

基于 GF-2 的沙地区域影像融合方法与评价

——以内蒙古自治区正蓝旗北部典型沙地为例

朝鲁门¹, 宁小莉¹, 包玉海², 海全胜¹, 张雪峰¹

(1. 内蒙古科技大学 包头师范学院 资源与环境学院, 内蒙古 包头 014030;

2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: [目的] 以内蒙古自治区正蓝旗北部典型沙地为例, 以国产高分卫星(GF-2)影像为数据源, 找出沙地区域的最佳影像融合方法, 以期对沙地区域影像融合方法研究提供技术支撑。[方法] 应用 HSV(Hue, Saturation, Value)、Brovey, Gram-Schmidt, PC(principal components)融合等 4 种融合方法对 GF-2 影像的全色波段和多光谱波段进行融合; 选取平均梯度、联合熵、相对偏差和标准差等 4 种统计方法, 对影像融合进行效果评价及分析。[结果] 4 种融合方法均提高了比原多光谱影像的 4 倍空间信息辨别度, 同时较好地保存了影像的原多光谱信息, 并增强了图像信息的分辨能力。其中, Brovey 融合方法的相对偏差最小, PC 融合方法的融合效果最不明显, 而 HSV 融合方法的联合熵和平均梯度最大, 并且其对影像融合效果最佳。[结论] HSV 融合是沙地区域影像融合的最佳方法。HSV 融合能对沙地区域的目视解译等工作提供清晰的空间和光谱分辨率影像数据。

关键词: GF-2; 沙地; 融合; HSV(色彩、纯度、明度模型)

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2019)04-0138-06

中图分类号: TP75

文献参数: 朝鲁门, 宁小莉, 包玉海, 等. 基于 GF-2 的沙地区域影像融合方法与评价[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 138-143. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 04. 022; Chao Lumen, Ning Xiaoli, Bao Yuhai, et al. Image fusion methods and evaluation in sandy area based on GF-2 satellite data[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 138-143.

Image Fusion Methods and Evaluation in Sandy Area Based on GF-2 Satellite Data

—A Case Study in North Zhenglan Banner of Inner Mongolia Autonomous Region

Chao Lumen¹, Ning Xiaoli¹, Bao Yuhai², Hai Quansheng¹, Zhang Xuefeng¹

(1. College of Resources and Environment, Baotou Normal College, Inner Mongolia

University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 2. College of

Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot, Inner Mongolia 010022, China)

Abstract: [Objective] Taking the typical sandy land in the northern part of Zhenglan Banner of Inner Mongolia Region as an example, the best image fusion method in the sandy area by using the domestic high-resolution satellite(GF-2) image was studied in order to provide technical support for the study of the image fusion method in the sandy area. [Methods] 1 m Pan spectral image and 4 m multispectral image of GF-2 were fused by HSV(Hue, Saturation, Value), Brovey, Gram-Schmidt and PC(principal components); And the four statistical methods, including average gradient, joint quantity, relative deviation and standard deviation were selected to evaluate and analyze the effect of fusion. [Results] The above four fusion methods could significantly improve the four fold spatial information discrimination of the multi-spectral image in the study area, preserve the original multi-spectral information of the image, and enhance the resolution ability of the image information. Among them, Brovey fusion method had the smallest relative deviation, PC had the least obvious fusion effect, while HSV fusion method had the largest joint quantity and average gradient, and it had the best image fusion effect. [Conclusion] HSV fusion was the best method of image fusion in sandy

收稿日期: 2019-03-15

修回日期: 2019-04-29

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目“浑善达克沙地沙漠化多源遥感监测及治理对策研究”(201605052); 包头师范学院青年科技基金项目“基于葵花-8 卫星的白天云相态识别研究”(BSYKJ2017-15)

第一作者: 朝鲁门(1990—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区兴安盟人, 硕士, 讲师, 主要从事环境遥感与 3S 技术应用研究。E-mail: huiyouyitian654@126.com。

通讯作者: 宁小莉(1965—), 女(蒙古族), 内蒙古自治区赤峰市人, 硕士, 教授, 主要从事人居环境研究。E-mail: ningxl2003@aliyun.com。

area. It could provide to clear spatial and spectral image data for visual interpretation of sandy areas.

Keywords: GF-2; sandy; fusion image; HSV(hue, saturation, value)

20 世纪 60 年代开始,随着遥感技术的快速发展,遥感影像数据已被各个部门广泛应用,对其获取的卫星影像在空间、光谱以及时间分辨率等方面的要求越来越高。2018 年 3 月 26 日至 4 月 4 日在内蒙古自治区中西部地区出现的沙尘天气,已经严重影响人们的日常生活及健康。沙尘暴的沙源归根结底是沙地。因此,在环境治理问题中沙地的研究比较迫切,而典型沙区的影像融合是重要的技术手段,是数据处理的重要环节,利用不同遥感数据及处理方法去除多余信息,提高影像的空间和光谱信息,提高影像读取能力是现在需要解决的关键技术问题,能为目视解译等后续的沙地研究工作提供科学的基础数据^[1-3]。

遥感影像融合专家 Alparon 等人^[4]在专著中指出遥感数据融合是针对某种调查现象,协同组合两个或者更多影像数据,以获取比单一影像更多的知识。针对光谱和空间信息进行处理,能提高图像信息综合分辨率,从而提高图像质量和计算机解译精度,对监测工作提供有力依据。目前使用较多的遥感影像融合方法有 HVS 融合方法、PanSharpen 融合方法、Brovey 融合方法、Gram-Schmidt 融合方法、小波变换融合方法、HPF 融合方法、NNDiffuse 融合方法、PCI 融合方法、改进 Brovey 融合方法及 Curvelet_HCS 融合方法等^[5-7]。国内外学者在不同类型卫星影像数据融合方面进行了较多研究。对于 IKONOS 影像,逢锦娇等^[8]提出 PanSharpen 融合效果优于 HSV 融合效果,主要表现在 PanSharpen 具有较高的分类精度。邢元军等^[9]利用 GF-1、ZY-3 和 ZY102C 等三种国产卫星为研究对象,通过融合结果验证,得出三种卫星的最佳融合方法分别是 GS、PC 和 IHS。HR 和 CCD 图像融合后,明显提高了土地利用信息的精度,在国土资源调查与生态环境监测中都起到重要的作用^[10]。国内外学者^[11-17]对 IKONOS 与 QuickBird、Landsat TM 与 SPOT、高分二号、高分一号、QuickBird、BJ-1、HJ-1 A 及 ZY-3 等不同遥感影像进行融合方法研究并对其进行融合效果评价。影像融合研究一般从融合方法、卫星影像以及地物等 3 方面进行研究。吕利利等^[18]提出沙漠地区地物单一,“同物异谱”和“异物同谱”现象较容易出现,采用建树的样本数据时要具有区域典型性和完整性。因此,影像信息中提高自然地物辨别度较为重要。地物方面,对城区、道路、林地、耕地、建筑物、水域等类型融合分析较多,而针对沙地区域的研究较少。沙地对人类生活、经济、环境等方面都有不容忽视的影响。

因此,学者应用 Landsat ETM,TM 与 SPOT 等影像是研究沙地区域影像最佳融合方法。本文利用国产高分影像数据,采用 HSV,Brovey, Gram-Schmidt, PC 融合等 4 种融合方法,进行沙地区域最佳影像融合方法研究,影像融合能提高影像的空间分辨率和光谱信息,从而提高沙地区域特征提取、分类、目标识别的精度,且研究结果能为沙地区域的后续研究提供科学的决策服务。

1 研究区概况与数据

正蓝旗位于内蒙古中部,浑善达克沙地腹地,地形从西南到东北呈递减,平均海拔在 1 300 m 左右,日均温大于 10 ℃,年积温约 1 870 ℃,属中温带大陆性气候,多年平均降雨量 350 mm,年际变化大,主要集中在夏季,年蒸发量约 1 936 mm,无霜期 104 d,平均风速 4.3 m/s。20 世纪 60 年代以后,浑善达克沙地发生了沙漠化扩大,仅仅 30 a 时间,沙漠化增长速度已高达 4%,内蒙古地区的沙地研究是对建立我国北方生态安全屏障,亮丽风景线的重要部分。本研究的研究区位于正蓝旗北部典型沙区,经纬度范围为 116°24′10.65″—116°28′38.31″E、42°30′37.70″—42°32′6.69″N。

高分二号(GF-2)卫星是我国自主研发的空间分辨率大于 1 m 的民用光学遥感卫星,卫星上搭载 1 m 全色和 4 m 多光谱相机的两台传感器,星下点空间分辨率能达到 0.8 m,有 4 个多光谱通道,1 个全色波段通道(表 1),2014 年 8 月 21 日开始投入使用。卫星数据主要为国家级各级各部门提供有效数据服务,如国土、测绘、环保、住房和城乡建设、交通运输和林业等,以及为相关各级政府提供咨询服务。本研究使用的是 2016 年 9 月 16 日成像的高分二号影像,景号为 GF2_PMS1_E116.3_N42.6_20160916_L1A0001830187,GF2_PMS2_E116.5_N42.5_20160916_L1A0001830240。

表 1 GF-2 卫星波段参数

波段	光谱 波段	波段 范围/ μm	空间分辨 率/m	时间分辨 率/d
1	蓝	0.45~0.52	4	5
2	绿	0.52~0.59	4	5
3	红	0.63~0.69	4	5
4	近红外	0.77~0.89	4	5
5	全色	0.45~0.90	1	5

2 方法

2.1 融合方法

2.1.1 HSV 融合方法 HSV(色彩、纯度、明度模型)变换,是将计算机上显示的彩色图像分解成 3 个度,色度(H)、饱和度(S)、亮度(V),彼此相互独立,符合人们平时的视觉辨别。HSV 融合是 RGB 转换为 HSV,再变回 RGB 的过程,即首先把 RGB(红、绿、蓝颜色模型)图像变换成色度、饱和度、亮度空间,亮度空间值给予高分辨率的波段,色度值、饱和度重采样到高分辨率像元尺寸,然后再将处理后图再变换回 RGB 显示图像^[19]。

2.1.2 Brovey 融合方法 Brovey(色彩标准化变换)融合方法是将多光谱影像的映像空间分解成色彩和亮度两个分量。首先将影像显示的多光谱波段颜色进行归一化处理,然后把全色影像的灰度值分别与多光谱影像各波段灰度值相乘,完成影像融合^[20]。

2.1.3 Gram-Schmidt 融合方法 Gram-Schmidt 融合方法是将多光谱图像转换到正交空间,再将全色波段图像变成第一空间值,再反变换获得融合图像^[21]。用该方法融合后得到的影像特征,改进了主成分变换中信息过分集中的问题,不用设置波段。

2.1.4 PC 融合方法 PC(principal components)融合方法,是数学统计方法的多维(多波段)正交变换,对多光谱图像进行主成分正变换,全色图像信息替换第一主成分量,第一主成分量信息已成为全色波段的空间信息,再通过主成分逆变换得到高分辨率多光谱图像^[22]。

2.2 融合效果评价方法

图像融合效果评价是对融合后的图像质量进行验证的方法,有主观肉眼评价和客观统计评价两种评价方法。主观肉眼评价是用人为的视觉来评价图像的清晰度。客观统计评价是用定量的方式来客观的描述图像在空间信息上和光谱保真度上提高影像质量程度的方法。定量方式,也就是用数学上的方法来量化,形成一个评价指标。本文为了验证沙地区域影像融合质量,选取了标准差、平均梯度、联合熵和相对偏差 4 种评价指标。

2.2.1 标准差 标准差能反映图像邻近像素间反差情况,融合前后图像的离散程度。标准差越大,与原始影像越接近,则融合后影像数据信息保持度越高。一景 $M \times N$ 的图像,其标准差计算公式为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [G(i,j) - u]^2}{MN}} \quad (i=1, \dots, N; j=1, \dots, M) \quad (1)$$

式中: S ——影像某一波段的标准差; $G(i,j)$ ——影像灰度值; u ——平均灰度值。

2.2.2 平均梯度 平均梯度是影像灰度变化率的平均值,能很好的说明影像的细微区别,一景 $I \times J$ 的图像,平均梯度值越高,影像识别度越高。其计算公式为:

$$G = \frac{1}{(I-1)(J-1)} \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=1}^{J-1} \sqrt{\frac{\left[\frac{\partial F(i,j)}{\partial x}\right]^2 + \left[\frac{\partial F(i,j)}{\partial y}\right]^2}{2}} \quad (i=1, \dots, I; j=1, \dots, J) \quad (2)$$

式中: G ——影像某一波段的平均梯度; $F(i,j)$ ——影像灰度值范围为 $0 \sim 255$; $\left[\frac{\partial F(i,j)}{\partial x}\right]$, $\left[\frac{\partial F(i,j)}{\partial y}\right]$ ——影像在像元 (i,j) 处,第 i 行、第 j 列的偏导数,计算时分别以 $F(i,j) - F(i+1,j)$ 和 $F(i,j) - F(i,j+1)$ 来计算。

2.2.3 联合熵 联合熵是美国科学家香农提出来的科学名词,主要度量两个概率分布间的差异性,能反映图像的细微信息量,联合熵值越大,说明图像上的细微信息越多。联合熵对遥感影像的清晰度分析中比较有说服力,将影像本身视为信息源,联合熵作为影像信息计算中作为重要的指标,其公式为:

$$E(x_1, \dots, x_n) = - \sum_{x_1} \sum_{x_n} p(x_1, \dots, x_n) \cdot \log_2 [p(x_1, \dots, x_n)] \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

式中: $E(x_1, \dots, x_n)$ ——影像联合熵; (x_1, \dots, x_n) ——像元在依次从 1 到 n 波段上 x_1, \dots, x_n 的概率,第 $1 \sim n$ 波段像元灰度,值为 x_1, \dots, x_n 的像元个数与影像总像元数的比值来获得联合熵。排除噪声、阴影等因素的情况下,计算后获得的值越高,能说明影像总信息量越多。

2.2.4 相对偏差 相对偏差在计算两组数据之间的偏离情况中使用较多,原影像和融合影像灰度值可以作为两组数据,通过相对偏差来表示原影像和融合影像光谱信息上的结合程度,由 $I \times J$ 行列构成的一幅影像,其计算相对偏差的公式为:

$$R = \frac{1}{IJ} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{|I(i,j) - J(i,j)|}{J(i,j)} \quad (i=1, \dots, I; j=1, \dots, J) \quad (4)$$

式中: R ——原影像与融合影像对应的某一波段的相对偏差; $I(i,j)$, $J(i,j)$ ——融合影像和原影像在像元第 i 行,第 j 列处的灰度值。计算结果值越小,则说明原影像与融合影像的偏差越小,则光谱信息保留度越好。

3 GF-2 影像融合效果评价与结果分析

本文应用客观评价指标标准差、平均梯度、联合

熵、相对偏差计算了研究区影像融合后的质量(如表 2 所示)。

表 2 融合影像评价指标值

融合方法	平均梯度	联合熵	相对偏差	标准差
原始影像	5.281 4	14.144 5	—	85.041 6
HSV	4.862 5	14.720 3	3.298 3	79.372 8
Brovey	4.862 3	12.582 3	2.173 0	72.702 4
Gram-Schimd	8.748 0	13.375 5	3.611 2	66.520 9
PC	3.682 0	13.357 8	3.575 6	66.899 2

由表 2 可知,用 4 种方法得出的影像融合的 4 个客观统计指标值之间的差异比较明显,在正蓝旗北部典型沙地区域的研究中可以很好地完成影像融合工作。HSV 融合方法、Brovey 融合方法、Gram-Schimd 融合方法、PC 融合方法的平均梯度分别为 4.862 5, 4.862 3,8.748 0 和 3.682 0,平均梯度是影像灰度变化率的平均值,能很好地说明影像的细微区别,平均梯度值越高,影像的细微区别越好。因此,Gram-Schimd 方法融合后的影像细微区别最好。4 种融合方法的联合熵分别为 14.720 3,12.582 3,13.375 5 和 13.357 8,联合熵主要反映图像的细微信息量,联合熵值越大,图像上细微信息越多,HSV 方法融合后影像的细微信息量最多。相对偏差分别为 3.298 3,2.173 0,3.611 2 和 3.575 6,相对偏差表示原影像和融合影像在信息上的结合程度,Brovey 融合方法的值为最小,Brovey 融合方法的融合前和融合后的影像的光谱信息结合度好。标准差分别 79.372 8,72.702 4 和 66.520 9,66.899 2,主要表明影像灰度值与平均灰度值的离散程度,HSV 融合方法的标准差为最高,且与原始影像的标准差接近,而且信息熵最高,说明用 HSV 方法融合后的影像与原始影像接近,信息含量最多,影像辨别度高。陈业培,谢士琴,胥兵等^[23-25]分别指出标准差最高与原始影像接近,说明融合后图像与原始图像比较接近。信息熵值越大,图像携带的信息量越大,信息辨别度越高。HSV 融合方法的联合熵和标准差都最高,使用 HSV 融合方法后影像纹理方面得到了改善,空间信息、光谱信息保留较好(图 1—3)。因此,HSV 方法融合后的影像辨别性最好,以及影像的细微信息量最多,平均梯度和相对偏差均位居第 2,在沙地的空间信息间辨别度和光谱保真度的计算中优于其他 3 个融合方法。Brovey 融合后影像的特征为光谱信息保真较好(图 4)。Brovey 融合方法的相对偏差最小,Brovey 融合方法融合后的影像的信息结合度好,联合熵和标准差均位居第 2,平均梯度位居第 3,综合表现位居第 2。Gram-Schimd 融合后空间纹理信息较好地保留,尤其能保证影像的光谱特

征信息(图 5)。Gram-Schimd 融合方法的平均梯度最大,影像细微区别最好,联合熵为第 3,相对偏差和标准差位居第 4,综合表现为第 3。PC 方法融合后的影像的优点为无波段限制,光谱信息保留好。第一主成分信息较集中,色调变化较大(图 6)。PC 融合方法的相对偏差和标准差位居第 3,平均梯度和联合熵位居第 4,综合表现为第 4,融合表现最不突出。4 种融合方法中,HSV 融合方法的联合熵和标准差值最高,因此,与原始影像接近而且细微信息量最多,影像的辨别性最好。Brovey 融合方法的影像光谱信息结合程度较好,Gram-Schimd 融合方法的影像细微区别度好,PC 融合效果最不明显。因此,HSV 融合方法在分析正蓝旗北部典型沙区时表现效果最好。

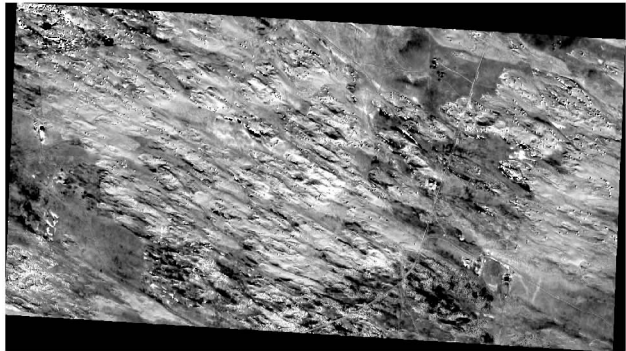


图 1 研究区原始多光谱影像

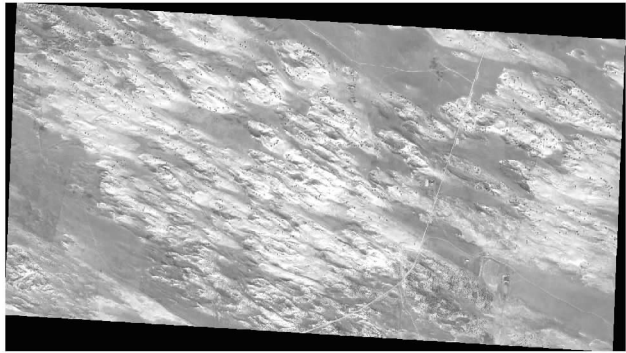


图 2 研究区原始全色影像

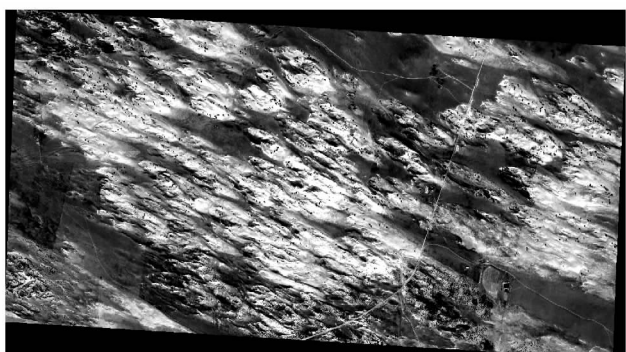


图 3 研究区 HSV 融合结果

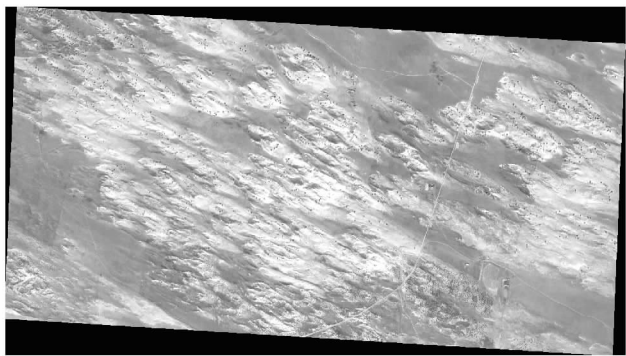


图 4 研究区 Brovey 融合结果

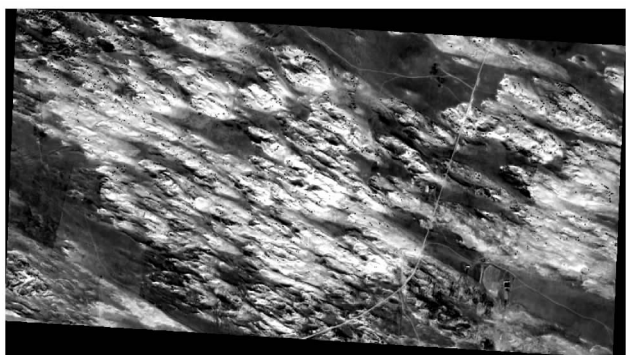


图 5 研究区 Gram-Schmidt 融合结果



图 6 研究区 PC 融合结果

4 讨论

(1) 文章利用国产高分辨率影像 GF-2,进行了沙地区域影像融合研究。琚存勇,周淑琴等^[26-27]分别应用 TM 与 SPOT、Landsat ETM 影像研究沙地区域影像最佳融合方法。应用高分影像对城区、道路、林地、耕地、建筑物、水域等地物进行影像融合分析研究较多。而沙地区域高分影像的最佳融合研究较少,本文以 GF-2 影像作为数据源,图像融合方法主要选取了 HSV 融合方法、Brovey 融合方法、Gram-Schmidt 融合方法、PC 融合方法等四种融合方法研究沙地区域最佳融合方法。基于汤耶磊等^[28]提出的针对区域特征及应用目的,不同地物选择适合高分影像融合算法较重要。刘川等^[29]提出 GF-2 卫星在建筑

与植被区域的融合中 IGS 方法优于 IHS,GS,PCA 等方法。其它自然地物中融合方法的效果也不同。影像相同,研究的自然地物不同,融合方法效果也不同。因此,采用其它的融合方法是后续要做的研究工作。

(2) 本文选取夏季的影像对沙地区域进行研究,夏季植被生长较好,植被与沙地分类较好。研究区地物类型的覆盖不同,融合方法的效果也不同^[30-31]。冯秀绒等^[32]得出在毛乌素沙地的裸沙,33%苔藓结皮与 100%苔藓结皮及其它地物的反射率不同。测同一种植被的光谱特征有一些差异,冬季植被的反射率明显低于夏季,可见光波段与近红外波段分别约低于 60%和 40%,同种植被的冠层和叶片光谱在近红外波段的反射率不同^[33]。处于不同季节时地表植物的覆盖度不同。因此,同一种影像融合方法对不同季节的影像融合效果可能不同。植被盖度高的地区选取四季影像进行研究较多,选取春、夏、秋、冬不同时期的影像,在沙地区域进行融合及效果分析是后续研究的工作。

5 结论

(1) 在正蓝旗北部典型沙地区域的影像融合中选取的 HSV 融合方法、Brovey 融合方法、Gram-Schmidt 融合方法、PC 融合方法等 4 种图像融合方法,均能明显地保留了全色波段的空间分辨率,同时较好地保留了多波段的光谱信息。

(2) HSV 融合方法的联合熵和标准差均最高, Brovey 融合方法的相对偏差最小, Gram-Schmidt 融合方法的平均梯度最大。

(3) HSV 融合是沙地区域影像融合的最佳方法。

[参 考 文 献]

- [1] Kaczynski R, Donnay J P, Muller F. Satellite image maps of Warsaw in the scale 1 : 25,000[J]. EARSel Advances in Remote Sensing, 1995,4(2):100-103.
- [2] 王广亮,李英成,曾钰,等. ALOS 数据像素级融合方法比较研究[J]. 测绘科学,2008,33(6):121-124.
- [3] 尹峰,孟祥超,梁鹏. 一种国产高分卫星遥感影像变分融合方法[J]. 国土资源遥感,2018,30(2):100-106.
- [4] Alparone L, Aiazzi B, Baronti S, et al. Remote Sensing Image Fusion[M]. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 2015.
- [5] 薛晶,官云兰,李宜龙,等. “高分二号”卫星影像融合方法对比和评价[J]. 航天返回与遥感,2017,38(2):91-99.
- [6] 李盛阳,张万峰,杨松. 多源高分辨率遥感影像智能融合[J]. 遥感学报,2017,21(3):415-424.
- [7] 杜习乐,吕昌河. 基于 TM/ETM⁺ 和 SPOT 融合影像的郑州市土地利用变化分析[J]. 水土保持通报,2013,33(3):211-216.
- [8] 逢锦娇,孙睿,王汶. 高分辨率影像配准误差对土地覆盖

- 分类和变化检测的影响[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(3):498-505.
- [9] 邢元军, 刘晓农, 宋亚斌, 等. 国产高分辨率遥感影像融合方法比较与分析[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(10):83-88.
- [10] 李京忠, 刘咏梅. CBERS-02BHR 与 CCD 影像图像融合应用及评价:以陕西省西乡县土地利用分类为例[J]. 水土保持通报, 2009, 29(2):160-164.
- [11] 熊德峰. 高分二号卫星影像融合方法探析[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9):102-108.
- [12] 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.
- [13] Zhang Yun, Hong Gang. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour IKONOS and QuickBird images[J]. Information Fusion, 2005, 6(3):225-234.
- [14] Nikolakopoulos K G. Comparison of nine fusion techniques for very high resolution data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2008, 74(5):647-659.
- [15] Zhou J, Civco D L, Silander J A. A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 19(4):743-757.
- [16] Huang Xin, Wen Dawei, Xie Junfeng, et al. Quality assessment of panchromatic and multispectral image fusion for the ZY-3 satellite: From an information extraction perspective[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4):753-757.
- [17] 刘咏梅, 李锐, 杨勤科. 基于多源遥感的土地利用动态监测图像分类方法研究:以陕北黄土丘陵沟壑区为例[J]. 水土保持通报, 2006, 26(6):63-66.
- [18] 吕利利, 颜耀文, 黄晓君, 等. 基于 CART 决策树分类的沙漠化信息提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(3):499-506.
- [19] Carper W, Lillesand T, Kiefer R. The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multi-spectral image data[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, 56(4):459-467.
- [20] Zhou Huizhen, Wu Shuang, Mao Dafa, et al. Improved Brovey method for multi-sensor image fusion [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(2):343-360.
- [21] 杨鹏飞, 廖秀英, 程辉, 等. 基于光谱梯度角与光谱信息散度评价指标的遥感影像融合方法比较[J]. 测绘工程, 2018, 27(11):51-55.
- [22] 张利华, 翟靖超, 李珊, 等. ALOS 融合影像质量评价及其土地盐渍化应用研究[J]. 地理科学, 2015, 35(6):798-804.
- [23] 胥兵, 方臣. ZY-102C 星图像与 ETM⁺ 图像融合方法及效果评价[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(3):80-85.
- [24] 陈业培, 孙开敏, 白婷, 等. 高分二号影像融合方法质量评价[J]. 测绘科学, 2017, 42(11):35-40.
- [25] 谢士琴, 赵天忠, 王威, 等. 高分二号卫星影像融合方法比较研究[J]. 系统仿真报, 2017, 29(11):2742-2746, 2752.
- [26] 据存勇. 基于遥感影像融合与地貌分类的土地沙漠化估测研究[D]. 黑龙江 哈尔滨:东北林业大学, 2009.
- [27] 周淑琴, 张青峰, 荆耀栋, 等. 沙地信息提取中的 ETM⁺ 遥感影像自身融合研究[J]. 山西农业大学学报:自然科学版, 2012, 32(2):188-192.
- [28] 汤耶磊, 王鸿燕, 刘荣. 高分二号卫星影像融合方法比较及效果优化研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(2):43-48.
- [29] 刘川, 齐修东, 藏文乾, 等. 基于 IHS 变换的 Gram-Schmidt 改进融合算法研究[J]. 测绘工程, 2018, 27(11):9-14.
- [30] 郑雅兰, 王雷光, 陆翔. 高分二号全色-多光谱影像融合方法对比研究[J]. 西南林业大学学报:自然科学, 2018, 38(2):103-110.
- [31] 丁相元, 高志海, 孙斌, 等. 基于高分一号时间序列数据的沙化土地分类[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(3):196-202.
- [32] 冯秀绒, 卜崇峰, 郝红科, 等. 基于光谱分析的生物结皮提取研究:以毛乌素沙地为例[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6):1024-1034.
- [33] 项巧巧, 申广荣, 吴裕, 等. 上海典型植被夏季与冬季的光谱特征分析[J]. 上海交通大学学报:农业科学版, 2018, 36(5):14-21.

(上接第 137 页)

- [7] 卢训令, 梁国付, 汤茜, 等. 农业景观非农生境植物多样性及其影响因素[J]. 生态学报, 2018, 38(5):1799-1809.
- [8] 王楠, 陈一先, 白雷超, 等. 陕北子洲县“7·26”特大暴雨引发的小流域土壤侵蚀调查[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4):338-344, 347-348.
- [9] 唐凯, 姜海波, 何新林, 等. 干旱区水面蒸发特性及消减技术研究[J]. 水资源与水工程学报, 2014, 25(6):68-71.
- [10] 严弋, 海热提. 潜流式人工湿地在我国干旱区的试运行[J]. 水处理技术, 2007, 33(10):42-45.
- [11] 崔叔阳. 表面流-潜流人工湿地系统处理城市雨水的试验研究[D]. 甘肃 兰州:兰州交通大学, 2016.
- [12] 刘滨谊, 王南. 黄土高原半干旱区生态化“水-绿”双赢空间模式构建[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(4):23-28.
- [13] 张起凤, 胡海波, 鲁小珍, 等. 美林湾小流域水土保持生态景观的规划设计[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4):132-135.
- [14] 严弋, 海热提. 潜流式人工湿地在我国干旱区的试运行[J]. 水处理技术, 2007, 33(10):42-45.