

基于多源同步数据的闽江下游悬浮物定量遥感

温小乐,徐涵秋*

(福州大学环境与资源学院空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福州 350002)

摘要:利用 2006-09-18 的同步 Landsat TM 数据、水面实测光谱数据和现场水样数据,研究了闽江下游的悬浮物,在这 3 种同步数据的基础上建立了分别基于实测光谱与影像光谱的悬浮物遥感预测模型。结果表明,实测光谱数据在 690nm 波长处,归一化光谱反射率与悬浮物浓度达到最大正相关,由 690nm 和 530nm 二处的反射率构成的比值预测模型与实测悬浮物浓度的拟合精度最高,最佳拟合模型可表达为 $SS = 116.2(R_{690}/R_{530}) - 33.4$ 。TM 影像各波段中以(TM2 + TM3)波段组合与实测悬浮物浓度的相关性最佳,由其所建立的影像光谱预测模型与实测悬浮物浓度的拟合精度最高,最佳拟合模型可表达为 $SS = 3793.7(R_{TM3} + R_{TM2}) - 16.5$ 。模型的精度评价表明,实测光谱模型的预测能力要强于影像光谱模型,但二者差异不大,在缺乏地面实测光谱数据时,基于影像光谱的遥感定量模型仍不失为一种预测悬浮物浓度的有效方法,其对闽江下游悬浮物浓度的反演结果能较准确地反映出该区域悬浮物浓度分布的空间差异,具有较高的实用性。

关键词:实测光谱;TM 影像;悬浮物;闽江

中图分类号:X87 文献标识码:A 文章编号:10250-3301(2008)09-2441-07

Quantitative Estimation of Suspended Solid Concentration in the Lower Min River Based on Multi-Source Synchronal Data

WEN Xiao-le, XU Han-qiu

(Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing, Ministry of Education, College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: Three synchronal data collected on 2006-09-18 have been used in the study of the suspended solid concentration (SSC) of the lower Min River, which are *in situ* sampled water data, field-spectrometer measured spectral data and Landsat TM spectral data. Two models for predicting SSC have been proposed, one of which is based on field-spectrometer measured data and the other is on Landsat TM data. The statistical analysis of the field-spectrometer measured data has revealed that the reflectance of the SSC at the 690 nm has the strongest correlation with the *in situ*-sampled SSC data. The regression model can be expressed as $SS = 116.2(R_{690}/R_{530}) - 33.4$. Furthermore, the model built upon the ratio of the reflectance at 690 nm to 530 nm has the best fitness with the *in situ* sampled SSC data. While the best predicting model for the Landsat TM data is achieved using the band combination of (TM2 + TM3) and is defined as $SS = 3793.7(R_{TM3} + R_{TM2}) - 16.5$. The assessment of the two models shows that the model on the field-spectrometer data has higher accuracy than that on the Landsat TM data but the difference is not big. This suggests that the Landsat TM data are still valuable in the prediction of the SSC if the field-spectrometer data are not available. Consequently, the predicting model based on the Landsat data has been applied in the study of the SSC of the lower Min River. The result shows that the model can efficiently reveal the SSC with its spatial distributional pattern features.

Key words: field-spectrometer; Landsat TM; the suspended solid concentration; Min River

水体悬浮物是指悬浮在水中的微小固体物质,其含量的多少直接影响到水体的透明度、浑浊度和水色等光学性质。常规的水质监测主要采用定断面定点的方法进行采样分析,这不仅费时耗资,且无法全面、同步地反映整个水域的水质状况。而遥感技术所具有的快速、实时、大面积的观测优势,为水质监测开辟了新的途径。水体悬浮物的遥感监测是通过研究水体反射光谱特征与悬浮物浓度之间的关系,建立相应的预测模型从而实现水体悬浮物浓度的反演^[1]。

内陆和近岸水体悬浮物的定量遥感主要基于 Landsat TM 卫星数据^[2~7]。近年来,随着实测光谱技

术的发展,许多学者开展了基于实测光谱数据的悬浮物遥感研究^[8~15],但它们大多用于研究湖泊水域,而对内陆河流则鲜有报道。另外,同时采用实测光谱数据和遥感卫星数据来进行水质研究的则更少,少量的此类研究由于实测光谱、卫星数据和地面水质采样数据三者的不同步,而使其实用效果大打折扣。根据 Steven 等^[16]的研究,卫星数据与现场水质采样数据的相关性会随着二者时间的不同步而变化,时

收稿日期:2007-09-19;修订日期:2007-12-15
基金项目:福建省教育厅重点项目(2005K006)
作者简介:温小乐(1976~),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为水质遥感与环境评价,E-mail:wexiaole@sina.com
* 通讯联系人,E-mail:hxu@fzu.edu.cn

间差异越大,相关系数越低。二者相差 1、3、7 d 的复相关系数 R^2 分别为 0.86、0.74 和 0.72,而标准偏差则分别增加为 0.245、0.358 和 0.361。显然,卫星数据和实测现场数据的同步性直接影响了研究结果的可靠性,同步性越高,则研究结果的可信度越高,而基于同一天的数据,其结果最为可靠。

为此,本研究在 2006-09-18 Landsat-5 卫星过空当日,在所调查水域进行了同步的水质采样、水面光谱实测,获得了与卫星过空当日同步的现场水质数据和水面实测光谱数据,以期为后续分析结果的可靠性打下坚实的基础。本研究在此基础上分别建立了基于实测光谱数据的悬浮物预测模型和基于影像光谱数据的悬浮物预测模型,并对所构建的两类模型的预测精度进行了对比评价,最后对闽江下游的悬浮物浓度进行了反演和分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

闽江位于我国福建省境内,是福建省最大的水系,一直以来都是沿江各地民众饮用水的主要来源。闽江发源于武夷山脉,流经 36 个县、市,总长 2 872 km,总流域面积 60 992 km²。闽江下游横穿福州市区,流经琅岐岛,最后注入台湾海峡。本研究的水域范围西起福州马尾港,东至闽江入海口,代表闽江下游悬浮沉积物汇聚的主要部位,研究流域全长 26 km(图 1)。

1.2 实验方法

于 2006-09-18 Landsat-5 卫星过空的当日,在所研究水域进行同步水质采样和水样点的水面光谱实测,以确保 3 种数据源的同步性。

1.2.1 野外实测方法

在对研究水域内的 23 个代表点位(图 1)进行水面反射光谱实测和同步水样采集时,同时对各采样点进行高精度 GPS 差分定位。反射光谱测量采用 ISI921VF 野外地物光谱仪,其波长范围为 380 ~ 1 080 nm,共 512 个波段,采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率 4 nm。采样当日,天空晴朗无风,水面基本平静,测量时间为 10:00 ~ 14:00。光谱测量时面向太阳,并于水面正上方 1 m 处进行。每个点至少测量 5 次反射光谱,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灰板校正。同步水样取自于各实测光谱点位水面之下 20 ~ 30 cm 处,实验室内采用重量法(GB 3838-2002)测定悬浮物含量。

1.2.2 影像处理方法

几何校正:对遥感影像的几何校正主要包括 2

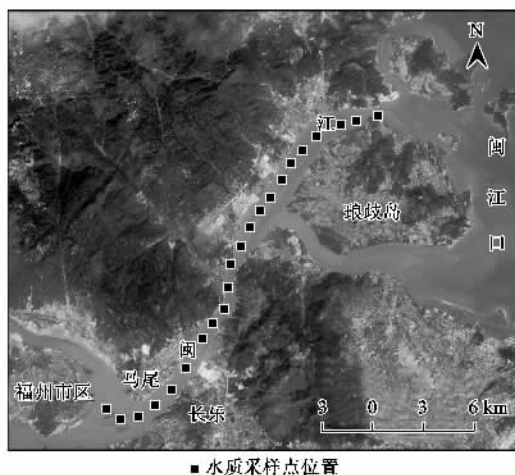


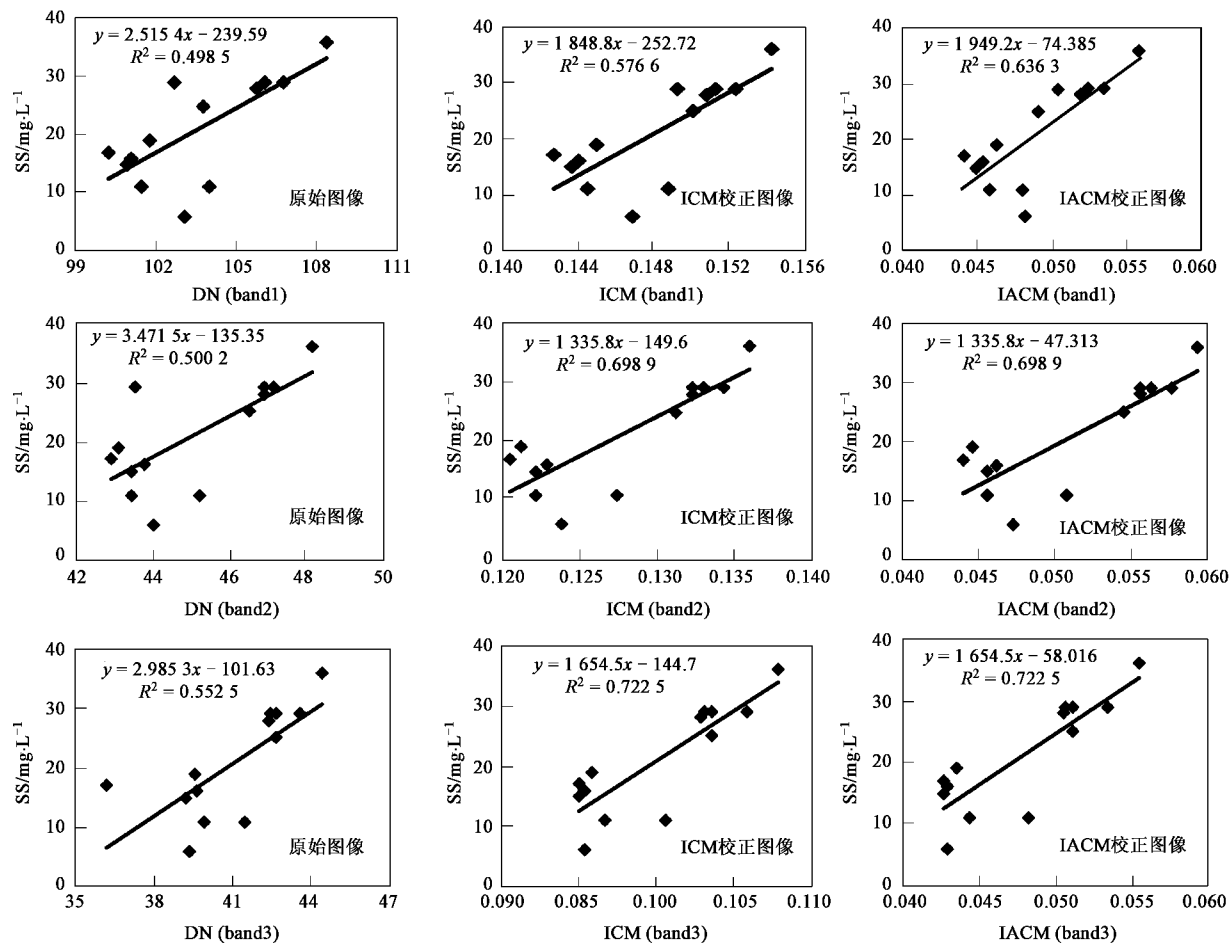
图 1 研究水域及采样点位示意

Fig.1 Map showing the studied water area and the water sampling locations

个过程,首先通过高精度 GPS 获取一定数量的野外控制点(GCP),然后,利用这些 GCP 对 2006 年的影像进行几何精校正。校正采用二次多项式变换和最邻近像元法重采样,校正误差 RMS 满足小于 0.5 个像元的精度要求。

辐射校正:影像的辐射校正就是为了消除大气及其它因素的影响。目前,常用的大气校正模型因需要各种难于获取的同步大气参数,而难于付诸实施^[17]。因此,基于遥感影像自身的绝对辐射校正技术就成为了一种重要的遥感影像后续校正技术。通过对遥感影像的正规化(normalization)来进行辐射校正就是其中最为重要的一种,当前常用的两大类数据正规化模型分别为日照差异校正模型(illumination correction model, ICM)和日照大气综合校正模型(illumination and atmospheric correction model, IACM),这两类模型也是目前 Landsat 数据的管理和分发机构——美国地质调查局(USGS)以及美国宇航局(NASA)采用的主要辐射校正技术。它通过将原始影像的 DN 值转换为传感器处的反射率来降低遥感影像的辐射差异,从而实现遥感影像的辐射校正。经过正规化后的多平台、多时相遥感影像可以大大减少由于日照和大气效应所带来的噪声^[18]。Xu^[19]曾对 ICM 模型和 IACM 模型进行了定量评价,并对比分析了 ICM 模型和 IACM 模型的适用条件和应用效果。

本研究分别采用 ICM 模型和 IACM 模型对获取的遥感影像进行辐射校正,然后将它们和地面水样实测悬浮物浓度值进行相关分析,并与未经辐射校正的原始影像的结果进行对比(图 2)。



因大气影响主要作用于可见光波段,对可见光以外的红外波段几乎没有影响,所以仅选可见光的
TM1、TM2、TM3 波段的灰度值与实测悬浮物的浓度值作相关性分析
图 2 原始影像、ICM 校正影像、IACM 校正影像与悬浮物浓度相关性比较

Fig. 2 Correlations between the *in situ* SSC data and the image data from original DN value , ICM-corrected value and IACM-corrected value

从图 2 可以看出,与未经辐射校正的原始影像相比,经过 ICM 或 IACM 处理后的影像的 1~3 波段灰度值与实测悬浮物浓度的相关性都得到了一定程度的提高,其中尤以蓝光波段(1 波段)最明显。这是由于蓝光波段受大气影响最严重,因此其与实测浓度值的相关性最差,其 R^2 仅为 0.498 5,但经过辐射校正后,其相关性得到了明显提升,无论是 ICM 或 IACM 法,其 R^2 都超过了 0.5,分别为 0.576 6 和 0.636 3。可见,对原始影像采用 ICM 或 IACM 模型进行辐射校正有效的。此外,通过比较 ICM 和 IACM 的校正效果可知,二者的主要区别在于对 TM1 波段的校正,由于 IACM 模型引入了大气校正因子,更有利于消除大气影响,所以其相关性又好于 ICM 模型。基于以上比较分析,本研究选用经 IACM 模型校正的影像来进一步反演悬浮物浓度。

水体信息提取:对所选水域的悬浮物浓度进行专题分析之前,应去除陆地等非水域信息,以突出所研究的水域信息。目前较为常用的水体信息提取指数为 Mcfeeters^[20] 提出的归一化水体指数 NDWI (normalized difference water index)。Xu^[21] 又对 NDWI 进行了修正,提出用中红外波段(如 TM5)替代 NDWI 指数中的近红外波段(TM4)可获得更为理想的水体提取效果,修正后的归一化水体指数 MNDWI (modified normalized difference water index)的数学表达式为:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR} \tag{1}$$

式中,Green 和 MIR 分别对应于 TM 影像的 2 波段和 5 波段的灰度值。利用该 MNDWI 指数法,并设定合适的阈值,便可以快速提取出研究区水体信息,掩掉其它背景信息。

2 结果与讨论

2.1 基于实测光谱数据的悬浮物遥感定量模型

2.1.1 悬浮物敏感波长的确定

首先对野外实测的闽江水体反射光谱曲线进行筛选,去除个别异常曲线后选定 19 条曲线用以光谱分析,其反射光谱曲线见图 3。

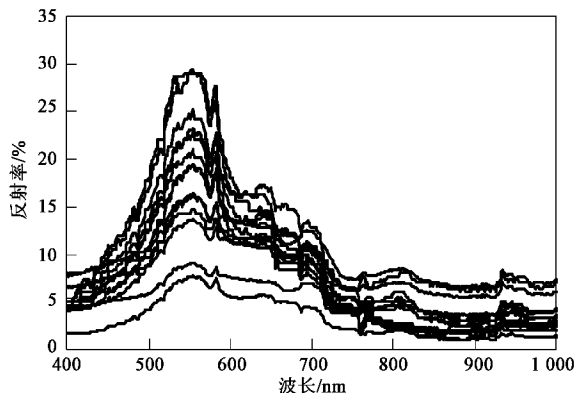


图 3 采样点水体的实测反射光谱曲线

Fig.3 Field-measured spectral reflectance of the water samples

随机选择 13 条实测光谱用作为样本数据用于建立回归分析模型,其余 6 条作为验证数据用于验证模型的准确性.为了避免因背景条件、测量角度等差异对各点测量结果的影响,在室内对每条反射光谱在 400 ~ 1 000 nm 波长范围内的反射率进行归一化处理,在此波长范围内每间隔 10 nm 取 1 个值,作为实测光谱研究数据,最后将各波段的归一化光谱反射率与实测悬浮物浓度进行相关性分析(图 4),找出实测光谱与悬浮物浓度显著相关的波长范围。

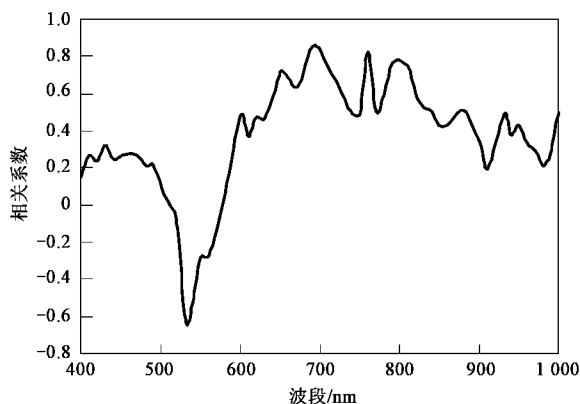


图 4 水体归一化光谱反射率与悬浮物浓度相关系数曲线

Fig.4 Difference of the correlation between normalized spectral reflectance and *in situ* measured SSC within the wavelengths ranging from 400-1 000 nm

图 4 的相关系数曲线显示,在 510 ~ 580 nm 波长范围内悬浮物浓度与归一化光谱反射率表现为负相关关系,最大负相关出现在 530 nm 处,相关系数为 -0.632;在 400 ~ 510 nm、580 ~ 1 000 nm 波长范围间,悬浮物浓度与归一化光谱反射率为正相关关系,且在 690 nm 和 760 nm 处正相关性较好,相关系数均大于 0.80,其中最大正相关出现在 690 nm 处 ($R = 0.852$)。实测悬浮物浓度与水体实测光谱反射率的相关性分析表明,可见光和近红外波长是监测悬浮物的敏感波长区间,通过分析可以确定出 3 个最敏感的波长位置,分别是 530、690 和 760 nm。

2.1.2 基于实测光谱的悬浮物定量预测模型

模型采用 2 种方法建立,第 1 种方法分别以选取出的 3 个敏感波长处的实测光谱反射率作为自变量,以实测悬浮物浓度作为因变量,进行回归分析,建立悬浮物预测模型;第 2 种方法对上述 3 个敏感波长进行比值运算,分别以正相关和负相关的反射率比值作为自变量(R_{690}/R_{530} 、 R_{760}/R_{530}),悬浮物浓度为因变量,建立波长比值悬浮物预测模型.采用波长比值方法创建预测模型,是希望通过波长比值运算来增强有用信息和抑制背景噪声,从而提高水质参数与光谱反射率的相关性.回归分析分别选用了线性回归、对数回归、指数回归和乘幂回归等多种模型,总的看来,线性回归拟合最好,对数回归次之,其它 2 种稍差.现将线性回归和对数回归的拟合方程列于表 1。

从表 1 可以看出,比值模型的拟合精度较之单波长模型有一定程度的提高,其中尤以 R_{690}/R_{530} 的比值组合提高最明显.可见,比值运算确实能进一步扩大两者之间的反差,增强悬浮物浓度的信息.而在由 R_{690}/R_{530} 比值变量所建立的多种回归模型中,以线性回归模型的相关系数为最高,达到 0.941,经 t 检验呈显著相关(差异显著性水平 $p = 0.01$).因此,可用它来建立实测光谱反射率与实测悬浮物浓度的定量预测模型(实测光谱模型),其表达式如下:

$$SS = 116.2(R_{690}/R_{530}) - 33.4 \quad (2)$$

2.2 基于 TM 影像数据的悬浮物遥感定量模型

将经过 IACM 校正的 TM 影像的各波段及其多种波段组合与实测悬浮物浓度进行回归分析,寻找相关性最佳的单波段或波段组合来建立悬浮物预测模型.为避免定位误差,采样点处的影像光谱值采用了 3×3 窗口的像元平均值来代表^[11].回归分析同样采用了线性、对数、指数和乘幂等多种模型,并选

表 1 水体实测光谱反射率与实测悬浮物浓度的回归模型

Table 1 Various regression models showing the fitness between field-spectrometer data and *in situ* sampled SSC data

项目	反射率	指标	回归方程类型	
			线性回归	对数回归
单波长	R530	方程	$y = -194.78x + 205.09$	$y = -184.94\ln x + 10.44$
		R	0.632	0.632
	R690	方程	$y = 102.04 x - 27.17$	$y = 42.66 \ln x + 53.41$
		R	0.852	0.844
	R760	方程	$y = 246.01 x + 4.65$	$y = 11.13 \ln x + 52.75$
		R	0.825	0.800
波长比值	R690/ R530	方程	$y = 116.2 x - 33.4$	$y = 50.54 \ln x + 60.0$
		R	0.941	0.934
	R760/ R530	方程	$y = 228.41 x + 4.96$	$y = 11.09 \ln x + 52.2$
		R	0.837	0.814

用了单波段和波段组合的 2 种形式来建模.

总的看来,影像光谱值与悬浮物浓度的拟合效果同样以线性和对数的模型为最好,而单波段的回归分析中又以可见光波段与悬浮物的相关性最高,红外波段与悬浮物的相关性较差,将拟合相关系数 > 0.8 的各类模型列于表 2. 3 个可见光波段的相关系数都大于 0.79,经 *t* 检验都呈显著相关(差异显著性水平 *p* = 0.01). 其中相关性最好的是 TM3 波段,其次为 TM2 和 TM1 波段,可见, TM3 波段是反演悬浮物的最佳波段. 在 2.1 节的实测光谱数据分析中,悬浮物浓度与水体实测光谱反射率的最大正相关出现在 690 nm 处,这一波长位置正好对应于 TM3 波段的波长范围内. 因此,无论是实测光谱数据或 TM 影

像数据,都表明了红光波段与实测悬浮物浓度的相关性最好.

进一步采用比值、求和等多种波段组合形式来分析它们与悬浮物浓度之间的相关关系. 从回归结果来看,由(TM2 + TM3)²波段组合所建立的线性回归模型的相关系数最高(*R* = 0.855),经 *t* 检验呈显著相关(差异显著性水平 *p* = 0.01),而其余各种波段组合都未能提高影像光谱反射率与悬浮物浓度的相关性. 因此,选取(TM2 + TM3)²波段组合作为最佳波段组合,建立了基于 TM 遥感影像的悬浮物预测模型(影像光谱模型),其表达式如下:

$$SS = 3\,793.7(R_{TM3} + R_{TM2})^2 - 16.5 \quad (3)$$

2.3 模型预测精度评价

表 2 TM 单波段或波段组合与实测悬浮物浓度的回归模型¹⁾

Table 2 Various regression models showing the fitness between TM data and *in situ* sampled SSC data

项目	TM	指标	回归方程类型	
			线性回归	对数回归
单波段	TM2	方程	$y = 1\,335.8 x - 47.3$	$y = 67 \ln x + 220.7$
		R	0.836	0.824
	TM3	方程	$y = 1\,654.5 x - 58.0$	$y = 78.7 \ln x + 260.7$
		R	0.850	0.844
	TM3 + TM1	方程	$y = 930.9 x - 69.0$	$y = 89.8 \ln x + 23.1$
		R	0.843	0.836
波段组合	TM2 + TM1	方程	$y = 816.7 x - 60.7$	$y = 80.8 \ln x + 207.3$
		R	0.833	0.822
	TM2 + TM3	方程	$y = 747.3 x - 52.9$	$y = 73.1 \ln x + 190.5$
		R	0.847	0.838
	(TM1 + TM2) ²	方程	$y = 4\,100.4 x - 20.4$	$y = 40.4 \ln x + 207.3$
		R	0.843	0.822
	(TM3 + TM2) ²	方程	$y = 3\,793.7 x - 16.5$	$y = 36.6 \ln x + 190.5$
		R	0.855	0.838

1) 波段组合中仅选择与悬浮物浓度相关性较高的 TM1、TM2、TM3 3 个单波段参与组合

预测模型的预测精度反映了模型的预测能力,其精度的高低直接决定了模型的实际应用价值. 为

了评价所建立的实测光谱模型与影像光谱模型的预测能力,采用未参与建模的 6 个验证点的悬浮物实

测浓度值来对所建的 2 个模型进行验证.

表 3 为两类模型的预测精度统计分析结果,图 5 为通过两类预测模型得出的悬浮物预测值与实测值的比较及其拟合关系图.对两类模型的相关系数分别进行显著性检验, t 检验结果表明均呈显著相关(差异显著性水平 $p = 0.01$).

由于本研究是在同步获取实测光谱、影像光谱和实测悬浮物浓度的基础上进行的,因此,研究时间上的高度同步性保证了对两类模型的预测精度进行比较的可比性及结果的可靠性.

通过表 3 和图 5 的分析可知,实测光谱模型的预测能力要强于影像光谱模型,这是因为实测光谱避免了大气等多种因素的干扰,所以其模型的预测效果较好.但表 3 显示二者的预测精度差异不大,由影像光谱模型得出的 6 个验证点的悬浮物预测浓度与实测浓度的拟合精度虽略逊于实测光谱模型,但其相关系数也可达 0.937.这一结果也同时验证了影像光谱预测模型的实际应用价值,即在缺乏地面实测光谱数据时,基于影像光谱的遥感定量模型仍不失为一种预测悬浮物浓度的有效方法.

表 3 实测光谱模型与影像光谱模型的预测精度比较

Table 3 Accuracy comparison between field-spectral-based model and Landsat TM-based model			
模型类型	预测相关系数 r	均方根差 RMSE	
实测光谱模型	0.958 ($t = 6.68 > t_{0.01} = 4.60$)	3.49	
影像光谱模型	0.937 ($t = 5.37 > t_{0.01} = 4.60$)	4.43	

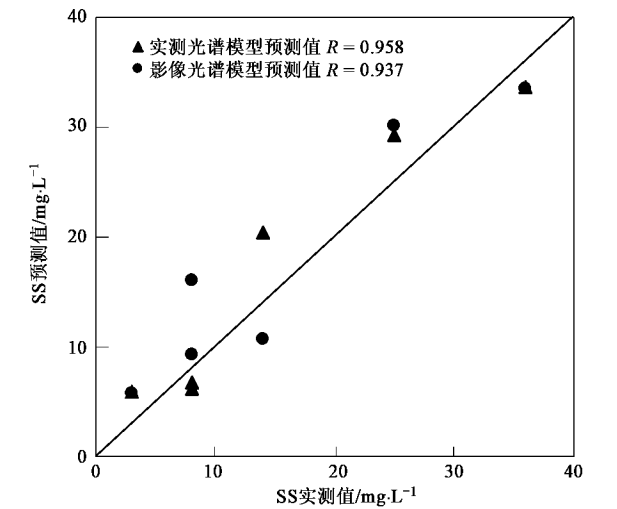


图 5 悬浮物遥感预测模型的预测精度

Fig.5 Fitness between *in situ* sampled SSC and predicted SSC

2.4 闽江下游悬浮物浓度反演

通过所建立的 TM 数据悬浮物预测模型(式 3)

对采样当日研究水域的悬浮物浓度进行反演,将悬浮物浓度由低至高分成 5 级,并统计面积比例,以揭示悬浮物浓度的空间分布情况(图 6).

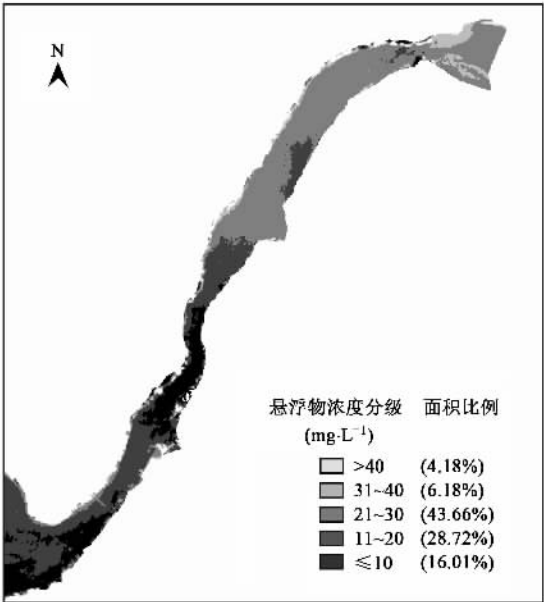


图 6 2006-09-18 闽江下游悬浮物浓度反演

Fig.6 Distributional feature of the SSC of the lower Min River on 2006-09-18, revealed by the TM-based predicting model

从图 6 可以看出,闽江下游河段的悬浮物分布具有以下特点:①大部分河段的悬浮物浓度 < 40 mg/L ,其分布面积约占研究水域的 95.2%;悬浮物浓度 > 40 mg/L 的水域面积较小,仅占 4.8%,分布于沿岸局部区域;②北部靠近入海口的河段中的悬浮物浓度普遍高于南部河段,经统计分析,北部河段的悬浮物平均浓度为 26.7 mg/L ,而南部河段的悬浮物平均浓度为 15.5 mg/L ,前者高出后者约 1.7 倍.分析原因,一是因为流域带来的泥沙在此处高度汇集,是泥沙等悬浮物交换频繁的区域;二是因为北部河岸沿线分布有多个村镇和工业区,是人群聚居、工业密集的区域,因此北部河段的悬浮物浓度高于南部河段,而且越靠近入海口,悬浮物浓度越高;③近岸区的悬浮物浓度要明显高于远岸水域的悬浮物浓度,这显然是由于近岸水域受到人类活动的强烈影响所致.

综上所述可知,由 TM 影像光谱预测模型得出的闽江悬浮物浓度反演结果能比较合理和准确地反映出区域悬浮物浓度分布的空间差异,因此,利用所建立的 TM 预测模型来研究闽江悬浮物浓度是可行的,具有较高的实用性.

3 结论

(1)水质遥感多源数据的同步性是水质研究的重要基础.利用所获取的闽江下游的同步 TM 数据、水面实测光谱数据和现场水样数据,所建立的 2 个悬浮物遥感模型(实测光谱模型和影像光谱模型)之间具有较好的吻合性.

(2)实测光谱数据表明,可见光和近红外是监测闽江下游悬浮物的敏感波长,530、690 和 760 nm 是 3 个最敏感的波长位置,由 R690/R530 的比值组合所建立的实测光谱模型与实测悬浮物浓度的拟合精度最高.

(3)TM 影像各波段中以可见光波段与实测悬浮物的相关性最好,其中尤以(TM2 + TM3)波段组合的相关性最佳,由其所建立的影像光谱模型与悬浮物实测浓度的拟合精度最高.

(4)两类模型精度评价表明,实测光谱模型的预测能力略强于影像光谱模型,但二者差异不大,在没有地面实测光谱数据时,基于影像光谱的遥感定量模型仍不失为一种预测悬浮物浓度的有效方法,其对闽江河段悬浮物浓度的反演结果与实际情况相吻合,具有较高的实用性.

(5)对闽江下游悬浮物浓度的反演结果表明,大部分河段的悬浮物浓度 < 40 mg/L,北部河段的悬浮物浓度高于南部河段,且越靠近入海口,悬浮物浓度越高.另外,近岸水域因受人类活动的强烈影响,其悬浮物浓度也明显高于远岸水域.

参考文献:

[1] Dekker A G, Vos R J, Peter S M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23 (1): 15-35.

[2] Nelson S A C, Cheruvilil K S, Soranno P A. Satellite remote sensing of freshwater macrophytes and the influence of water clarity [J]. Aquatic Botany, 2006, 85 (4): 289-298.

[3] Alicia V, Alberto P, Daniel C. Water quality assessment using remote sensing techniques: Medrano Creek, Argentina [J]. Journal of Environmental Management, 2006, 81 (4): 429-433.

[4] 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.

[5] 王学军,马延.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] 汪小钦,王钦敏,邵群勇,等.遥感在悬浮物质浓度提取中的应用——以福建闽江口为例[J].遥感学报,2003,7(1):54-57.

[7] 李胜,徐涵秋,王琳.近岸水域悬浮物的遥感分析[J].遥感技术与应用,2005,20(6):601-605.

[8] 李洪灵,张鹰,姜杰.基于遥感方法反演悬浮泥沙分布[J].水科学进展,2006,17(2):242-245.

[9] 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[J].湖泊科学,2005,17(2):97-103.

[10] 吕恒,李新国,江南.基于反射光谱和模拟 MERIS 数据的太湖悬浮物遥感定量模型[J].湖泊科学,2005,17(2):104-109.

[11] Gin K Y, Koh S T. Spectral irradiance profiles of suspended marine clay for the estimation of suspended sediment concentration in tropical waters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24 (16): 3235-3245.

[12] Doxaran D, Froidefond J. Spectral signature of highly turbid waters application with SPOT data to quantify suspended particulate matter concentrations[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 81 (1): 149-161.

[13] 李素菊,王学军.巢湖水体悬浮物含量与光谱反射率的关系[J].城市环境与城市生态,2003,16(6):66-68.

[14] Liew S C, 吕喜玺,陈平,等.高浑浊内河悬沙浓度的遥感估测:以中国云南金沙江下游支流为例[J].山地学报,2003,21 (3): 378-379.

[15] 巩彩兰,尹球,匡定波.黄浦江水质指标与反射光谱特征的关系分析[J].遥感学报,2006,10(6):910-916.

[16] Steven M K, Patrick L B, Leif G O, et al. A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82 (1): 38-47.

[17] Du Y, Philippe M T, Cihlar J. Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection [J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 82 (1): 123-134.

[18] Chander G, Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41 (11): 2674-2677.

[19] Xu H Q. Evaluation of two absolute radiometric normalization algorithms for pre-processing of Landsat imagery [J]. Journal of China University of Geosciences, 2006, 17 (2): 146-150.

[20] Mcfeete S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17 (7): 1425-1432.

[21] Xu H Q. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27 (14): 3025-3033.