

面向 GF-1 数据不同融合方法对扰动地块的提取

刘二佳¹, 罗志东^{2,3}, 张晓丽¹, 瞿帅¹, 何亮⁴, 朱程浩¹, 赵院³

(1. 北京林业大学林学院, 精准林业北京市重点实验室, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 3. 水利部水土保持监测中心, 北京 100053;

4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 以 GF-1 影像为数据源, 采用 HPF 变换 (High-Pass fusion, 高通滤波变换)、Ehlers 变换 (空间滤波变换)、Brovey 变换 (彩色标准变换)、GS 变换 (Gram-Schmidt, 正交化变换)、PC 变换 (Principle Components, 主成分变换) 等 5 种常用融合算法, 根据视觉分析和数理统计分析对融合后的影像进行质量评价, 并通过面向对象分类方法对扰动图斑信息进行提取, 研究适用于生产建设项目集中区扰动地表信息提取的融合算法。结果表明: 基于 PC 和 GS 算法的融合结果影像视觉效果好, 细节清晰, 色调自然, 纹理增强明显, 较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。通过定量分析可知, PC 变换最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性, GS 融合算法在增益效果上具有优势, 融合影像信息量最大, 纹理最为细致。总体而言, PC 变换和 GS 变换影像融合算法在生产建设项目扰动图斑信息提取上具有很大的优势, 在煤炭覆盖区提取正确率均为 100%, 在裸露地表和在建筑物用地混合区大于 80%, 较原始多光谱影像分类精度提高了约 10%。该研究为推进国产高分遥感数据在生产建设项目水土保持监管中的高效应用奠定数据基础, 对提升生产建设项目水土保持监管效率和信息化水平具有非常重要的意义。

关键词: 影像融合; GF-1 卫星; 生产建设项目扰动地表提取; 面向对象分类算法

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)03-0358-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.03.054

Comparison of Fusion Algorithms for GF-1 Data from Extracted of Distribution Information on Production and Construction Projects

LIU Erjia¹, LUO Zhidong^{2,3}, ZHANG Xiaoli¹, QU Shuai¹,

HE liang⁴, ZHU Chenghao¹, ZHAO Yuan³

(1. Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Key Lab. for Silviculture and Conservation
Co-constructed by China Ministry of Education and Beijing, Forestry College, Beijing Forestry

University, Beijing 100083; 2. Beijing Institute of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry

University, Beijing 100083; 3. Water and Soil Conservation Monitoring Center of Ministry of Water Resources,

Beijing 100053; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: Based on the GF-1 satellite images, the study used five different methods including high-pass fusion, Ehlers transformation, Brovey transformation, Gram-Schmidt spectral sharpening, and principle components spectral sharpening to obtain an optimal method for image enhancement of production and construction projects. To access the performance of these fusion methods, the quality of the fused image was evaluated by the visual and statistical analyses. Moreover, the object-oriented classification method was used to examine the accuracy of extracting the disturbance information on production and construction projects in the central area. Results showed that the principle components and gram-schmidt fusion algorithm achieved better fusion of multispectral spectral information and panchromatic image spatial information, and therefore, higher spectral fidelity, richer spatial information and better visual effect were obtained. Quantitative analysis showed that the principle components transform preserved the spectral characteristics of the original multispectral image to the maximum extent. The gram-schmidt fusion algorithm had the advantage of gain, and the fused image had the largest amount of information and the most detailed texture. Overall, the principle components and Gram-Schmidt image fusion algorithms had great advantages in information extraction of disturbance information on production and construction projects. The extraction accuracy in the coal-covering

收稿日期: 2018-01-25

资助项目: 高分水利遥感应用示范系统项目(一期)(08-Y30B07-9001-13/15)

第一作者: 刘二佳(1987—), 女, 山西临汾人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀监测和遥感应用研究。E-mail: ejlovesmile@163.com

通信作者: 张晓丽(1967—), 女, 河北张家口人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感和 GIS 在资源与环境中的应用研究。E-mail: zhang-xl@263.net

area was 100%, and greater than 80% in the mixed area of bare land and construction land and the classification accuracy was 10% higher than that of the original multispectral image. This research provide a solid foundation for promoting the efficient application of domestic high-resolution remote sensing data in water and soil conservation regulation of production and construction projects, and is of great significance to advance the efficiency and informationization of soil and water conservation supervision on production and construction projects.

Keywords: fused image; GF-1 satellite; extraction of distribution on production and construction projects; object-oriented image classification

近 20 多年来,我国经济社会发展迅速,城镇化、工业化和基础设施建设处于快速发展过程中,生产建设活动频繁剧烈,水土流失日益加剧^[1-2]。因此加强生产建设项目水土保持监管,对保护区域内水土资源有着重要意义。根据中国水土保持公报,2005—2014 年,全国每年审批的生产建设项目水土保持方案的数量约 3 万个,据不完全统计平均每年在建项目扰动地表的规模约为 2 万 km²。通常利用现场跟踪检查为主的方式对生产建设项目进行水土保持监管,工作量大、效率低、实时性差,难以满足监管及时性的要求,未监管的区域易造成水土流失隐患。基于航空、航天、无人机等高分遥感技术,结合地面实地检查等措施,开展生产建设项目水土保持全周期、全流程的监管,是加强生产建设项目水土保持事中事后监管的重要探索与实践。因此,应用高分辨率卫星数据解决生产建设项目的监管问题成为水土保持行业发展的重要趋势。高分一号卫星作为我国中长期科技重大专项高分辨率对地观测系统的首颗高分卫星,具有高空间、高时间与高光谱分辨率相结合的特点,为生产建设项目天地一体化监管提供重要的基础数据支撑^[3]。影像融合是将不同卫星或相同卫星不同传感器所获取数据高效利用的重要手段,既提高了多光谱影像的空间纹理细节,又保留其丰富的波谱特性,削弱因时相造成的影像特征差异,减少信息冗余,增加有效信息量,突出影像层次和细节信息,增强扰动地表特殊对象的影像特征,提高后续目视解译或自动识别的准确率和分类精度^[4-5]。遥感影像融合的算法自上个世纪 80 年代开始发展,主要包括图形变换、数学运算、彩色技术等 3 种^[6]。针对特殊的地物要素,融合方法不同融合结果可能有差异,需将影像特点、应用需求及融合方法综合考虑^[7]。目前研究中对于高分一号影像的融合虽然已有报道^[8-11],但是针对适用于生产建设项目扰动图斑的融合算法尚未有学者提出。因此,针对目前常用融合方法,探讨适合于高分一号卫星生产建设项目集中区扰动地表影像的融合方法,为天地一体化监管影像大规模的融合应用提供参考具有重要意义。本文选择 5 种具有代表性融合方法 HPF 变换(High-Pass fusion,高通滤波变换)、Ehlers

变换(空间滤波变换)、Brovey 变换(彩色标准变换)、GS 变换(Gram-Schmidt,正交化变换)、PC 变换(Principal Components,主成分变换),根据目视分析和定量分析对融合后的影像进行质量评价,并通过面向对象分类方法对扰动图斑进行提取,研究适用于生产建设项目集中区扰动地表信息提取的融合算法,为大规模推进国产高分遥感数据在生产建设项目水土保持监管中的高效应用提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黔西县地处黔中山原西部,地势西北高,东南低,属喀斯特丘陵地貌类型,地理位置为东经 105°47′—106°26′,北纬 26°45′—27°21′,面积 2 389.5 km²。境内碳酸盐岩分布面积约占全县总面积的 95%,喀斯特发育、溶丘、洼地、峰丛、溶斗、伏流等分布普遍。该县属中亚热带向北亚热带过渡的季风气候区,多年平均气温为 13.89℃,平均蒸发量为 1 234.90 mm,年降水量为 954.88 mm。区内自东南向西北地带性植被由中亚热带常绿阔叶林向北亚热带常绿阔叶混交林交替^[12]。研究区自然资源丰富,地表扰动活跃,生产建设项目类型多样,特征多样,包括公路、火电、铁路、房地产、井采矿、露天矿、输变电、水利枢纽、加工制造。生产建设项目扰动急速扩张,严重影响生态环境。本文选择黔西县中部的生产建设项目集中,面积为 425 km² 区域进行研究,重点分析该区生产建设项目扰动地块的空间分布情况。影像资料的采集时间为 2017 年 8 月 24 日,该时期扰动地块与其他地物的差异较为明显,有利于进行扰动地块提取。为保证影像融合的质量,消除影像传感器和大气对地物光谱值的影响,对多光谱影像进行大气校正。以 1:10 000 的数字高程模型为基准影像进行正射校正,误差控制在 2 个像素内。

1.2 影像融合及评价方法

采用 HPF、Brovey、PC、Ehlers、Gram-Schmidt 等 5 种算法对 GF-1 全色和多光谱影像进行融合。HPF 变换和 Ehlers 融合由 ERDASIMAGINE 2014 软件实现,其余融合算法均由 ENVI 5.2 实现。由于 Brovey 融合算法只有 3 波段参与运算,因此分别采

取 R、G、B 波段融合以及 R、G、NIR 波段与全色进行融合试验。为更好地满足生产建设项目扰动图斑的提取,综合视觉效果定性分析和数理统计定量分析方法,评价融合影像效果质量。其中视觉效果是通过影像的光谱清晰度、保真度、纹理特征进行直观分析,定量分析从融合影像的光谱信息、纹理信息进行评价分析,减少评价的随机性,使得评价更加科学全

表 1 影像融合评价指标分析

指标	名称	计算公式	式中字母含义
光谱评价指标	光谱角/(°)	$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{i,j} Q_{i,j}}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N Q_{i,j}^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P_{i,j}^2}}$	$P_{i,j}$ 为原始多光谱影像光谱向量 $Q_{i,j}$ 为融合影像光谱向量 M, N 为图形的行列数
	相关系数	$c = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [(P_{i,j} - \overline{P_{i,j}})(Q_{i,j} - \overline{Q_{i,j}})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (P_{i,j} - \overline{P_{i,j}})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Q_{i,j} - \overline{Q_{i,j}})^2}}$	$\overline{P_{i,j}}$ 为原始多光谱影像的均值 $\overline{Q_{i,j}}$ 为融合后多光谱影像的均值
	平均梯度	$\Delta = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sqrt{[(Q_{i,j} + Q_{i+1,j})^2 + (Q_{i,j} + Q_{i,j+1})^2] / 2}$	同上
纹理评价指标	二阶矩	$ASM = - \sum_{i=1}^L Q_i^2$	Q_i 为灰度值为 i 的概率密度; L 为图像灰度级数
	信息熵	$ENT = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N M(\chi_{i,j})^2$	$M(\chi_{i,j})^2$ 是灰度共生矩阵元素

1.3 融合影像分类方法

为探讨各种融合算法对生产建设项目扰动图斑信息提取的适宜性,本研究采用面向对象多尺度分割方法,通过 Jeffries-Matusita 距离(J-M 距离)法筛选适用于本研究提取目标的多特征指数,生成树型结构的判别函数,建立下层节点和分支,实现生产建设项目扰动图斑提取。

1.3.1 面向对象多尺度分割 遥感影像分割是面向对象遥感影像分类的基础,影像分割的质量影响分类提取的精度。本文利用基于分形网络进化分割算法(Fractal Net Evolution Algorithm, FNEA)的面向对象多尺度分割方法,综合考虑各典型地物的分布特点,根据影像不同的光谱、纹理、形状和空间特征,选用信息熵作为内部同质性评价指标,分割强度作为邻域异质性评价指标,通过逐次调整分割尺度大小使各典型地物实现最优分割^[19-21]。确定的最佳分割尺度因子:分割尺度 100,颜色因子 0.7,紧凑度 0.5,各波段的权重均设置为 1。

1.3.2 J-M 距离可分离性特征分析 结合典型地物的地表特征,通过 J-M(Jeffries-Matudita)距离变量,获取各类在各特征上的 J-M 距离可分离性矩阵,选择与其他地物距离最大,区分性最强的特征进行组合,构建描述某类地物的最优特征空间^[22-24]。J-M 距离法的取值范围是[0,2],J-M 距离越大,说明 2 类在特征的可分性越强。其中:0 表示 2 种类别在某个特征上完全混淆;2 表示 2 种类别在某个特

征上能够完全分开,通常认为 J-M 距离大于 1.8 的类别分离性较强,而小于 1 的类别可分性较差,可进行合并处理。计算公式为:

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

$$B = \frac{1}{8} (m_1 - m_2)^2 \frac{2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \right)$$

式中: B 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的巴氏距离; m_1 和 m_2 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的均值; σ_1 和 σ_2 表示 c_1 和 c_2 基于 f 特征的标准差。

1.3.3 面向对象多层次分类提取及精度评价 以分割后的影像为基础,综合考虑影像对象特征组合,利用决策树的模糊分类方式,结合专家知识,确定各特征规则的隶属度函数和参数,形成典型地物提取的规则集,识别生产建设项目扰动图斑。针对点型和线型生产建设项目的不同特点,对比分析 5 种融合算法的分类效果,以外业实地调查和专家目视解译结果为真值,通过单变量统计法分别从数量和面积方面对扰动图斑提取结果进行精度评价。其中,点型生产建设项目扰动图斑的精度评价指标为:

$$Q_n = Q_{r,n} / Q_{tot,n}$$

式中: Q_n 为点型生产建设项目扰动图斑数量提取正确率; $Q_{r,n}$ 为点型生产建设项目正确图斑数量; $Q_{tot,n}$ 为点型生产建设项目提取图斑总数量。

$$Q_a = Q_{r,a} / Q_{tot,a}$$

式中: Q_a 为点型生产建设项目扰动图斑面积提取正确率; $Q_{r,a}$ 为点型生产建设项目正确图斑总面积(m^2); $Q_{tot,a}$ 为点型生产建设项目提取图斑总面积(m^2)。

$$Q_l=Q_{l_a}/Q_{tot_a}$$

式中: Q_l 为线型生产建设项目图斑长度提取精度; Q_{l_a} 为线型生产建设项目图斑的正确提取的长度(m); Q_{tot_a} 为线型生产建设项目图斑的总长度(m)。

2 结果与分析

2.1 基于视觉结果的定性分析

不同生产建设项目由于建设特点不同、施工工艺不同,项目特点差异很大。即使同一类型生产建设项目,由于施工时序不同,在遥感影像上所体现的特征差异也很大。水土保持重点关注的对象是生产建设项目施工建设过程对地表造成的扰动^[25]。生产建设项目扰动地块具有组合结构的特征,主要包含裸露地表和在建建筑用地混合地表区、煤炭覆盖区 2 个类别

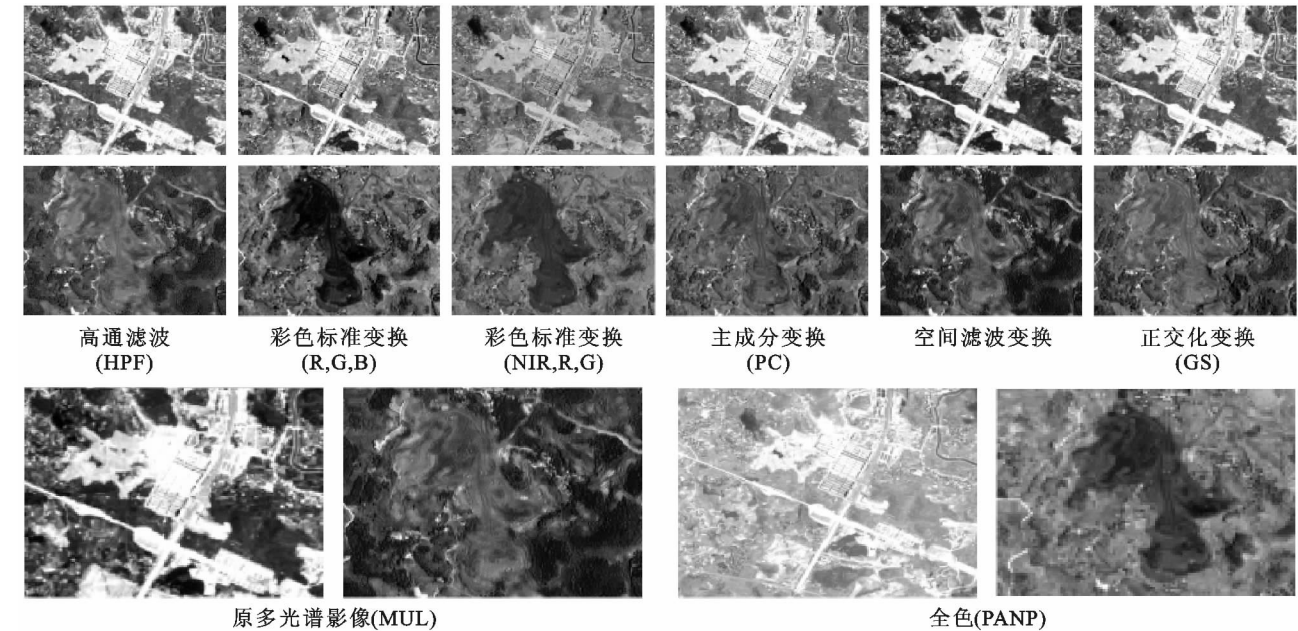


图 1 裸露地表和在建建筑用地混合地表区、煤炭覆盖区融合影像细节对比

2.2 基于数理统计的特征

2.2.1 光谱分析 光谱角反映原始多光谱影像与融合后影像光谱特征的相差程度,值越小,二者差异越小,光谱保真度越高,继承性越好。由表 2 可知,PC 变换在 R、G、B 波段上光谱角均较小,最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性;Brovey 假彩色变换和 Ehlers 变换光谱角为 0.2,保真度最低;Hpf 变换在 R 波段上的保真度最高,但在 G、B 波段上的保真度较低。对于 NIR 波段而言,Hpf、Ehlers、PC 和 GS 变换光谱角和光谱偏差均较小,Brovey 假彩色变换值大,偏差幅度达 50%以上。光谱相关系数反映影像光谱信息的继承性,相关系数越高说明光谱扭曲程度小,对原始影像光谱信息改变小。HPF、PC 和 GS 融合算法在各波段上的相关系数均大于 0.9,说明该算法光谱继承特征优于其他算法。其中,NIR 波段对于裸露地表和建筑物提取具有重要意义,除 Brovey 变换外,其他算法的相关系数均大于 0.90,PC

的覆盖类型。通过分析 5 种不同的融合方法融合后的典型的生产建设项目扰动图斑的区域(图 1)可知,影像的空间分辨率、清晰度均有很大的提高,边界变得更加清晰,目视容易判断。其中,Brovey 变换改变了多光谱影像的色调,光谱信息损失比较大,在建建筑物和裸露地表色调和纹理比较清晰,但煤炭覆盖区与未耕作的耕地易混淆;Ehlers 融合后的影像,所有扰动图斑的特征地物纹理均有些模糊,边缘清晰度低,有明显的晕边现象;HPF 融合影像在色调上有较大的改变,但是煤炭覆盖区出现重影,轮廓和层次感差;PC 和 GS 融合算法影像目视效果好,细节清晰,色调自然,较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。

算法的值高达 0.98,表示 PC 融合算法在 NIR 波段上光谱保持性均较好。Brovey 真彩色变换相关系数较低,R、G、B 波段上均不到 0.65,光谱扭曲度较高。平均梯度反映影像的清晰度,值越大表示影像层次越丰富,对比度越大。对于原始影像,各融合算法在不同波段平均梯度值上均有较大幅度的提高,其中 PC 和 GS 变换融合算法的平均梯度增幅均在 35%以上,说明其融合结果的清晰度和对比度提高显著。总体而言,PC 和 GS 变换影像融合算法在生产建设项目扰动图斑信息提取上具有很大的可能性。

2.2.2 纹理分析 选择生产建设项目特征地物裸露地表和在建建筑用地混合区域、煤炭覆盖区 2 种类型分析其二阶矩、熵值 2 个指标。为消除方向参数对纹理特征提取的影响,更好地反映图像的特点,对 0°,45°,90°,135°这 4 个方向的计算结果求平均,距离参数为 3 个像元。二阶矩值小说明影像灰度分布越

均匀,纹理细致。由图 2 可知,与原始多光谱影像相比,各融合算法在生产建设项目扰动图斑的典型地物特征上均有一定的改善,二阶距值均有所下降。其中,裸露地表和在建建筑用地混合区域,除 Brovey 真彩色变换外,其他融合算法二阶距值下降幅度达 55%以上,纹理改善明显;煤炭覆盖区,除 Hpf 和 Ehlers 外,其他算法的改善效率接近 60%。熵值反

映影像所包含的信息量,熵值越大则影像空间细节越丰富。由图 3 可知,HPF 和 Brover 真彩色 2 种融合算法信息熵增幅较少,分别为 37%和 16%,GS 信息量改善最好,高达 64%。综合上述分析的 2 个纹理特征指标,GS、PC 和 Ehlers 算法对纹理具有稳定和显著的改善,其中 GS 在增益效果上更具优势,融合影像信息量最大,纹理最为细致。

表 2 生产建设项目扰动图斑原多光谱影像各波段与融合影像特征

方法	光谱角/(°)				相关系数				平均梯度			
	R	G	B	NIR	R	G	B	NIR	R	G	B	NIR
Hpf	0.13	0.51	0.62	0.13	0.94	0.95	0.95	0.95	107.12	104.02	103.31	152.40
PC	0.11	0.12	0.11	0.15	0.96	0.93	0.90	0.98	124.02	122.03	134.09	151.02
Brovey(R,G,B)	0.21	0.22	0.23		0.61	0.58	0.30		104.50	104.42	103.44	
Brovey(R,G,NIR)	0.28	0.23		0.37	0.84	0.83		0.85	104.00	104.40		104.80
Ehlers	0.25	0.21	0.18	0.13	0.89	0.86	0.89	0.95	103.27	98.24	97.15	100.12
GS	0.21	0.18	0.16	0.14	0.18	0.15	0.13	0.11	124.97	142.55	145.83	148.41

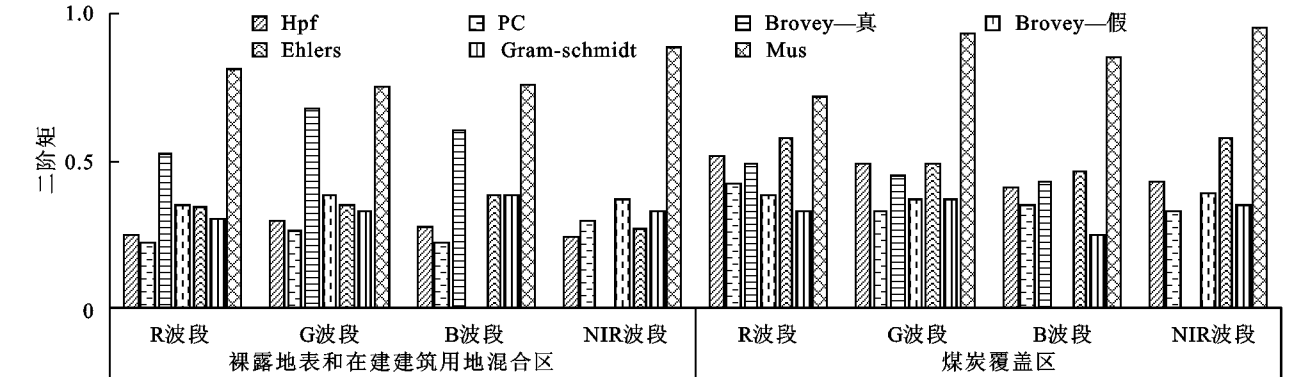


图 2 二阶距指标统计

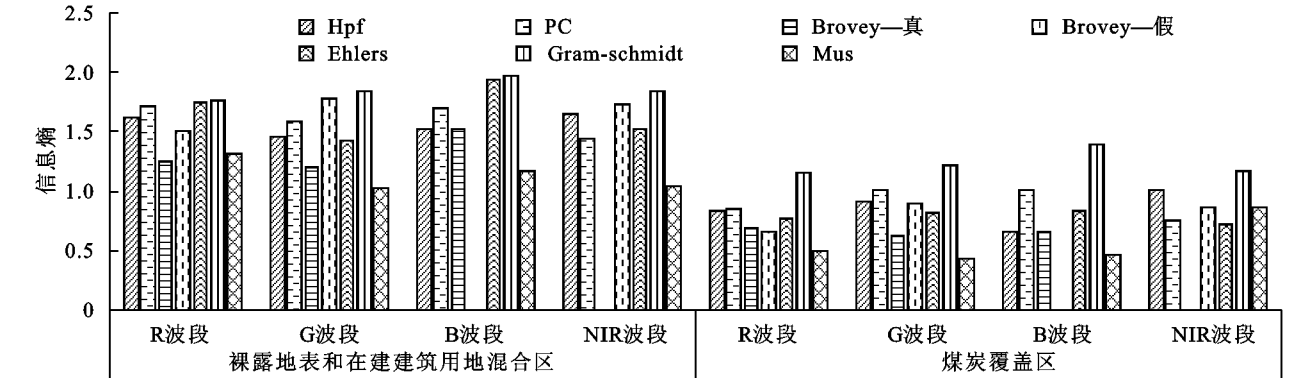


图 3 信息熵指标统计

2.3 扰动图斑多层次模型构建

为了探究各融合算法下在特殊地物信息提取上的应用效果,本研究基于研究区不同的影像结果,利用上述面向对象的方法提取生产建设项目扰动图斑。结合专家目视解译和实地调查的数据,选择生产建设项目特征地物裸露地表和在建建筑用地混合区域、煤炭覆盖区 2 种类型共 56 个分类样本,按照点型和线型分别对提取结果进行精度评价。由表 3 可知,生产建设项目扰动图斑中的煤炭覆盖区所有融合算法的数量提取正确率均为 100%,除 Hpf 变换融合结果外,其他融合算法面积正确率均为 100%,较原始多光谱影像分类精度提高了约

10%。GS 变换融合结果在点型裸露地表和在建建筑用地混合区数量提取正确率和面积正确率最高,分别为 92%和 83%,其次是 Hpf 和 PC 变换,Brovey 变换融合结果正确率低于原始多光谱影像;GS 变换融合结果在线型长度提取正确率也是最高,其次是 Ehlers、PC、Hpf 变换,最小为 Brovey 变换,说明并非所有融合变换算法都能增强影像信息提取的能力。面积精度低的原因主要是由于生产建设项目裸露地表和在建建筑用地混合区扰动图斑边缘多为裸露地面向植被过渡的区域,在一定程度上影响了面积提取的精度。漏提的主要原因是其地表组成比较破碎,部分图

斑没有达到筛选阈值,或者周边地物干扰扰动图斑的连续性,误提的图斑主要是植被覆盖率较低的耕地。综上所述,PC 和 GS 融合算法增强信息,适宜于生产建设项目扰动图斑信息提取。

表 3 生产建设项目扰动图斑分类精度评价

融合数据	裸露地表和在建建筑			煤炭覆盖区	
	用地混合区				
	点型	线型		点型	
	Q_n	Q_a	Q_l	Q_n	Q_a
Mul	0.72	0.81	0.72	1.00	0.90
Hpj	0.73	0.85	0.74	1.00	0.83
PC	0.77	0.89	0.80	1.00	1.00
Brovey(R,G,B)	0.66	0.77	0.53	1.00	1.00
Brovey(R,G,NIR)	0.68	0.79	0.62	1.00	1.00
Ehlers	0.71	0.80	0.78	1.00	1.00
GS	0.83	0.92	0.83	1.00	1.00

3 结论

(1)通过目视分析 5 种不同的融合方法融合后生产建设项目扰动图斑区域,可知 PC 和 GS 融合算法影像目视效果好,细节清晰,色调自然,较好的融合了多光谱影像的光谱信息和全色影像的空间信息。

(2)通过数据统计分析可知 Principle Components 变换最大程度地保持原多光谱影像的光谱特性,GS 变换在增益效果上更具优势,融合影像信息量最大,纹理最为细致。

(3)通过面向对象的方法提取生产建设项目扰动图斑的结果可知,煤炭覆盖区提取正确率高,除 HPF 融合结果外,其他融合算法较原始多光谱影像分类精度提高了约 10%。裸露地表和在建建筑用地混合区在 GS 和 PC 融合算法提取正确率大于 80%。

(4)综合考虑融合图像质量和融合影像分类结果,针对 GF-1 影像,PC 变换和 GS 变换融合效果优于其他融合算法,为天地一体化监管影像大规模的融合应用提供参考具有重要意义。

参考文献:

[1] 李智广,王敬贵.生产建设项目“天地一体化”监管示范总体实施方案[J].中国水土保持,2015(2):14-17.

[2] 王龔,宋立旺,王琦.基于 3S 技术的生产建设项目水土保持监督检查[J].中国人口·资源与环境,2017,27(增刊 1):92-94.

[3] 云影.高分分辨率对地观测系统重大专项首发星:高分一号卫星[J].卫星应用,2013(3):72.

[4] 王华斌,李国元,张本奎,等.资源三号卫星影像融合算法对比分析[J].测绘科学,2015,40(1):47-51.

[5] 孙攀,董玉森,陈伟涛,等.高分二号卫星影像融合及质量评价[J].国土资源遥感,2016,28(4):108-113.

[6] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013.

[7] 李爽.融合方法及空间分辨率比率对遥感影像融合结果

影响的研究[D].武汉:武汉大学,2010.

[8] 周嘉男,艾海滨,张力.高分一号遥感影像融合方法比较研究[J].地理空间信息,2016(2):47-49.

[9] 林雪.面向林地信息的高分一号遥感影像融合与分类研究[D].北京:北京林业大学,2016.

[10] 王晓绵,姜芸.高分一号遥感卫星影像融合及质量评价方法研究[J].测绘与空间地理信息,2015,38(8):178-179,182.

[11] 郭会敏,洪运富,李营,等.基于高分一号卫星影像的多种融合方法比较[J].地理与地理信息科学,2015,31(1):23-26,40.

[12] 陈发军,陈坤浩,谢永贵,等.黔西北喀斯特生态系统中主要植物物候格局[J].山地学报,2010,28(6):57-65.

[13] 李存军,刘良云,王纪华,等.2 种高保真遥感影像融合方法比较[J].中国图象图形学报,2004,9(11):1376-85.

[14] 胡曼,彭道黎.面向林地分类的 GF-2 影像融合算法评价[J].浙江农林大学学报,2017,34(2):340-348.

[15] 郑中,祁元,张金龙.基于光谱角和光谱距离评价指标的遥感影像融合方法比较研究:以 QuickBird 数据为例[J].遥感技术与应用,2013,28(3):437-443.

[16] 李霖,余梦媛,罗恒. ZY-3 卫星全色与多光谱影像融合方法比较[J].农业工程学报,2014,30(16):157-165.

[17] Li S, Li Z L, Gong J Y. Multivariate statistical analysis of measures for assessing the quality of image fusion[J]. International Journal of Image & Data Fusion. 2010,1(1): 47-66.

[18] 王乐.遥感影像融合及其质量评价[D].长春:吉林大学,2012.

[19] 杨亦宁.基于优度准则的遥感影像最优分割参数组合选择研究[D].兰州:兰州大学,2013.

[20] 黄慧萍.面向对象影像分析中的尺度问题研究[D].北京:中国科学院遥感应用研究所,2003.

[21] 于文婧,刘晓娜,孙丹峰,等.基于 HJ-CCD 数据和决策树法的干旱半干旱灌区土地利用分类[J].农业工程学报,2016,32(2):212-219.

[22] 马娜,胡云锋,庄大方,等.基于最佳波段指数和 J-M 距离可分性的高光谱数据最佳波段组合选取研究:以环境小卫星高光谱数据在东莞市的应用为例[J].遥感技术与应用,2010,25(3):358-365.

[23] Nussbaum S, Niemyer I, Canty M J. SEaTH - A new tool for automated feature extraction in the context of object-based image analysis[C]// Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio). International Conference on Object-Based Image Analysis, Brazilian: Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2012: 434-439.

[24] 朱永森,曾永年,张猛.基于 HJ 卫星数据与面向对象分类的土地利用/覆盖信息提取[J].农业工程学报,2017,33(14):258-265.

[25] 姜德文,郭索彦,赵永军,等.生产建设项目水土保持准入条件通用条款[J].中国水土保持科学,2010,8(3):43-54.