

# 顾及极化特征的 SAR 与光学影像融合与分类

万剑华, 臧金霞, 刘善伟\*

中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

**摘要** 全极化合成孔径雷达(SAR)具有丰富的极化信息,对地物识别具有显著优势,提出了一种顾及极化特征的 SAR 与中分光学影像融合的方法,对全极化 SAR 影像进行极化目标分解,采用改进的色度、饱和度、明度(HSV)变换方法融合极化特征波段与中分光学影像,并基于面向对象的方法对融合影像进行地物分类。结果表明,该融合方法优于传统单极化 SAR 与中分光学影像的 HSV 融合方法,能够有效利用全极化 SAR 的极化纹理信息。面向对象分类方法能够降低 SAR 对融合影像的斑点噪声影响,地物总体分类精度优于高分光学影像,且对于极化信息敏感的地物,其分类精度明显优于高分光学影像。

**关键词** 遥感; 影像融合; 色度变换; 全极化合成孔径雷达; 中分光学影像; 分类

**中图分类号** P237 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0628001

## Fusion and Classification of SAR and Optical Image with Consideration of Polarization Characteristics

Wan Jianhua, Zang Jinxia, Liu Shanwei

*School of Geoscience, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China*

**Abstract** Full polarimetric synthetic aperture radar (SAR) possessed rich polarization information, it has a significant advantage for coverings recognition. A fusion method which took into account polarization characteristics of full polarimetric SAR is proposed based on SAR and medium resolution optical image. Full polarimetric SAR is carried out polarimetric target decomposition, polarization characteristics and optical image is fused with the improved hue, saturation, value (HSV) transform method. The fusion image is classified based on the object-oriented method. The results show that the proposed fusion method is superior to the traditional HSV fusion method for effectively using the polarimetric information and texture information of full polarimetric SAR. Object-oriented classification method can reduce the speckle noise of fusion image from SAR. The overall classification accuracy is better than that of high resolution optical image, and the classification accuracy of coverings which is sensitive to the polarization information is obviously better than that of high resolution optical image.

**Key words** remote sensing; image fusion; hue transform; full polarimetric synthetic aperture radar; medium resolution optical image; classification

**OCIS codes** 280.4750; 100.3008; 350.2660; 280.6730; 280.4788; 110.2970

## 1 引 言

高分辨率光学影像包含详细的地物覆盖信息<sup>[1]</sup>, 是进行地理国情监测的重要数据源, 但高分卫星重访周期长, 且成像质量易受天气影响, 尤其在雨季和雾季, 无云数据获取困难, 制约了高分光学影像的应用。目前商业合成孔径雷达(SAR)能达到米级分辨率, 且具有全天时、全天候特点, 但缺乏光谱信息; 中分光学卫星定期重访且周期短, 无云影像容易获取, 但空间分辨率低。融合两种影像可实现优势互补, 提高影像的地物解译能力。

遥感影像融合多为光学影像之间的融合<sup>[2-4]</sup>, 近几年光学影像与单极化 SAR 融合研究逐渐增多<sup>[5-6]</sup>, 但

**收稿日期:** 2016-12-21; **收到修改稿日期:** 2017-02-06

**基金项目:** 山东省自然科学基金(ZR2016DM16)

**作者简介:** 万剑华(1966—), 男, 博士, 教授, 主要从事 3S 技术应用方面的研究。E-mail: wjh66310@163.com

\* **通信联系人。** E-mail: shanweiliu@163.com

利用全极化 SAR 与光学影像融合的研究很少。随着 SAR 技术的发展,全极化 SAR 数据源越来越丰富,与单极化 SAR 相比,全极化 SAR 完整记录了地物在水平极化 HH、交叉极化 HV 和 VH 以及垂直极化 VV 四种极化状态下的散射回波,为地物识别提供更多的极化信息和分类特征<sup>[7]</sup>。目前,国内外已有学者基于 SAR 与中分光学影像的融合影像开展地物分类研究<sup>[8-12]</sup>。Pereira 等基于 ALOS PALSAR 与 Landsat TM 影像进行融合及组合,比较地物分类精度,发现基于双极化波段与 TM 融合影像的分类结果优于单极化波段<sup>[13]</sup>,表明丰富的极化信息有利于提高地物分类精度。

为充分利用全极化 SAR 的极化信息,本文提出了一种改进的色度、饱和度、明度(HSV)融合方法,并与采用传统 HSV 融合方法得到的单极化 SAR 与中分光学融合影像进行对比评价,为验证融合影像的地物解译能力,基于融合影像和高分光学影像分别开展面向对象的地物分类,进行地物分类精度评价与分析。

## 2 研究区和数据

### 2.1 研究区

以黄河三角洲为研究区,该区域位于黄河入海口处,湿地植被丰富,地面覆盖有芦苇、翅碱蓬、互花米草等典型湿地植被,是我国沿海最大的新生湿地自然植被群落<sup>[14]</sup>。

### 2.2 数据

实验数据包括 Radarsat-2 卫星全极化精细模式 SAR 影像、Landsat8 ETM+ 中分光学影像、高分一号光学影像以及黄河三角洲实地踏勘解译图。SAR 影像与光学影像成像于植被茂盛月份,时间仅相差一年,且该区域主要为自然地物,自然变化非常小,可以忽略时间差异对融合效果产生的影响,数据基本信息如表 1 所示。

表 1 数据基本信息  
Table 1 Basic information of data

Data type	Band	Resolution /m	Acquisition time
Radarsat-2 full polarimetric SAR images	C	8	2016-09-14
Landsat 8 ETM+ image	3,4,5	30	2015-06-05
GF-1 image	1,2,3,4	8	2015-09-21
The Yellow River delta interpretation map			2015-06

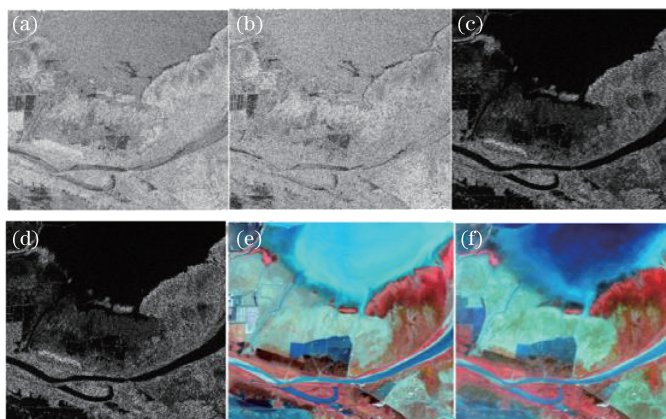


图 1 全极化 SAR 影像、ETM+ 影像和 GF-1 影像。(a) HH; (b) HV; (c) VH; (d) VV; (e) ETM+; (f) GF-1

Fig. 1 Full polarization SAR images, ETM+ image and GF-1 image. (a) HH;  
(b) HV; (c) VH; (d) VV; (e) ETM+; (f) GF-1

## 3 方 法

采用像素级与特征级相结合的方法,首先提取 SAR 极化特征,然后基于极化特征与中分光学影像进行 HSV 融合。

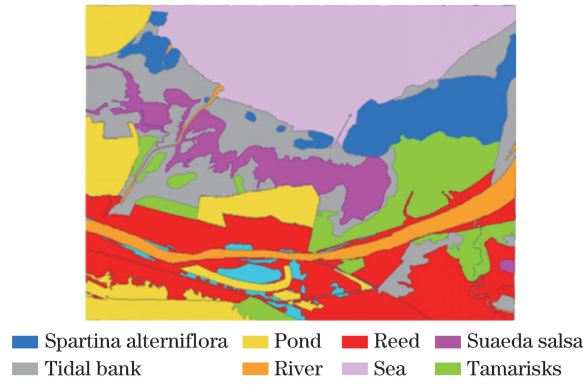


图 2 黄河口地区解译图

Fig. 2 Yellow River delta interpretation map

### 3.1 全极化 SAR 影像极化分解与降噪

极化分解有助于利用极化散射矩阵揭示散射体的物理机理,根据目标散射特性的变化与否,极化分解的方法可分为两类:相干目标分解和非相干目标分解。相干目标分解是针对目标散射矩阵的分解,要求目标的散射特征是确定或稳态的;非相干目标分解是针对极化协方差矩阵  $C$ 、极化相干矩阵  $T$ 、Muller 矩阵  $M$  或 Stokes 矩阵  $K$  的分解,目标可以是非确定或时变的。由于自然界中的目标复杂,且目标散射特性呈现很强的变化性,因此大多数的研究中采用非相干目标分解方法,包括 H-A- $\alpha$  分解、Cloude 分解和 Freeman-Durden 分解。

针对研究区植被丰富的特点,采用 Freeman-Durden 分解, Freeman-Durden 分解模型将原始协方差矩阵  $[C]$  分解为表面散射、偶次散射、体散射之和<sup>[15-16]</sup>,即

$$[C] = \langle [C] \rangle_s + \langle [C] \rangle_d + \langle [C] \rangle_v, \quad (1)$$

式中表示  $\langle [C] \rangle_s$  表面散射,  $\langle [C] \rangle_d$  表示偶次散射,  $\langle [C] \rangle_v$  表示体散射。总的后向散射模型如下:

$$\begin{cases} \langle |S_{HH}|^2 \rangle = f_s |\beta|^2 + f_d |\alpha|^2 + f_v \\ \langle |S_{VV}|^2 \rangle = f_s + f_d + f_v \\ \langle S_{HH} S_{VV}^* \rangle = f_s \beta + f_d \alpha + f_v / 3 \\ \langle |S_{HV}|^2 \rangle = f_v / 3 \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $S_{HH}$  为水平向发射和水平向接收的回波数据,  $S_{VV}$  为垂直向发射和垂直向接收的回波数据,  $S_{HV}$  为垂直向发射和水平向接收的回波数据。  $f_s$  为表面散射分量的分解系数,  $f_d$  为偶次散射分量的分解系数,  $f_v$  为体散射分量的分解系数,  $\beta$  为水平发射水平接收后向散射反射系数与垂直发射垂直接收后向散射发射系数之比,  $\alpha$  为地表和竖直墙体的水平反射系数乘积与地表和竖直墙体的垂直反射系数乘积之比。

由(2)式可得到三种散射分量的散射功率为

$$\begin{cases} P_s = f_s (1 + |\beta|^2) \\ P_d = f_d (1 + |\alpha|^2), \\ P_v = 8f_v / 3 \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $P_s$ 、 $P_d$ 、 $P_v$  分别为表面散射、偶次散射、体散射三种分量的散射功率。

该散射模型可初步确定哪种散射机制成分在极化 SAR 数据的后向散射模型中占主要地位。三分量散射机制模型可以有效区分不同地物类型<sup>[17]</sup>。

由于散射体目标的回波具有相干性,导致雷达图像上出现许多斑点噪声,影响雷达影像的质量,给雷达影像解译造成困难,在利用雷达影像解译之前,应先进行降噪处理。采用 Gamma 滤波与中值滤波相结合的方法<sup>[8]</sup>,首先采用 Gamma 滤波,减弱 SAR 影像的噪声,然后在减弱噪声的影像上进行中值滤波,使影像更均匀。

### 3.2 改进的 HSV 融合方法

在色度学中,把彩色影像由 RGB 彩色空间变换到 HSV 色度空间称为 HSV 变换,反之称为 HSV 逆变

换<sup>[18]</sup>。经过 HSV 变换后,色度、饱和度、明度三种成分间的相关性变低,可对三个变量单独处理。

在 RGB 空间中的灰度线是彩色立方体的对角线,而在 HSV 空间中是垂直中轴。根据三角直角坐标系的旋转变换,得到 HSV 正变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 R、G、B 分别代表红、绿、蓝三种颜色亮度值,(5)式给出了 I、v<sub>1</sub>、v<sub>2</sub> 与 H、S、V 的关系,即

$$\begin{cases} H = \arctan(v_1/v_2) \\ S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \\ V = I \end{cases} \quad (5)$$

相应的逆变换公式为

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

HSV 变换能够增强融合影像的空间细节表现能力,方法简捷,但只能进行三个波段的变换,若直接进行 V 分量替代,还会出现严重的光谱畸变现象。因此,在传统 HSV 变换基础上提出改进方法。

首先对全极化 SAR 数据进行 Freeman-Durden 分解,得到表面散射、偶次散射和体散射三个极化特征,三个极化特征波段在 RGB 空间可合成多光谱影像,对合成的多光谱影像和中分光学影像分别进行预处理,然后分别进行 HSV 变换,得到 H<sub>1</sub>、S<sub>1</sub>、V<sub>1</sub>、H<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、V<sub>2</sub> 共 6 个分量;V<sub>1</sub> 和 V<sub>2</sub> 两个分量加权平均,得到新的明度分量 V<sub>3</sub>,用 V<sub>3</sub> 替代 V<sub>2</sub>,对 H<sub>2</sub>、S<sub>2</sub>、V<sub>3</sub> 三分量进行 HSV 逆变换,得到融合影像,融合过程中由于对 V 分量进行加权平均,有效减轻了光谱畸变现象。融合流程图如图 3 所示。

## 4 实 验

### 4.1 融合实验

Freeman-Durden 极化分解及降噪后得到的 SAR 假彩色影像如图 4 所示,显示波段分别对应:R 为偶次散射,G 为体散射,B 为表面散射。

基于改进的 HSV 融合方法,融合 Radarsat-2 全极化 SAR 影像与 Landsat8 ETM+ 中分光学影像,为与改进 HSV 方法得到的融合影像进行对比,采用传统 HSV 融合方法,分别基于 4 种单极化 SAR(HH、HV、VH、VV)与中分光学影像进行融合,融合影像如图 5 所示。

### 4.2 分类实验

为验证融合影像的地物解译能力,以高分光学影像作为对比,开展面向对象的影像分类,面向对象的分类方法可以消除 SAR 影像相干斑噪声影响及高分光学影像椒盐现象,该方法比传统基于像元的分类方法更适用于 SAR 影像及高分辨率影像。

分类实验主要过程为对高分光学影像进行预处理,分别对融合影像及高分光学影像进行多尺度分割,采用标准最邻近方法开展面向对象分类,最后基于分类结果进行分类精度评价及对比分析。



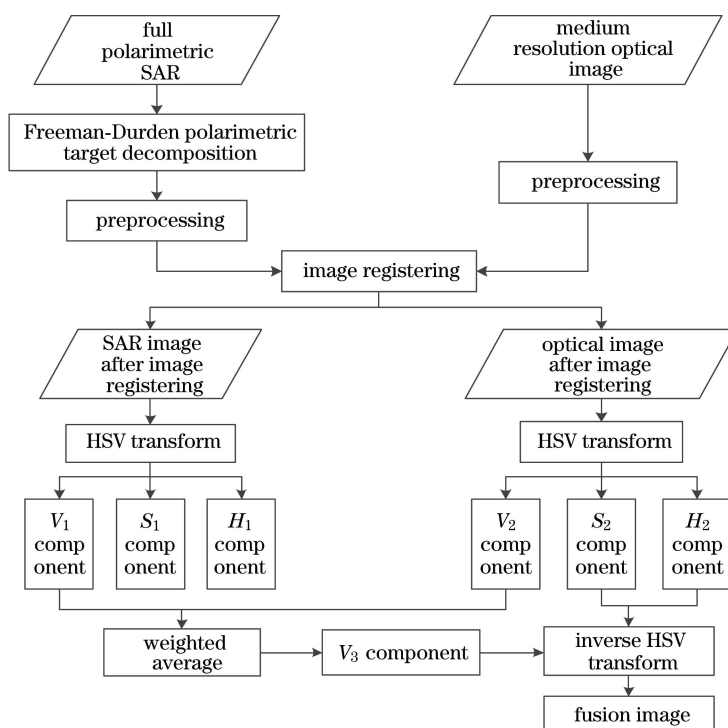


图 3 基于全极化 SAR 与中分辨率光学影像的改进 HSV 融合流程图

Fig. 3 Flow chart of improved HSV fusion based on full polarimetric SAR and medium resolution optical image

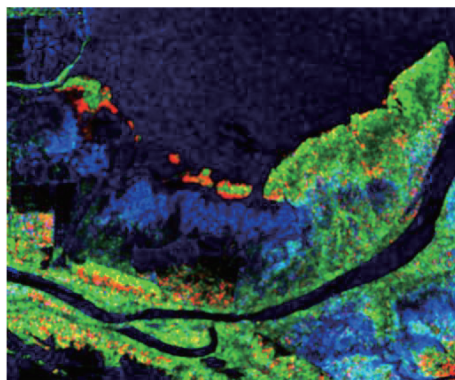


图 4 极化分解和降噪后的 SAR 假彩色影像

Fig. 4 SAR false color image after polarization decomposition and noise reduction

多尺度分割是自下而上的,从单像元区域开始,相邻影像区域依次合并增长,将影像分割成不同尺度大小特征相似的对象<sup>[19]</sup>。尺度参数决定对象的最大异质度,应选择分割后的对象与欲获取目标有较好吻合度的最大分割尺度。形状因子定义了影像对象结果的纹理一致性,由紧致度和平滑度组成,两者和为 1,形状因子与色彩因子的和为 1,大多情况下,色彩因子是最重要的。经过反复实验,本文融合影像及高分光学影像的分割尺度选择为 60,形状因子为 0.1,紧密度为 0.5。

基于面向对象的分类方法,将研究区分为互花米草、盐地碱蓬、芦苇、怪柳、潮滩、坑塘水面、河流、海洋共 8 类,分类结果如图 6 所示。

## 5 分析与讨论

### 5.1 影像融合效果分析

为清晰显示融合影像的细节信息,截取地物类型较丰富的一组小区域,如图 7 所示。

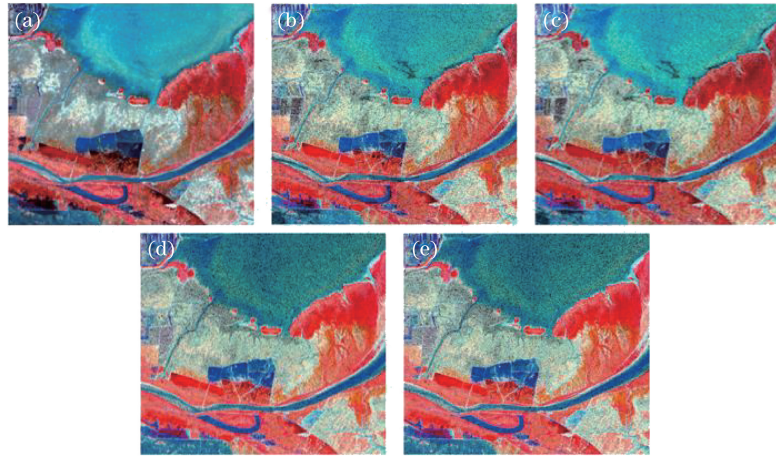


图 5 融合影像。(a) 本文方法融合影像;(b) HH 极化融合影像;(c) HV 极化融合影像;  
(d) VH 极化融合影像;(e) VV 极化融合影像

Fig. 5 Fusion images. (a) Fusion image with the proposed method; (b) fusion image of HH polarization; (c) fusion image of HV polarization; (d) fusion image of VH polarization; (e) fusion image of VV polarization

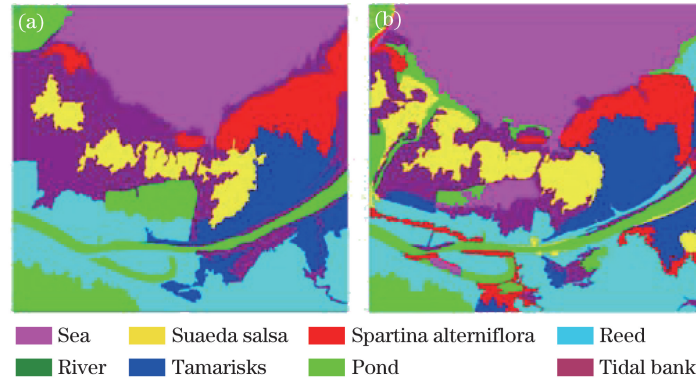


图 6 分类结果图。(a)融合影像分类结果图;(b)高分光学影像分类结果图  
Fig. 6 Classification results images. (a) Classification results of fusion image;  
(b) classification results of high resolution optical image

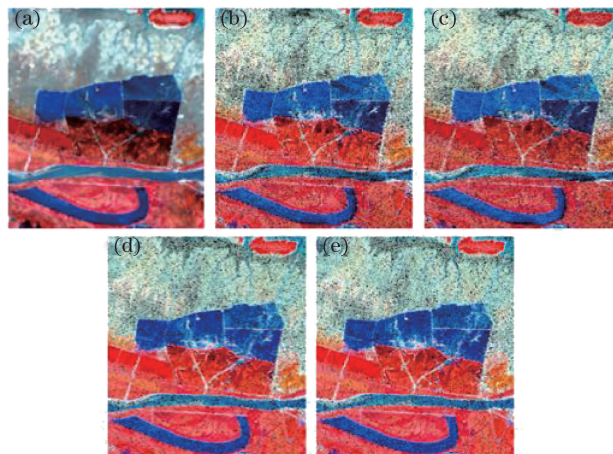


图 7 融合影像细节图。(a)本文方法融合细节图;(b)HH 极化融合细节图;(c)HV 极化融合细节图;  
(d)VH 极化融合细节图;(e)VV 极化融合细节图

Fig. 7 Detail images of fusion images. (a) Detail image with the proposed method;  
(b) detail image of HH polarization; (c) detail image of HV polarization;  
(d) detail image of VH polarization; (e) detail image of VV polarization

从图 7 可看出,本文方法得到的融合影像[图 7(a)]斑点噪声较少,影像更加均匀,较好的保留了光学影像的色彩信息,色彩对比明显,细节纹理信息更为丰富。传统融合方法得到的融合影像斑点噪声较多,光谱畸变大,色彩存在失真现象。从实地地物来看,图 7(a)中河流及坑塘的边界清晰;盐地碱蓬与潮滩,互花米草与怪柳由于极化特征差异大,能够明显区分。传统方法得到的融合影像由于不含极化特征,盐地碱蓬与潮滩存在较大混淆。

定性评价往往带有一定的主观性,故选取了均值、熵、平均梯度三个参数进行定量评价,如表 2 所示。

表 2 融合结果参数统计表

Table 2 Parameters table of fusion results

Fusion image	Average	Entropy	Average gradient
Fusion image with the proposed method	133.09	7.72	16.10
Fusion image of HH polarization	124.75	7.05	15.55
Fusion image of HV polarization	122.58	7.06	13.17
Fusion image of VH polarization	132.48	7.33	15.96
Fusion image of VV polarization	125.58	7.32	14.86

从表 2 可看出,本文方法融合影像的均值、熵、平均梯度均高于其他四幅融合影像。均值为图像中所有像元亮度值的算术平均值,遥感影像中反映了地物的平均反射强度,表示了地物的平均反射率,可以看出,本文方法融合影像的地物平均反射强度最高。熵是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标,融合图像的熵值大小能反映图像所包含信息量的多少,本文方法融合影像信息量最丰富。平均梯度反映了图像中微小细节反差的表达能力和纹理变化特征,同时也反映了影像的清晰度,本文方法融合影像的平均梯度明显高于其他四幅融合影像,说明本文方法能够显著增强图像纹理特征和细节反差,提高影像清晰度。

## 5.2 融合影像分类结果分析

由图 6 可知,两幅影像的分类结果均较完整,没有出现椒盐现象及较小碎斑,两幅影像分类结果基本一致。

基于现场踏勘后的人工解译图(图 3),分别计算融合影像与高分光学影像分类结果的混淆矩阵(表 3)。基于表 3,得到融合影像和高分光学影像的不同地物分类精度对比情况(图 8)。

表 3 地物分类精度表

Table 3 Classification accuracy of different land cover types

Feature type	Fusion image classification accuracy /%		High resolution optical image classification accuracy /%	
	Producer's accuracy	User's accuracy	Producer's accuracy	User's accuracy
Spartina alterniflora	95.09	93.18	89.23	89.92
Reed	83.91	86.53	89.76	81.76
Suaeda salsa	84.35	99.98	87.68	73.86
Tamarisks	77.99	78.46	90.58	83.90
Tidal bank	94.89	70.75	71.78	84.80
River	90.64	96.51	85.00	100.00
Pond	85.33	99.07	78.04	88.95
Sea	99.10	100.00	100.00	100.00
Overall accuracy /%	89.47		87.37	
Kappa coefficient	0.88		0.86	

依据以上分类精度图、表,得出融合影像和高分光学影像的分类结果分析如下:

1) 融合影像总体分类精度及 kappa 系数均高于高分光学影像,两者相差 2.1%,kappa 系数相差 0.02。融合影像空间分辨率提高,相比低分辨率影像,其混合像元数量减少,降低了误分概率,此外融合影像光谱信息丰富,且具有高分光学影像缺乏的极化信息,融合影像的地物整体解译能力优于高分光学影像。

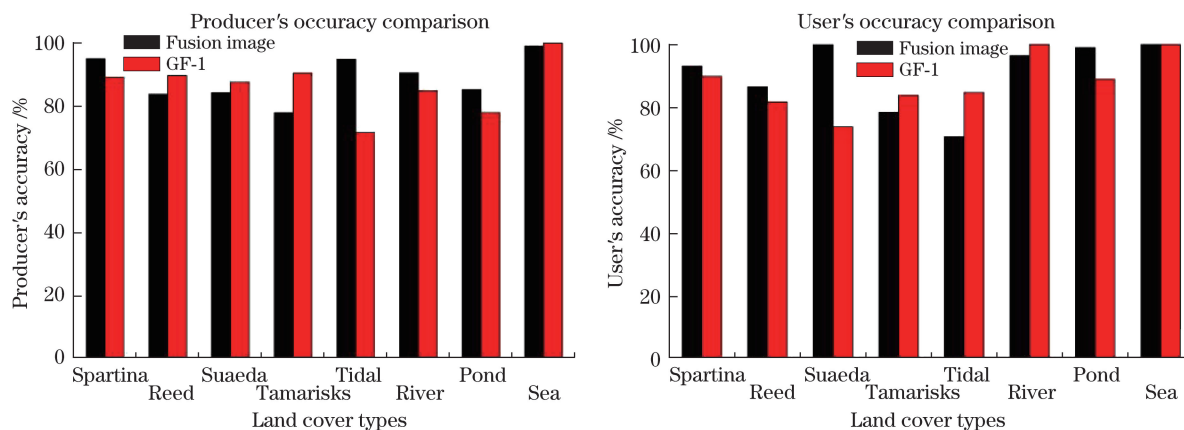


图 8 融合影像与高分光学影像不同地物生产者精度和用户精度对比

Fig. 8 Producer and user accuracy comparison of different land cover types between fusion image and high resolution optical image

2) 在互花米草、怪柳、盐地碱蓬、芦苇 4 种植被中,融合影像中互花米草的生产者精度和用户精度高于高分光学影像,盐地碱蓬的用户精度高于高分光学影像,生产者精度略低于高分光学影像,总体来看,融合影像中互花米草和盐地碱蓬分类精度优于高分光学影像。就极化特征而言,互花米草以体散射为主,偶次散射和面散射强度低,融合影像利用其极化信息和光谱信息分类,分类精度优于高分光学影像。盐地碱蓬生长在潮间带上,与潮滩光谱信息相似,与其他地物光谱信息差别大,两幅影像分类结果中盐地碱蓬主要与潮滩混淆。融合影像中芦苇的分类精度与高分光学影像接近,怪柳分类精度低于高分光学影像,从图 6(a)中可看出,怪柳与芦苇有一定程度地混淆,怪柳分布稀疏,光谱信息在一定程度上受底质影响,因此单从光谱信息较易区分怪柳与芦苇,但融合影像中包含 SAR 的极化信息,两者均有较强的体散射和偶次散射,极化信息相差小,对分类结果造成干扰。

3) 综合生产者精度与用户精度,可看出融合影像中潮滩、河流、坑塘水面、海洋的分类精度均接近或优于高分光学影像。SAR 影像能够穿透水体,水体中内容物不同,其极化信息不同,融合影像还具有丰富的纹理信息和光谱信息。因此,融合影像利用极化纹理信息及光谱信息可有效区分不同的水体。坑塘水面主要为水,内有养殖生物、水草等内容物,其极化散射信息表现为表面散射和体散射,河流与海洋的极化散射信息主要表现为表面散射,但两者光谱信息有所差异,潮滩与河流、坑塘水面、海洋的光谱信息差异大。因此,融合影像依据极化纹理信息及光谱信息,能够有效区分 4 种地物,分类精度接近或优于高分光学影像。

## 6 结 论

针对高分全极化 SAR 与中分光学影像的融合问题,提出一种改进的 HSV 融合方法,通过与传统 HSV 融合方法得到的单极化 SAR 与中分光学融合影像对比发现,本文方法能够有效利用全极化 SAR 的极化信息,减小融合影像光谱畸变,提高空间分辨率,使融合影像含有丰富的极化纹理信息及光谱信息。为验证融合影像的地物解译能力,以高分光学影像作为对比,采用面向对象的分类方法进行影像分类,面向对象的分类方法有效消除了融合影像中斑点噪声对分类结果的影响以及高分光学影像中的椒盐现象,提高了分类精度。通过融合影像与高分光学影像的地物分类精度对比分析,发现融合影像的地物解译能力总体优于高分光学影像,尤其是对于光谱信息相似但极化信息差异大的地物分类精度,高分光学影像不能有效区分,融合影像可依据极化信息进行区分,表明融合影像替代高分光学影像开展地物分类研究是可行的。



## 参 考 文 献

- [1] Chen Yixiang. Modeling of spatial structural features and information extraction for high resolution remote sensing images[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013: 1-7.  
陈一祥. 高分影像空间结构特征建模与信息提取[D]. 武汉: 武汉大学, 2013: 1-7.
- [2] Wu Yiquan, Tao Feixiang. Multispectral and panchromatic image fusion based on improved projected gradient NMF in NSST domain[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410005.  
吴一全, 陶飞翔. 改进投影梯度 NMF 的 NSST 域多光谱与全色图像融合[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410005.
- [3] Zhang Libao, Zhang Jue. A new adaptive fusion method based on saliency analysis for remote sensing images[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114001.  
张立保, 章 珏. 基于显著性分析的自适应遥感图像融合[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114001.
- [4] Chang Huawen, Chen Chunxiang. Image fusion based on HSV color space model and wavelet transform[J]. Computer Engineering and Design, 2007, 28(23): 5682-5684.  
常化文, 陈春香. 基于 HSV 变换与小波变换的遥感图像融合[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(23): 5682-5684.
- [5] Wu Juan, Lu Ling, Dong Jing. Fusion mutispectral and high resolution image using IHS transform and histogram equilibrium[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2004, 28(1): 55-58.  
伍 娟, 卢 凌, 董 静. 基于 IHS 变换与直方图匹配法的遥感影像融合[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(1): 55-58.
- [6] Xu Gan, You Hongjian. Comparision of image fusion of SAR and optical image based on wavelet transform[J]. Sciences of Surveying and Mapping, 2008, 33(1): 109-112.  
徐 赣, 尤红建. 小波的 SAR 和光学图像融合方法比较研究[J]. 测绘科学, 2008, 33(1): 109-112.
- [7] Wu Yonghui, Ji Kefeng, Yu Wenxian. A new feature selection algorithm for SVM-based fully polarimetric SAR image classification[J]. Signal Process, 2007, 23(6): 877-881.  
吴永辉, 计科峰, 郁文贤. SVM 全极化 SAR 图像分类中的特征选择[J]. 信号处理, 2007, 23(6): 877-881.
- [8] Gang H, Aining Z, Fuqun Z. Integration of optical and synthetic aperture radar (SAR) images to differentiate grassland and alfalfa in Prairie area[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 28: 12-19.
- [9] Castañeda C, Ducrot D. Land cover mapping of wetland areas in an agricultural landscape using SAR and Landsat imagery[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 90(7): 2270-2277.
- [10] Yang Hu, Guo Huadong, Wang Changlin. Coast line dynamic inspect and land cover classification at Yellow River Mouth using TM-SAR data fusion method[J]. Geography and Territorial Research, 2001, 17(4): 15-19.  
杨 虎, 郭华东, 王长林. TM-SAR 数据融合在黄河口沙咀动态监测中的应用研究[J]. 地理学与国土研究, 2001, 17(4): 15-19.
- [11] Han Zhen, Jin Yaqiu. Information extraction and classification of typical canopies over the Chongming eastern tidal flat from data fusion of ERS-2 SAR and Landsat ETM+ [J]. Marine Environmental Science, 2006, 25(3): 21-24.  
韩 震, 金亚秋. ERS-2 SAR 和 Landsat ETM+ 数据融合提取崇明东滩典型地物信息与分类[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(3): 21-24.
- [12] Costa M P F, Telmer K H. Utilizing SAR imagery and aquatic vegetation to map fresh and brackish lakes in the Brazilian Pantanal wetland[J]. Remote sensing of Environment, 2006, 105(3): 204-213.
- [13] Pereira L O, Freitas C C, Sant' Anna S J S, *et al.* Optical and radar data integration for land use and land cover mapping in the Brazilian Amazon[J]. GIScience & Remote Sensing, 2013, 50(3): 301-321.
- [14] Wang Xiaopeng. Study on the Yellow River delta wetland typical vegetation using hyperspectral remote sensing[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014: 14-27.  
王霄鹏. 黄河三角洲湿地典型植被高光谱遥感研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014: 14-27.
- [15] Freeman A, Durden S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 963-973.
- [16] Xu Xing'ou, Shu Ning, Li Lei. Water content information extraction from quad-polarization SAR images via Freeman-Durden decomposition[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(27): 17-19.  
徐星欧, 舒 宁, 李 磊. Freeman-Durden 分解方法提取雷达影像含水量信息[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 17-19.



- [17] Lee J S, Pottier E. Polarimetric radar imaging: from basics to applications[M]. Hong Wen, Li Yang, Yin Qiang, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 149-153.  
李仲森, 鲍狄埃. 极化雷达成像基础与应用[M]. 洪文, 李洋, 尹婧, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 149-153.
- [18] Jia Yonghong, Li Deren. Comparison of HIS transformation for integrating SAR and TM images[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1997, 32(3): 34-39.  
贾永红, 李德仁. SAR与TM影像的IHS变换复合及其质量定量评价[J]. 国土资源遥感, 1997, 32(3): 34-39.
- [19] Fei Xianyun, Wang Ting, Wei Xueli. Coastal wetland classification based on multi-scale image segmentation using high spatial RS images[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(2): 298-303.  
费鲜芸, 王 婷, 魏雪丽. 基于多尺度分割的遥感影像滨海湿地分类[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(2): 298-303.