

长春市南湖富营养化高光谱遥感监测模型*

段洪涛^{1,2}, 张 柏¹, 宋开山^{1,2}, 黄素军³, 王宗明^{1,2}, 张树清¹

(1: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3: 呼和浩特市清洁能源办公室, 呼和浩特 010030)

摘要:通过对长春市南湖水质参数和高光谱反射率的相关分析, 建立两者间的一元回归模型; 同时利用日本学者相崎守弘等人提出的修正营养状态指数(TSI_M)模型, 分别针对水质参数实验室数据和高光谱数据, 对长春市南湖富营养化程度进行评价和监测. 结果表明: 1) 利用高光谱遥感监测模型进行湖泊富营养化监测和评价, 能够获得较为准确的评价结果, 相对于传统监测方法具有省时省力的特点; 2) 用实验室数据得出的 TSI_M修正营养状态指数, 各点数据起伏比较大, 而高光谱遥感监测模型模拟营养状态指数相对平缓, 这表明监测模型对各点数据进行了不同程度的同化, 相对缩小了同期各点数据和异期同点数据之间的差异, 这与实验室化学分析数据监测结果相比是一个不足之处; 3) 长春市南湖水体呈现较为严重的富营养化状态, 需要采取措施防止南湖水质进一步恶化.

关键词:富营养化; 高光谱; TSI_M; 长春南湖

Hyperspectral Monitoring Model of Eutrophication in Lake Nanhu, Changchun

DUAN Hongtao^{1,2}, ZHANG Bai¹, SONG Kaishan^{1,2}, HUANG Sujun³, WANG Zongming^{1,2} & ZHANG Shuqing¹

(1: Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, CAS, Changchun 130012, P. R. China)

(2: Graduate School of CAS, Beijing 100039, P. R. China)

(3: Office of clean Energy of Hohhot 010030, P. R. China)

Abstract: This study presents an approach for the determination of the trophic state from field reflectance spectra in Lake Nanhu of Changchun, which was in eutrophic status. Reflectance spectra were measured from April to July in 2004, with ASD FieldSpec spectrometer. Based on in situ water sampling and reflectance measurements, algorithms of Chlorophyll-a, TN and TP have been developed. With the TSI_M trophic state index model, the lake trophic state are monitored and evaluated. The model equations as follows:

$$\begin{aligned} \text{TSI}_M(\text{Chla}) &= 10[2.46 + \ln(\text{Chla})/\ln(2.5)] \\ \text{TSI}_M(\text{TN}) &= 10[2.46 + (0.3155 \ln(\text{TN}) + 4.5998)/\ln(2.5)] \\ \text{TSI}_M(\text{TP}) &= 10[2.46 + (0.3939 \ln(\text{TP}) + 5.4415)/\ln(2.5)] \\ \text{TSI}_M(\text{AVE}) &= [\text{TSI}_M(\text{Chla}) + \text{TSI}_M(\text{TN}) + \text{TSI}_M(\text{TP})]/3 \end{aligned}$$

The result shows: 1) TSI_M model to evaluate lake water trophic state, may obtain accurate result normally, with little time, effort and money; 2) The TSI_M trophic states of hyperspectral simulation data, compared with that of laboratory data, narrow the differences of the same point in different months and different points in one same month; 3) Lake Nanhu is in serious eutrophic state, and needs to take measures to prevent the water quality from worsening further.

Keywords: Eutrophication; hyperspectral; TSI_M; Lake Nanhu, Changchun

湖泊是人类重要的自然资源, 广泛用于防洪、灌溉、航运、给水和养殖等, 而城市湖泊的价值则更多地体现于旅游、娱乐和美学方面, 以及在改善城市生态环境中的作用. 由于人类活动的强烈影响, 这类湖泊大多已处于富营养化状态, 严重影响了湖泊价值^[1]. 湖水富营养化的发生, 主要是湖水中的氮、磷等营养物质的

* 国家自然科学基金(40401003, 40371082) 和中国科学院创新领域前沿课题" 内陆湖泊水质遥感机理研究" 联合资助. 2004-07-09 收稿; 2005-03-22 收修改稿. 段洪涛, 男, 1979 年生, 博士研究生. E-mail: htduan@neigae.ac.cn.

增加和藻类过量繁殖所致^[2]。水体遥感监测正是通过研究水体反射光谱特征与水质参数浓度之间的关系,建立水质参数反演算法,对湖泊富营养化进行监测,这已成为目前湖泊遥感技术应用的主要领域之一^[3-5]。传统多光谱传感器由于较低的光谱分辨率,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目前内陆湖泊水质遥感实用化的难点。随着高光谱遥感的出现使上述情况大有改观,高光谱反射率已经被广泛用于水生态系统的水质情况评估中,如区分湖泊、河口的营养状态^[6,7],描述水藻和赤潮特征^[7-9],研究叶绿素含量及其它水质参数与高光谱反射率的关系等^[10,11]。湖泊富营养化界定和分类是一个很复杂的问题,现在学术界还没有定论。一个合适的分类方法,通常依赖于湖泊所在的地理位置、湖泊水的用途,以及各种水质参数,如叶绿素 a、总氮(TN)、总磷(TP)、透明度等^[6]。本文通过野外高光谱仪器,尝试建立水质参数与光谱特征之间的响应关系和遥感定量模型,并利用日本学者相崎守弘等人提出的 TSM 修正营养状态指数模型,采用能反应湖泊藻类数量多寡的指标—叶绿素为主要评价因子, TN、TP 等为辅助因子,对长春市南湖富营养化程度进行监测,为南湖富营养化程度高光谱遥感监测进一步研究奠定基础。

1 实验方法及数据获取

1.1 研究区域

长春南湖(43°51'N, 125°18'E)是一个小型半封闭式的内陆湖泊,属于磷限制型湖泊。海拔 214 m,汇水区面积 14.36 km²。研究期间湖水面积 8.528×10^5 m²,最大水深 6.65 m,平均水深 2.84 m,最大库容量 3.369×10^6 m³,平均水力学滞留时间 270 d 左右。该地区属于温带大陆性气候,四季盛行西南风。每年冰期约 150 d,无霜期 140-150 d。多年平均降水量和蒸发量分别为 576.3 mm 和 1438.4 mm^[12]。

南湖是长春市内唯一的水上风景区和天然浴场。1966 年以前,南湖湖水清澈,水质良好。然而,自 20 世纪 60 年代末起,随着城市的发展,南湖周围逐渐都市化,人类活动影响加剧,各种生活污水、工业废水和农田汇水排入南湖,致使水质变差,湖水生态系统的结构和功能发生明显变化,富营养化程度日益严重^[13]。

1.2 数据获取及预处理

为研究南湖水体的富营养化情况,我们于 2004 年 4 月 25 日、6 月 27 日和 7 月 25 日分 3 次对研究区内代表点位分别用 GPS 进行定位,并测量水体反射光谱,同步采集水样。其中,4 月 25 日采样点数为 5 个,6 月 27 日和 7 月 25 日加强了采样密度,分别新增两点和三点(图 1)。因此三次采样共计 20 点,随机选取其中 14 个作为建模数据。叶绿素 a 浓度的测定,采样后,立即返回实验室过滤,然后用丙酮萃取,蔽光 24 h 后,采用分光光度计测定。TN、TP 含量采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,当天在实验室内完成。水体的反射光谱测量光谱测试采用美国分析光谱仪器公司(Analytical Spectral Devices, ASD 公司)生产的 FieldSpec FSR VNIR[®] 野外光谱仪,可在 350 nm-1050 nm 波长范围内进行连续测量,采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率 3 nm,视场角 25°,共有 512 个采样值。光谱测量时间为 10:00-14:00,三次采样当时天气晴朗无风,湖面基本平静。光谱测量在距水面上方 1 m 处进行,光谱仪传感器探头方向基本垂直于水面。在每个点位,进行 20 次反射光谱测量,最后取其平均值作为该点的光谱反射值,每个样点测定前都进行白板定标。实验室内对每条平均反射光谱利用其在 350-1000 nm 范围内的波段反射率进行对所有数据进行归一化及合并处理,选取敏感波段,分别以 400、412、443、490、510、560、620、665、681、705、753、765、775、865、890、900 nm 为中心,上下各扩展 5 nm,作为实际研究光谱数据。

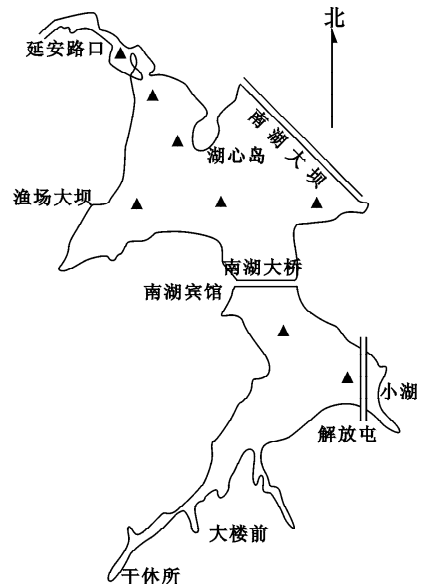


图 1 长春南湖采样点分布图

Fig. 1 Distribution of sampling points in Lake Nanhu

2 高光谱模型

2.1 水质参数遥感原理

对水体来说,水的光谱特征主要是由水本身的物质组成决定,同时又受到各种水状态的影响. 湖泊水体中影响光的强度及光谱分布的物质大致可分为3类^[14]:浮游藻类色素,黄色物质和悬浮物质. 除了悬浮颗粒物在其自然浓度条件下对光不发生明显吸收外,其余两种物质分别选择吸收一定波长范围的光,形成各自的吸收波谱. 水中的分子及分子聚集体对光的散射使光改变方向,其中的后向散射光与水底的反射光一起返回水面,通过水—气界面回到大气中,就是可遥感的部分,这一部分光反映了水体内部的吸收特征. 因此,水中组分含量的差别造成一定波长范围反射率的显著不同,成为用遥感技术定量模型监测水质参数的基础. TN、TP等虽然无法直接影响水体反射光谱特征,但是,TN、TP却不同程度影响控制着水体中浮游藻类的生长繁殖,与叶绿素含量有很大的相关性. 国内外大量的研究表明,与湖泊富营养化有关的水质参数之间存在某种相关关系^[15,16],国内学者金相灿等的研究也表明,叶绿素a与TP、TN之间的相关关系分别为0.84、0.82^[17]. 因此,通过反射光谱直接反演TN、TP含量,不失为一个有意义的尝试.

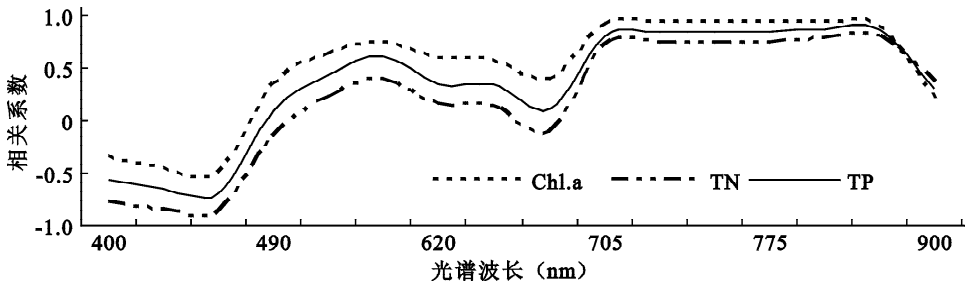


图2 光谱反射率和叶绿素a、TN和TP相关系数示意图

Fig. 2 The correlation between chlorophyll-a concentration, TN, TP and spectral reflectance

2.2 单波段相关分析

2.2.1 单波段数据与水质参数相关分析 在对光谱数据进行初步处理后,分别求其特征点与叶绿素a、TN和TP的相关系数(图2). 我们发现叶绿素a、TP和TN具有十分类似的趋势线,说明南湖水体中三者之间具有较好的相关性. 叶绿素a、TP含量在443 nm之前与光谱反射率呈负相关,TN含量在490 nm之前与光谱反射率呈负相关. 负相关中,400–443 nm相关系数比较明显,TN含量与光谱反射率之间的相关系数绝对值较大,皆在0.8以上,TP次之,在0.6左右,叶绿素a相对较小,在0.5上下. 正相关中,叶绿素a和TP具有两个较高相关系数区域,510–665 nm和705–890 nm,而TN只有一个较高相关系数区域705–890 nm. 在510–665 nm区域,TP相关系数在0.5偏下,而叶绿素a普遍在0.5偏上. 705–890 nm三者相关系数更为明显,TN皆在0.7以上,TP在0.8以上,而叶绿素a相关系数最为明显,达到0.9以上. 叶绿素a在443、560和705 nm附近相关系数绝对值较高,说明在这些波段附近的光谱反射率受浮游植物浓度变化的影响较大,其中443 nm附近为负相关,后两者波段附近为正相关,这三个波段位置分别对应叶绿素a的吸收峰、叶绿素和胡萝卜素弱吸收形成的反射峰及叶绿素a的反射峰的位置. 这与Koponen等^[6,18]等人的研究基本相似. 通过研究分析,在南湖水体中可以采用单波段对叶绿素a、TP和TN含量进行估算. 同时由于目前叶绿素a含量高光谱模型研究已经比较成熟,这里采用了现在相对认同的705 nm建立模型.

2.2.2 叶绿素a含量估测模型 用705 nm特征波长的光谱反射率和叶绿素a含量做一元回归相关分析(图3a),得到叶绿素a含量估测模型:

$$y = 3530.4x - 3.0573 \quad (1)$$

式中, y 为叶绿素a含量($\mu\text{g/L}$); x 为705 nm特征波长处的反射率值.

2.2.3 TN含量估测模型 由于TN含量与特征波长的光谱反射率相关关系研究的还比较少,没有成熟的模

型可以借用. 通过对单波段数据与南湖水体中 TN 含量求相关系数(图 2), 发现特征波长 400、412、443、560、705、753、765、775、865、890 nm 处具有较大的相关系数. 用这些特征波长与 TN 含量分别作一元回归分析(表 1), 可以看出 400、412、443、865、890 nm 的一元回归方程 R^2 值比较大, 普遍达到 0.6 以上, 443 nm 最高, 达到 0.7598. 因此决定选用 443nm 与 TN 的一元回归方程(图 3b)为估测模型:

$$y = -213.78x + 4.2434 \tag{2}$$

式中, y 为 TN 含量(mg/L); x 为 443 nm 特征波长处的反射率值.

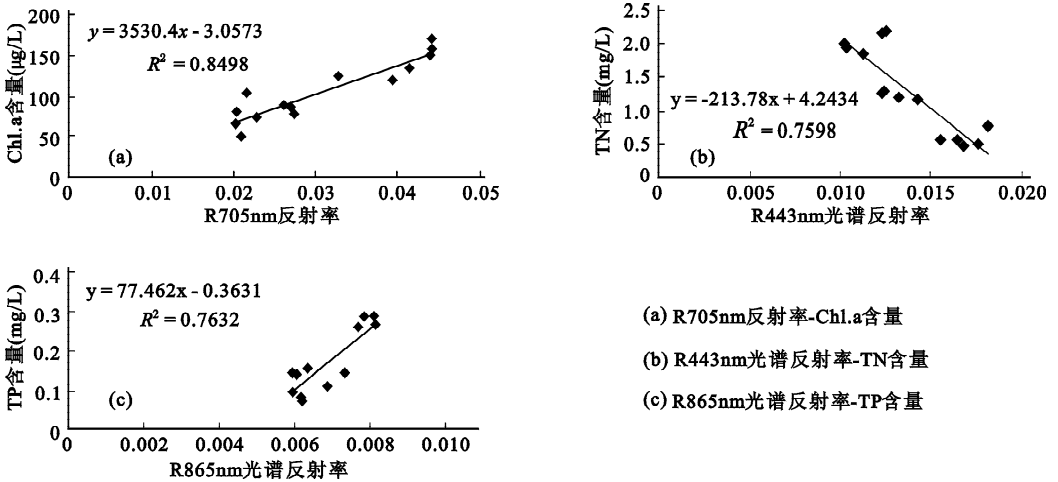


图 3 光谱反射率与若干水质指标的关系

Fig. 3 Relationships of chl-a vs spectral reflectance of 705nm(a); TN vs spectral reflectance of 403nm(b); and TP vs spectral reflectance of 865 nm(c)

表 1 特征波长反射率值与 TN 含量回归拟合方程及相关指数

Tab.1 Regressive equations and relation coefficients indicating the relationship between TN contents and spectral reflectance

特征波长 (nm)	线性拟合方程	确定指数 (R^2)	特征波长 (nm)	线性拟合方程	确定指数 (R^2)
400	$y = -217.52x + 4.6846$	0.6265	765	$y = 147.37x - 0.6234$	0.5584
412	$y = -216.57x + 4.4632$	0.7344	775	$y = 136.69x - 0.4597$	0.5594
443	$y = -213.78x + 4.2434$	0.7598	865	$y = 572.75x - 2.5939$	0.6033
705	$y = 48.387x - 0.2154$	0.5268	890	$y = 2336x - 11.341$	0.6555
753	$y = 153.37x - 0.7134$	0.5599			

2.2.4 TP 含量估测模型 TP 含量与特征波长的光谱反射率相关关系研究情况同 TN 类似, 现在涉及的相对较少. 经过对获取的南湖水体 TP 含量和特征波长反射率进行相关分析, 我们已经知道 TP 含量除与反射光谱中 490、510、620-681、900 nm 相关系数绝对值较小外, 其他点普遍较高, 705-890 nm 都在 0.80 以上, 我们认为可以尝试建立其估算模型. 对这些特征波长光谱反射率分别与 TP 含量做一元线性回归(表 2), 可以看出 865 nm 回归方程 R^2 值相对较大, 故选用其作为估测模型(图 3c):

$$y = 77.462x - 0.3631 \tag{3}$$

式中, y 为 TP 含量(mg/L); x 为 865 nm 特征波长处的反射率值.

表2 特征波长反射率值与 TP 含量回归拟合方程及相关指数

Tab.2 Regressive equations and relation coefficients indicating the relationship between TP contents and spectral reflectance

特征波长 (nm)	线性拟合方程	确定指数 (R ²)	特征波长 (nm)	线性拟合方程	确定指数 (R ²)
400	$y = -18.347x + 0.448$	0.3083	753	$y = 20.858x - 0.1103$	0.7161
412	$y = -19.861x + 0.4528$	0.4272	765	$y = 20.14x - 0.0993$	0.7212
443	$y = -20.425x + 0.444$	0.4796	775	$y = 18.656x - 0.0766$	0.7205
560	$y = -72.279x + 0.9844$	0.498	865	$y = 77.462x - 0.3631$	0.7632
705	$y = 6.5243x - 0.0408$	0.6623	890	$y = 275.81x - 1.3341$	0.73474

3 模型验证

为了分析模型实际应用的适用性以及由模型模拟而造成的误差, 选用所有采样点实测数据和模型模拟数据作线性相关, 对叶绿素 a、TN 和 TP 估测模型分别进行验证(图4). 模型验证结果显示, 只有 TP 含量估测模型确定指数(R²)偏低, 但是也有0.5658, 其余两个分别达到0.6581和0.7254, 相对来说, 效果还比较理想.

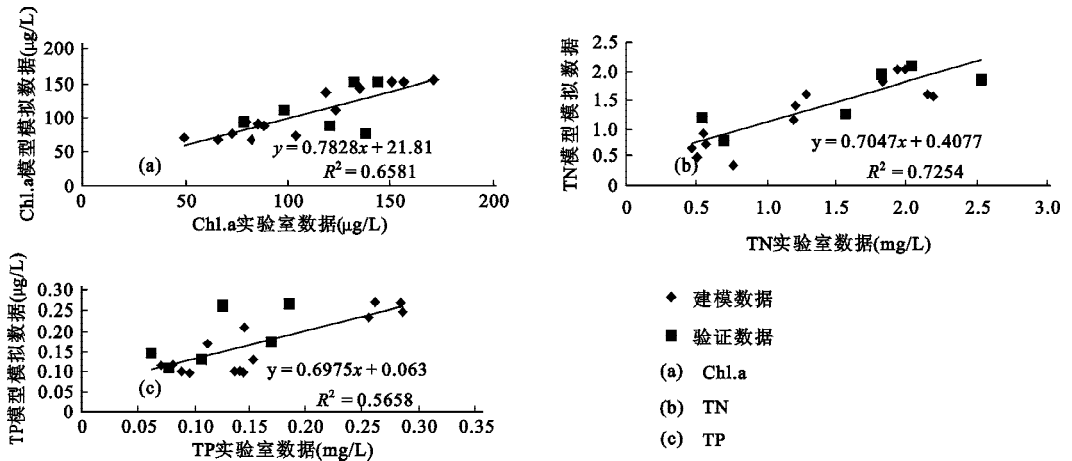


图4 模型验证

Fig.4 The verification of chlorophyll-a, TP and TN models

表3 叶绿素 a 含量与 TP、TN 含量一元回归拟合方程及相关指数

Tab.3 Regressive equations and relation coefficients indicating the relationship between Chla contents and TN, TP contents

光谱特征波长 (nm)	线性拟合方程	确定指数 (R ²)	备注
ln(Chla) - ln(TN)	$y = 0.3155x + 4.5998$	0.3062	其中 y 代表 ln(Chla), x 代表 ln(TN)
ln(Chla) - ln(TP)	$y = 0.3939x + 5.4415$	0.3079	其中 y 代表 ln(Chla), x 代表 ln(TP)

4 南湖富营养化状态评价

4.1 TSI_M修正营养状态指数模型

湖泊富营养化评价, 就是通过与湖泊营养状态有关的一系列指标及指标间的相互关系, 对湖泊的营养状态做出准确的判断. 目前比较常用的是日本的相崎守弘等人提出的修正营养状态指数(TSI_M)模型^[16,19], 即以叶绿素 a 浓度为基准的营养状态指数. 基本公式如下:

$$TSI_M(Chla) = 10[2.46 + \ln(Chla)/\ln(2.5)] \quad (4)$$

根据表3中南湖水体叶绿素a含量与TN、TP含量的相关关系,从而可以得到其指数计算公式:

$$TSI_M(TN) = 10[2.46 + (0.3155 \ln(TN) + 4.5998)/\ln(2.5)] \quad (5)$$

$$TSI_M(TP) = 10[2.46 + (0.3939 \ln(TP) + 5.4415)/\ln(2.5)] \quad (6)$$

然后对这3项指数求均值得出各湖泊的富营养状态值,即综合评分公式:

$$TSI_M(AVE) = [TSI_M(Chla) + TSI_M(TN) + TSI_M(TP)]/3 \quad (7)$$

同时借助类似湖泊富营养化程度划分标准^[16,19],规定南湖富营养化程度划分标准为:

$TSI_M(AVE) < 20$, 贫营养性; $20 \leq TSI_M(AVE) < 60$, 中营养性; $60 \leq TSI_M(AVE) < 80$, 富营养性; $TSI_M(AVE) \geq 80$, 极富营养性.

4.2 南湖富营养化程度监测结果及验证

采用 TSI_M 修正营养状态指数模型,分别对三次所有采样点实验室数据和高光谱模型模拟数据进行运算,得出两组南湖修正营养状态指数(图5),同时进行了验证.对两组结果进行线性相关分析(图6),确定指数达到0.7481,效果比较理想.

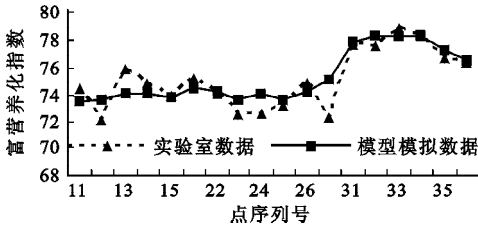


图5 南湖富营养化状态评价结果

Fig. 5 Evaluation result of eutrophical state of Lake Nanhu

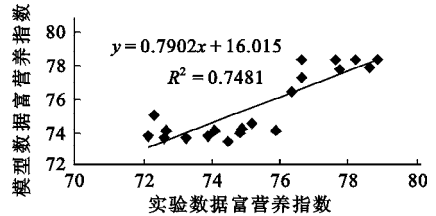


图6 高光谱模拟和实验室数据监测南湖富营养化指数回归拟合方程及相关指数

Fig. 6 Regressive equations and determination coefficient

从南湖富营养化状态评价结果中可以看出,不论是用实验室监测数据,还是用高光谱模型模拟数据,所有采样点营养状态指数一般在70-80之间,处于富营养性状态,这与孙刚等人^[1,20]对南湖进行富营养化监测结果类似.同时可以看出,6月份南湖营养状态指数与4月份基本持平,而7月份各点均有增加,一般在77-79之间,处于极富营养性边缘.这可能是由于4月末长春气温刚开始转暖,6月末气温刚开始增高,藻类尚未大面积繁殖,而7月末8月初长春进入盛夏,气温明显升高,蓝藻门的螺旋鱼腥藻(*Anabaena spiroides*)、铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*)等藻类大量繁殖,叶绿素a含量显著升高,部分达到4、5月份两倍以上,因而南湖富营养状态指数也相应增加.

5 结论

(1) 利用高光谱遥感监测模型进行湖泊富营养化监测和评价,能够获取较为准确的评价结果,相对于传统监测方法具有省时省力省钱的特点.运用其对湖泊富营养化程度进行监测和研究,不失为一个有意义的尝试.但是由于比较困难获得卫星或者航空高光谱影像,只能利用实测光谱数据对水体以点为单位进行研究,而难以进行大面积水体研究,这是目前国内高光谱遥感研究的一个主要障碍和缺憾.

(2) 用实验室数据得出的 TSI_M 修正营养状态指数,各点数据起伏比较大,而高光谱遥感监测模型模拟营养状态指数相对平缓,这表明监测模型对各点数据进行了不同程度的同化,相对缩小了同期异点数据和异期同点数据之间的差异,这与实验室化学分析数据监测结果相比是一个不足之处.同时由于采样点数不够多, $\ln(Chla)$ 与 $\ln(TN)$ 和 $\ln(Chla)$ 与 $\ln(TP)$ 之间相关度不高,这也影响了高光谱遥感监测模型的精度.

(3) 本文只是利用一些特征因子对湖泊营养化状态做出了富营养化程度的评价,应该在充分认识湖泊富营养化发生机理的基础上,寻求建立更为合理的评价模型和评价方法.

(4) 研究表明,长春市南湖水体呈现较为严重的富营养化状态,需要采取措施防止南湖水质进一步恶化.

6 参考文献

- [1] 孙刚, 盛连喜. 湖泊富营养化治理的生态工程. 应用生态学报, 2001, 12(4): 590 - 592.
- [2] 张喜勤. 长春市南湖水质治理结果评价. 东北水利水电, 1994, (3): 26 - 30.
- [3] 疏小舟, 尹球, 匡定波. 内陆水体藻类叶绿素浓度与反射光谱特征的关系. 遥感学报, 2000, 4(1): 41 - 45.
- [4] 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. 湖泊科学, 2005, 17(2): 97 - 103.
- [5] 张渊智, 聂跃平. 运用遥感方法监测地表示水质. 遥感技术与应用, 2000, (4): 214 - 219.
- [6] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, et al. Lake water quality classification with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79: 51 - 59.
- [7] 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. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73, 227 - 235.
- [8] Kahru M, Mitchell B G. Spectral reflectance and absorption of a massive red tide off southern California. *Journal of Geophysics Research of Oceans*, 1998, 103 (C10): 21601 - 21609.
- [9] Stumpf R P. Applications of satellite ocean color sensors for monitoring and predicting harmful algal blooms. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, 7 (5): 1363 - 1368.
- [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. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2003, 29(6): 621 - 626.
- [11] 李素菊, 王学军. 巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 66 - 68.
- [12] 孙刚, 盛连喜, 冯江等. 中国湖泊渔业与富营养化的关系. 东北师大学报(自然科学版), 1999, (1): 74 - 78.
- [13] 卢文喜. 长春南湖水质成分的因子分析. 世界地质, 1999, 18(3): 61 - 65.
- [14] 张运林, 秦伯强, 陈伟民. 湖泊光学研究动态及其应用. 水科学进展, 2003, 14(5): 653 - 659.
- [15] Morihiro Aizaki, Akira Otsuki, Takayoshi Kawai. Relationship between nutrient loading and phytoplankton standing crop in outdoor experimental ponds with continuous flow systems. *Water Research*, 1986, 20(7): 859 - 863.
- [16] 张海林, 何报寅. 遥感方法应用于湖泊富营养化评价的研究. 上海环境科学, 2003, 22(12): 1030 - 1033.
- [17] 金相灿. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [18] 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. 湖泊科学, 2002, 14(3): 228 - 234.
- [19] 王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, 18(5): 47 - 49.
- [20] 卢文喜, 祝廷成, 田野. 长春南湖富营养化的成因和治理对策. 东北师大学报(自然科学版), 2002, 34(3): 103 - 107.