

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.018

# 基于GF-1/WFV与MODIS时空融合的森林覆盖定量提取

徐磊<sup>1</sup> 巫兆聪<sup>1</sup> 罗飞<sup>2</sup> 杨帆<sup>3</sup> 项伟<sup>1</sup> 高飞<sup>1</sup>

(1. 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 430079; 2. 伦敦玛丽女王大学电子工程与计算机科学学院, 伦敦 E1 4NS;  
3. 国家海洋局南海规划与环境研究院, 广州 510310)

**摘要:** 森林作为陆地生态系统的重要组成部分,因其巨大的碳储量和固碳能力而备受关注,利用高分1号卫星的NDVI数据(GF-1 NDVI)可实现森林覆盖的定量提取。然而,由于受阴雨天气、运行成本等因素的影响,难以形成GF-1 NDVI时间序列数据,无法满足森林覆盖高精度提取的需求,为此,以河南省嵩山部分地区为实验区,应用STAVFM算法融合GF-1/WFV NDVI与MODIS NDVI,生成8 d步长的GF-1/WFV NDVI时间序列数据,在此基础上,提取NDVI特征并与GF-1/WFV的光谱特征进行组合,最后,采用SVM分类方法实现研究区森林覆盖的定量提取。研究表明,利用STAVFM算法生成的GF-1/WFV NDVI时序数据效果理想,很好地解决了GF-1 NDVI时序数据的缺失问题,由其NDVI特征与GF-1/WFV光谱特征构成的组合能够实现森林覆盖的有效提取,基于SVM分类后的总体分类精度为94.72%,与未融入NDVI特征的GF-1/WFV原始影像的分类结果相比,提高了4.90个百分点。

**关键词:** 森林覆盖; 遥感; 定量提取; 时空融合; GF-1/WFV; MODIS NDVI

**中图分类号:** TP79; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)07-0145-08

## Quantitative Extraction of Forest Cover Based on Fusing of GF-1/WFV and MODIS Data

XU Lei<sup>1</sup> WU Zhaocong<sup>1</sup> LUO Fei<sup>2</sup> YANG Fan<sup>3</sup> XIANG Wei<sup>1</sup> GAO Fei<sup>1</sup>

(1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2. School of Electronic Engineering and Computer Science, Queen Mary University of London, London E1 4NS, UK

3. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, State Oceanic Administration, Guangzhou 510310, China)

**Abstract:** As an important part of terrestrial ecosystem, forest is concerned by its huge carbon storage and carbon sequestration capacity. With the successful launch of China's high score 1 (GF-1) satellite, it is possible to use NDVI data to realize the quantitative extraction of forest cover. However, due to the impact of rainy weather, operating costs and other factors, it is difficult to form NDVI GF-1 time series data, which cannot meet the demand for high precision extraction of forest cover. With the aim to solve this problem, Songshan was taken as part of the Henan GF-1/WFV NDVI and MODIS NDVI experimentation area, application of STAVFM algorithm was integrated, and GF-1/WFV NDVI time series data was used to generate the 8 d step, then from the time series data in NDVI feature extraction and spectral features were combined with GF-1/WFV. Finally, SVM classification method was used to realize quantitative forest coverage extraction. The research results showed that the NDVI GF-1/WFV sequence data generated by the STAVFM algorithm was ideal, which can solve the problem of the NDVI GF-1 time series data. The overall classification accuracy based on the SVM classification was 94.72%, which was improved by 4.90 percentage points compared with the classification results of the original GF-1/WFV image without fusing the characters of NDVI. This method provided a new way for high precision extraction of forest cover.

**Key words:** forest cover; remote sensing; quantitative extraction; spatial and temporal data fusion; GF-1/WFV; MODIS NDVI

收稿日期: 2016-10-27 修回日期: 2016-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101410)和民用航天“十二五”技术预先研究项目(2013669-7)

作者简介: 徐磊(1983—),男,博士生,主要从事时序遥感分析和定量遥感研究,E-mail: rellxu@126.com

通信作者: 巫兆聪(1968—),男,教授,博士,主要从事高分辨率遥感影像信息提取、定量遥感研究,E-mail: zcwoo@whu.edu.cn

## 引言

森林生态系统是陆地生态系统中生产力最高的系统,集中了约85%的陆地生物量。同时,作为一个巨大的碳库,森林生态系统的碳循环与碳蓄积已成为全球陆地碳循环与全球气候变化的重要研究内容<sup>[1-2]</sup>,定量获取森林覆盖面积及其分布信息是进行上述研究的关键。随着我国高分1号(GF-1)卫星的成功发射,利用GF-1 NDVI实现森林覆盖的定量提取成为可能<sup>[3]</sup>。然而,高时间序列NDVI的获取要求卫星能够实现高频度的重点观测,这势必大大增加GF-1卫星的运行成本,此外,在我国尤其是长江以南地区,由于阴雨天气的影响,GF-1影像数据易受到云污染,从而出现不同程度的缺失,很难形成GF-1 NDVI时间序列数据,基于GF-1 NDVI时间序列数据的森林覆盖提取受到了限制。多源遥感数据时空融合方法的提出,为上述问题的解决提供了新的途径。现有研究已表明<sup>[4-5]</sup>,MODIS影像数据虽在反映空间尺度较小与空间异质区域的植被覆盖方面能力有限(空间分辨率最高为250 m),但其高时间分辨率(1 d)的特征使得该数据能够实现对植被覆盖的大范围、持续观测。因此,采用遥感数据时空融合技术将GF-1数据与MODIS数据进行融合,生成高时相、高空间分辨率的时间序列数据,最终用于森林覆盖的定量提取,成为一种可能。

目前,国内外学者针对遥感数据时空融合方法已展开了相应的研究,并取得了一些成果<sup>[6-8]</sup>。这些时空数据融合方法虽未将数据限定为Landsat与MODIS,但所涉参数考虑的均是国外卫星数据的特点,很少用于国产卫星数据的融合。MENG等<sup>[9]</sup>在STARFM算法基础上,提出了时空自适应植被指数

融合模型(Spatial and temporal adaptive vegetation index fusion model, STAVFM),并将融合生成的高时空分辨率NDVI成功地应用于农作物生物量的估算。该时空融合算法不仅可以直接实现植被指数的融合,而且能够用于国产卫星数据的定量分析。本文以河南省嵩山部分地区为实验区,应用STAVFM算法融合GF-1/WFV NDVI与MODIS NDVI,生成时间步长为8 d的GF-1/WFV NDVI时间序列数据,在此基础上,提取NDVI特征并同GF-1/WFV的光谱特征进行组合,最后,采用支持向量机(Support vector machine, SVM)分类方法实现研究区森林覆盖的定量提取。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区概况

研究区位于河南省登封市西北部,为嵩山地区一部分,位于 $34^{\circ}23' \sim 34^{\circ}38'N$ 、 $112^{\circ}49' \sim 113^{\circ}10'E$ ,对应影像大小为3 265 像元 $\times$ 3 632 像元,跨登封、新密、巩义及偃师4市(图1)。本区属北温带大陆性季风气候,四季分明,平均日照时数2 275 h,无霜期213 d,年平均气温 $14.3^{\circ}C$ ,年均降水量640.9 mm,全区相对湿度60%。区内地形以山地、丘陵和平原为主,其中,山地平均海拔高度700~1 200 m,丘陵平均海拔高度350~500 m。土壤类型以褐土为主,植被覆盖属暖温带落叶阔叶林。本区农业资源丰富,农作物主要有小麦、玉米、豆类等,经济作物主要为烟叶。

### 1.2 数据及处理

#### 1.2.1 GF-1/WFV 影像数据

本文使用GF-1/WFV影像数据两景,均由高分1号多光谱宽幅相机拍摄获取,轨道号为4/98(Path/Row)、3/98(Path/Row),成像日期分别为2014年8月15日、2014年10月24日。星下点空

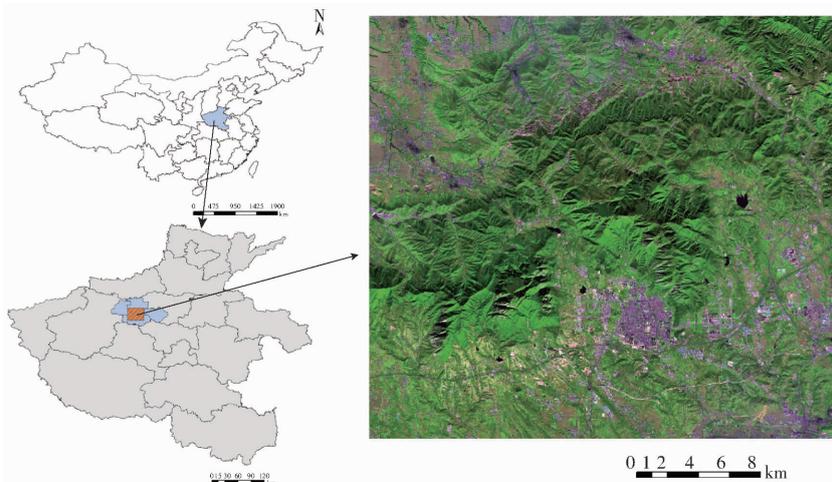


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of study area

间分辨率为 16 m, 含 4 个光谱段, 光谱范围为 0.45 ~ 0.89  $\mu\text{m}$ , 数据含云量小于 1%, 其中实验区的含云量为 0, 可视性良好。影像的预处理主要包括辐射定标、大气校正及几何精校正 3 部分。首先, 在 ENVI 5.2 平台下运用 FLAASH 模块对上述两景 GF-1/WFV 影像进行辐射定标及大气校正, 然后以 1:5 000 的 DEM 采用二次多项式法对图像进行几何精校正, 坐标系统为 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_49N, 保证精度范围控制在 1 个像元以内。之后, 通过掩模裁剪得到实验区的影像数据。最后, 计算上述结果的 NDVI, 并将 NDVI 的取值范围设置为 0 ~ 10 000, NDVI 的计算公式为<sup>[10]</sup>

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中  $\rho_{NIR}$ ——近红外波段反射率

$\rho_R$ ——红外波段反射率

### 1.2.2 时间序列 MODIS 数据

本文使用的 MODIS 数据为 MOD09Q1 反射率产品, 该产品从 NASA 网站 (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>) 获取, 共 46 期, 对应时间范围为 2014 年 1 月 1 日—2014 年 12 月 19 日, 轨道号为 h27v05, 空间分辨率为 250 m, 含 2 个波段且 8 d 最大值合成。首先, 利用 MRT (MODIS Reprojection Tool) 将 MOD09Q1 数据的坐标系转换为 WGS\_1984 并进行几何配准, 精度优于 1 个像元, 之后将其空间分辨率从 250 m 重采样到 16 m, 最后, 裁剪得到实验区的时序 MODIS 数据并生成其 NDVI, 取值范围同样设置为 0 ~ 10 000。

此外, 为了确定研究区林地及非林地的分布情况, 参照 GB/T 21010—2007《土地利用现状分类》, 本文于 2014 年 5 月对研究区进行了实地调查, 完成区内典型土地利用/覆盖类型 (包括耕地、林地、园地、草地、水域及其它土地) 的采样, 样本均匀分布, 其中位置信息的记录借助手持 GPS 完成, 精度控制在 1 m 以内。

## 2 研究方法

在对 GF-1/WFV 与 MODIS 数据进行时空融合的基础上, 实现森林覆盖的定量提取。首先, 在完成上述数据预处理 (包括辐射定标、大气校正及几何精校正等) 的基础上, 运用 STAVFM 算法融合生成 8 d 的时序 GF-1/WFV NDVI, 并对其进行平滑、重构, 在此基础上, 提取 NDVI 特征并同 GF-1/WFV 影像的光谱特征进行组合, 最后, 采用支持向量机分类方法对实验区的森林覆盖进行分类, 定量提取森林覆盖并评价其结果 (图 2)。

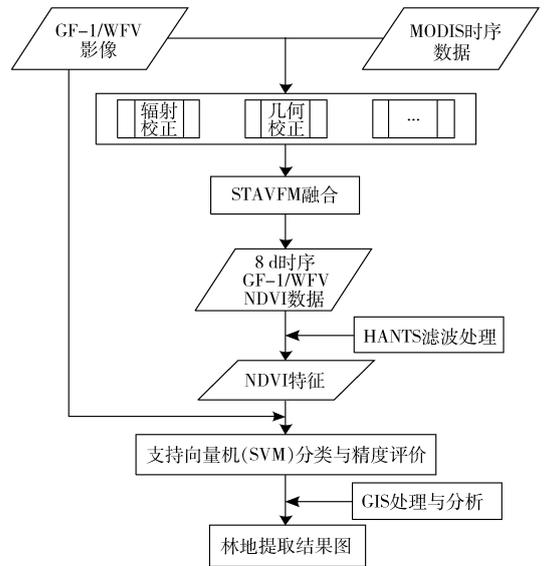


图 2 研究技术路线图

Fig. 2 Route chart of research technology

### 2.1 GF-1/WFV NDVI 与时序 MODIS NDVI 的时空融合

GF-1/WFV NDVI 与时序 MODIS NDVI 的时空融合采用了时空自适应植被指数融合模型 (STAVFM) 算法, 该算法为 MENG 等对时空适应性反射率融合模型 (STARFM) 改进后提出的一种尺度转换方法<sup>[11]</sup>, 其基于  $T_0$  时刻的 MODIS NDVI 及某一高空间分辨率 NDVI 数据, 通过计算两类数据间的空间分布差异, 结合  $T_p$  时刻的 MODIS NDVI 数据, 预测生成  $T_p$  时刻的高空间分辨率 NDVI 数据, 预测过程中使用滑动窗口法消除低分辨率 NDVI 影像数据像元边界的影响, 计算公式为<sup>[12]</sup>

$$L(x_{\omega/2}, y_{\omega/2}, T_p) = \sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{\omega} \sum_{k=1}^n W_{ijk} (M(x_i, y_j, T_p) + L(x_i, y_j, T_0) - M(x_i, y_j, T_0)) \quad (2)$$

式中  $L(x_{\omega/2}, y_{\omega/2}, T_p)$ ——预测后  $T_p$  时刻某一高空间分辨率 NDVI 像元值

$\omega$ ——移动窗口的大小

$(x_{\omega/2}, y_{\omega/2})$ ——窗口的中间像元

$M(x_i, y_j, T_p)$ ——窗口位置  $(x_i, y_j)$  处  $T_p$  时刻的 MODIS NDVI 像元值

$M(x_i, y_j, T_0)$ —— $T_0$  时刻 MODIS 数据的 NDVI 像元值

$L(x_i, y_j, T_0)$ —— $T_0$  时刻某一高空间分辨率数据的 NDVI 像元值

$W_{ijk}$ ——窗口内各像元预测中心像元权重

权重  $W_{ijk}$  决定了移动窗口内各像元对预测值贡献的大小, 其计算公式为

$$W_{ijk} = \frac{1}{C_{ijk}} \quad (3)$$

$$C_{ijk} = \sum_{i=1}^{\omega} \sum_{j=1}^{\omega} \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_{ijk}}$$

式中,  $C_{ijk}$  由窗口中心预测像元及窗口中其它像元的光谱距离、时间距离、空间距离 3 项计算确定。

本文以上述获取的 2014 年 8 月 15 日 GF-1/WFV NDVI 为  $T_0$  时刻的 GF-1/WFV NDVI 数据, 同时以 2014 年 8 月 14 日的 MODIS NDVI 为  $T_0$  时刻的 MODIS NDVI 数据, 结合处理后的 8 d 间隔时序 MODIS NDVI 数据, 采用 STAVFM 算法进行融合及预测, 最后, 生成空间分辨率为 16 m、时间间隔为 8 d 的时序 GF-1/WFV NDVI, 用于下一步的分析。

## 2.2 时序 GF-1/WFV NDVI 的重构

融合生成的 8 d 时序 GF-1/WFV NDVI 数据虽已经过大气校正等处理, 但其本身仍存有由云污染和大气变化等引起的低值突变噪声<sup>[13-17]</sup>。针对此情况, 本文采用时间序列谐波分析法 (Harmonic analysis of time series, HANTS) 对上述时序 GF-1/WFV NDVI 数据进行滤波、重构。时间序列谐波分析法 (HANTS) 由 JAKUBAUSKAS 等<sup>[18]</sup> 提出, 为一种新的物候分析方法, 即将时间序列数据按傅立叶级数展开为不同阶频率谐波叠加的形式。该方法将植被物候特征信息集中在低阶谐波, 云覆盖、大气环境变化和双向反射特性等噪声信息则被分配到高阶谐波, 将高阶谐波剔除后, 选择若干能够反映地表植被动态的低阶谐波进行叠加拟合, 最终实现原始时间序列数据的高质量重构, 特征值包括谐波余项、谐波幅值、谐波相位等<sup>[19]</sup>, 基本原理如下<sup>[20]</sup>:

$f(t)$  是周期为  $N$  的离散时间序列信号, 表达式为

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (4)$$

其傅里叶级数展开式为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t) \quad (5)$$

其中 
$$A_0 = \frac{a_0}{2} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N f(t) \quad (6)$$

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N f(t) \cos \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (7)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N f(t) \sin \frac{2\pi k}{N}(t-1) \quad (8)$$

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (9)$$

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N} \quad (10)$$

$$\varphi_k = \arctan \frac{a_k}{b_k} \quad (11)$$

式中  $A_0$ ——谐波余项  $k$ ——谐波阶数

$A_k$ 、 $\omega_k$ 、 $\varphi_k$ ——第  $k$  阶谐波的幅值、频率和相位

$a_k$ 、 $b_k$ ——第  $k$  阶谐波的傅里叶系数

本文在分析实验区植被覆盖的物候特征及时序 GF-1/WFV NDVI 数据特点的基础上, 采用由荷兰 Geospatial Data Service Centre (GDSC) 提供的 HANTS 软件, 对融合生成的 8 d 时序 GF-1/WFV NDVI 数据进行平滑。

## 2.3 GF-1/WFV 数据特征提取与组合

生成的时序 GF-1/WFV NDVI 数据包含 46 个 NDVI 特征, 为了减小数据计算量, 提高运算效率, 达到有效综合多时相 NDVI 信息的目的<sup>[21-22]</sup>, 本文从中提取 4 个时间特征, 即 NDVI 的年最大值 (NDVI<sub>MAX</sub>)、年最小值 (NDVI<sub>MIN</sub>)、年均值 (NDVI<sub>MEAN</sub>) 及年标准差 (NDVI<sub>STD</sub>)。在此基础上, 将提取的 4 个时间特征同原 GF-1/WFV 影像的 4 个光谱段 (波段 1、2、3 和 4) 进行组合, 生成的影像数据既包含 GF-1/WFV 影像的光谱特征, 又包含高空间分辨率时序 GF-1/WFV NDVI 的时间特征 (表 1)。该数据最终用于实验区森林覆盖的提取研究。

表 1 实验数据特征组合

Tab. 1 Feature combination of experiment data

特征属性	特征名称	特征表达	波长范围/ $\mu\text{m}$
光谱特征	蓝色波段反射率	Band 1 (Blue)	0.45 ~ 0.52
	绿色波段反射率	Band 2 (Green)	0.52 ~ 0.59
	红色波段反射率	Band 3 (Red)	0.63 ~ 0.69
	近红外波段反射率	Band 4 (NIR)	0.77 ~ 0.89
NDVI 特征	NDVI 年最大值	NDVI <sub>MAX</sub>	
	NDVI 年最小值	NDVI <sub>MIN</sub>	
	NDVI 年均值	NDVI <sub>MEAN</sub>	
	NDVI 年标准差	NDVI <sub>STD</sub>	

在使用特征组合后的 GF-1/WFV 影像进行森林覆盖提取前, 需要定量分析不同地表覆盖类型之间的可分性。常用的地物类型可分性判别模型有欧氏距离模型、巴氏距离模型及 J-M (Jeffries-Matusita) 距离模型等, 其中, J-M 距离模型具有明显优势<sup>[23]</sup>, 其基于某一特征计算不同地物类别样本间的距离, 计算公式为<sup>[24]</sup>

$$J = 2(1 - e^{-B}) \quad (12)$$

式中  $B$ ——某一特征维上的巴氏距离

在样本满足正态分布的前提下, 两类样本的巴氏距离计算公式为

$$B = \frac{1}{8} (e_1 - e_2)^2 \frac{2}{\delta_1^2 + \delta_2^2} + \frac{1}{2} \ln \frac{\delta_1^2 + \delta_2^2}{2\delta_1\delta_2} \quad (13)$$

式中  $e_1$ 、 $e_2$ ——某类特征的均值

$\delta_1^2$ 、 $\delta_2^2$ ——某类特征的方差

本文借助野外地面调查及 Google Earth 平台,

在 ENVI 5.2 下生成训练样本并计算各地物覆盖类型间的 J-M 距离,为后续分类工作做好准备。

## 2.4 影像分类及精度评价

支持向量机是建立在统计学习理论基础上的—种新的机器学习方法,其较好地解决了以往学习方法中的小样本、非线性及高维数等问题,具有很强的泛化能力<sup>[25-27]</sup>。本文选用径向基函数(Radial basis function, RBF)作为影像分类的核函数,最常用的径向基函数是高斯核函数,公式为<sup>[28-31]</sup>

$$K(X, X') = \exp\left(-\frac{\|X - X'\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (14)$$

式中  $K(X, X')$ ——空间中任意一点  $X$  到某一中心  $X'$  之间欧氏距离单调函数

$X'$ ——核函数中心

$\sigma$ ——函数的宽度参数

本文在上述组合生成的 GF-1/WFV 影像的基础上,利用 SVM 分类方法对研究区的地物进行分类。首先,参照 GB/T 21010—2007《土地利用现状分类》将区内地物分为林地与非林地两类,其中非林地由耕地、园地、草地、水域及其它土地合并而成,在此基础上,结合上述地面采样数据及 Google Earth 数据,借助 ENVI 5.2 的 ROI 工具生成面状样本 126 个(1/2 用于分类,剩余的 1/2 用于精度验证),对应像元数为 21 482 个,其中,林地像元数 11 128 个,非林地像元数 10 354 个,且均匀分布。最后,在 Supervised Classification 模块下实现研究区森林覆盖的分类,分类完成后,借助总体精度、生产者精度、用户精度及 Kappa 系数等指标实现对分类结果的精度评价。为了更好地反映特征组合后的 GF-1/WFV 影像对森林覆盖的提取能力,本文采用相同的方法对特征组合前的 GF-1/WFV 原始影像进行分类及精度评价,所用训练样本及验证样本的数量均与上述研究相同,在此基础上,对特征组合前后的影像分类精度进行比较与分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 STAVFM 时空融合结果

本文将预测生成的 GF-1/WFV NDVI 时序影像中的一期(第 297 天)与上述实际获取的 GF-1/WFV NDVI 影像(2014 年 10 月 24 日,第 297 天)对比后发现(图 3),GF-1/WFV NDVI 预测值不仅在空间分布上与同期的 GF-1/WFV NDVI 真实值一致,而且其还能在 16 m 空间分辨率的像元尺度上反映地物的空间细节及分布差异。可见,STAVFM 算法实现了 GF-1/WFV NDVI 影像的高空间分辨率特征同 MODIS NDVI 影像的高时间分辨率特征的有机结合。同时,本文从上述两幅 GF-1/WFV NDVI 影像中分别裁出一正方形区域,区域大小为 200 像元×200 像元,在此基础上,利用 ENVI/IDL 提取两幅影像的 NDVI 值并进行回归分析,结果如图 4 所示。从图中可以看出,NDVI 值对应数据点的分布较为集中,且绝大多数位于直线  $y = x$  的两侧,该现象说明 NDVI 预测值与 NDVI 真实值之间呈线性相关,而  $R^2 = 0.9476$  则表明上述预测值与真实值之间呈高度相关且线性拟合的程度很好。综上所述,STAVFM 时空融合算法实现了 GF-1/WFV NDVI 与时序 MODIS NDVI 的理想融合,从而为后续研究区森林覆盖的精准提取做好了数据准备。

### 3.2 时序 GF-1/WFV NDVI 平滑结果

平滑处理前后的林地时间序列 NDVI 如图 5 所示,从图中可以看出,时间序列谐波分析法(HANTS)具有很好的细节拟合能力,整体保真性良好,平滑重建后的林地时序 NDVI 曲线保持了其原有的形状,改善了异常值,同时,恢复了 NDVI 的变化趋势并反映了林地 NDVI 生长期内的动态变化特征及物候特性,具体地说,研究区内林地的生长期主要集中于 3 月中旬—9 月中旬。与此对应,林地 NDVI 全年呈现出先上升后下降的趋势,即春、夏两

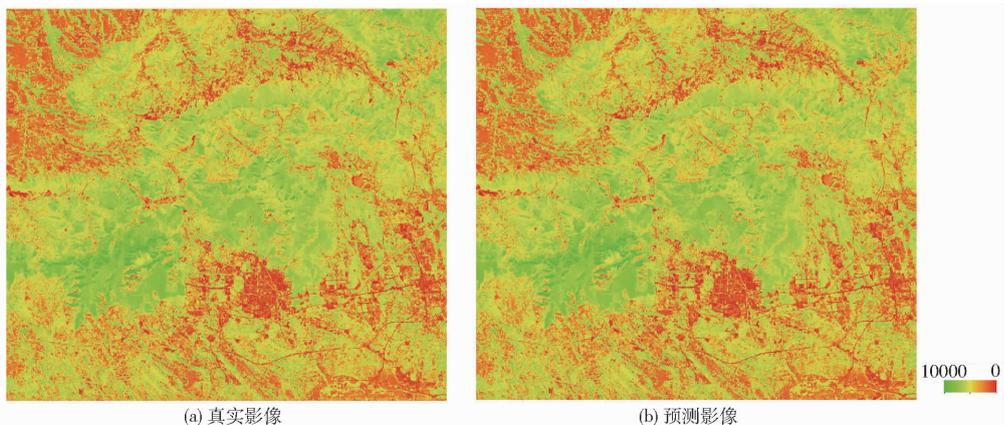


图3 GF-1/WFV NDVI 真实影像及预测影像

Fig.3 Actual and predicted NDVI images of GF-1/WFV data

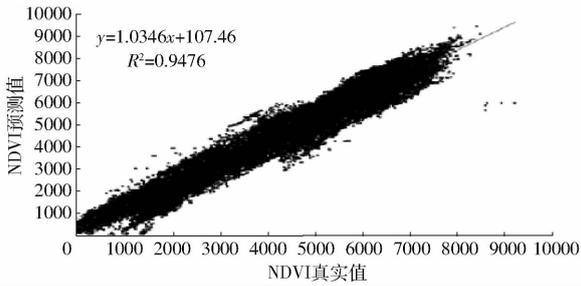


图4 GF-1/WFV NDVI 真实值与预测值散点分布图

Fig.4 Scatter plot of actual NDVI and predicted NDVI from GF-1/WFV images

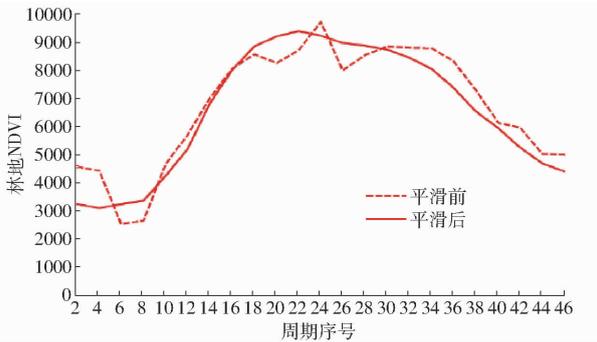


图5 平滑前后林地时序 NDVI 曲线

Fig.5 Unsmoothed and smoothed NDVI time series curves of forest

季,林地 NDVI 持续增长,至7月上旬与8月上旬间,林地 NDVI 达到峰值,最后,至秋、冬季节,林地 NDVI 则逐渐下降。可见,实验区内的林地 NDVI 呈现出单峰变化的态势,该结果与我国雨热同期的气候特征是密不可分的。

### 3.3 GF-1/WFV 特征组合的 J-M 距离计算结果

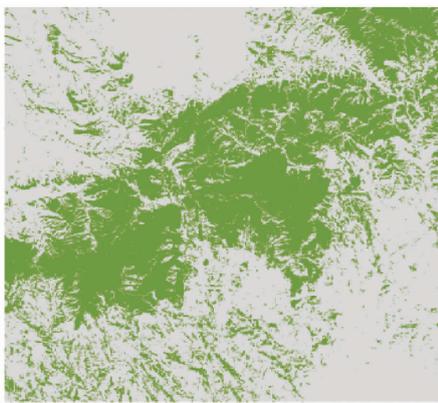
J-M 距离的取值范围为  $0 \sim 2$ <sup>[32]</sup>。具体来说,若 J-M 距离的取值大于 1.9,表明地物样本间的可分性很好;若 J-M 距离的取值介于 1.8~1.9 之间,表明地物样本间的可分性较好;若 J-M 距离的取值介于 1.0~1.8 之间,表明地物样本需重新选择;若 J-M 距离的取值小于 1.0,表明两类地物样本应合为一类。本文中新生成的 GF-1/WFV 影像数据

包含 8 个特征数,即  $NDVI_{MAX}$ 、 $NDVI_{MIN}$ 、 $NDVI_{MEAN}$ 、 $NDVI_{STD}$ 、Band 1 (Blue)、Band 2 (Green)、Band 3 (Red) 和 Band 4 (NIR)。基于该特征空间的 J-M 距离计算结果为 1.982,而仅基于影像 NDVI 特征及仅基于影像光谱特征的计算结果分别为 1.898 和 1.882,前者明显高于后者,由此可见,新生成的 GF-1/WFV 影像具有理想的地物可分性,可很好地用于研究区森林覆盖的分类与提取。

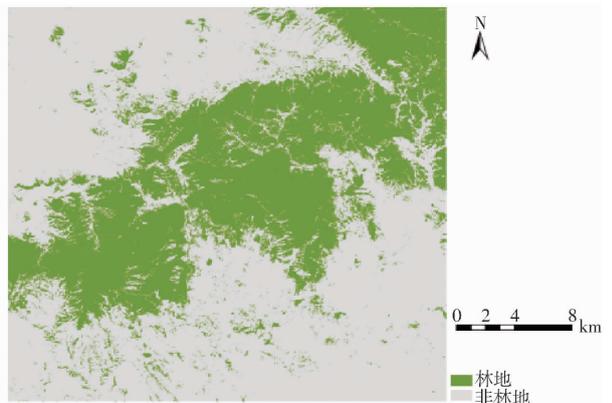
### 3.4 分类结果与精度分析

本文在 ENVI 5.2 平台的支持下,采用支持向量机的分类方法分别对融入时序 NDVI 的 GF-1/WFV 影像、GF-1/WFV 原始影像进行分类,分类完成后,在 ArcGIS 10.2 平台下完成分类结果的聚类、掩模及剔除等,最终得到研究区森林覆盖的提取结果(图 6)。从目视效果来看,图 6a、6b 均能客观反映研究区森林覆盖的分布,但比较后发现,图 6b 的效果好于图 6a:首先,在地势平坦地区(主要为平原),图 6a 中林地同耕地混合分布的情况较图 6b 明显增多;其次,在林区边缘,图 6a 中林地与裸地的混合分布也多于图 6b。可见,仅依靠影像的光谱信息不能很好地区分林地与非林地,而融入 NDVI 信息的影像数据则能够实现林地与非林地的有效识别。

为了对上述分类结果进行定量评价,分别求出它们的混淆矩阵(表 2、3)。可以看出,融入时序 NDVI 的 GF-1/WFV 影像的分类效果明显好于 GF-1/WFV 原始影像的分类效果,总体分类精度由 89.82% 提高到 94.72%,该结果同上述目视判读的结果一致,说明高空间分辨率多光谱遥感数据同高空间分辨率时序 NDVI 的组合,可以为森林覆盖的定量提取提供更多有用的信息。具体地说,一方面,高空间分辨率的时序 NDVI 为很好反映植被的物候特征提供了可能,另一方面,该数据组合有效地削弱了影像中地形、云及阴影的影响。



(a) GF-1/WFV数据



(b) GF-1/WFV时空融合数据

图6 GF-1/WFV 数据及 GF-1/WFV 时空融合数据的森林覆盖提取结果

Fig.6 Forest cover extraction results of GF-1/WFV data and GF-1/WFV fused data

表2 GF-1/WFV 影像分类精度评价结果

Tab.2 Evaluation result of classification precision for GF-1/WFV image

分类类别	实际类别		
	林地	非林地	总数
林地	4 775	304	4 779
非林地	789	4 873	5 962
总数	5 564	5 177	10 741

表3 GF-1/WFV 时空融合影像分类精度评价结果

Tab.3 Evaluation result of classification precision for GF-1/WFV fused image

分类类别	实际类别		
	林地	非林地	总数
林地	5 126	129	5 127
非林地	438	5 048	5 614
总数	5 564	5 177	10 741

## 4 结论

(1) 本文研究结果理想, 总体分类精度为

94.72%, 与 GF-1/WFV 原始影像的分类结果相比, 提高了 4.90 个百分点, 可见, 本文所用方法在有效解决 GF-1 NDVI 数据缺失问题的同时, 实现了森林覆盖的高精细定量提取。

(2) 基于 STAVFM 算法融合生成的时序 GF-1/WFV NDVI 数据, 其空间分辨率为 16 m, 时间间隔为 8 d, 该数据既保持了 GF-1/WFV NDVI 的高空间分辨率特征, 又保持了时序 MODIS NDVI 的高时间分辨率特征, 具有明显的优势, 可以很好地用于森林覆盖的提取, 为实现森林覆盖的有效提取提供了可能性。

(3) 由特征组合生成的影像数据, 既包含 GF-1/WFV 影像的光谱特征, 又包含 GF-1/WFV NDVI 时序数据的时间特征, 其与仅拥有光谱特征的 GF-1/WFV 原始影像数据相比, 包含着更为丰富的植被生长信息, 能够进一步提高分类的精度, 随着高分辨率影像分类理论的进一步发展, 融入更多有意义的特征变量如纹理特征等, 成为重要发展趋势。

## 参 考 文 献

- 杨柳, 孙金华, 冯仲科, 等. 基于 PSO-LSSVM 的森林地上生物量估测模型[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 273-287. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160836&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160836&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.036.
- YANG Liu, SUN Jinhua, FENG Zhongke, et al. Estimation model of forest above-ground biomass based on PSO-LSSVM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 273-287. (in Chinese)
- 段祝庚, 赵旦, 曾源, 等. 基于遥感的区域尺度森林地上生物量估算研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2015, 40(10): 1400-1408.
- DUAN Zhugeng, ZHAO Dan, ZENG Yuan, et al. Estimation of the forest aboveground biomass at regional scale based on remote sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(10): 1400-1408. (in Chinese)
- 张荣群, 王盛安, 高万林, 等. 基于时序植被指数的县域作物遥感分类方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(增刊): 246-252. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2015S040&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2015S040&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.S0.040.
- ZHANG Rongqun, WANG Sheng'an, GAO Wanlin, et al. Remote sensing classification method of county-level agricultural crops using time series NDVI[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(Supp.): 246-252. (in Chinese)
- 孙锐, 荣媛, 苏红波, 等. MODIS 和 HJ-1 CCD 数据时空融合重构 NDVI 时间序列[J]. 遥感学报, 2016, 20(3): 361-373.
- SUN Rui, RONG Yuan, SU Hongbo, et al. NDVI time-series reconstruction based on MODIS and HJ-1 CCD data spatial-temporal fusion[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(3): 361-373. (in Chinese)
- 刘建光, 李红, 孙丹峰, 等. MODIS 土地利用/覆被多时相光谱决策树分类[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 312-319.
- LIU Jianguang, LI Hong, SUN Danfeng, et al. Land use/cover decision tree classification fusing multi-temporal and multi-spectral of MODIS[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 312-319. (in Chinese)
- GAO F, MASEK J, SCHWALLER M, et al. On the blending of the Landsat and MODIS surface reflectance: predicting daily Landsat surface reflectance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(8): 2207-2218.
- ZHU Xinlin, CHEN Jin, GAO Feng, et al. An enhanced spatial and temporal adaptive reflectance fusion model for complex heterogeneous regions[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2610-2623.
- 邱明权, 王洁, 牛铮, 等. 融合 MODIS 与 Landsat 数据生成高时间分辨率 Landsat 数据[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 3(1): 80-84.
- WU Mingquan, WANG Jie, NIU Zheng, et al. A model for spatial and temporal data fusion[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 3(1): 80-84. (in Chinese)
- MENG Jihua, DU Xin, WU Bingfang. Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation[J]. International Journal of Digital Earth, 2013, 6(3): 203-218.
- 南颖, 刘志锋, 董叶辉, 等. 2000—2008 年长白山地区植被覆盖变化对气候的响应研究[J]. 地理科学, 2010, 30(6): 921-928.
- NAN Ying, LIU Zhifeng, DONG Yehui, et al. The responses of vegetation cover to climate change in the Changbai mountain area

- from 2000 to 2008[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2010,30(6):921-928. (in Chinese)
- 11 MENG Jihua, DU Xin, WU Bingfang. Generation of high spatial and temporal resolution NDVI and its application in crop biomass estimation [J]. *International Journal of Digital Earth*,2013,6(3):203-218.
- 12 MENG Jihua, WU Bingfang, DU Xin. Method to construct high spatial and temporal resolution NDVI dataset - STAVFM [J]. *Journal of Remote Sensing*,2011,15(1):44-59.
- 13 李杭燕, 颜耀文, 马明国. 时序 NDVI 数据集重建方法评价与实例研究[J]. *遥感技术与应用*,2009,24(5):596-602.  
LI Hangyan, JIE Yaowen, MA Mingguo. Reconstruction of temporal NDVI dataset: evaluation and case study[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009,24(5):596-602. (in Chinese)
- 14 左丽君, 张增祥, 董婷婷, 等. MODIS/NDVI 和 MODIS/EVI 在耕地信息提取中的应用及对比分析[J]. *农业工程学报*,2008,24(3):167-172.  
ZUO Lijun, ZHANG Zengxiang, DONG Tingting, et al. Application of MODIS/NDVI and MODIS EVI to extracting the information of cultivated land and comparison analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008,24(3):167-172. (in Chinese)
- 15 侯光雷, 张洪岩, 王野乔, 等. 基于时间序列谐波分析的东北地区耕地资源提取[J]. *自然资源学报*,2010,25(9):1607-1617.  
HOU Guanglei, ZHANG Hongyan, WANG Yeqiao, et al. Application of harmonic analysis of time series to extracting the crop land resource in Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010,25(9):1607-1617. (in Chinese)
- 16 杨强, 王婷婷, 陈昊, 等. 基于 MODIS EVI 数据的锡林郭勒盟植被覆盖度变化特征[J]. *农业工程学报*,2015,31(22):191-199.  
YANG Qiang, WANG Tingting, CHEN Hao, et al. Characteristics of vegetation cover change in Xilin Gol League based on MODIS EVI data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015,31(22):191-199. (in Chinese)
- 17 许青云, 杨贵军, 龙慧灵, 等. 基于 MODIS NDVI 多年时序数据的农作物种植识别[J]. *农业工程学报*,2014,30(11):134-144.  
XU Qingyun, YANG Guijun, LONG Huiling, et al. Crop information identification based on MODIS NDVI time-series data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014,30(11):134-144. (in Chinese)
- 18 JAKUBAUSKAS M E, LEGATES D R, KASTENS J H. Crop identification using harmonic analysis of time-series AVHRR NDVI data[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2002,37:127-139.
- 19 梁守真, 邢前国, 施平, 等. 山东省典型地表覆被 NDVI 时间序列谐波分析[J]. *生态学杂志*,2011,30(1):59-65.  
LIANG Shouzhen, XING Qianguo, SHI Ping, et al. Harmonic analysis on NDVI time series of typical and covers in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011,30(1):59-65. (in Chinese)
- 20 张连翀, 王卫. 基于谐波分析和线性混合模型的河北平原区土地覆被分类研究[J]. *地理与地理信息科学*,2015,31(3):98-104.  
ZHANG Lianchong, WANG Wei. Land cover classification of Hebei Plain based on harmonics analysis and linear mixture model [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2015,31(3):98-104. (in Chinese)
- 21 谢相建, 薛朝辉, 王冬辰, 等. 顾及物候特征的喀斯特断陷盆地土地覆盖遥感分类[J]. *遥感学报*,2015,19(4):627-638.  
XIE Xiangjian, XUE Zhaohui, WANG Dongchen, et al. Land cover classification in karst regions based on phenological features derived from a longterm remote sensing image series[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2015,19(4):627-638. (in Chinese)
- 22 GU Juan, LI Xin, HUANG Chunlin. Land cover classification based on time-series MODIS NDVI data in Heihe River Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2010,25(3):317-326.
- 23 HAO Pengyu, WANG Li, NIU Zheng, et al. The potential of time series merged from Landsat-5 TM and HJ-1 CCD for crop classification: a case study for Bole and Manas counties in Xinjiang, China[J]. *Remote Sensing*,2014,6(8):7610-7631.
- 24 张猛, 曾永年. 基于多时相 Landsat 数据融合的洞庭湖区水稻面积提取[J]. *农业工程学报*,2015,31(13):178-185.  
ZHANG Meng, ZENG Yongnian. Mapping paddy fields of Dongting Lake area by fusing Landsat and MODIS data[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015,31(13):178-185. (in Chinese)
- 25 VAPNIK V. The nature of statistical learning theory [M]. New York: Springer-Verlag, 1995.
- 26 SU L H. Optimizing support vector machine learning for semi-arid vegetation mapping by using clustering analysis [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009,64: 407-413.
- 27 LI S J, WU H, WAN D S, et al. An effective feature selection method for hyperspectral image classification based on genetic algorithm and support vector machine [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2011,24(1):40-48.
- 28 FOODY G M, MATHUR A. A relative evaluation of multiclass image classification by support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,2004, 42(6):1335-1343.
- 29 PAL M, MATHER P M. Support vector machines for classification in remote sensing[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2005,26(5):1007-1011.
- 30 MELGANI F, BRUZZONE L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,2004,42(8): 1778-1790.
- 31 JAYADCVA R, KHEMCHANDANI S C. Twin support vector machines for pattern classification [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(5): 905-910.
- 32 ZHANG X Y, FRIEDL M A, SCHAAF C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*,2003,84(3):471-475.