

# 基于高光谱技术的湖泊富营养化综合评价研究

——以贵阳市百花湖为例

吴廷宽<sup>1</sup>, 贺中华<sup>1</sup>, 梁虹<sup>1</sup>, 杨朝晖<sup>2</sup>, 曾信波<sup>2</sup>, 刘绥华<sup>1</sup>, 陈栋为<sup>3</sup>, 焦树林<sup>1</sup>, 李秋华<sup>4</sup>

(1. 贵州师范大学地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001; 2. 贵州省水利厅, 贵州 贵阳 550002;

3. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550000;

4. 贵州师范大学贵州省山地环境信息系统和生态环境保护重点实验室, 贵州 贵阳 550001)

**摘要:**为了能够准确、快速、大范围地对湖泊富营养化进行监测评价,以贵阳市百花湖为实例,首先,对其水体进行光谱实测与水体采样实验,以及对水体光谱进行归一化、一阶微分、二阶微分等处理,诊断各水质参数的敏感波段,建立其水质参数的高光谱遥感定量模型;其次,探讨湖泊水质高光谱反射率与水质参数浓度之间的定量关系,并采用综合营养状态指数法(TLI)对百花湖富营养化进行评价。结果表明:(1)利用水体光谱的一阶微分反射率分析光谱与水质参数之间的相关性,得出水质参数(Chl-a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub>)的敏感波段分别为699nm、823nm、399 nm、563nm、504nm;(2)利用水质参数敏感波段对湖泊水质参数进行估测的效果较为理想,各估测模型R<sup>2</sup>分别达到0.8276、0.7711、0.7917、0.9213、0.8328;(3)采用水质参数的实测值与估测值对百花湖富营养化评价结果是一致的,且均为中营养化,说明采用高光谱技术对湖泊富营养化的监测与评价是可行的。

**关键词:**高光谱技术;水质参数;富营养化;综合评价;百花湖

中图分类号:TV211.1

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)02-0028-07

## 1 引言

湖泊富营养化是指湖泊水体在自然因素和人类活动的影响下,大量营养盐输入湖泊水体,使湖泊逐步由生产力水平较低的贫营养状态向生产力水平较高的富营养状态变化的一种现象<sup>[1]</sup>。为了准确评定湖泊所处的富营养状态,进而为富营养化湖泊的防治提供科学依据,世界各国的科学家提出了许多富营养化评价方法,并在应用中收到了较好的效果<sup>[2-3]</sup>。传统的监测方法是采集水样,然后在实验室经过实验得出水质参数数据,这样的方法不仅费时费力,且不能及时地反应水质状况和大面积的水质分布。水质遥感监测是通过分析水体反射光谱特征与水质参数浓度之间的关系,建立

水质参数的反演算法。这种方法不仅省时省力,而且还可以利用卫星影像进行全面、及时的水质监测。目前,国内外学者通过水质参数与遥感数据相结合,成功估测出水质参数浓度,并建立富营养化评价模型<sup>[4-8]</sup>。

由于多光谱传感器的光谱分辨率较低,很难辨别水质参数的诊断性吸收特征,光谱数据的定量分析仍然是湖泊水质遥感研究的难点。随着高光谱传感器的出现,其达纳米(nm)级的光谱分辨率,可以获得目标对象的诊断性光谱特性,实现遥感信息模型参数的确定,这很好的解决了常规遥感中存在的问题,提高了多参数反演的精度。利用高光谱遥感技术监测内陆水体的水质参数具有很大的发展潜力,并且在水体富营养化状态研究中获得了很好的评价<sup>[9]</sup>。段红涛等通过模

收稿日期:2015-04-07

基金项目:国家自然科学基金资助(41471032);贵州师范大学研究生创新基金资助(研创2014(20));贵州省科技厅自然科学基金资助(贵州省科技厅自然科学基金 黔科合J字[2010]2026号,黔科合J字[2013]2208号);贵州师范大学2014年博士科研启动项目资助;贵州省科学技术基金(黔科合J字[2014]2127号,黔科合J字[2013]2300号);贵州省水利厅科技基金(KT201402)

作者简介:吴廷宽(1989-),男,贵州遵义人,硕士研究生,研究方向:喀斯特水文水资源与GIS。E-mail:854990759@qq.com

通讯作者:贺中华(1976-),男,贵州兴义人,博士,教授,硕士生导师,研究方向:环境遥感。E-mail:zhonghuahe@gznu.edu.cn

拟水质参数浓度,并结合修正营养状态指数 TSIM 对查干湖和长春市南湖水体富营养化程度进行评价<sup>[9,14]</sup>;张囡囡、臧淑英利用高光谱数据对扎龙湿地克钦湖富营养化状态进行了评价<sup>[15]</sup>;王婷等通过建立水质参数高光谱估测模型和营养指数求平均值的方法得到了鄱阳湖富营养化高光谱遥感监测模型<sup>[16]</sup>。

总体来说,在利用高光谱评价湖泊水质的研究中,大多倾向单一水质参数或几个参数求平均值等方法进行评价,此类方法的评价结果较片面且综合性较差,致使评价结果之间不具有一定的可比性。基于以上不足,本文利用百花湖水体的高光谱实测数据和采样实验数据,选择叶绿素 a(Chl-a)、透明度(SD)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)建立高光谱估测模型。并结合综合营养评价指数(TLI)对百花湖富营养化程度进行评价,以期今后高光谱遥感监测湖泊富营养化程度提供理论基础。

## 2 数据获取及评价方法

### 2.1 研究区概况

百花湖位于贵州省中部,距贵阳市 16km,位于乌江一级支流猫跳河的中游,是一个人工湖泊。湖面面积 14.5km<sup>2</sup>,总库容 1.82×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,最大水深为 45m,平均水深 10.8m,整体上呈一狭长带状。为了获取该区域的水质参数和光谱数据,在研究区布置了 17 个采样点(图 1),采样点数据获取时间为 2015 年 1 月 13 日上午 10 时至下午 15 时。在 17 组采样数据中随机选取 10 组数据建立模型,其他 7 组数据用于模型验证。



图 1 研究区及采样点示意图

Fig.1 Location of the study area and the sampling sites

### 2.2 数据获取

(1)水质参数的获取。在国家标准的基础上,根据

遥感实验同步要求的特点,每个采样点取表层 0.5m 处水样进行实验室分析,分析的参数包括叶绿素 a(Chl-a)、透明度(SD)、总磷(TP)、总氮(TN)、高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)(按有关湖泊调查规范<sup>[14]</sup>进行)。其中透明度用塞氏罗盘现场测定;总磷采用过硫酸钾消解法进行预处理,钼梯抗分光光度法测定;总氮采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定;叶绿素 a 采用改进的反复冻融、丙酮浸提测定;其他指标按照国家标准方法测定。此外,在进行光谱量测的同时,用 GPS 对采样点定位,并采用 YSI-6600V2 便携式水质多参数测定仪原位测定水温、电导率、PH、溶解氧等指标。

(2)水体光谱反射率采集。水体光谱反射率测量是采用美国 ASD FieldSpecFR 全波段野外光谱仪(350~2 500nm)进行野外光谱数据测量。该仪器能以 0.1s 的速度记录 350~2 500nm 的光谱数据,光谱分辨率在 350~1 050nm 之间是 3nm,在 1 000~2 500nm 之间是 10~12nm 左右,1m 长标准光纤探头,光谱仪探头视场角为 25°。测量时间内天空基本无云,风力 1~2 级,水面平静。测量在船上进行,标准光纤探头距离水面 1m 左右,测量时垂直水面,借助白板测量,仪器自动将水体的向上辐射率转化为水体的反射率,每个样点至少测量 10 次,取平均值作为该点的实际光谱反射值。

### 2.3 评价方法

本次富营养化评价采用水体综合营养状态指数法,它是由中国环境监测总站推荐的“湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定”提供。该评价方法参数包括叶绿素 a(Chl-a)、总磷(TP)、总氮(TN)、透明度(SD)和高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)<sup>[1,23]</sup>,其计算公式为:

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

式中:TLI(Σ)为综合营养状态指数;W<sub>j</sub>为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;TLI(j)为第 j 种参数的营养状态指数;m 为评价参数的个数。以 Chl-a 作为基准参数,则第 j 种参数的归一化的相关权重计算公式为:

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

式中:W<sub>j</sub>为第 j 种参数的营养状态指数的相关权重;r<sub>ij</sub>为第 j 种参数与基准参数 Chl-a 的相关系数;m 为评价参数的个数;r<sub>ij</sub>及 r<sub>ij</sub><sup>2</sup>值见表 1。

表1 中国湖泊部分参数与Chl-a的相关关系 $r_{ij}$ 及 $r_{ij}^2$ 值<sup>[23]</sup>  
Table1 The  $r_{ij}$  and  $r_{ij}^2$  values of the correlation between the parameters of Chinese lakes and chl-a

参数	Chl-a	TP	TN	SD	COD <sub>Mn</sub>
$r_{ij}$	1	0.84	0.82	-0.83	0.83
$r_{ij}^2$	1	0.7956	0.6724	0.6889	0.6889

分营养状态指数(TLI)计算公式为:

$$TLI(\text{Chl-a})=10(2.5+1.0861\ln\text{Chl-a}); \quad (3)$$

$$TLI(\text{TP})=10(9.436+1.624\ln\text{TP}); \quad (4)$$

$$TLI(\text{TN})=10(5.453+1.694\ln\text{TN}); \quad (5)$$

$$TLI(\text{SD})=10(5.118-1.94\ln\text{SD}); \quad (6)$$

$$TLI(\text{COD}_{\text{Mn}})=10(0.109+2.661\ln\text{COD}_{\text{Mn}}) \quad (7)$$

TLI 指数营养状态分级(评价)标准参见表 2。

表2 TLI与水体营养类别的对应关系  
Table2 The corresponding relation between TLI and water body nutrient categories

TLI 与水体营养类别的对应关系					
$TLI(\Sigma)<30$	$30\leq TLI(\Sigma)\leq 50$	$TLI(\Sigma)>50$	$50<TLI(\Sigma)\leq 60$	$60<TLI(\Sigma)\leq 70$	$TLI(\Sigma)>70$
贫营养	中营养	富营养	轻度富营养	中度富营养	重度富营养

### 3 结果与分析

#### 3.1 水质高光谱模型

##### 3.1.1 叶绿素 a 高光谱估测模型

对光谱数据进行处理时,为尽可能的去除光谱测量时外界因素对测量数据的影响,迅速确定光谱曲线弯曲点及最大值点的波长位置和反映出参数指标明显特征的波段,本文对现场采集的水体光谱做了归一化、一阶微分、二阶微分、倒数、对数等处理。并在此基础上,做了一系列的相关分析,其中效果较好的是归一化、一阶微分和二阶微分光谱。这是由于归一化处理减少了环境遮蔽以及测量角度的变化给测量带来的影响,这样可以使得不同的测量数据能进行比较,而一阶、二阶微分处理可以去除部分线性、噪声光谱对目标参数的影响,所以从中选取归一化、一阶微分两种较理想的反射率来分析各水质参数的敏感波段。图 2 是经过归一化、一阶和二阶微分处理后的光谱反射率与叶绿素 a 浓度的相关系数图,从图 2 中可以提取出与叶绿素 a 相关系数较高的波段,并用来建立高光谱定量模型。

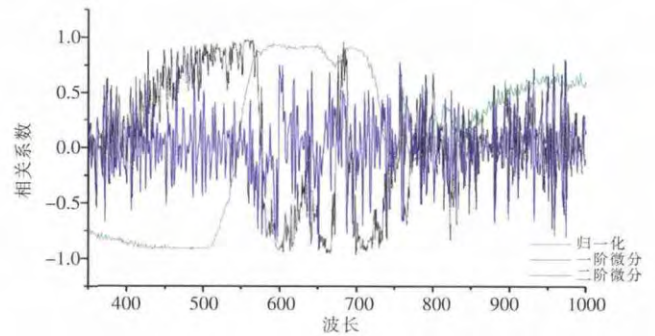


图2 归一化、一阶微分、二阶微分光谱与叶绿素 a 浓度的相关性(横坐标为波长/nm)

Fig.2 The correlation between Chlorophyll-a concentration and normalization, first-order differential and second-order differential spectrum

从图 2 中可以看出,叶绿素 a 与归一化水体反射率在 500nm 和 700nm 附近的相关性较显著,相关系数的绝对值比较高,说明这些波段的光谱反射率受浮游植物浓度变化的影响较大<sup>[10]</sup>。因此,选取了 511nm、691nm、700nm 波段的归一化反射率来建立回归方程。而从叶绿素 a 与一阶微分光谱的相关系数图(图 2)得知,在多个波段处的相关系数较高,相关系数绝对值都达到了 0.9 以上,说明这些波段适合用来建立模型,因此选取了 683nm、699nm 波段反射率的一阶微分值来建立回归方程。由于波段比值法可以部分地消除水面光滑度和微波随时间和空间变化的干扰,在一定程度上减少其他物质的影响<sup>[11]</sup>,在对百花湖水体归一化、一阶微分反射率特征波段的比值处理中发现 700nm/511nm 和 683nm/699nm 的相关性最好,进而与叶绿素 a 建立模型。用诊断出的敏感波段及比值与水质参数建立回归模型,其中精度较高的模型如表 3 所示, $R^2$  为回归分析的决定系数,数值介于 0 到 1 之间,这个数值越大说明回归的越好; $P$  为显著性概率,当  $\leq 0.05$  时,说明该水平下统计意义显著; $F$  为检验系数,其值越大模型效果越好。从中对比发现用一阶微分后 699nm 波段处的线性模型最好,得到最理想的模型为:

$$y=-48487.266x+0.255 \quad (8)$$

式中: $y$  为 Chl-a 浓度(mg/L); $x$  表示 699nm 处的一阶微分反射率,模型的  $R^2$  为 0.941。结果与李云亮<sup>[11]</sup>用的 699nm 波段完全一致;与宋玲玲<sup>[12]</sup>用的 695.5nm、李素菊<sup>[13]</sup>用的 689nm、段洪涛<sup>[14]</sup>用的 705nm、张国图<sup>[15]</sup>用的 703nm 光谱区域类似;与 Rundquist<sup>[16-18]</sup>等的研究结论一致。Rundquist 等通过大量的现场数据证明,690nm 附近反射率的微分值与叶绿素 a 浓度有较好相关性,利用 690nm 处反射率微分值估算叶绿素 a 浓度效果最佳,且精度总体高于比值法。

表3 水质参数与归一化、一阶微分反射率的拟合模型  
Table3 Regression analysis of the water quality parameters and normalization and first order differential reflectivity

自变量	模型类型	拟合模型方程	R <sup>2</sup>	P 值	F 值	
归一化	511	线性	$y=-46.869x+66.571$	0.814	0.002	26.303
		一元二次	$y=27.431x^2-114.101x+107.703$	0.815	0.015	10.984
	700	线性	$y=33.081x-11.599$	0.797	0.003	23.600
		一元二次	$y=87.517x^2-74.7x+21.219$	0.816	0.015	11.058
	700/511	线性	$y=30.527x-6.546$	0.822	0.002	27.766
		一元二次	$y=27.989x^2+2.025x+0.562$	0.825	0.013	11.788
一阶	683	线性	$y=64440.13x+7.819$	0.913	0.000	62.974
		指数	$y=7.547e^{7576.242x}$	0.917	0.000	66.550
	699	线性	$y=-48487.266x+0.255$	0.941	0.000	96.293
		指数	$y=3.142e^{-5623.481x}$	0.920	0.000	69.311
		线性	$y=-10.465x+8.347$	0.819	0.002	27.195
	683/699	一元二次	$y=15.796x^2-10.935x+7.682$	0.867	0.006	16.344
	指数	$y=38.029e^{-1.252x}$	0.852	0.001	34.489	

3.1.2 TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 的高光谱估测模型

TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 作为水体富营养化评价不可缺少的指标,为诊断各指标参数的敏感波段和提高模型反演精度,将光谱进行归一化、一阶微分、二阶微分、倒数、对数等处理。在此基础上,将各水质参数与光谱进

行相关分析。结果发现 TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 水质参数均与一阶微分光谱的相关性较好,这与张国囡、臧淑英<sup>[15]</sup>对扎龙湿地克钦湖富营养化状态高光谱遥感评价中的结论一致。图 3 是 TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub> 浓度与一阶微分光谱的相关系数图。

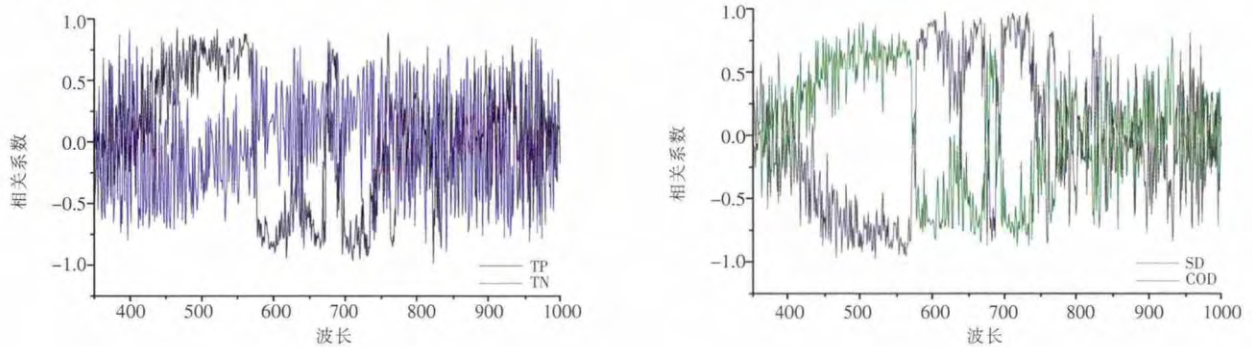


图3 一阶微分光谱反射率与水质参数 TP、TN(左)及 SD、COD(右)的相关性(横坐标为波/nm)  
Fig.3 Correlation between the first order differential reflectivity and water quality parameters

从图 3 可看出 TP 与一阶微分光谱在很多波段处的相关系数都达到了 0.9 以上,选择其中相关系数最显著的 721nm、823nm 处的波段反射率来建立回归方程;TN 与部分一阶微分光谱的相关系数达到了 0.9 以上,选择其中相关系数最高的 399nm、840nm 波段的一阶微分反射率来建立回归方程;SD 与一阶微分光谱在 560nm、720nm 波段附近有较好的相关性,且相关系数的绝对值比较高,选取了 563nm、720nm 波段的一阶微分反射率来建立 SD 的回归方程;COD<sub>Mn</sub> 参数在 500nm 和 700nm 附近的几个波段处的相关系数超过了 0.8,因此

选择相关系数最高的 504nm 和 717nm 波段值来建立模型。由于波段比值可以部分地消除水面光滑度和不同时间、空间的微波干扰,并在一定程度上减少其他物质的影响<sup>[11]</sup>,因此用各水质参数的敏感波段及波段比值建立回归方程,最终得到 TP 最理想的模型为:

$$y=-186.543x+0.019 \tag{9}$$

式中:y 为 TP 浓度 (mg/L);x 为 823nm 波段处的一阶微分反射率,模型的 R<sup>2</sup> 为 0.91。结果与段洪涛等人<sup>[9]</sup>用的 810nm、865nm 光谱区域类似。

TN 的最理想模型为:

$$y=860.672x+2.076 \quad (10)$$

式中: $y$ 为TN含量(mg/L); $x$ 为399nm波段处反射率的一阶微分值, $R^2=0.84$ 。

SD的最理想模型为:

$$y=2.338e-4000.131x \quad (11)$$

式中: $y$ 为SD(m); $x$ 为563nm波段的一阶微分值, $R^2=0.94$ 。其结果和王婷<sup>[22]</sup>等用的564nm光谱区域类似,用来建模的720nm波段与段洪涛<sup>[21]</sup>的720nm一致。

COD<sub>Mn</sub>的最理想模型为:

$$y=893.267x+1.838 \quad (12)$$

式中: $y$ 为COD<sub>Mn</sub>浓度(mg/L); $x$ 为504nm波段的一阶微分反射率值, $R^2=0.81$ 。

### 3.1.3 模型精度检验

为验证模型实际应用的准确性,选用剩余的7个点来对模型进行精度检验。将模型估测出的水质参数

值和实测的水质参数值进行精度分析,如图4所示,从图中可看出Chl-a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub>的 $R^2$ 分别为0.8276、0.7711、0.7917、0.9213、0.8328,由此得知所建模型精度均较高,可用该模型估测出的水质参数浓度对百花湖富营养化进行评价。

### 3.2 水体富营养化评价

利用17个水样点的实验数据按公式1~7计算得出每个样点的综合营养指数如图5(实测值)所示,从图中可知,百花湖冬季的综合营养指数在30~35之间,按营养状态分级(评价)标准(见表2)划分,百花湖冬季水体处于中营养状态。通过百花湖水体的光谱反射率模拟得到估测模型(模型8~12),进而反演各水质参数浓度,得到17个水样点各水质参数的估测值为评价指标,根据公式1~7计算得出每个样点的综合营养指数如图5(估测值)所示,按营养状态分级(评价)标准

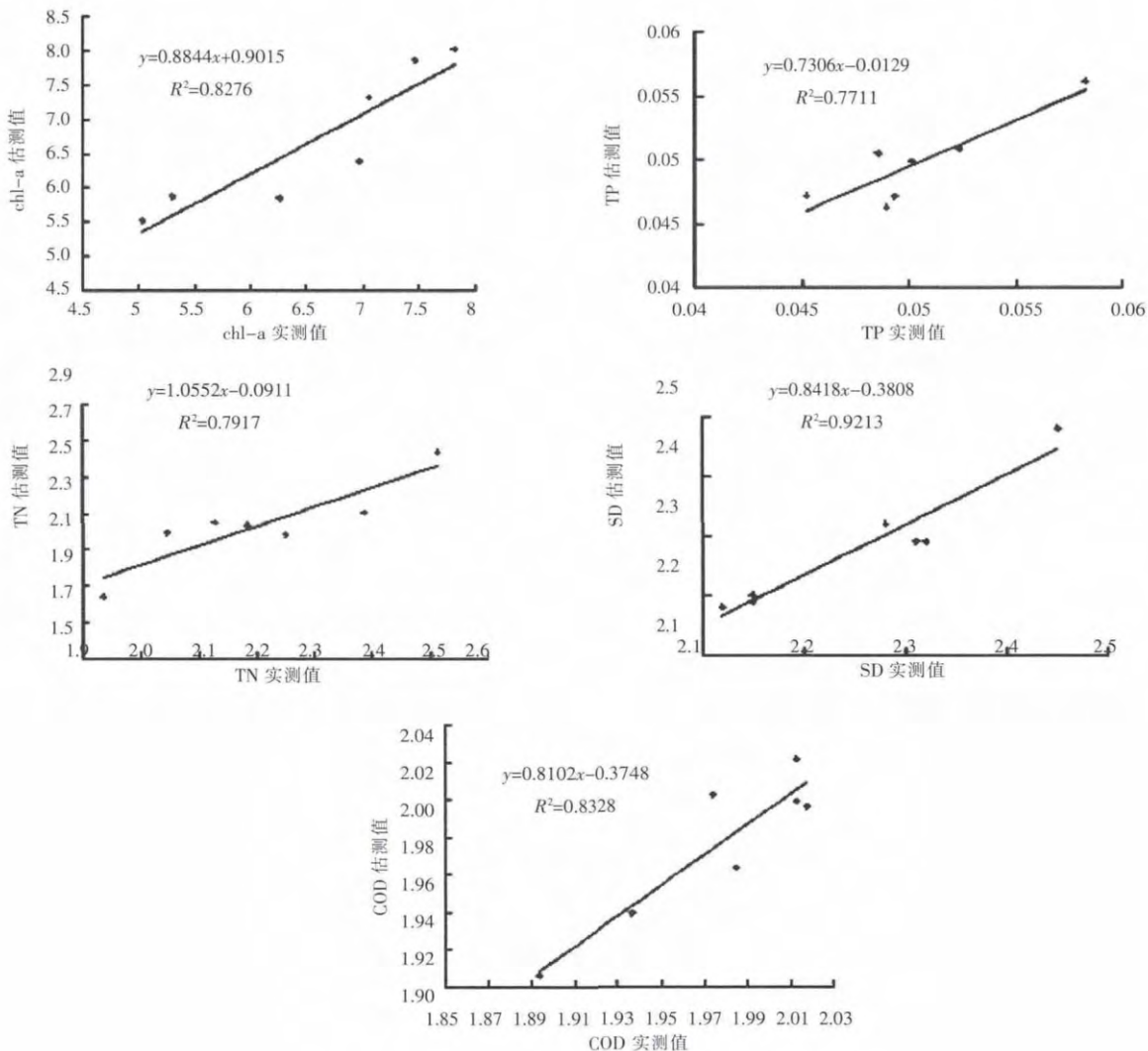


图4 高光谱估测水质参数和实测水质参数验证

Fig.4 Modeling validation with estimated data and measured data of water quality parameters

(见表2)划分百花湖冬季富营养化评价结果为中营养状态。由各水质参数的实测值和估测值得出的两种评价结果(图5所示)对比可知:两种评价结果的综合营

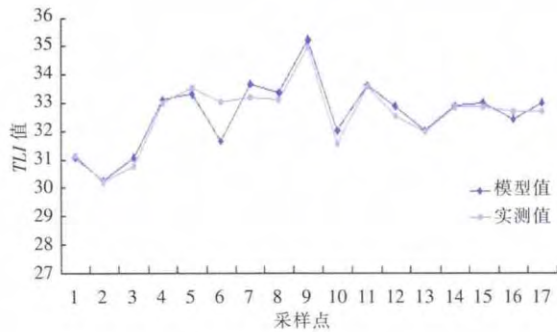


图5 TLI的实测、模拟结果  
Fig.5 The simulated and measured results of TLI

有较高的准确性,可以用来对湖泊进行富营养化评价。

#### 4 讨论

(1)利用实验所得水质参数浓度值结合综合营养指数法得出的结果是较准确的,这种算法很成熟且是中国环境监测总站推荐的。由百花湖实验所得水质参数浓度值的评价结果可知:百花湖冬季处于中营养化状态,且综合营养指数变化很小,都在30~35之间。这是因为冬季水温较低,各水质参数很稳定且浓度较低,当然这和近几年人们对湖泊的保护也是息息相关的。

(2)本文体现出高光谱技术在富营养化评价中的优势,不仅能够快速获取较为准确的评价结果,且较传统水质监测方法更省时、省力、快速、监测范围广等优点,能及时为湖泊管理者提供最新的富营养状况。高光谱技术能快速的监测出Chl-a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub>参数浓度作为参数,再利用TLI计算方法直接得到富营养化评价结果,从而省掉了繁琐的实验过程,直接得到准确的评价结果。从模型评价精度看,高光谱模型的评价精度也很高,利用其反演出来的水质参数浓度做的评价结果和实验所得的水质参数浓度做的评价结果是一致的,并且两者计算出的综合营养指数非常接近(如图5所示)。这也再一次说明了高光谱技术的优越性。

(3)在模型的建立中,由于实测数据的缺乏,这些成果的适用性还需大量实验研究加以验证。因此,加强实验研究、探索水质参数和高光谱数据的定量关系,从而建立更合理、可靠、适用的模型是利用高光谱遥感技

术进行水质监测的长远研究课题。

#### 5 结论

本文通过对百花湖水体光谱反射率与水质参数做相关分析,提取各水质参数的敏感波段来建立参数估测模型。结合综合营养状态指数法,用估测出的各水质参数浓度值对百花湖进行富营养化评价。结果表明:

(1)通过对百花湖水体光谱进行归一化、一阶微分、二阶微分等处理,分析光谱与水质参数之间的相关性,得出水质参数(Chl-a、TP、TN、SD、COD<sub>Mn</sub>)的敏感波段分别为699nm、823nm、399nm、563nm、504nm;

(2)利用水质参数敏感波段所建立的各项参数估测模型效果较为理想,其估测模型 $R^2$ 分别达到0.8276、0.7711、0.7917、0.9213、0.8328;

(3)利用水质参数的实测值与估测值对百花湖富营养化评价结果是一致的,且均为中营养化,说明采用高光谱技术对湖泊水质参数的监测与评价是可行的。

参考文献:

- [1] 王明翠,刘雪芹,张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准[J]. 中国环境监测, 2002,18(5):47-49. (WANG Mingcui, LIU Xueqin, ZHANG Jianhui, et al. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication[J]. Environmental Monitoring in China, 2002,18(5):47-49. (in Chinese))
- [2] 舒金华. 我国湖泊富营养化程度评价方法的探讨[J]. 环境污染与防治, 1990,12(5):2-7. (SHU Jinhua. The assessment methodology for eutrophication level of lakes in China[J]. Environmental Pollution & Control, 1990,12(5):2-7. (in Chinese))
- [3] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated

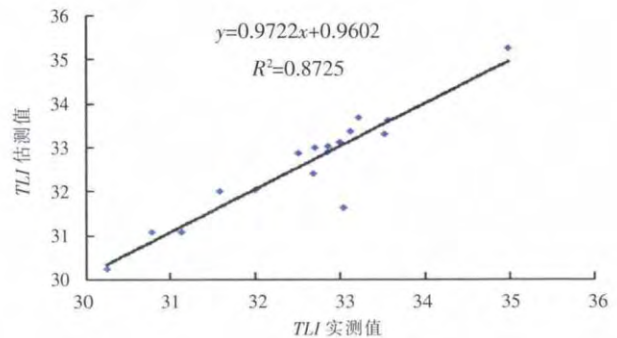


图6 两种评价结果验证  
Fig.6 Verification of two kinds of results

- MERIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,79:51-59.
- [4] Thiemann S, Kaufmann H. Determination of chlorophyll content and trophic of lakes using field spectrometer and IRS-1C satellite data in the Mecklenburg lake district, Germany [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000,73:227-235.
- [5] Wezemak C T, Tanis F J, Bajza C A. Trophic state analysis of inland lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1976,5:147-164.
- [6] Cheng K S, Lei T C. Reservoir trophic state evaluation using Landsat TM images [J]. *Journal of the American Water Resource Association*, 2001,37(5):120-132.
- [7] 吕恒,江南,罗淑葱. 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. (LU Heng, JIANG Nan, LUO Liancong. Quantitative retrieval of chlorophyll-a by remote sensing in Taihu lake based on TM data [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006,26(4):472-476. (in Chinese))
- [8] 闻见光,肖青,柳钦火,等. 基于混合光谱理论的太湖水体叶绿素a浓度提取[J]. *地理科学*, 2007,27(1):92-97. (WEN Jianguang, XIAO Qing, LIU Qinhuo, et al. Extraction of chlorophyll-a concentration based on spectral unmixing model in Taihu lake water [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007,27(1):92-97. (in Chinese))
- [9] 段洪涛,于磊,张柏,等. 查干湖富营养化状况高光谱遥感评价研究[J]. *环境科学学报*, 2006,26(7):1219-1226. (DUAN Hontao, YU Lei, ZHANG Bai, et al. Hyperspectral data applied in monitoring and evaluating the water trophic state of Chagan lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006,26(7):1219-1226. (in Chinese))
- [10] 刘英,王珂,周斌,等. 千岛湖水体叶绿素浓度高光谱遥感监测研究初报[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2003,29(6):621-626. (LIU Ying, WANG Ke, ZHOU Bin, et al. Preliminary study on hyperspectral remote sensing of Qiandao Lake chlorophyll-a concentration[J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci)*, 2003,29(6):621-626. (in Chinese))
- [11] 李云亮,张运林,刘明亮. 太湖真光层深度的计算及遥感反演[J]. *湖泊科学*, 2009,21(2):165-172. (LI Yunliang, ZHANG Yunlin, LIU Mingliang. Calculation and retrieval of euphotic depth of lake Taihu by remote sensing[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009,21(2):165-172. (in Chinese))
- [12] 宋玲玲,仇雁翎,张洪恩,等. 淀山湖叶绿素a的高光谱遥感监测研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2007,16(1):48-51. (SONG Lingling, QIU Yanling, ZHANG Hongen, et al. Application of hyperspectral remote sensing in monitoring chlorophyll-a concentration in Dianshan lake [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007,16(1):48-51. (in Chinese))
- [13] 李素菊,吴倩,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. *湖泊科学*, 2002,14(3):228-234. (LI Suju, WU Qian, WANG Xuejun, et al. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002,14(3):228-234. (in Chinese))
- [14] 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. (DUAN Hontao, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Hyperspectral monitoring model of eutrophication in Nanhu Lake, Changchun [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005,17(3):282-288. (in Chinese))
- [15] 张囡囡,臧淑英. 扎龙湿地克钦湖富营养化状态的高光谱遥感评价[J]. *地理科学*, 2012,32(2):232-237. (ZHANG Nannan, ZANG Shuying. Hyperspectral data applied in monitoring and evaluating the water trophic state of Keqin lake, Zhalong wetland[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012,32(2):232-237. (in Chinese))
- [16] 李素菊,吴倩,王学军,等. 巢湖浮游植物叶绿素含量与反射光谱特征的关系[J]. *湖泊科学*, 2002,14(3):228-234. (LI Suju, WU Qian, WANG Xuejun, et al. Correlations between reflectance spectra and contents of chlorophyll-a in Chaohu lake [J]. *Journal of Lake Sciences*. 2002,14(3):228-234. (in Chinese))
- [17] Luoheng H, Donald C, Rundquist D C. Comparison of NIR/RED ratio and first derivative of reflectance in estimating algal-chlorophyll concentration: a case study in a turbid reservoir[J]. *Remote Sens Environ*, 1997,62:253-261.
- [18] Rundquist D C, Han L, Schalles J F, et al. Remote measurement of algal chlorophyll in surface waters: the case for the first derivative of reflectance near 690nm [J]. *Photogramm, Eng Remote Sens*. 1996,62:195-200.
- [19] 张运林,秦伯强,陈伟民,等. 湖泊水体透明度的分析、变化及相关分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2003,(2):30-36. (ZHANG Yunlin, QIN Boqiang, CHEN Weimin, et al. Analysis of transparency for lake water, change and relevant [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2003,(2):30-36. (in Chinese))
- [20] 张巍,王学军,江耀慈,等. 太湖水质指标相关性与富营养化特征分析[J]. *环境污染与防治*, 2002,24(1):50-53. (ZHANG Wei, WANG Xuejun, JIANG Yaoci, et al. Study on characteristics and correlation among parameters of eutrophication in Taihu lake [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2002,24(1):50-53. (in Chinese))
- [21] 段洪涛,张柏,宋开山,等. 查干湖透明度高光谱估测模型研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2006,20(1):156-160. (DUAN Hontao, ZHANG Bai, SONG Kaishan, et al. Hyperspectral model of transparency in Chagan lake of Jilin Province [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2006,20(1):156-160. (in Chinese))
- [22] 王婷,黄文江,刘良云,等. 鄱阳湖富营养化高光谱遥感监测模型初探 [J]. *测绘科学*, 2007,(4):44-46. (WANG Ting, HUANG Wenjiang, LIU Liangyun, et al. Hyperspectral monitoring model of eutrophication in Poyang lake [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007,(4):44-46. (in Chinese))
- [23] 李锦秀,廖文根. 富营养化综合防治调控指标探讨[J]. *水资源保护*, 2002,(2):3-5. (LI Jinxiu, LIAO Wengen. Control indexes for comprehensive prevention of eutrophication [J]. *Water Resources Protection*, 2002,(2):3-5. (in Chinese))

汛的尖兵和耳目的作用,对报讯曲线的制作精度和效率有较大的提高。

致谢:项目从立项、研究到应用,经过一年多的努力终于达到了预期的效果,黄委中游水文水资源局技术科的张玉胜、董福新、马志刚、王秀兰一年来的参与和帮助,给予了很大的支持,在此,表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

[1] 宋俊峰. 山区性河流水文站高洪流量报讯方法探讨 [J]. 陕西水利, 2010,6(3):125-126. (SONG Junfeng. Discussion on high flood infor-

mation method for hydrology stations on rivers in mountain areas[J]. Shaanxi Water Resources, 2010,6(3):125-126. (in Chinese))

[2] 方晨. AutoCAD2006 中文版建筑制图实例教程[M]. 上海: 科学普及出版社,2006. (FANG Chen. Instance Tutorial of AutoCAD2006 Chinese Architectural Drawing[M]. Shanghai: Popular Science Press, 2006. (in Chinese))

[3] SL 247-2012, 水文资料整编规范[S]. (SL 247-2012, Code for Hydrologic Data Proceeding [S]. (in Chinese))

[4] SL 58-2014, 水文测量规范 [S].(SL 58-2014, Specification for Geodesic Survey in Hydrology [S]. (in Chinese))

## How to Draw Millimeter Grid Digital Map of High Flood Reporting Curve

YANG Jin, HAN Shuyuan, YANG Jianzhong, ZHENG Kai, WANG Kun

(Middle Stream Bureau of Hydrology and Water Resources, Yellow River Conservancy Commission, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** This paper gave the software, method, principle, technology and process to make high flood reporting curve millimeter grid digital maps using the CAD drawing function and EXCEL data storage and computing function. Application of this method can improve the precision and efficiency of drawing high flood reporting curves.

**Key words:** high flood reporting curve; digitization; millimeter grid; coordinate conversion

(上接第 34 页)

## Evaluation of Lake Eutrophication Based on Hyperspectral Technology: A Study Case of Baihua Lake in Guiyang City

WU Tingkuan<sup>1</sup>, HE Zhonghua<sup>1</sup>, LIANG Hong<sup>1</sup>, YANG Zhaohui<sup>2</sup>, ZENG Xinbo<sup>2</sup>, LIU Suihua<sup>1</sup>, CHEN Dongwei<sup>3</sup>,  
JIAO Shulin<sup>1</sup>, LI Qiuhua<sup>4</sup>

(1. School of Geographic and Environmental Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. Water Resources Department of Guizhou Province, Guiyang 550002, China; 3. Guiyang Investigation and Design Institute of Power Construction Corporation of China, Guiyang 550000, China; 4. Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

**Abstract:** In order to improve the accuracy and speed and make large range monitoring and evaluation of lake eutrophication, this paper measured the spectrum and analyzed the water samples in the Baihua Lake of Guiyang City. By studying the normalization of water spectral reflectance, the first and second order differential spectrum processing, a diagnosis was made on the sensitive bands of the various water quality parameters to establish the hyperspectral quantitative model. This paper also discussed the quantitative relationship between the spectral reflectance and concentration of water quality parameter, evaluated the eutrophication of water with comprehensive nutrition state index method (TLI). The results show that (1) it's suitable to use hyperspectral remote sensing to monitor water quality, and the sensitive bands of the water quality parameters (Chl-a, TP, TN, SD and COD<sub>Mn</sub>) are respectively 699nm, 823nm, 399nm, 563nm, 504nm; (2) The effect of the model with sensitive brand is very good, the various estimated models  $R^2$  are respectively 0.8276, 0.7711, 0.7917, 0.9213 and 0.8328; (3) The water quality is in moderate eutrophic state from the evaluation of eutrophication in the Baiha Lake based on the measured and estimated data.

**Key words:** hyperspectrum; water quality parameter; eutrophication; comprehensive assessment; Baihua Lake