inner lake are inferior to that near the outlets of four tributaries.

Key words: water pollution; total phosphorus (TP); eutrophication; MODIS; Dongting lake

1 研究背景

国内外许多学者开展了利用 MODIS 数据来估算水体污染参数的研究, 以此监测水质变化情况。目前国内外对叶绿素、悬浮物、透明度等具有显著光谱特征的水质参数反演开展了大量研究工作, 采用

半经验和经验方法建立了一系列反演模型和算法^[1-4]。目前对于 TP 的反演大多是通过数学统计分析 TP 浓度与 TP 实测光谱反射率的相关性来实现或通过 TP 浓度与其他水质参数的相关性实现间接反演。王学军等^[5]研究分析 TM 影像和实测的太湖水质参数的关系, 得出了 TP 等 7 种水质参数的反

收稿日期: 2014-01-19; 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41171342); 中欧科技合作的“龙计划”三期项目 (ID 10697); 省高校创新平台开放基金项目 (10K042); 杭州师范大学“遥感与地球科学创新平台”开放基金 (PDKF2010YG08); 地理学湖南省重点学科项目 (2012001)

作者简介: 张鸿键 (1989-), 女, 湖南湘潭人, 硕士研究生, 研究方向为资源环境遥感。

通讯作者: 杨波 (1974-), 男, 湖南长沙人, 副教授, 研究领域为资源环境与灾害遥感。

演模型,结果表明,利用相关分析等手段可以更充分利用遥感信息,使预测结果更加精确。王建平等^[6]基于TM数据应用人工神经网络模型反演了鄱阳湖TP等水质参数。许勇等^[7]采用MODIS多光谱影像建立了无机氮磷营养盐的定量反演模型。段洪涛等^[8]发现TP含量与光谱反射率在400~430 nm范围内有一定相关性,在705~890 nm范围内相关系数达到0.8。江辉^[9]基于多源遥感(MODIS、TM/ETM+数据)对鄱阳湖TP等水质参数进行了反演和分析。

Chang N B等^[10]基于MODIS数据采用遗传算法程序对美国佛罗里达州西部坦帕湾的TP浓度的空间分布进行了研究,并从飓风等自然灾害及变化的水文环境分析了TP浓度的分布规律。因此将MODIS数据应用于洞庭湖水体水质状况的监测是可行的。

洞庭湖区水体营养化状况的研究大多采用传统的统计分析方法对监测面点源数据进行分析研究^[11-13],此种方法只能通过每月固定的时间和监测断面的数据来分析湖区水体的水质状况。而使用遥感图像反演的方法,可以通过影像及时得出全湖水体的水质状况。也有研究者采用ETM+影像对东洞庭湖叶绿素a、悬浮物、黄色物质及湖泊营养化进行了研究^[14]。由于MODIS数据时间分辨率为一天,且一幅影像包含整个洞庭湖区,因此本文将利用多年洞庭湖枯水期的监测断面TP浓度的实测数据与同步的500m MODIS 1~7波段的反射率数据,对洞庭湖枯水期的水体营养状况进行研究,为政府部门的决策提供依据。

2 研究区概况及数据预处理

2.1 研究区概况

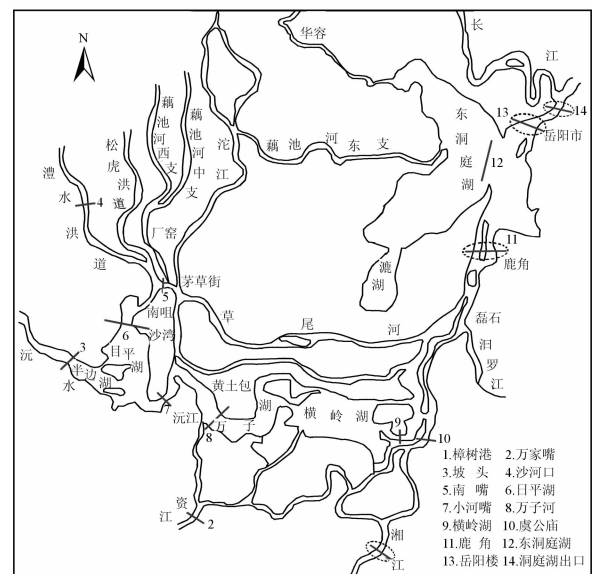
洞庭湖是中国第二大淡水湖泊,具有抗旱、泄洪、改善生态环境的重要作用。洞庭湖位于湖南省北部,长江中下游南岸,地理坐标东经111°40′~113°10′,北纬28°30′~30°20′。南接湘、资、沅、澧四水,北纳长江,主要分为东洞庭湖、南洞庭湖和西洞庭湖三部分,湖面总面积约2 740 km²。洞庭湖依据水情大致可以分为3个时期:6~9月为洪水期,4~5月和10~11月为平水期,12月至翌年3月为枯水期^[11]。据洞庭湖1991~2009年水质监测资料的研究结果表明,洞庭湖水质污染以氮磷污染为主,水体状况呈逐渐恶化的趋势,富营养化程度逐年加剧^[13]。遥感水质监测,是利用水体及污染物质的光

谱特性与遥感数据相结合,可以突破点状监测,快速、及时地提供整个湖泊范围的水质状况。由此可见对洞庭湖水质进行遥感实时监测和营养化水平的分析意义重大,也能对政府部门的污染防治决策提供依据。

2.2 数据获取及预处理

(1)水质实测数据。本文使用的2003~2010年的水质实测数据来自于洞庭湖生态环境监测中心,监测断面见图1。

(2)MODIS数据的获取与处理。MODIS重访周期为一天,能方便地获得与实测数据同步的水体反射率数据。本文使用的MODIS卫星影像是通过地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/csearch.jsp>)获取。①500m地表反射率值的MOD09GA。②2005、2009及2013年枯水期3期MOD09A1数据。该数据已经经过了大气校正,使用ENVI软件中MODIS的HDF格式数据转换补丁(MODIS Conversion Toolkit)进行几何校正。采用等经纬度投影:Geographic Lat/Lon,基准面为WGS-84。



(图中虚线椭圆所示区域为获得实测数据的断面)

图1 洞庭湖监测断面分布示意图

由于洞庭湖区在平水期和丰水期云量较多,选取2003~2010年期间洞庭湖枯水期MOD09GA数据质量较好且与实测数据同步的影像,提取反射率值,得到38个点数据。通常认为一个样本中出现概率很小的值叫做异常值,将与平均值的偏差超过两倍标准差的数据认为是异常值,予以剔除,以保证数据整体的可靠性和建模的准确性。根据总磷的浓度值对38个数据,进行异常值检验,剔除2个异常点

数据之后,将剩下 36 个点数据随机分成两组,一组 26 个数据用来做相关分析、建模,另一组 10 个数据用来作模型验证。

3 研究方法

3.1 基于 MODIS 数据的总磷(TP)反演模型构建

3.1.1 波段反射率与 TP 实测值的相关性分析 利用预处理后 MODIS 7 个波段的地表反射率值,与同步获取的 TP 实测数据进行单波段和多波段组合的 Pesrson 相关分析。其中波段组合包括任意两波段的和、差、比值以及和差组合算法。分析结果见表 1,表中列出了相关系数 $|R| > 0.6$ 的波段或波段组合。

3.1.2 曲线拟合及模型建立 运用 Spss19.0 软件对相关系数 $|R| > 0.6$ 的波段或波段组合与总磷(TP)分别进行线性、对数、指数、二次多项式、三次多项式模型的曲线估计分析,曲线估计结果显示三次项模型的相关性系数 R^2 均要高于其他模型。选取曲线估计决定系数 $R^2 > 0.5$ 的波段组合进行三次多项式非线性回归分析。

从表 2 可知,决定系数 R^2 最大的是波段组合

的三次多项式函数。因此波段组合 的三次多项式函数是最佳模型。

$$Y = -163.969X^3 + 5.73X^2 + 1.257X + 0.097(R^2 = 0.565)$$

(1)

式中: X 为波段组合 $b_1 - b_5$ 的光谱反射率; Y 为总磷浓度,mg/L。

表 1 MODIS 500 m 单波段及波段组合与 TP 的相关性分析结果

波段或 波段组合	R	波段或 波段组合	R
b_5	-0.603	$b_4 - b_6$	-0.6
b_6	-0.626	$b_5 + b_6$	-0.616
b_7	-0.634	$b_5 + b_7$	-0.621
b_1/b_2	0.608	$b_6 + b_7$	-0.632
$b_1 - b_5$	0.624	$b_1/(b_5 + b_6)$	-0.628
$b_1 - b_6$	0.641	$b_1/(b_5 + b_7)$	-0.627
$b_1 - b_7$	0.622	$b_1/(b_6 + b_7)$	-0.665
$b_4 + b_7$	0.616	$(b_2 + b_7)/(b_2 + b_7)$	-0.646
$b_4 - b_5$	0.602	$(b_1 - b_6)/(b_5 + b_7)$	-0.642

表 2 总磷(TP)与 MODIS 数据波段反射率的回归分析

波段或波段组合变量	回归模型	决定系数 R^2
$X = b_1 - b_5$	$Y = -163.696X^3 + 5.737X^2 + 1.257X + 0.097$	0.565
$X = b_1 - b_6$	$Y = -278.367X^3 + 25.521X^2 + 0.823X + 0.075$	0.538
$X = b_4 - b_5$	$Y = -124.205X^3 + 0.964X^2 + 1.164X + 0.105$	
$X = b_5 + b_7$	$Y = -12.232X^3 - 5.669X^2 + 0.349X + 0.145$	0.502

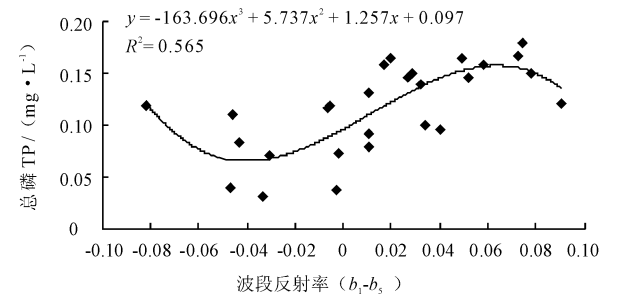


图 2 总磷的三次多项式回归模型拟合图

3.2 洞庭湖枯水期水体总磷营养状况评价方法

3.2.1 洞庭湖水体提取 采用莫伟华等^[15]提出的混合水体指数(CIWI),对 2005 - 2013 年间 3 期影像进行水体提取。公式如下:

$$CIWI = NDVI + NIR$$

(2)

式中: $NDVI = CH2 - CH1/CH2 + CH1$ 、 $NIR = CH7/\overline{CH7}$, 其中 $CH1$ 、 $CH2$ 、 $CH7$ 为通道 1、2、7 的反照率值, $\overline{CH7}$ 为通道 7 所有像元反照率的均值。

3.2.2 修正营养状态指数 采用 1981 年日本的相崎守弘等人提出的修正营养状态指数(TSIM)对湖泊水质营养状况进行评价,水体的叶绿素 a 浓度、透明度以及总磷浓度三个参数中的任何一个都可以独立用来评价水体的富营养状态。以 TP 为基准的公式如下:

$$TSIM(TP) = 10 \times (2.46 + \frac{6.71 + 1.15\ln TP}{\ln 2.5})$$

(3)

3.2.3 湖泊水体营养状况评价标准 采用国际通用的湖泊营养化程度划分标准,在同一营养状态下,指数越高,营养程度越重(表 3)。

表 3 湖泊水体营养状况划分标准			
营养状态指数范围		湖泊水体营养状态	
≤30		贫营养	
30 ~ 50		中营养	
50 ~ 60		轻度富营养	
> 50	60 ~ 70	富营养	中度富营养
	> 70		重度富营养

4 结果与分析

4.1 总磷反演模型的验证

利用模型验证组的 10 个点数据对回归模型反演值进行精度验证,公式为:

$$\text{相对误差}(\%) = \frac{\rho_{\text{实测TP}} - \rho_{\text{预测TP}}}{\rho_{\text{实测TP}}} \quad (4)$$

表 4 三次多项式函数回归模型反演精度验证

检验样本	实测值	回归模型值	相对误差
mg/L, %			
1	0.0527	0.0666	26.52
2	0.1360	0.1528	12.39
3	0.1470	0.1559	6.04
4	0.1503	0.1575	4.75
5	0.0860	0.0809	5.96
6	0.1170	0.1105	5.55
7	0.1340	0.1396	4.14
8	0.1500	0.1441	3.95
9	0.1660	0.1536	7.47
10	0.0890	0.0774	13.03

从表 4 可知,波段 1 与波段 5 之差与 TP 浓度建立的三次多项式回归方程,具有较高的拟合程度,回归模型反演精度验证相对误差在 30.00% 以内,平均误差值为 8.98%。从图 3 中可知,模型的预测值与实测值的复相关系数达到了 0.8。因此,波段 1 与波段 5 之差($b_1 - b_5$)对水体的 TP 浓度的反演模型较为适合。

基于 MODIS 数据对不同波段及波段组合与 TP 浓度进行相关分析,发现 MODIS 数据与 TP 浓度具有相对较好的相关性,不同波段拟合的相关系数并不高,可能有以下 2 个原因:一是 MODIS 通道波段未准确覆盖 TP 浓度的光谱高敏感区;二是湖区上空大气校正误差的影响。而对回归模型反演精度的验证表明基于 TP 的三次多项式回归模型具有良好的精度,可用于水体的水质预测。

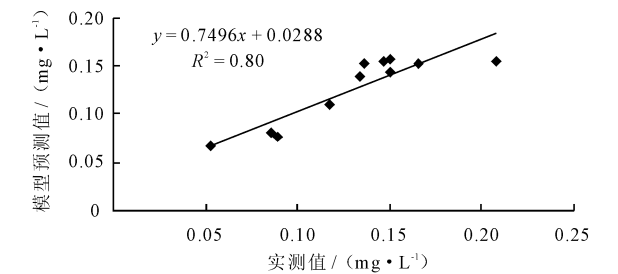


图 3 总磷的实测值与回归模型值的比较

4.2 洞庭湖总磷的反演结果

基于 TP 的三次多项式回归模型对 2005、2009 及 2013 年遥感影像进行 TP 浓度的反演,反演结果见图 4。

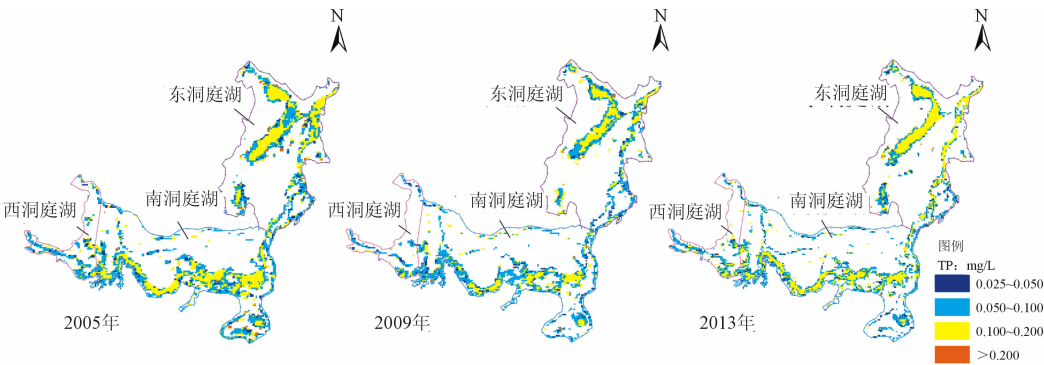


图 4 洞庭湖总磷反演结果图

根据我国环境保护局《地表水环境质量标准》(GB 3838 - 2002),总磷湖库水体分为如下等级(mg/L): $TP \leq 0.01$, I 类; $0.01 < TP \leq 0.025$, II 类; $0.025 < TP \leq 0.05$, III 类; $0.05 < TP \leq 0.10$, IV 类; $0.10 < TP \leq 0.20$, V 类; $0.20 < TP$ 劣 V 类。从表

5 中,可以看出从 2005 年 - 2013 年湖区的 TP 浓度最小值为 0.048 mg/L,为 III 类水质等级,最大值皆超过了 0.2 mg/L,为劣 V 类水质等级,湖区无 I 类、II 类水质分布,从平均值来看,湖区总磷浓度呈现 2005 年总磷浓度最高,2009 年总磷浓度有所降低,

而到 2013 年总磷浓度又有所回升,但总体变化不是很大,皆处于Ⅳ类水质范畴。从图 4 来看,Ⅴ类水质所占面积大,其次是Ⅳ类水质。水质等级在Ⅲ类~Ⅴ类,呈现从入湖区到湖心地区渐趋严重的趋势。而劣Ⅴ类水质则零星的分布在湖体边缘,主要是一些独立封闭的小区。这主要是因为从入湖区到湖心区域,水深逐渐变深,水流速度亦会较之缓慢,这样将会导致 TP 的富集,而在一些独立封闭的区域,水体的更新速度慢,TP 的富集就更加严重,水体的自净能力较弱,因此在这些封闭的区域呈现劣Ⅴ类水质。

表 5 洞庭湖总磷浓度的统计值				mg/L
年 份	最小值	最大值	平均值	标准差
2005	0.048	0.286	0.096	0.040
2009	0.048	0.231	0.087	0.034
2013	0.048	0.237	0.094	0.036

4.3 洞庭湖水质营养状况评价

为了进一步了解总磷浓度对于洞庭湖水质营养状况的影响,采用以 TP 为基准的修正营养状态指数(*TSIM*)计算洞庭湖 3 期影像水体的营养状况,结果见图 5。

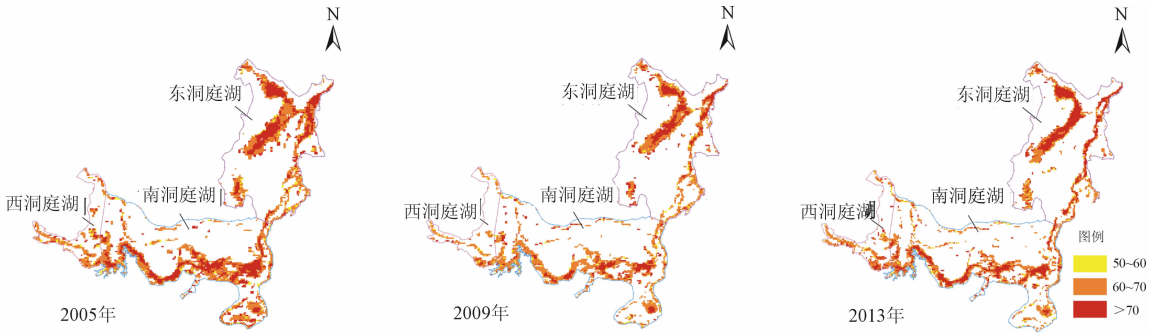


图 5 以 TP 为基准的 *TSIM* 指数分布图

由于洞庭湖的污染指标主要是 TP 和 TN,因此原则上以 TP 为标准的 *TSIM* 指数要比多个水质参与评价的综合污染指数偏高。以 TP 为标准的 *TSIM* 指数分布能够很好地反映出洞庭湖湖区总磷污染的情况。从表 6 洞庭湖营养状态分级所占百分比可以看出,湖区中度富营养状态占主要部分,其次是重度富营养状态,全湖地区无中营养和贫营养状态。2005-2013 年,轻度富营养状态所占百分比无显著变化,比例略有上升。重度富营养状态在 2009 年下降到 28.26%,在 2013 年继而回升到 38.81%,比例略高于 2005 年。结合图 5 和表 6 可以看出,整个洞庭湖的营养化水平则呈现:东洞庭湖>南洞庭湖>西洞庭湖。其中,2013 年重度富营养比例上升的区域主要是东洞庭湖和西洞庭湖地区。从图上还可以看出,洞庭湖湖体水质劣于入湖口水质。

洞庭湖的 TP 污染严重,有较明显的富营养化趋势,引起的主要原因有:①来源于城镇工业废水、生活污水。据调查,洞庭湖环湖周围年排入湖内工业废水约 3 亿 t,年排入湖内的生活污水约 2.7 亿 t,工业废水中以造纸、化肥行业为主,化工制造业污水的排放是导致 TP 含量超标的主要原因之一。②农业的面源污染。农业面源污染是导致 TP 含量超标的另一个主要原因。而农业化肥的使用范围广,强

度大,且湖区养殖业发达,畜禽类粪便多,产生了面源污染,湖区的农业面源污染的治理措施也较薄弱,造成了水体 TP 浓度的升高。③洞庭湖自身水体环境变化的影响。枯水期洞庭湖水位较低,使得洞庭湖水体环境容量减小,自净能力减弱。上述因素导致 TP 的富集,当 TP 浓度超过 0.1 mg/L(如果磷是限制因素)时,藻类会过量繁殖,从而致使湖区水体营养化水平趋于富营养化状态。引起 TP 浓度以及水体的营养化水平的年际变化的原因主要有:

表 6 洞庭湖营养状态统计表					%
年份	营养状态	全湖	东洞庭湖	南洞庭湖	西洞庭湖
2005	轻度富营养	6.49	6.28	5.47	10.91
	中度富营养	55.17	51.70	54.23	71.88
	重度富营养	38.34	42.01	40.30	17.19
2009	轻度富营养	6.59	5.77	6.43	10.65
	中度富营养	65.15	56.95	69.37	79.94
	重度富营养	28.26	37.27	24.20	9.41
2013	轻度富营养	6.71	5.52	6.95	9.04
	中度富营养	54.47	45.86	57.99	67.66
	重度富营养	38.81	48.62	35.07	23.31

①2007 年洞庭湖周边以造纸厂整治为主的污染治理工作开展,使得洞庭湖的水体有了改善。因此 2009 年洞庭湖的富营养状况有所好转。②三峡水库运行以来,使得长江来沙减少,导致洞庭湖水位变幅缩小,换水周期延长,从而导致 TP 的富集,使得 2013 年富营养状况渐趋严重。

5 结 语

本文以洞庭湖枯水期的水体为研究对象,在分析实测数据总磷(TP)浓度与 MODIS 波段及波段组合相关关系的基础上,由 TP 浓度的敏感波段组合建立 TP 的经验反演模型,最后采用修正的营养状态指数(TSIM)得到了洞庭湖区水体 2005 年、2009 年及 2013 年 3 个时期的营养状态分布图,主要的结论如下:

(1)对 MODIS 数据不同波段及波段组合与水质参数进行相关分析。结果显示:TP 的最佳遥感反演波段为 500m 分辨率的反射率($b_1 - b_5$)组合,并且建立了三次多项式的遥感反演模型。

(2)运用遥感反演模型及 2005 年、2009 年及 2013 年 3 个时期 MODIS 数据进行 TP 的反演,得出了洞庭湖区水体 TP 的分布图,结果显示,洞庭湖 TP 浓度皆处于Ⅲ类水质及以上,大部分区域是Ⅳ类和Ⅴ类,甚至有部分水质处于劣Ⅴ类。结果表明,洞庭湖水体在枯水期受 TP 污染严重。

(3)采用修正的营养状态指数(TSIM),得到了以 TP 为基准的营养状态指数计算表达式。以 TP 为基准的营养状态指数表达式较好地反映了 2005、2009 及 2013 年 3 个时期洞庭湖水体 TP 的分布状况,反演结果表明,洞庭湖在枯水期已经呈现 TP 富营养化趋势,且空间分布不均衡,东洞庭湖的富营养化程度最严重,南洞庭湖次之,西洞庭湖相对较轻。富营养化状况在 2009 年有所好转,但 2013 年出现了富营养状况渐趋严重的状况。因此,应该加强湖区 TP 污染的防治,在污染整治措施实施一段时间后,及时监测湖区污染状况,并采取有效措施,保护好治理的成果,避免反弹现象的发生,维持良好的水环境。

参考文献:

[1] Barnes B B, Hu C, Schaeffer B A, et al. MODIS-derived

spatiotemporal water clarity patterns in optically shallow florida keys waters: A new approach to remove bottom contamination[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 377 - 391.

- [2] Pan M, Yang K, Zhao X, et al. Remote sensing recognition, concentration classification and dynamic analysis of cyanobacteria bloom in Dianchi Lake based on MODIS data [C]// Geoinformatics, 20th International Conference on. IEEE, 2012.
- [3] 祝令亚. 湖泊水质遥感监测与评价方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2006.
- [4] Taylor Long M, Peter Marinello. Lake Clarity Assessment in Minnesota's Northern Superior Forest Ecoregion using MODIS Satellite Imagery[EB/OL]. [2012 - 12 - 10]. [2014 - 2 - 20]. http://www.r-s-c-c.org/sites/default/files/long_marinello_report.pdf.
- [5] 王学军, 马 廷. 应用遥感技术监测和评价太湖水质状况[J]. 环境科学, 2000, 21(6): 65 - 68.
- [6] 王建平, 程声通, 贾海峰, 等. 用 TM 影像进行湖泊水色反演研究的人工神经网络模型[J]. 环境科学, 2003, 24(2): 73 - 76.
- [7] 许 勇, 成长春, 张 鹰, 等. 基于 MODIS 影像的射阳河口海域可溶性无机氮磷营养盐浓度遥感监测研究[J]. 海洋通报, 2012, 31(6): 700 - 706.
- [8] 段洪涛, 张 柏, 宋开山, 等. 长春市南湖富营养化高光谱遥感监测模型[J]. 湖泊科学, 2005, 17(3): 282 - 288.
- [9] 江 辉. 基于多源遥感的鄱阳湖水质参数反演与分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- [10] Chang N B, Xuan Z, Yang Y J. Exploring spatiotemporal patterns of phosphorus concentrations in a coastal bay with MODIS images and machine learning models[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 134: 100 - 110.
- [11] 来红州, 莫多闻, 苏成. 洞庭湖演变趋势探讨[J]. 地理研究, 2004, 23(1): 78 - 86.
- [12] 黄代中, 万 群, 李利强, 等. 洞庭湖近 20 年水质与富营养化状态变化[J]. 环境科学研究, 2013, 26(1): 27 - 33.
- [13] 李有志, 刘 芬, 张灿明. 洞庭湖湿地水环境变化趋势及成因分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8 - 9): 1295 - 1300.
- [14] 高泽润. 基于 ETM + 影像的洞庭湖水体富营养化监测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [15] 莫伟华, 孙 涵, 钟仕全, 等. MODIS 水体指数模型(CI-WI)研究及其应用[J]. 遥感信息, 2007(5): 16 - 21.