

引用格式: Xu Liangjiang, Huang Changchun, Li Yunmei, *et al.* Deriving Concentration of TN, TP based on Hyper Spectral Reflectivity[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2013, 28(4): 681-688. [徐良将, 黄昌春, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射率的总氮总磷的反演[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(4): 681-688.]

基于高光谱遥感反射率的总氮总磷的反演

徐良将, 黄昌春, 李云梅, 陈霞

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 基于2005年4~10月实测高光谱数据, 通过微分法和波段比值法对室内水样分析结果中的总氮和总磷浓度进行反演。结果表明: 以1 nm为间隔的微分法中455 nm处的微分值对总氮浓度较为敏感, 最大负相关达到-0.857, 而最大正相关为波段比值(1015/528 nm)的0.803, 利用上述两个因子作为自变量进行多元回归, 得到总氮最佳反演模型。该模型绝对误差为0.16, 实测值与预测值之间 R^2 为0.839; 波段比值(671 nm/680 nm)对总磷浓度较为敏感, 达到最大负相关-0.889, 选用其作为自变量进行二次多项式回归, 得到总磷最佳反演模型, 该模型绝对误差为0.003, 实测值与预测值之间 R^2 为0.934。

关键词: 高光谱反射率; 总氮; 总磷; 波段比值; 微分方法

中图分类号: X 524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2013)04-0681-08

1 引言

太湖水体富营养化引起藻类大量繁殖形成“水华”使得水质恶化、湖泊功能衰退, 对环太湖地区的工农业用水安全形成较大的威胁。大量针对性的研究表明, 影响藻类繁殖和水体富营养化的重要因素是水体中氮(N)磷(P)含量^[1-6]。Neill^[7]认为在盐度低的水体中, P是浮游植物生长的主要限制性营养因素, 在盐度为35‰左右时, N、P同时成为浮游植物生长的限制性营养元素, 而在盐度大于30‰时, N成为浮游植物生长的主要限制性营养因素; Suttle等^[8]、Bulgakov等^[9]、李建平等^[10]研究表明N、P比能够较好地表达N、P对浮游植物生长及其种群结构变迁的影响; 陈宇炜等^[11]通过多元逐步回归统计方法确定太湖梅梁湾地区N、P和水温为藻类总生物量以及微囊藻总生物量的显著相关因子。由此可见, 无论是作为富营养化指标还是作为“水华”形成的重要影响因子, 对氮、磷的监测具有重要意义。目前, 氮磷监测方法主要是基于常规监测方法^[12]。常规监测方法虽能够

提供离散断面准确、详实的水质参数信息, 但较难反映水质面状上的渐变情况和不同区域水质变化的边界, 同时费时费力, 遥感技术宏观、大规模获取地表信息的特点, 为解决这一局限性提供了有效手段。

目前, 国内外对于营养盐遥感反演方法的研究并不多, 普遍使用的方法主要分为间接法和直接法。间接法主要是基于营养盐与某些光敏感性物质(叶绿素等)、海温等之间的关系, 建立营养盐遥感反演模型。直接法则使用偏最小二乘法、微分光谱技术等获得营养盐与光谱数据的关系, 实现营养盐浓度的遥感反演^[13]。目前总氮、总磷光谱响应机理并不明确, 从野外光谱信息中, 难以找到氮磷的光谱特征信息, 这主要是由于氮磷光谱信息被水体组分其他信息所掩盖。如太湖水体反射率曲线具有典型二类水体光谱特征, 由于叶绿素、类胡萝卜素、非色素颗粒物以及可溶性有机物质在蓝紫光波段的强烈吸收^[14-16], 使得该波长范围内的遥感反射率较低; 水体组分的低吸收和高散射作用, 形成了青、绿和黄光波长处的反射峰值(也称为泥沙第一反射峰)^[17-18]; 藻

收稿日期: 2012-05-23; 修订日期: 2013-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41030751, 41173094, 41103047), 中国科学院数字地球重点实验室开放基金(2012LDE009), 高层次人才引进科研启动基金项目(2011105XGQ0244), 江苏省普通高校研究生科研创新项目(CXZZ12_0395), 江苏省高校自然科学研究项目(13KJB170007)。

作者简介: 徐良将(1979—), 男, 博士研究生, 江苏徐州人, 主要从事土壤侵蚀与环境效应研究。E-mail: xuliangjiang@njnu.edu.cn。

通讯作者: 黄昌春(1982—), 男, 博士, 讲师, 江苏扬州人, 主要从事环境污染遥感监测研究。E-mail: huangchangchun_aaa@163.com。

蓝蛋白的吸收带形成了橙光波长范围内反射凹值^[19],而叶绿素在 675nm 处的强吸收,使得该处出现反射谷值;由于叶绿素的荧光效应,产生了 680~720 nm 之间的反射峰值,此处可作为判断是否有叶绿素的依据^[20],但是此处的波峰位置不稳定,随着叶绿素 a 浓度升高,它会发生“红移”^[21-22];800 nm 左右的峰值为 540 nm 左右泥沙反射峰值饱和后随泥沙浓度继续增加而剧烈增加形成的,被称为泥沙第二反射峰^[22]。氮盐溶液的光谱特征是在波长 404 nm 处有一小峰、477 nm 处有个明显的反射峰,磷盐溶液在 350 nm 处有一明显的反射峰^[24]。因此,总氮、总磷的反演需要提取反射率中总氮、总磷的微弱信号或与之相关的共变信号。

本文基于太湖表层水样的总氮、总磷和同步观测光谱数据,利用微分法和波段比值法确定总氮、总磷敏感波长,建立总氮、总磷的反演模型,从而为水体富营养化评价、“水华”预警系统提供连续面状数

据,并为总氮、总磷传感器敏感波段的选取和设置提供参考。

2 材料与方法

2.1 数据采集

2005 年 4~10 月,每月采集太湖 20 个常规监测样点(图 1)表层水样的水质参数和同步光谱数据,水质参数由无锡市环境监测中心提供,主要包括总氮、总磷。光谱数据是利用 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱仪进行采集^[25],光谱数据包括:标准灰板(L_p)、水体(L_w)和天空光(L_{sky})的光谱辐亮度信息,每个对象采集 10 条光谱数据,用以去除异常值后做均值处理。依据仪器观测平面与太阳入射平面的夹角 $90^{\circ} \leq \Phi \leq 135^{\circ}$ (背向太阳方向),仪器与目标法线方向的夹角 $30^{\circ} \leq \theta \leq 45^{\circ}$ ^[13]的观测几何进行观测,以避免太阳直射反射和船舶阴影对光场的破坏。

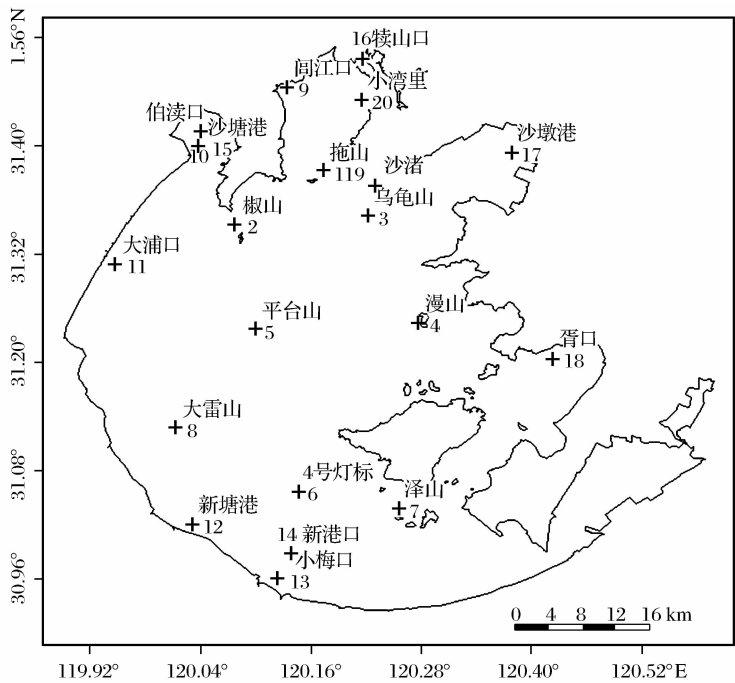


图 1 样点图
Fig. 1 Sample sites

2.2 反射率的计算

遥感反射率的计算公式为:

$$R_{rs} = L_w / E_d(0^+) \tag{1}$$

其中: L_w 为离水辐亮度, $E_d(0^+)$ 为水面总入射辐照度。 L_w 和 $E_d(0^+)$ 可以通过下列公式计算得到:

$$L_w = L_{sw} - r \cdot L_{sky} \tag{2}$$
$$E_d(0^+) = L_p \cdot \pi / \rho_p \tag{3}$$

其中: L_{sw} 为总光谱辐亮度信息, L_{sky} 为天空漫散射光辐亮度, r 为气—水界面对天空光的反射率,根据文献^[13]取 $r = 0.022$, L_p 为标准灰板的辐亮度, ρ_p 为标准灰板的反射率,选用的是经过严格定标的 30% 的灰板。

2.3 模型检验和误差分析

计算绝对误差和相对误差来衡量模拟精度,绝

对误差公式为:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(Y_s - Y_m)^2}}{n} \quad (4)$$

相对误差公式为:

$$\delta = \frac{Y_s - Y_m}{Y_m} \quad (5)$$

其中: Y_s 为模型模拟值, Y_m 为实测值, ϵ 为绝对误差, n 为检验样点数目, δ 为相对误差。

3 结果分析

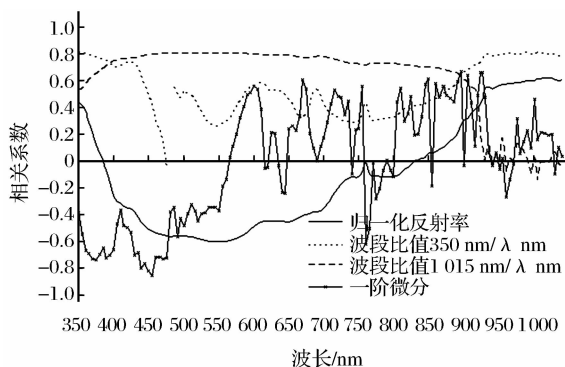
3.1 总氮反演模型

3.1.1 相关性分析

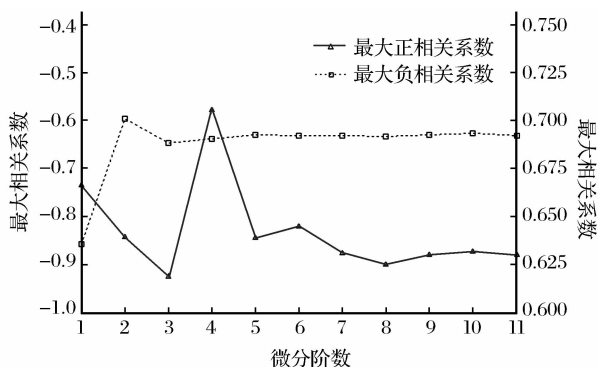
由于测量时间和地点的差异使得光谱具有一定的变异性,因此可以利用对光谱进行归一化的方法来减小时间和地点差异对绝对反射率值的影响^[26]。利

用每个波长上的反射率除以整个波长范围内反射率的平均值进行归一化处理,得到归一化反射率,将其与总氮浓度做相关性分析,得到最大正负相关系数分别为 $-0.603 \sim 0.621$,对应波长分别为 544 nm 和 1015 nm (图2(a)),这与王桥等^[27]的理论实验结果的 530 nm 和 693 nm 左右较为接近。

通过波段比值可以部分地消除大气影响和不同时间和空间上水表粗糙度(大小尺度的波(浪)谱)的干扰,并在一定程度上减小其他污染物的影响^[28-29]。利用自编 Matlab 程序将每个波长与所有波长作比值处理后,并逐一与总氮浓度做相关性分析,得到含有最高正相关系数($350/480 \text{ nm}$ 、 $1015/528 \text{ nm}$)的两组比值($350/\lambda \text{ nm}$ 、 $1015/\lambda \text{ nm}$)相关系数谱,最大正相关系数分别为 0.802 ($350/\lambda \text{ nm}$)、 0.803 ($1015/\lambda \text{ nm}$)(图2(a))。



(a) 总氮与遥感反射率之间相关系数谱



(b) 不同阶数的最大正负相关系数

图2 总氮与光谱相关系数

Fig. 2 The correlation coefficient between TN and reflection spectra

光谱微分技术能够方便地发现光谱数据的形状变化,并能迅速确定光谱弯曲点及最大最小反射率的波长位置,而对数据的振幅敏感程度较低,因而在遥感分析领域得到广泛应用^[30-32]。一阶微分处理可以去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱(必须为非线性的)的作用,消除水面对水体反射光谱的影响^[33];而高阶微分能够凸显出微量物质的弱光谱信号。利用自编 Matlab 程序进行 $1 \sim 11$ 阶微分处理(微分间隔为 1 nm)并与总氮浓度进行相关性分析(图2(a)),发现与归一化反射率和波段比值相比,一阶微分相关系数较高,最大负相关系数为 -0.857 ,对应波长为 455 nm ;同时一阶微分相关系数远高于其他阶数微分相关性(图2(b)),二阶微分后随着微分阶数的增加最大负相关变化较小;最大正相关为四阶微分的 0.706 ,略高于一阶微分的 0.667 ,而其他阶数微分相关性亦都高于 0.625 ,差

别较小。

基于以上分析可以确定一阶微分具有较强的优势,但是一阶微分间隔的取值对相关性具有较大的影响,如图3所示,随着一阶微分间隔的增加,最大

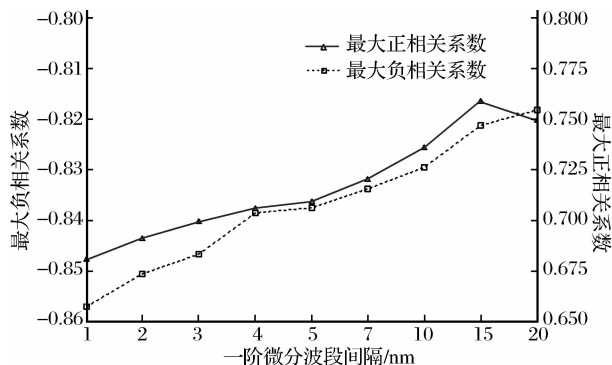


图3 不同间隔的一阶微分最大正负相关系数

Fig. 3 Maximum plus-minus correlation coefficient of first-derivative for different interval

负相关系数不断降低,而最大正相关系数不断增加。通过回归分析得到,若用单波段微分法,则 1nm 间隔微分法的最大负相关因子具有较好的回归效果;若用具有最大相关性的微分值进行多元回归,则 2 nm间隔微分法的最大正负相关因子回归效果最好。

3.1.2 模型的建立

利用 80 个样点中的 61 个样点用于建模,19 个样点用于模型检验,根据上述相关性分析,选用正相关性较大的波段比值、负相关系数较高的微分单波段作为反演因子对总氮进行反演,利用 SPSS 软件分别选用二次多项式、指数、幂函数、线性函数进行拟合,结果如表 1 所示。从拟合效果来看,波段比值

模型中,幂函数模型效果最佳, R^2 为 0.611,F 假设检验值为 45.57,其次是线性模型, R^2 和 F 假设检验值分别为 0.607 和 90.94;微分单波段模型中,效果最好的是二次多项式模式, R^2 为 0.788,F 假设检验值为 109.42,其次是线性模型, R^2 和 F 假设检验值分别为 0.737 和 165.11;多元回归模型中反演因子为 1 nm(455 nm)(1 nm 微分间隔的 455 nm 微分值),1015/528 nm 的回归效果最好, R^2 为 0.779,F 假设检验值为 106.89,其次是反演因子为 2 nm (454、920 nm), R^2 和 F 假设检验值分别为 0.737 和 165.11,在反演因子与总氮相关性确定条件下,反演因子之间相关性越低,多元回归效果越好,反之则回归效果越差。

表 1 总氮回归模型
Table 1 Regression model of TN

因子		模型方程	R^2	F
350/480 nm	线性	$Y=1.91X+1.24$	0.607	90.94
	幂函数	$Y=3.0294X^{0.5829}$	0.611	45.57
	指数	$Y=1.4433EXP(0.5822X)$	0.367	34.18
	二次多项式	$Y=0.2272X^2+1.2497X+1.5161$	0.398	39.08
1 nm(455 nm)	线性	$Y=-31.402X+5.94$	0.737	165.11
	指数	$Y=7.0446EXP(-11079X)$	0.650	107.75
	二次多项式	$Y=1.3E+08X^2-55.292X+6.7092$	0.788	109.42
2 nm(454、920 nm)	多元线性回归	$Y=1.082.12X_1-24.823.7X_2+5.158$	0.779	106.89
1 nm(455)、1 015/528 nm	多元线性回归	$Y=-22.825.891X_1+0.607X_2+4.659$	0.786	106.54

注:Y 为总氮浓度,X 为反演因子, X_1 为多元回归因子中第一个因子、 X_2 为第二个因子

3.1.3 模型验证和误差分析

利用剩余的 19 个样点对模型进行验证,分别计算表 1 中具有相对较高的 R^2 和 F 模型,得到的绝对误差以及模型预测与实测值之间的 R^2 如表 2 所示,发现原 R^2 和 F 最高的 1 nm(455 nm)的二次多项式模型的误差要高于多元回归模型,并且实测值与预测值之间的 R^2 也要小于多元回归模型;误差最大的是 350/480 nm 的幂函数形式,绝对误差达 0.2205,而以 1 nm(455)、1 015/528 nm 为反演因子的多元回归模型绝对误差相对最小,只有 0.16,且 R^2 最大为 0.839;综合考虑回归模型的 R^2 、F 值和预测与实测值之间的 R^2 相对较大以及模型绝对误差

ϵ 相对较小等因素,确定自变量为 1 nm(455)、1 015/528 nm 的多元线性回归方程为最佳模型。图 4 是最佳模型预测值和实测值散点图以及预测值的相对误差,由图可知,除去少数样点相对误差较高以外,85.23%的样点相对误差在 25%以内,说明该模型具有较好的预测结果,在太湖地区具有一定的实用性。

3.2 总磷反演模型

3.2.1 相关性分析

同样利用自编 Matlab 程序将每个波长与所有波长作比值处理后,并逐一与总磷浓度做相关性分析,得到含有最高正相关系数的 671/680nm、

表 2 总氮回归模型检验
Table 2 Checking of regression model of TN

	350/480 nm		1 nm(455 nm)		2 nm(454、920 nm)	1 nm(455)、1 015/528 nm
	线性	幂函数	线性	二次多项式		
ϵ	0.1908	0.2205	0.1878	0.1751	0.1667	0.1601
R^2	0.79	0.768	0.798	0.829	0.839	0.839

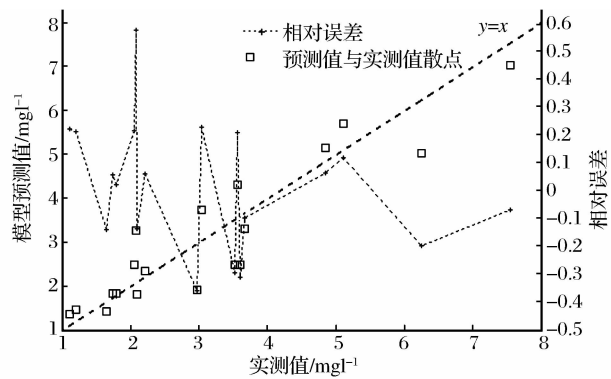


图 4 总氮预测值与实测值散点图

Fig. 4 Scatter diagram of measurement and predictive value for TN

673/679 nm、675/678 nm 波段比值与总磷的相关系数谱,以及经过归一化和一阶微分处理的反射率与总磷的相关系数谱如图 5 所示,发现波段比值与总磷浓度具有较强相关性,最高为 673/679 nm 的 0.888,其次是 671/680 nm 的 0.887,再次为 675/678 nm 的 0.884,这与理论^[27]上磷的最大相关波段为 673 nm 左右相类似;而一阶微分最大正负相关系数分别为 0.666 和-0.662,要小于波段比值,对应的波长分别为 701 nm 和 475 nm;而归一化反射率与总磷相关性最小,最大负相关关系系数为-0.645。

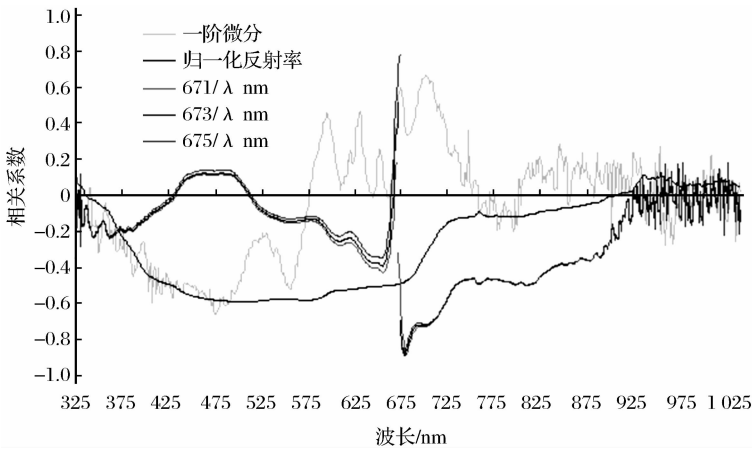


图 5 相关系数谱

Fig. 5 Correlation coefficient spectrum

3.2.2 模型的建立

与总氮反演一样,选用同样的 61 个样点用于建模,19 个样点用于模型检验。分别选用二次多项

式、指数、幂函数和线性函数对选用反演因子进行拟合,拟合结果如表 3 所示。微分间隔为 1 nm 的 701 nm 微分值与总磷的 R^2 和 F 较低,难以用于总磷的遥

表 3 总磷回归模型
Table 3 Regression model of Tp

因子		模型方程	R^2	F
1 nm(701 nm)	线性	$Y=181.17X+0.09$	0.398	38.97
	671/680 nm	$Y=-1.78X+1.817$	0.802	239.19
673/679 nm	二次多项式	$Y=12.8265X^2-26.86X+14.0727$	0.835	147.01
	幂函数	$Y=0.0379X^{-24.795}$	0.770	197.76
	指数	$Y=4.2E+09EXP(-25.429X)$	0.774	201.58
	线性 *	$Y=-2.53X+2.5617$	0.802	239.23
675/678 nm	幂函数	$Y=0.0370X^{-34.991}$	0.752	179.23
	指数	$Y=1.1E+14EXP(-35.652X)$	0.754	181.19
	线性 *	$Y=-4.65X+4.682$	0.794	226.76
	幂函数	$Y=0.0356X^{-64.347}$	0.732	161.33
	指数	$Y=6.3E+26EXP(-65.048X)$	0.733	162.17
	多元线性回归	$Y=-1.75924X_1+0.871803X_2+0.927785$	0.804	118.81
	多元线性回归	$Y=-2.37377X_1+1.692053X_2+0.720683$	0.805	119.76
	多元线性回归	$Y=-3.70697X_1+4.125167X_2-0.38074$	0.804	118.68

注: * 表示二次多项式回归效果与线性相同

感反演;与之相比,波段比值与总磷浓度具有较好的拟合效果,其中 671/680 nm 拟合效果最好,二次多项式和线性拟合 R^2 分别为 0.835 和 0.802,其次是 673/679 nm 因子,再次为 675/678 nm,可以看出波段比值法可以较好地应用于总磷的反演;但由于多元回归因子之间的较大相关性,与比值回归效果相比,多元回归的效果优势并不明显。

3.2.3 模型验证和误差分析

分别计算表 3 中具有相对较高的 R^2 和 F 模型,得到的绝对误差以及模型预测与实测值之间的 R^2 如表 4 所示,发现原 R^2 和 F 最高的 671/680 nm 二次多项式模型的误差最小,并且实测值与预测值之间的

R^2 最高;误差最大的是 671/670 nm 的线性形式,绝对误差达到 0.004;而以 671/680,671/670 nm、673/679,673/672 nm、675/678,675/674 nm 为反演因子的多元回归模型并无较为明显的优势,绝对误差和 R^2 分别为 0.0038、0.0036、0.0034 和 0.909、0.915、0.931;综合考虑回归模型的 R^2 、F 值和预测与实测值之间的 R^2 以及模型绝对误差 ϵ 等因素,确定自变量为 671/680 的二次多项式回归方程为最佳模型。图 6 为最佳模型预测值和实测值散点图以及预测值的相对误差,由图 6 可知,除去个别样点相对误差较高外,89.47%的样点相对误差在 20%以内,说明该模型具有较好的预测结果和稳定性。

表 4 总磷回归模型检验
Table 4 Checking of regression model of TP

	671/680		671/670 nm		675/678 nm		671/680,	673/679,	675/678,
	线性	二次多项式	线性	幂函数	线性	幂函数	671/670 nm	673/672 nm	675/674 nm
ϵ	0.003701	0.003122	0.003991	0.003701	0.00373	0.003923	0.003761	0.003645	0.003406
R^2	0.913	0.934	0.919	0.898	0.92	0.901	0.909	0.915	0.931

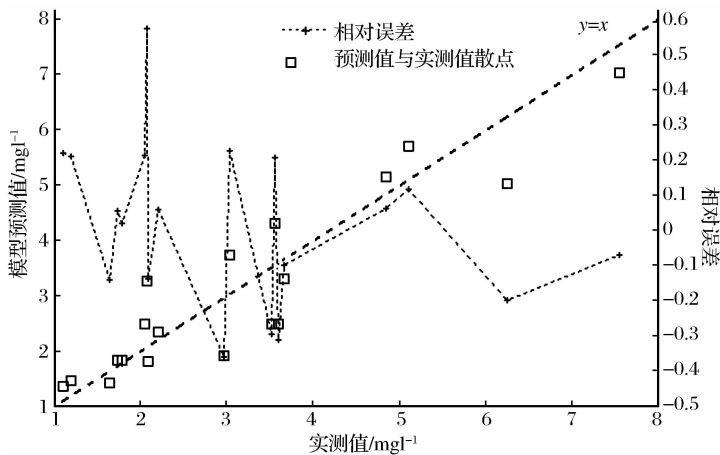


图 6 总磷预测值与实测值散点图
Fig. 6 Scatter diagram of measurement and predictive value for TP

4 结 语

目前,基于高光谱数据的总氮、总磷反演机理并不明确,因而对其反演的方法主要是经验模型。总磷的反演效果要优于总氮,这主要是由于氮 530 nm 敏感波段易受太湖水体中高非色素物质和黄质等信号的掩盖,而 693 nm 易受纯水信号的影响,而总磷敏感波段较总氮受到影响相对要小;同时依据 Neill^[7] 的 N、P 对浮游植物影响理论,太湖地区总磷对浮游植物起着主要影响作用,因而总磷遥感信号与浮游植物遥感信号具有一定的共变性。实测数据

表明:太湖地区 4~10 月,总磷与叶绿素 a 浓度相关性为 0.576,而总氮与叶绿素 a 浓度的相关性仅为 0.194。通过本研究得出以下两个结论:

- (1)有效提取微弱信号的微分法对总氮浓度具有较高的负敏感性,波段比值法与总氮浓度具有较高的正相关性,结合微分法和波段比值法进行多元线性回归得到的总氮反演模型具有相对较高的预测精度,绝对误差为 0.16,实测值与预测值之间的 R^2 为 0.839。
- (2)微分法对于与叶绿素 a 相关性较高的总磷敏感性较低,而波段比值法与总磷具有较高的负相

关性,利用波段比值作为自变量得到总磷二次多项式反演模型,该模型绝对误差为 0.003,实测值与预测值之间 R^2 为 0.934。

总氮、总磷的高光谱反演尚处于探索阶段,其反演模型的改进还有待进一步从分子光谱学、光学机理上作全面的探讨,本研究尚处于起步阶段,实验数据采集量不够充足,今后还会进一步延长时空范围,扩充数据集,以作进一步探索。

参考文献(References):

- [1] Wu Yinghao, Ji Weitao. Jiangxi Poyang Lake National Nature Reserve Study[M]. Beijing: China Forestry Press, 2002. [吴英豪, 纪伟涛. 江西鄱阳湖国家级自然保护区研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.]
- [2] Lin Wanlian, Wang Jian, Huang Xiangfei. Wuhan East Lake Water Column Floating Particulate Organic Carbon, Nitrogen, Phosphorus Decade Dynamic[M]. Beijing: Science Press, 1995: 75-91. [林婉莲, 王建, 黄祥飞. 武汉东湖水柱浮游颗粒有机碳、氮、磷十年动态[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 75-91.]
- [3] Wang Jian, Lin Wanlian. Research of Wuhan East Lake Phosphorus Nutritional Status[M]. Beijing: Science Press, 1995: 108-128. [王建, 林婉莲. 武汉东湖磷营养状况的研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 108-128.]
- [4] Wang Yong, Jiao Nianzhi. Research Progresses in Nutrient Bottom-up Effect on Phytoplankton Growth[J]. Marine Sciences, 2000, 24(10): 30-33. [王勇, 焦念志. 营养盐对浮游植物生长上行效应机制的研究进展[J]. 海洋科学, 2000, 24(10): 30-33.]
- [5] Chen Qiong. The Influence to Water Bloom by Nitrogen, Phosphorus[J]. Bulletin of Biology, 2006, 41(5): 12-14. [陈琼. 氮、磷对水华发生的影响[J]. 生物学通报, 2006, 41(5): 12-14.]
- [6] Qin Boqiang, Yang Liuyan, Chen Feizhou, *et al.* Eutrophication Mechanisms and Control Technology and Its Applications[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(16): 1857-1866. [秦伯强, 杨柳燕, 陈非洲, 等. 湖泊富营养化发生机制与控制技术及其应用[J]. 科学通报, 2006, 51(16): 1857-1866.]
- [7] Neill M. A Method to Determine Which Nutrient is Limiting for Plant Growth in Estuarine Waters—at Any Salinity[J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, 50: 945-955.
- [8] Suttle C A, Harrison P J. Ammonium and Phosphate Uptake Rates, N:P Supply Ratios, and Evidence for N and P Limitation in Some Oligotrophic Lakes[J]. Limnology Oceanography, 1988, 33: 186-202.
- [9] Bulgakov N G, Levich A P. The Nitrogen:Phosphorus Ratio as a Factor Regulating Phytoplankton Community Structure[J]. Archives Fù Hydrobiologie, 1999, 146: 3-22.
- [10] Li Jianping, Wu Libo, Dai Yongkang, *et al.* Effects of Different Nitrogen-phosphorus Ratio on the Freshwater Phytoplankton Growth and the Variations of Environmental Factors[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(2): 342-346. [李建平, 吴立波, 戴永康, 等. 不同氮磷比对淡水藻类生长的影响及水环境因子的变化[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 342-346.]
- [11] Chen Yuwei, Qin Boqiang, Gao Xiyun. Prediction of Blue-green Algae Bloom Using Stepwise Multiple Regression between Algae & Related Environmental Factors in Meiliang Bay, Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2001, 13(1): 63-71. [陈宇伟, 秦伯强, 高锡云. 太湖梅梁湾藻类及相关环境因子逐步回归统计和蓝藻水华的初步预测[J]. 湖泊科学, 2001, 13(1): 63-71.]
- [12] State Environmental Protection Administration. Determination Methods for Examination of Water and Wastewater[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243. [国家环境保护总局编. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 243.]
- [13] Ana Silió-Calzada, Annick Bricaud, Bernard Gentili. Estimates of Sea Surface Nitrate Concentrations from Sea Surface Temperature and Chlorophyll Concentration in Upwelling Areas: A Case Study for the Benguela System[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112: 3173-3180.
- [14] Tang Junwu, Tian Guoliang, Wang Xiaoyong. The Methods of Water Spectra Measurement and Analysis I: Above-Water Method[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(1): 37-44. [唐军武, 田国良, 汪小勇. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法[J]. 遥感学报, 2004, 8(1): 37-44.]
- [15] Gitelson A. The Peak Near 700 nm on Radiance Spectra of Algae and Water: Relationships of Its Magnitude and Position with Chlorophyll Concentration[J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13(17): 3367-3373.
- [16] Zhang Yunlin, Wu Shengcai, Qin Boqiang, *et al.* Absorption of Light by Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Meiliang Bay of Taihu Lake[J]. China Environmental Science, 2004, 24(4): 405-409. [张运林, 吴生才, 秦伯强, 等. 太湖梅梁湾有色可溶性有机物对光的吸收[J]. 中国环境科学, 2004, 24(4): 405-409.]
- [17] Gitelson A, Garbuzov G, Szilagyi F, *et al.* Quantitative Remote Sensing Methods for Real Time Monitoring of Inland Waters Quality[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14: 1269-1295.
- [18] Doxaran D, Froidefond J M, Lavender S, *et al.* Spectral Signature of Highly Turbid Waters: Application with SPOT Data to Quantify Suspended Particulate Matter Concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(1): 149.
- [19] Shu Xiaozhou, Yin Qiu, Kuang Dingbo. Relationship between Algal Chlorophyll Concentration and Spectral Reflectance of Inland Water[J]. Journal of Remote Sensing, 2000, 4(1): 41-45. [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[J]. 遥感学报, 2000, 4(1): 41-45.]
- [20] Ma Ronghua, Dai Jinfang. Chlorophyll-a Concentration Estimation with Field Spectra of Water-body Near Meiliang Bayou in Taihu Lake[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(1): 78-86. [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.]
- [21] Lv Heng, Li Xinguo, Zhou Lianyi, *et al.* Quantitative Estimation of Chlorophyll-a Concentration in the Northern Part of Lake Taihu Using Spectral Reflectance[J]. Journal of Lake Sciences, 2006, 18(4): 349-355. [吕恒, 李新国, 周连义, 等. 基于反射光谱的太湖北部叶绿素 a 浓度定量估算[J]. 湖泊科学, 2006, 18(4): 349-355.]
- [22] Jiao Hongbo, Zha Yong, Li Yunmei, *et al.* Modelling Chlorophyll-a Concentration in Taihu Lake from Hyperspectral Reflectance Data[J]. Journal of Remote Sensing, 2006, 10(2): 242-248. [焦红波, 查勇, 李云梅, 等. 基于高光谱遥感反射比的太湖水体叶绿素 a 含量估算模型[J]. 遥感学报, 2006, 10(2): 242-248.]
- [23] Han Zhen, Yun Caixing, Jiang Xuezhong. Experimental Study on Reflected Spectrum of Suspended Sediment[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 12: 118-122. [韩震, 恽才兴, 蒋雪中. 悬浮泥沙反射光谱特性实验研究[J]. 水利学报, 2003, 12: 118-122.]
- [24] Gong Shaoqi, Huang Jiazhu, Li Yunmei, *et al.* Preliminary Exploring of Hyperspectral Remote Sensing Experiment for Nitrogen and Phosphorus in Water[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(14): 839-842. [龚绍琦, 黄家柱, 李云梅, 等. 水体氮磷高光谱遥感实验研究初探[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(14): 839-842.]
- [25] Qin Yan, Deng Ruru, He Yingqing, *et al.* Development and Application of Water Quality Remote Sensing Monitoring System for Large and Medium-sized Reservoirs in Guangdong Province[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2011, 26(6): 855-862. [秦雁, 邓孺孺, 何颖清, 等. 广东省大中型水库水质遥感监测系统的建立与应用[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(6): 855-862.]
- [26] Berman M, Kiiveri H, Lagerstrom R, *et al.* ICE: A Statistical Approach to Identifying Endmembers in Hyperspectral Images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, (42): 2085-2095.
- [27] Wang Qiao, Zhang Bing, Wei Yuchun. Implementation of Experimental and Software of Water Environment Remote Sensing Monitor in Taihu Lake[M]. Beijing: Science Press, 2008: 101. [王桥, 张兵, 韦玉春. 太湖水体环境遥感监测实验及其软件实现[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 101.]
- [28] Pulliainen J, Kallio K, Eloheimo K. A Semi-operative Approach to Lake Water Quality Retrieval from Remote Sensing Data[J]. Science of the Total Environment, 2001, 268: 79-93.
- [29] Koponen S, Pulliainen J, Kallio K, *et al.* Lake Water Quality Classification with Airborne Hyperspectral Spectrometer and Simulated MERIS Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 51-59.
- [30] Butler W L, Hopkins D W. Higher Derivative Analysis of Complex Absorption Spectra[J]. Photochemistry and Photobiology, 1970, 12(6): 439-450.
- [31] Fuan T, Philpot w. Derivative Analysis of Hyperspectral Data [J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 41-51.
- [32] Millie D F, Schofield O M, Kirkpatrick G J. Detection of Harmful Algal Blooms Using Photopigments and Absorption Signatures: A Case Study of the Florida Red Tide Dinoflagellate, *Gymnodinium breve*[J]. Limnology: Oceanography, 1997, 42(5): 1240-1251.
- [33] Gooding D G, Han L. Analysis of Suspended Solids in Water Using Remotely Sensed High Resolution Derivative Spectra [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1993, 59(4): 505-510.

Deriving Concentration of TN, TP based on Hyper Spectral Reflectivity

Xu Liangjiang, Huang Changchun, Li Yunmei, Chen Xia

(School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China)

Abstract: Inversion of TN and TP' concentration through the method of derivative and wavelength ratio on the basis of the hyper spectral data which was measured from April to October in 2005. The results indicate that differential method in the 1nm intervals 455 nm differential values of TN concentration in more sensitive, maximum Negative correlation coefficient is -0.857 , maximum positive correlation coefficient is wavelength ratio's (1 015/528 nm) 0.803 . Using these two factors as variables for multiple regression, the best inverse model of TN was got, the absolute error of model is 0.16 , between measured and predicted values of R^2 is 0.839 . The band ratio (671/680 nm) of TP concentration is more sensitive, the maximum Negative correlation coefficient is -0.889 , because the variables are selected as a second polynomial regression, the best inverse model of TP was got. The absolute error of the model is 0.003 , between measured and predicted values of R^2 is 0.934 .

Key words: Hyper Spectral Reflectivity; TN; TP; Wavelength ratio; Derivative method