

文章编号: 0253-2239(2009)05-1403-05

# 基于光谱指数法的植被含水量遥感定量监测及分析

李玉霞<sup>1</sup> 杨武年<sup>2</sup> 童玲<sup>1</sup> 简季<sup>2</sup> 顾行发<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>电子科技大学 地表空间信息技术研究所, 四川 成都 610054  
<sup>2</sup>成都理工大学 遥感与 GIS 研究所, 四川 成都 610059  
<sup>3</sup>中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

**摘要** 在分析植被光谱特征与光谱和植被水分相关性的基础上,初步确定几个波段或波段组合为植被含水量的光谱指数。利用数据对植被含水量 FMC(Fuel Moisture Content)与上述水份光谱指数分别建立最优函数关系。通过分析不同光谱指数的关系及其相对误差,确定以 1600 nm 和 820 nm 处反射率的比值  $S_R$  作为建立本研究区植被含水量模型的特征参数;并利用实测光谱反射率与植被含水量建立  $S_R$  与 FMC 之间的模型关系。根据植被含水量模型、ETM 和 ASTER 遥感数据,在 IDL7.0 开发平台下实现研究区植被含水量的定量反演,并利用区内实测数据和本底调查数据对反演结果进行了综合评价与分析。结果表明,光谱指数  $S_R$  可以较好地剔除环境背景以及冠层结构等外界因素的影响,植被含水量遥感反演精度较高,能真实反映研究区植被含水量的时空变化规律与特征。

**关键词** 遥感; 定量反演; 植被含水量; 光谱指数; 光谱反射率

中图分类号 Q149 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092905.1403

## Remote Sensing Quantitative Monitoring and Analysis of Fuel Moisture Content Based on Spectral Index

Li Yuxia<sup>1</sup> Yang Wunian<sup>2</sup> Tong Ling<sup>1</sup> Jian Ji<sup>2</sup> Gu Xingfa<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geo-Spatial Information Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China  
<sup>2</sup>Institute of RS & GIS, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China  
<sup>3</sup>Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

**Abstract** Some bands or band combination are used as the spectral indices of fuel moisture content based on analyzing the spectral characteristic and relation of spectrum and fuel moisture content. The optimal function models are respectively established between the fuel moisture content and spectral indices. By analyzing the spectral index and its relative error, it confirms the spectral index  $S_R = R_{1600}/R_{820}$  as the characteristic parameters of the model, where  $R_{1600}$  and  $R_{820}$  are the reflectivities at 1600 nm and 820 nm. Utilizing the measured vegetation spectral reflectance and fuel moisture content, the model relation between fuel moisture content and  $S_R$  spectral index is established. According to the model of fuel moisture content, ETM and ASTER remote sensing data, the quantitative inversion are achieved by the programme based on IDL7.0 platform. The measured data and background data surveyed in the study area are used to evaluate and analyze the inversion results synthetically. The results show that the spectral index  $S_R$  can eliminate the outside impact of the background environment, the canopy structure, and other factors. The remote sensing retrieval precision of fuel moisture content superior. It can reflect the variety characteristics of the fuel moisture content in the study area veritably.

**Key words** remote sensing; quantitative inversion; vegetation water content; spectral index; spectral reflectance

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2008-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(60841006)、“十一五”国家科技支撑计划(MYHT0601)和电子科技大学青年科技基金(L080107)资助课题。

作者简介: 李玉霞(1979—),女,博士后,讲师,主要从事定量遥感,数字图像处理,3S 技术及应用方面的研究。

E-mail: liyuxia@uestc.edu.cn

## 1 引 言

植被含水量的研究对植被生长、火灾、旱灾以及生态环境安全监测等具有重要意义。对于植被水的定量监测和估算,有多种野外实测手段,但获取信息只反映了采样点周边较小范围和较短时间内的状况。如果采用野外实测手段获取较大范围内植被水动态状况,需布控较多采样点,且长时间连续野外作业,这在经济和技术上都不可行,而遥感手段可以很好的满足其空间广泛性和时间连续性要求。国内外利用遥感技术对植被含水量开展了大量的研究。Ceccato 等<sup>[1,2]</sup>综合考虑了叶片内部结构、叶片水份含量以及干物质等的影响,发现 1600 nm 和 820 nm 反射率的简单比值指数与植被含水量高度相关。但大部分研究针对农作物进行的,植被结构单一。

自 2000 年 3 月至 2007 年 5 月,本课题组在岷江上游毛儿盖地区多次进行大面积不同森林植被类型的实际观测,并对此间收到的 ETM 和 ASTER 遥感数据进行了大气校正、几何校正及地形校正等处理<sup>[3~7]</sup>。利用美国 ASD Field Spec® Pro FR 光谱仪(350~2500 nm)进行了植被野外反射光谱测量。本文利用该地区野外实测的各种数据,研究了分析植被含水量与光谱反射率及光谱指数之间的模型关系,构建了基于光谱指数法的植被含水量遥感信息模型。

## 2 基于光谱指数法的植被含水量模型

植被的反射光谱曲线起伏变化较明显,具有多峰与多谷的特征,如图 1 所示<sup>[8]</sup>。在可见光波段 550 nm(绿光)附近有反射率为 10%~20% 的一个波峰,两侧 450 nm(蓝光)和 670 nm(红光)则有两个由于叶绿素吸收造成的吸收带。在近红外波段 800~1000 nm 有一个细胞结构影响形成的反射陡坡。在近红外波段 1300~2500 nm 由于植物含水

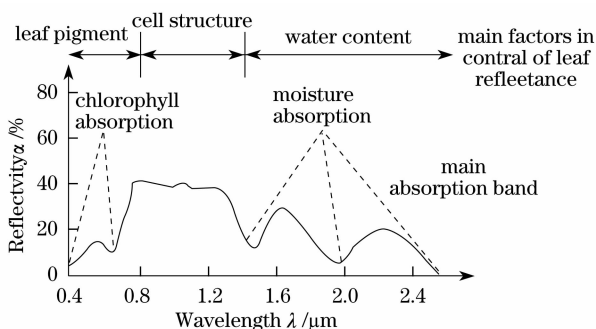


图 1 绿色植物有效光谱响应特征

fig. 1 Effective spectral response characteristics of green plants

量的影响,吸收率增大,反射率下降,并形成几个水分吸收带。植被在不同光谱段各不相同的反射光谱曲线形态和特征构成了在遥感图像上辨认或区分其它地物的物理基础。

### 2.1 光谱指数的确定

光谱指数法是指某些特定波段或波段反射率的组合,与植被的水、叶片色素或光合作用以及氮胁迫状态等有关。波段组合的选取参照一定的物理基础,能消除环境影响<sup>[1,2,9~16]</sup>。本文选择以下几个波段或波段组合,利用 LOPEX'93 库数据,对植被水份与光谱指数的相关关系做试验研究。950 nm 和 970 nm 是水份的敏感波段,把 900 nm 作为参比波段进而定义的水份指数  $W_{I_1} = R_{970}/R_{900}$  和  $W_{I_2} = R_{950}/R_{900}$ ; 860 nm 和 1240 nm 处反射率比值指数经非线性归一化处理得归一化差值水份指数  $N_{DWI} = (R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$ ; 由 820 nm 和 1600 nm 处反射率定义的比值指数  $S_R = R_{1600}/R_{820}$ , 土壤可调节水份指数  $S_{WAI} = (R_{820} - R_{1600}) * (1 + L) / (R_{820} + R_{1600} + L)$  及归一化红外指数  $II = (R_{820} - R_{1600}) / (R_{820} + R_{1600})$ ; 中心波长位于 975 nm 与 1200 nm 的比值指数构造水份指数  $R_{975} = 2 * R_{960-990} / (R_{920-940} + R_{1090-1110})$  和  $R_{1200} = 2 * R_{1180-1220} / (R_{1090-1110} + R_{1265-1285})$ 。

基于 LOPEX'93 及实测数据库,用 52 个样本的 FMC(Fuel Moisture Content)与光谱指数值建立最优回归关系。通过分析得出,与 FMC 相关度  $r$  最高的是  $W_{I_1}$ ,  $r^2 = 0.7901$ ; 其次是  $S_R$ ,  $r^2 = 0.769$ ; 最差的是  $R_{1200}$ ,  $r^2 = 0.239$ 。另外取 20 个样本对不同光谱指数的统计关系进行验证,用相对误差  $e_R$  来说明其统计精度。结果表明,各光谱指数对 FMC 的影响不同,相对误差变化范围在 10.21%~16.42% 之间。对 FMC 预测精度最好的是  $S_R$ , 相对误差为 10.21%; 其次是  $II$ , 相对误差为 10.29%; 然后是  $W_{I_1}$ 、 $N_{DWI}$ 、 $S_{WAI}$ 、 $R_{975}$  和  $R_{1200}$  分别为 10.38%、10.86%、11.56%、11.97% 和 12.01%; 精度最差的是  $W_{I_2}$ , 相对误差为 16.42%。

以上结果说明,用 FMC 表征植被含水量时,选用近红外波段组合或者近红外和短波红外波段组合结果都相对不错,但是以  $S_R$  光谱指数的效果最好。因此首选光谱指数  $S_R$  作为预测模型的因子。1600 nm 是水份强吸收波段,而 820 nm 是水份的弱吸收波段,二者比值的结合可以增强含水量信息<sup>[1,2]</sup>。因此为了建立本研究区植被含水量 FMC 最优统计关系,取得较好预测精度,并且易与遥感数

据(ETM 和 ASTER 数据)波段相对应。

### 2.2 模型的建立

根据以上分析,采用鲜重和干重的差值与鲜重的百分比表征植被含水量(FMC),选用波长1600 nm和820 nm 反射率构建的比值指数  $S_R$  ( $S_R = R_{1600}/R_{820}$ )作为建立本研究区植被含水量模型的特征参数。根据实测和处理后的数据,建立植被含水量 FMC( $Y$ )与  $S_R$  光谱指数( $X$ )最优模型关系,用最小二乘法拟合出对数方程(图 2),并给出残差分析(图 3)。

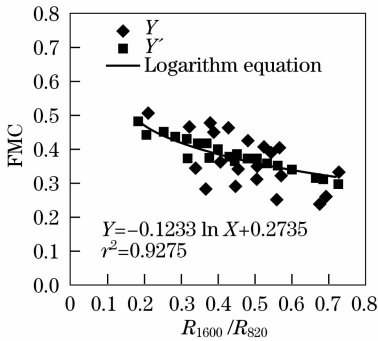


图 2 FMC 与光谱指数  $S_R$  的模型关系

Fig. 2 Model between fuel moisture content (FMC) and  $S_R$  spectral index

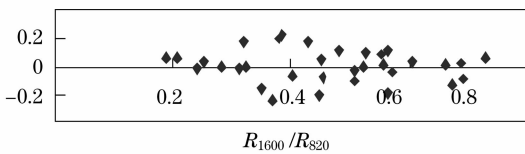


图 3 FMC 实测值与模型预测值的残差分布图

Fig. 3 Standard residual error distribution of the FMC model

植被含水量(FMC)与反射光谱指数  $S_R$  之间存在  $Y = -0.1233 \ln(X) + 0.2735$  对数函数关系,  $r^2 = 0.9275$ 。从其残差和标准残差值可见,残差值相对较小且分布均匀,也即预测值和实测值之间的离散度较小,能较好的反应植被含水量大小。实际测定结果与回归结果表明,重复检测自变量( $n=20$ ,数据呈正态分布),结果与实际测量值相符,精度较高。从总体上看, $S_R$  光谱指数法对植被含水量的预测能力较强,把通过建模数据获得的模型关系应用到检验数据时, $e_R$  值较小,且分布均匀,说明此方法对植被含水量的反演是很有效的。

### 2.3 模型验证

利用检验数据对建立模型的预测能力进行评价。另外取 20 个实测数据验证 FMC 与光谱指数  $S_R$  的模型关系。用相对误差  $e_R$  来验证光谱指数  $S_R$

与植被含水量模型的统计精度

$$e_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{Y_i - Y'_i}{Y_i}, \quad (1)$$

其中  $Y_i$  为实测值, $Y'_i$ 为模型模拟值, $n$  为样本个数。通过检验数据验证表明,植被含水量 FMC 与光谱指数  $S_R$  模型关系的相对误差值为 11.09%;同时也表明,在冠层层次,能找到通用的植被含水量提取关系。也可以考虑采用最优子集回归方法研究不同光谱指数的各种组合对植被含水量的贡献率,建立全局最优的回归关系,进而得到一个多反演因子的综合反演模型,这样,考虑了不同影响因子对模型的影响,可提高反演精度。

## 3 植被含水量遥感反演与评价

### 3.1 植被含水量遥感反演

根据基于光谱指数法植被含水量模型,ETM 图像选用大气校正后的短波红外 5 波段(1550~1750 nm)和近红外 4 波段(775~900 nm),ASTER 图像选用 4 波段(1600~1700 nm)和 3 波段(760~860 nm),借助 IDL7.0 开发平台编程实现研究区植被含水量的遥感反演,FMC 的分布状况见图 4 和图 5。

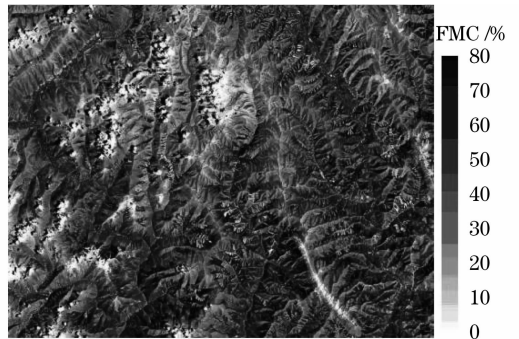


图 4 ETM 数据植被含水量反演结果图

Fig. 4 Inversion results of FMC based on ETM image

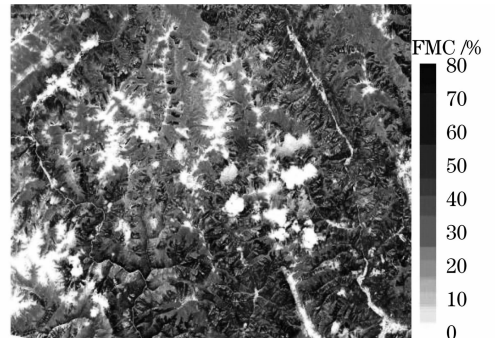


图 5 ASTER 数据植被含水量反演结果图

Fig. 5 Inversion results of FMC based on ASTER image  
在图 4 和 5 中,颜色越深,表示含水量越大;有

云、雪覆盖区域,由于云、雪的高反射特性,所以在反演结果图中表现为浅白色,但云阴影的区域在图中表现为黑色。结合研究区植被分类图,经统计分析 ETM 数据的植被含水量反演结果表明:岷江上游毛儿盖地区的植被含水量(FMC)最小值为 0.593%,最大值为 80.869%,平均为 39.867%。从图 4 中可见毛儿盖河以及其它小水系的含水量也非常高,在反演结果图中颜色最深,近乎为黑色;在反演结果图的右下方有长条形的白色区域,根据研究区遥感调查分类图发现,此区域为采伐迹地,含水量比较低,呈浅白色。但是从图 5 中反映的毛儿盖河及其它小水系的颜色为浅白色,这是由于 ASTER 图像获取时间为 11 月份,河流中的水体已结成厚度不同的冰的缘故。

上述研究结果表明,光谱指数  $S_R$  可以较好地剔除背景及冠层结构的影响,能较准确地提取植被含水量。

### 3.2 结果评价

通过综合分析研究区植被含水量反演结果、实测光谱数据、实测植被含水量主要记录参数及数值、野外记录其他资料及相关参考文献<sup>[1,2,6,7,10]</sup>,可以得出,植被含水量与植被类型、植被生长状况、植被覆盖度、土壤类型、土壤水份、植被生长地域的高程和坡度、阴坡与阳坡等条件有密切的关系。

对反演结果的评价,通过两个方法:

1) 利用实测植被含水量数据(16 个样本数据)评价植被含水量反演模型的精度。图 6 为实测植被含水量数据和对应点模型反演结果(ETM 数据)的散点图,可以看出实测值和模型反演值分布均匀,误差较小,只有个别实测数据点误差相对较大,可能是由于采集和处理实测数据时,仪器或者人为影响造成的。图 6 表明利用光谱指数法反演的植被含水量与实测植被含水量的结果基本一致,模型反演精度都较高。

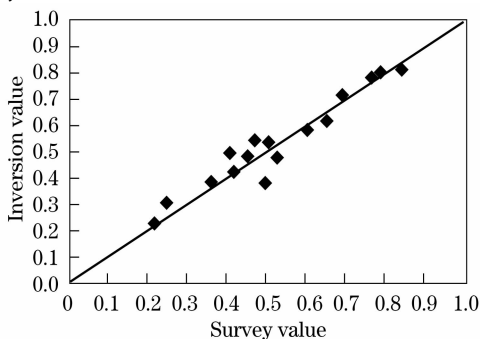


图 6 FMC 反演(ETM 数据)和实测数据比较  
Fig. 6 Comparison the FMC inversion data with the survey data

2) 采用杨武年教授和万新南教授等承担的 863 课题“岷江生态环境本底遥感综合调查与评价项目”中有关生态水资源研究成果,作为评价本文植被含水量模型的参照。此外,从上述综合分析可知,植被含水量与植被类型、土壤类型和水系分布等密切相关,将植被含水量分布图与植被类型分布图进行叠加分析,可以从另一个方面判定植被含水量遥感模型的正确性。

图 7 和图 8 分别为 ETM 数据和 ASTER 数据反演的 FMC 分布图与实验区生态环境本底遥感调查植被分布图的叠加结果图。图中线条为植被类型分布界线,数字为植被类型代码,代码含义见表 1。从图中可以看出,反演的植被含水量与生态环境本底遥感调查植被分类图在空间序列上能很好的吻合。譬如,常绿林(分级代码为 312)比天然草地(分级代码为 333)分布区域的植被含水量大;灌木林(分级代码为 331)比灌草过渡带(分级代码为 332)分布区域的植被含水量大;有云或雪覆盖的区域、裸岩(分级代码为 623)和采伐迹地(分级代码为 342)

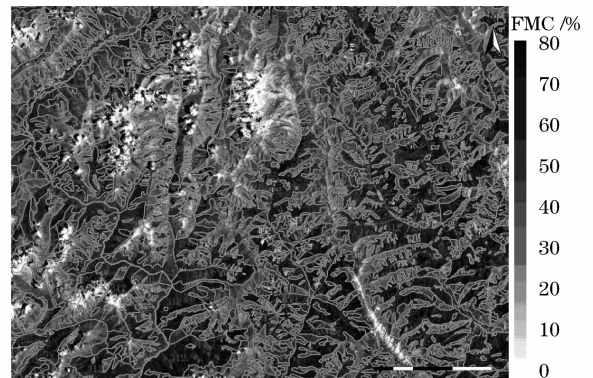


图 7 植被类型分布图与 ETM 图像反演的 FMC 叠置图  
Fig. 7 FMC superposition of vegetation distribution and ETM inversion result

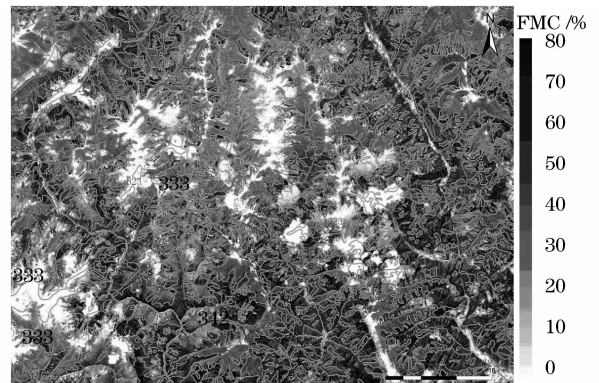


图 8 植被类型分布图与 ASTER 图像反演的 FMC 叠置图  
Fig. 8 FMC superposition of vegetation distribution and ASTER inversion result

表 1 研究区生态环境本底遥感调查植被分类表

Table 1 Vegetation distribution surveyed by remote sensing about ecological environment in the study area

Classification code	Factual meaning
213	irrigated land
214	dry fields
241	inter-planting orchard crops
244	agro-forestry area
311	deciduous forest
312	evergreen forest
313	mixed forest
323	shelter forest
3231	young shelter forest
325	other forest
331	shrubby
332	shrub-grass transition zone
333	natural grassland
342	cutover land
511	river
513	lake
621	wasteland
623	uncovered rock

等无植被生长的区域植被含水量较小。图 7 和图 8 可以看出,植被含水量反演结果和植被分布状况是一致的,这表明利用  $S_R$  光谱指数为特征参数建立模型反演的植被含水量能较好的反映实验区植被含水量的实际状况,模型反演结果比较理想。

## 4 结论与探讨

建立的模型及反演结果表明,以 1600 nm 和 820 nm 波段比值为中心构造的光谱指数  $S_R$  对 WVC 的预测能力较强,二者之间存在高度负相关的对数函数关系,相关度  $r^2 = 0.769$ 。对所建模型进行数据检验的相对误差较小,  $e_R$  为 10.21%,且分布均匀。光谱指数  $S_R$  能较好的剔除环境背景以及冠层结构等外界因素的影响。通过大量实地观测资料验证和分析表明,反演结果真实的反映了研究区植被含水量的时空变化规律与特征。由于试验样本采集涵盖了 10 余种植被类型且地域分布也较广,能更好的代表研究区实际情况。如果进一步扩大样本空间,考虑更多的生化参数,加入其他因素影响将更加有助于模型的完善。

## 参 考 文 献

- 1 Ceccato P., Gobron N., Flasse S. et al.. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1. Theoretical approach [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **82**(3):188~197
- 2 Ceccato P., Flasse S., Gregoire J. M.. Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 2. Validation and applications [J]. *Remote Sensing of*

- Environment*, 2002, **82**(4): 198~207
- 3 Liu Delian, Zhang Jianqi. New texture segmentation-based approach for change detection in remote sensing image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8):1177~1181
- 刘德连,张建奇.基于纹理分割的遥感图像的变化探测[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8):1177~1181
- 4 Ming Ying, Jiang Jingjue. Background modeling and moving-objects detection based on cauchy distribution for video sequence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):587~592
- 明英,蒋晶珺.基于柯西分布的视频图像序列背景建模和运动目标检测[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):587~592
- 5 Liu Delian, Zhang Jianqi, He Guojing. Target detection for remote sensing image based on gaussian transformation of background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):638~642
- 刘德连,张建奇,何国经.背景高斯化的遥感图像目标检测[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):638~642
- 6 Peng Nina, Yi Weining, Ma Jinji. Atmospheric correction of quickBird-2 imagery for turbid water coastal areas using MODIS data [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):817~820
- 彭妮娜,易维宁,麻金继.利用 MODIS 数据进行 QuickBird-2 卫星海岸带图像大气校正研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):817~820
- 7 Tian Ying, Yuan Weiqi. Ear recognition based on fusion of scale invariant feature transform and geometric feature [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8):1485~1491
- 田莹,苑玮琦.尺度不变特征与几何特征融合的人耳识别方法 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(8):1485~1491
- 8 梅安新. 遥感导论 [M]. 北京:高等教育出版社, 2002
- 9 Sims, D. A., Gamon, J. A. Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: A comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **84**(9):526~537
- 10 M. Tugrul Yilmaz, E. Raymond Hunt Jr, Lyssa D. Goins. Vegetation water content during SMEX04 from ground data and Landsat 5 Thematic Mapper imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**:350~362
- 11 P. J. Zarco-Tejada, S. L. Ustin. Modeling canopy water content for carbon estimates from MODIS data at land EOS validation sites [J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2001, **1**:342~344
- 12 M. Tugrul Yilmaz, E. Raymond Hunt Jr., Thomas J. Jackson. Remote sensing of vegetation water content from equivalent water thickness using satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**:350~362
- 13 Dong Jingjing, Niu Zheng, Shen Yan. Comparison of the methods of obtaining leaf water content by using reflectance data [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2006, **28**(4):588~593
- 董晶晶,牛铮,沈艳等.利用反射光谱信息提取叶片水分含量的方法比较 [J]. *江西农业大学学报*, 2006, **28**(4):588~593
- 14 R. Colombo, M. Meroni, A. Marchesi. Estimation of leaf and canopy water content in poplar plantations by means of hyperspectral indices and inverse modeling [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**:1820~1834
- 15 M. Trombetti, D. Riaño, M. A. Rubio. Multi-temporal vegetation canopy water content retrieval and interpretation using artificial neural networks for the continental USA [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**:203~215
- 16 Yenben Cheng, Pablo J. Zarco-Tejada, David Riaño. Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy scenarios: Relationships between AVIRIS and MODIS indexes [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, **105**:354~361