

基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型*

吕恒^{1,2}, 李新国^{1,2}, 江南¹

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 利用地物光谱仪研究了太湖水体的反射光谱特征, 通过对比分析, 发现 580nm 反射率值和 810nm 的反射峰高是太湖悬浮物的敏感波段, 并通过光谱微分的方法, 发现 840nm 附近的一阶微分与悬浮物浓度相关性最好, 基于上述结论, 分别建立了太湖悬浮物的反射光谱和一阶微分遥感定量模型, 并利用反射光谱数据, 模拟 MERIS 数据的波段设置, 结果表明 MERIS 第 5、12、13 波段可以很好的估测太湖的悬浮物浓度。

关键词: 悬浮物; 反射光谱; MERIS; 遥感定量模型; 太湖

Estimation of Suspended Solids Concentration in Lake Taihu Using Spectral Reflectance and Simulated MERIS

LU Heng^{1,2}, LI Xinguo^{1,2} & JIANG Nan¹

(1: Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, P. R. China)

Abstract: Lake Taihu is the third biggest freshwater lake in China. This study was conducted to establish remote sensing algorithms for the retrieval of suspended solids concentration in Lake Taihu. Reflectance spectral were measured on 13th of Nov. 2003 by using ASD FieldSpec HandHeld radiometer. Water samples for suspended solids concentration, chlorophyll-a, DOC measurements were collected at the same time. Based on the comparison and analysis of the reflectance spectral, the reflectance of 580nm was found to be sensitive to the SSC, in this band, the difference of SSC can be maximum showed, and the peak height of 810 nm was found to have higher correlation with SSC than other bands and can be used for index of SSC. The significantly correlation between the concentration of suspended solids and the reflectance first-derivative of 840nm was also found in this research by using spectral derivative technology. Through simulating MERIS data based on reflectance spectral, it was found that the 5, 12, 13band can be effectively used to retrieve SSC.

Keywords: Suspended Solids; Spectral Reflectance; MERIS; Remote Sensing Algorithm; Lake Taihu

悬浮物(Suspended Solids, SS)是水质监测中的一个重要参数,它直接影响水体的透明度、水色等光学特性。常规的悬浮物测定方法是逐点采样,然后烘干称重,计算出悬浮物的浓度,这种方法不仅费时、费力,而且仅能提供空间上离散点的信息,并不能提供整个水体的悬浮物浓度分布状况,而利用遥感技术可以大面积、快速的提供水体的悬浮物浓度信息。利用遥感监测悬浮物具有快速、低廉和便于进行长期动态监测的优势,国内外许多学者进行了利用卫星遥感技术监测水体悬浮物浓度的研究^[1-12],分析了悬浮物的光谱特征,取得了较大的进展。

本研究的目的是利用地物光谱仪实测太湖水体的光谱反射率,并进行同步的水质采样和测定,分析光谱反射率与悬浮物浓度之间的定量关系,建立太湖悬浮物的光谱测定模型,为将来利用卫星传感器进行水质遥感提供参考,同时,利用测定的光谱反射率模拟 MERIS 数据,建立模拟 MERIS 数据与悬浮物浓度的遥感定量模型,为以后利用实际的 MERIS 数据进行水质遥感监测提供参考依据。

* 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-331)和江苏省自然科学基金项目(BK2002149)联合资助。2004-03-16 收稿;2004-05-24 收修改稿。吕恒,男,1977年生,博士研究生,E-mail:HengLu@niglas.ac.cn.

1 研究方法

太湖是中国第三大淡水湖,面积 2425 km²,平均水深 2.12 m^[13],水体呈中度富营养化到富营养化,水质属于 II-V 类^[14].2003 年 11 月 13 日,在太湖采取了 17 个点的水面反射光谱,每个采样点同时进行表层水质采样,在实验室测得悬浮物浓度、叶绿素 a 和溶解性有机 C 浓度等三个指标.

水面反射光谱是利用美国 ASD 公司的 FieldSpec HandHeld 手持式地物光谱仪测量,该光谱仪的波段范围为 325 - 1075 nm,共 512 个波段,色散 1.6 nm,光谱分辨率为 3.5 nm,视场角 25 度.采样当天,天空晴朗无云,湖面平静.反射光谱数据在距离水面 1 m 处垂直于水面测得.每次光谱测量扫描 5 次,每个采样点至少测量 5 次光谱,最后取平均值作为该点的反射光谱.在测量光谱时,面向太阳,避免仪器阴影影响水体的反射光谱.

2 基于反射光谱数据的遥感定量模型

2.1 太湖水体反射光谱分析

通过对 17 个点的水质分析显示,悬浮物浓度最高 135.40 mg/L,最低 9.44 mg/L,叶绿素浓度最高 159.59 μg/L,最低 3.12 μg/L,悬浮物浓度和叶绿素浓度变化都比较大(图 1).从图中可以明显看出反射率呈典型的内陆湖泊的光谱特征,在蓝光波段(400 - 500nm)由于叶绿素和黄色物质的吸收作用,该范围的反射率比较低,在 445nm 和 665nm 附近有的采样点呈现明显的反射谷值,这是由于叶绿素的吸收作用造成的,有的点这一谷值不甚明显甚至丢失,是因为叶绿素 a 的含量较低,而悬浮物和 DOC 含量较高,悬浮物的反射光谱信息掩盖了叶绿素的反射光谱信息,在 625 nm 附近呈现反射谷值或呈肩状,是由于藻蓝素在 624 nm 处的吸收峰造成的,690 - 710 nm 附近左右强烈的反射峰值,是由于叶绿素的荧光作用,这一反射峰值随着叶绿素浓度的增加,向长波方向偏移.图中 1 号点和 6 号点由于叶绿素浓度含量相对较高,悬浮物浓度相对较低,叶绿素的荧光光谱特征明显的显示出来,在 700 nm 附近出现了非常明显的反射峰.为了进一步分析悬浮物的反射光谱特征,提取 4 个典型可比点(1、10、11、15 号点)反射光谱做详细的比较分析(表 1).

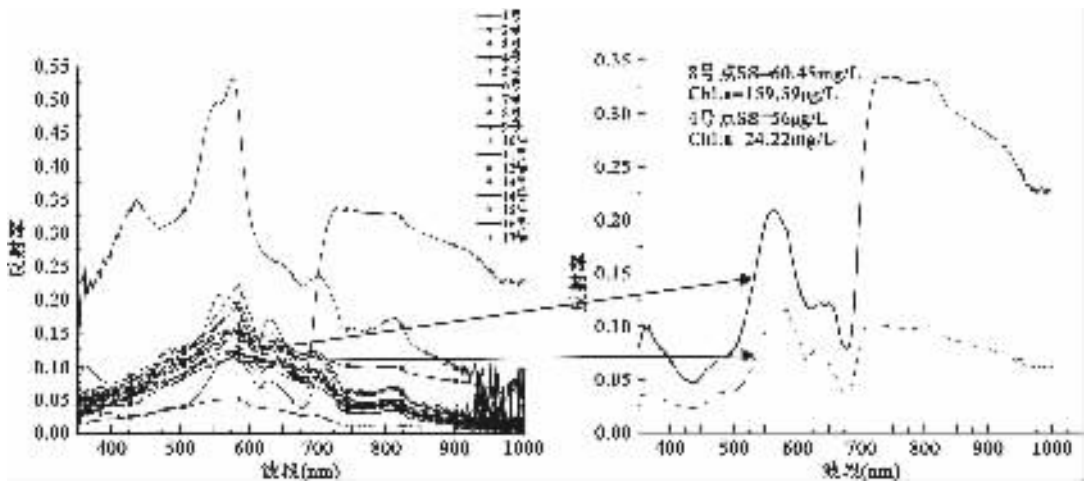


图 1 光谱反射率图

Fig. 1 The spectral reflectance of light over Lake Taihu

可以看出,1 号和 15 号悬浮物浓度比较接近,而叶绿素浓度相差较大,10 号点 11 号点叶绿素浓度相同,而悬浮物浓度相差非常大.

表1 4个采样点的水质参数

Tab 1 Concentration of SS, Chl and DOC of 4 samples

	SS(mg/L)	叶绿素($\mu\text{g/L}$)	DOC(mg/L)
1号	34.24	17.43	5.70
10号	9.44	7.03	4.83
11号	60.92	7.03	5.54
15号	33.28	5.47	6.23

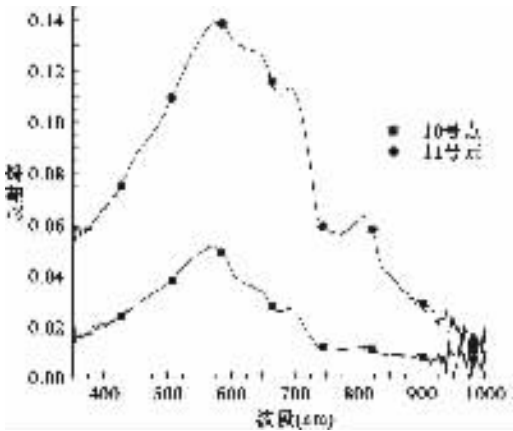


图2 10、11号点光谱反射率图

Fig. 2 The spectral reflectance of 10, 11 sample points

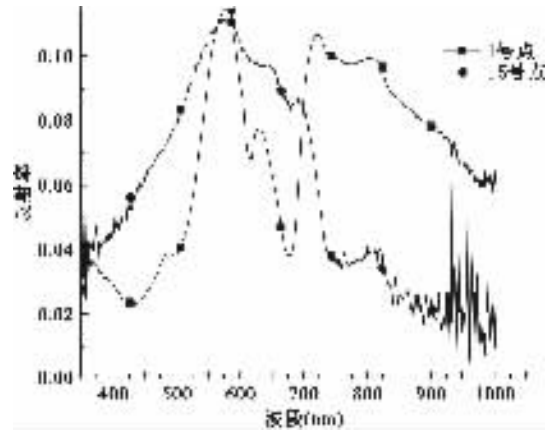


图3 1、15号点光谱反射率图

Fig. 3 The spectral reflectance of 1, 15 sample points

从图2中可以看出,因为11号点的悬浮物浓度比10号点的悬浮物浓度大,由于悬浮物的散射作用,使得11号点的反射率在350-1000nm的波长范围内都比10号点高,但是在580nm附近两个采样点的反射率差值最大,而从图3中可以看出,在580nm附近,两个采样点的反射率值基本上相同,而1号点和15号点两点的悬浮物浓度仅差0.96 mg/L,因此可以认为580nm是太湖水体悬浮物的敏感波段,悬浮物浓度的差异在这一波段附近可以得到最大程度的反映,从图2和图3中还可以看出,810nm附近反射峰也是悬浮物特有的光谱特征,1、11、15号点因为具有较高的悬浮物浓度,在810nm附近都出现了明显的反射峰值,而10号点因为其较低的悬浮物浓度,在810nm反射峰不是很明显,因此用810nm的反射峰高作为悬浮物浓度的指示值,810nm的峰高值=810nm的反射率值-780nm的反射率值.通过相关分析得出,810nm的峰高值与SS浓度PEARSON相关系数是0.84,高于其他各波段与SS的相关性.

GIN等人^[10]在对新加坡近海岸水体的悬浮物光谱研究时也发现在810nm附近也有个反射峰,这与我们本次研究的结果是相一致的,但他还发现对于有机悬浮物,在550nm有一个反射峰,在600-645nm和665-690nm有两个较弱的反射峰,而对于无机悬浮物,在595nm和690nm有两个明显反射峰,而在754nm附近有一个反射谷,这些特征,在本次研究的太湖水体中并没有明显的反映出来,这是因为太湖的悬浮物颗粒大小、形状、颜色、组成与近海岸水体不可能完全相同,再者,GIN等人是在实验室条件下完成这些实验工作的,悬浮物的光谱反射特征没有受到叶绿素、DOC等的影响,而本次研究是在野外完成的,且太湖水体的叶绿素含量和DOC都比较高,影响了悬浮物的特征光谱,造成了一些悬浮物光谱特征的丢失.

2.2 基于反射光谱数据的悬浮物浓度估算模型

把17个点按照悬浮物浓度从高到低排序,每隔3个点取出一点,即把17个点的采样数据分成两组,一组13个点用于建立回归模型,一组4个点用于检验回归模型,根据GIN等人研究的结果^[10],用R550/R754和R595/R754来估算悬浮物浓度,结果不是很理想, $R^2 < 0.3$,因此GIN等人研究的结果并不适合于太湖水体,根据太湖水体反射光谱分析结果,以(R810-R780)和R580分别作为自变量(R代表反射率值),悬浮物

浓度作为因变量,进行回归分析,得到回归方程:

$$SS = 289.18 \times R580, R^2 = 0.90 \text{ (未经校正)}, RMSE = 20.75 \quad (1)$$

$$SS = 5926.31 \times (R810 - R780) + 22.95, R^2 = 0.72, RMSE = 17.41 \quad (2)$$

根据图 4 的散点可以看出,模型(即公式)1 对 SS 浓度小于 60 mg/L 时,模型有很好的估测精度,而大于 60 mg/L 估测效果不是很理想,这是因为悬浮物浓度在区间 60 - 140 之间的样本点太少,造成估算模型不能较好的估测这一区间的浓度. 模型 2 的情况与模型 1 基本类似. 因此,采样时要充分考虑到采样点悬浮物浓度分布情况.

2.3 基于光谱微分的悬浮物浓度估算模型

光谱微分技术是高光谱遥感中一种常用的技术手段,它可以用来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)的影响. Gooding^[15] 等人认为水体的反射光谱的一阶微分可消除水面的影响,二阶微分可以消除悬浮物浓度的影响.

由于采集的光谱反射率值是离散的,对 17 个采样点的反射光谱求一阶微分,一阶微分用下式求算:
 $R(\lambda_i)' = (R(\lambda_{i+1}) - R(\lambda_{i-1})) / (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1})$ (3)
 式中, $\lambda_{i+1}, \lambda_{i-1}, \lambda_i$ 为相邻波长, $R(\lambda_i)'$ 为波长 λ_i 的一阶微分反射光谱.

对 17 个采样点,按上式进行一阶微分处理,然后在 SAS 支持下,进行相关性分析,结果表明,悬浮物浓度与各波段的一阶微分的 PEARSON 相关系数在波段 350 - 750nm 低于悬浮物浓度与各波段的反射光谱值的相关系数,如图 5 所示,这是因为这一区域范围的反射光谱变化不仅受悬浮物的影响而且还受到叶绿素和 DOC 的影响,在大于 750 nm 的波长范围内,即在长波波段,由于水体的强烈吸收作用,这一部分反射光谱的变化主要是因为悬浮物的散射作用造成的,在 840 nm 附近,悬浮物浓度与一阶微分的相关系数最大 -0.85,因此,根据太湖水体光谱分析的方法,以 840 nm 附近的一阶微分作为自变量,以悬浮物浓度作为因变量,进行回归分析,得到回归方程 3,对比图 4、图 6 中的测试数据可以看出 840 nm 的一阶微分可以很好的估算太湖的悬浮物浓度,图 6 的四个测试数据样点离散程度要低于图 4 测试数据的离散程度,模型反演精度好于反射光谱模型,表明反射光谱进行一阶微分后,消除了线性影响,提高了反演的精度.

$$SS = -46993.50 \times R_{840}' + 32.24, R^2 = 0.71, RMSE = 17.60 \quad (4)$$

3 基于模拟 MERIS 数据的悬浮物浓度估算模型

MERIS 是搭载在 ENVISAT-1 极轨对地观测卫星上专门针对水色遥感的传感器,波谱范围 412 - 1050 nm,星下点的分辨率为 300 m,重复观测周期 2 - 3 d. MERIS 能够在 15 个波段上收集数据. MERIS 设置的三

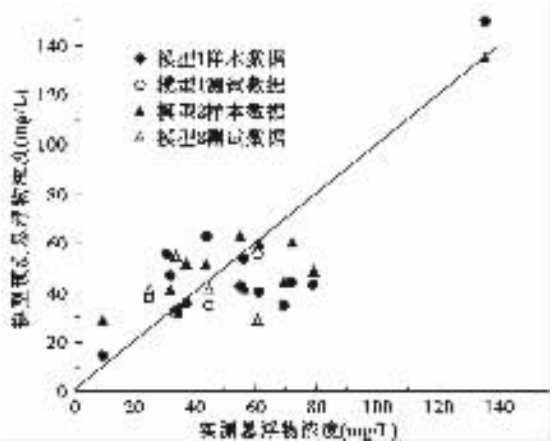


图 4 实测值和预测值散点图

Fig. 4 Predicted suspended sediment concentration versus measured suspended sediment concentration using Model 1, 2

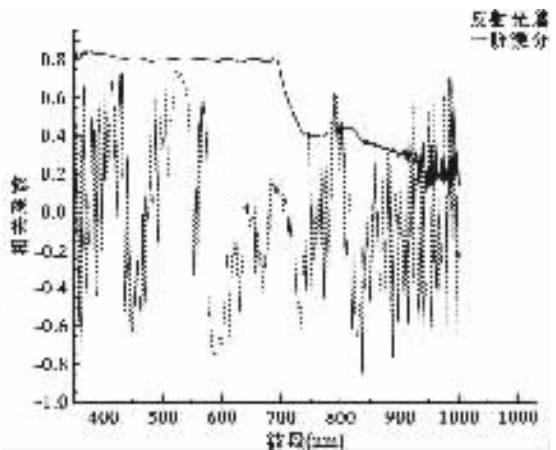


图 5 悬浮物浓度与各波段之间的相关系数图

Fig. 5 The Correlation of SS Concentration and reflectance

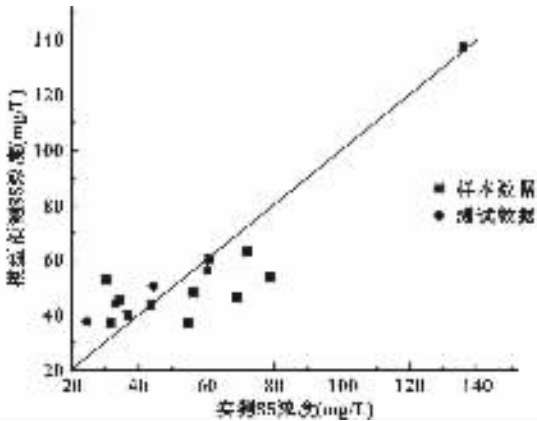


图6 实测值和预测值散点图

Fig. 6 Predicted suspended sediment concentration versus measured suspended sediment concentration using Model 3

个近红外波段可以用来完成精确的大气校正,这就大大的提高了水质参数的反演精度. MERIS 数据以其较多的光谱波段、中等尺度的地面分辨率、较好的时间分辨率、较优的波段设置成为内陆湖泊水质遥感监测的有力工具,由于我国目前还不能接收 MERIS 数据,因此利用光谱仪测得的光谱反射数据模拟 MERIS 数据.

MERIS 数据一共有 15 个波段,波段设置如表 2 所示,各波段的反射率值,用下面的公式求算:

$$R_{MERIS_i} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda = \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{\lambda} / \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda \quad (5)$$

式中, i 为 1-15 为 MERIS 各个波段; R 为反射率; λ_1, λ_2 为 MERIS 各波段起始波长.

表 2 MERIS 波段设置

Tab. 2 MERIS Spectral channels

序号	波段中央 (nm)	波段宽度 (nm)	序号	波段中央 (nm)	波段宽度 (nm)	序号	波段中央 (nm)	波段宽度 (nm)
1	412.5	10	6	620	10	11	760.625	3.75
2	442.5	10	7	665	10	12	778.75	15
3	490	10	8	681.25	7.5	13	865	20
4	510	10	9	708.75	10	14	885	10
5	560	10	10	753.75	7.5	15	900	10

Topliss 等人^[3]利用 CZCS 数据和波段比值的方法反演了 Fundy 和 Beaufort 海湾水体的悬浮物浓度,取得令人满意的结果. 根据 Topliss 的结果,分别分析 (MERIS5/ MERIS7)、(MERIS7/ MERIS10)、(MERIS4/ MERIS7)、(MERIS5/ MERIS10) 和 SS 悬浮物浓度的关系,结果表明这四种波段比值与悬浮物浓度的相关性都非常低(表 3). Topliss 这一研究结论并不能应用到太湖水体.

表 3 悬浮物浓度与波段比值之间的相关系数

Tab. 3 Coefficient of SS Concentration and Band ratios

PEARSON 相关系数	MERIS5/ MERIS7	MERIS7/ MERIS10	MERIS4/ MERIS7	MERIS5/ MERIS10
SS	0.10510	-0.35916	0.23299	-0.27708
lnSS	-0.10651	-0.31354	-0.11499	-0.37995

根据上文光谱分析可知,580 nm 的反射峰值和 810 nm 的峰高可以作为悬浮物浓度的指示值,而在 MERIS 的 15 个波段里,缺失 580 nm 和 810 nm 的波段,选择相邻波段作为替代,选择第 5 波段的反射率值 R_5 替代 580 nm 的反射峰值,选择 ($R_{13} - R_{12}$) 作为 810 nm 的峰高,结果表明 R_5 和 ($R_{13} - R_{12}$) 与悬浮物浓度具有很好的相关性,相关系数在 0.8 以上 ($\alpha = 0.01$),依然用上面的方法,以 R_5 和 ($R_{13} - R_{12}$) 分别作为自变量,以 SS 浓度作为因变量,选择 13 个点,用于回归分析,4 个点用于检验模型,得到回归方程:

$$SS = -3099.99 (R_{13} - R_{12}), \quad R^2 = 0.95 \text{ (未经校正)}, \quad RMSE = 14.86 \quad (6)$$

$$SS = 309.61R_5, \quad R^2 = 0.90 \text{ (未经校正)}, \quad RMSE = 20.58 \quad (7)$$

从图 7 可以看出,基于模拟 MERIS 数据建立的太湖悬浮物估算模型在悬浮物浓度小于 60 mg/L 时,模型具有较好的预测精度,但对于悬浮物浓度大于 60 mg/L 时,估算误差就比较大,总体上说,模型(公式)6 的估算效果要好于模型(公式)7. 利用 MERIS 数据监测内陆湖泊水质是可行的,具有较好的应用前景.

4 结语

本研究通过对太湖水体的反射光谱分析得出,太湖水体的悬浮物浓度对 580 nm 附近的反射率值和 810 nm 反射峰高比较敏感,在这两个波段附近,悬浮物浓度的差异可以得到很好的指示,通过对反射光谱的一阶微分分析得出,悬浮物浓度与 840 nm 附近一阶微分的相关性最大,用其估算悬浮物浓度的模型要好于基于光谱反射率的估算模型.通过模拟 MERIS 数据分析得出,利用 MERIS 第 5、12、13 波段可以估算太湖水体悬浮物浓度, MERIS 数据在监测内陆湖泊水质方面有着良好的应用前景.

由于本次采样点较少,时相单一,所建立的悬浮物浓度估算模型精度不是很高,在以后的工作应该加大采样点数,进行多时相采样,以期获得反演的最佳模型.同时太湖水体受人类活动影响很大,光学特征极其复杂,应该利用一些非线性的方法反演太湖水质参数.

5 参考文献

- [1] Lindell T, Karlsson B. A Further development of the chromaticity, technique for satellite mapping of suspended sediment load. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1986, **52**(9):1521-1529.
- [2] Ritchie J C, Cooper C M. Using Landsat Multispectral Scanner Data to estimate suspended sediments in Moon Lake, Mississippi. *Remote Sensing of Environment*, 1987, **23**:65-81.
- [3] Topliss B J, Almos C L. Algorithms for remote sensing of high concentration, inorganic suspended sediment. *Int J Remote Sensing*, 1990, **11**(6):947-966.
- [4] Chen EH, Hanson J D. The form of the relationship between suspended sediment concentration and spectral reflectance; its implications for the use of Daedalus 1268 data. *Int J Remote Sensing*, 1991, **12**(1):215-222.
- [5] Choubey V K, Subramanian V. Estimation of suspended solids using indian Remote Sensing Satellite - 1A data : a case study from Central India. *Int J Remote Sensing*, 1992, **13**(8):1473-1486.
- [6] Ritchie J C, Cooper C M. An algorithm for estimating surface suspended sediment concentrations with landsat MSS digital data. *Water Resources Research*, 1991, **27**:373-379.
- [7] Roberts A, Kirman C, Lesack L. Suspended sediment concentration estimation from multi-spectral video imagery. *Int J Remote Sensing*, 1995, **16**(13):2439-2455.
- [8] Li Y, Li J. A suspended sediment satellite sensing algorithm based on gradient transiting from water-leaving to satellite-detected reflectance spectrum. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(10):925-930.
- [9] Deng M, Li Y. Use of SeaWiFS imagery to detect three-dimensional distribution of suspended sediment, *INT J Remote Sensing*, 2003, **24**(3):519-534.
- [10] Gin K Y - H, Koh S T. Spectral irradiance profiles of suspended marine clay for the estimation of suspended sediment concentration in tropical waters. *Int J Remote Sensing*, 2003, **24**(16):3235-3245.
- [11] Doxaran D, Froidefond J - M. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **81**:149-161.
- [12] 许 君,方红亮,傅肃性等.运用 SPOT 数据进行河流水体悬浮物固体浓度的研究. *遥感技术与应用*, 1999, **14**(4):17-22.
- [13] 王苏民,窦鸿身主编. *中国湖泊志*.北京:科学出版社,1998:580.
- [14] 刘兆德,虞孝感,王志宪.太湖流域水环境污染现状与治理的新建议. *自然资源学报*, 2003, **18**(4):467-474.
- [15] Goodin D, Han L, Fraser R, et al. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1993, **59**(4), 505-510.

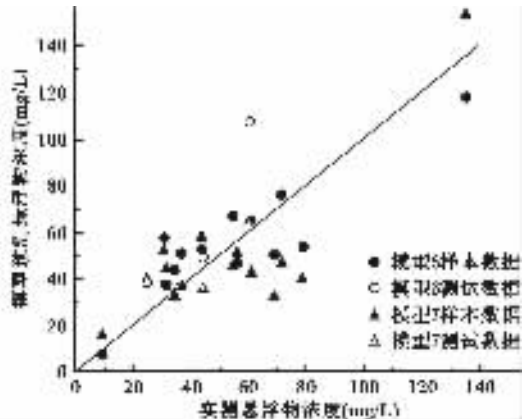


图7 实测值和预测值散点图

Fig.7 Predicted suspended sediment concentration versus measured suspended solid concentration using Model 6,7