

资源三号卫星湿地多光谱与全色影像融合质量评价^①

吴瑞娟^{②*} 何秀凤^{*} 王 静^{**}

(^{*}河海大学地球科学与工程学院 南京 210098)

(^{**}中国土地勘测规划院 北京 100035)

摘要 从沿海湿地分类效果和定量指标两方面对资源三号(ZY-3)卫星多光谱(MS)图像与全色(PAN)图像融合的质量进行了评价。采用通用明度-色度饱和度(GIHS)变换、 α trous 小波变换(AWT)、非下采样 Contourlet 变换(NSCT)和 NSCT-GIHS 变换结合(用 NSCT-GIHS 表示)4 种融合方法得到了 ZY-3 MS-PAN 融合图像,并构建了光谱信息指数和空间信息指数定量评价融合效果。定量分析结果表明,采用 NSCT-GIHS 方法得到的融合图像质量在光谱和空间特征保真度均为最优。基于 ZY-3 MS-PAN 融合图像,提出了面向对象的湿地分类方法。分类结果表明,NSCT_GIHS 融合图像的总体分类精度为最高值 96%,Kappa 系数为 0.9425。可见湿地分类结果与定量评价相一致。

关键词 资源三号(ZY-3)卫星,图像融合,图像融合质量评价,面向对象的分类,沿海湿地

0 引言

沿海湿地开发对发展经济有重大意义。人类活动、外来物种入侵等打破了湿地的演替规律^[1],如何监测湿地演变过程是沿海地区大开发过程中急需解决的问题。中国第一颗民用高分辨率光学立体测绘卫星——资源三号(ziyuan-3,ZY-3)卫星则使精细化湿地调查与监测成为可能。该卫星能够获取空间分辨率为 5.8m 的多光谱(multi-spectral,MS)影像和空间分辨率为 2.1m 的正视全色(panchromatic,PAN)影像,同时,其图像融合技术能集高空间分辨率和高光谱分辨率于一体,从而有利于湿地信息提取。目前基于 ZY-3 卫星影像进行土地利用/土地覆盖监测的研究颇多^[2-4],而在湿地调查与监测方面还未见相关报道。到目前为止,仅有 Huang 等^[5]研究了 ZY-3 卫星 MS 影像和 PAN 影像融合方法以及从提取建筑物、阴影、植被和水体能力的角度评价了不同融合方法的效果。沿海湿地地物类型复杂,植

被类型多样,有芦苇、米草等,鉴于此,本文试图探索一种通用的湿地信息提取方法。面向对象的分类方法在城区^[6]、煤田区^[7]和林业区^[8,9]均得到应用,其中 Qian 等^[6]研究发现,相比于基于像素的分类方法,采用面向对象的分类方法分类精度提高了 18%。

本研究从分类效果和定量指标两个方面对江苏沿海湿地的 ZY-3 卫星 MS-PAN 融合图像的质量进行了评价。首先采用 4 种融合方法得到融合图像:(1)通用明度-色度饱和度(generalized intensity-hue-saturation, GIHS)变换^[10];(2) α trous 小波变换(α trous wavelet transformation, AWT)^[11];(3)非下采样 Contourlet 变换(nonsub sampled contourlet transformation, NSCT)^[12];(4) NSCT 与 GIHS 变换相结合的融合方法,用 NSCT_GIHS 表示。其次,构建光谱信息指数和空间信息指数,定量评价不同融合方法的融合结果。这里借鉴卫徽^[13]和陈超^[14]的定量评价思路,然而与卫徽^[13]不同的是,本文引入了结构相似度(structure similarity, SSIM)指数,同时加入了

^① 国家自然科学基金(41274017,41330750),江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD),中央高校科研业务费(2013/B13020271)和对地观测技术国家测绘地理信息局重点实验开放基金(K201410)资助项目。

^② 女,1985 年生,博士生;研究方向:光学与雷达影像数据处理方法及应用;联系人,E-mail: rjwu2004@hhu.edu.cn
(收稿日期:2014-08-11)

从遥感应用的层面对融合图像质量进行评价。最后,针对 ZY-3 卫星 MS-PAN 融合图像,提出一种面向对象的沿海湿地分类方法,采用混淆矩阵和 kappa 系数表征分类结果的精度,分析分类结果并得出结论。

1 方法

1.1 融合方法定量评价指标

1.1.1 光谱信息指数

(1) 相关系数(correlation coefficient, CC),用下式表示:

$$CC(I_F, I_o) = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_F(i, j) - \bar{I}_F(i, j)][I_o(i, j) - \bar{I}_o(i, j)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_F(i, j) - \bar{I}_F(i, j)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_o(i, j) - \bar{I}_o(i, j)]^2}} \quad (1)$$

式中, $I_o(i, j)$, $I_F(i, j)$ 分别为源图像和融合图像在像元位置 (i, j) 上的灰度值, $\bar{I}_o(i, j)$, $\bar{I}_F(i, j)$ 为灰度均值, M 和 N 为图像的尺寸大小。

(2) 相对偏差(relative deviation, RD),式为

$$RD(I_F, I_o) = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{|I_F(i, j) - I_o(i, j)|}{I_o(i, j)} \quad (2)$$

式中, $I_o(i, j)$, $I_F(i, j)$ 分别为源图像和融合图像在像元位置 (i, j) 上的灰度值, M 和 N 为图像的尺寸大小。

(3) 均方根误差(root mean squared error, RMSE),式为

$$RMSE(I_F, I_o) = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I_F(i, j) - I_o(i, j)]^2} \quad (3)$$

式中, $I_o(i, j)$, $I_F(i, j)$ 分别为源图像和融合图像在像元位置 (i, j) 上的灰度值, M 和 N 为图像的尺寸大小。

(4) 峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR),式为

$$PSNR = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\max_i^2}{RMSE(I_F, I_o)^2} \right) \quad (4)$$

式中, \max_i^2 为最大的像素值。 $RMSE(I_F, I_o)$ 为源图像 $I_o(i, j)$ 和融合图像 $I_F(i, j)$ 的均方根误差。

光谱信息指数中, CC, PSNR 与图像质量正相关, RMSE, RD 与图像质量负相关。

1.1.2 空间信息指数

(1) 结构相似度(structure similarity, SSIM),式为

$$\begin{aligned} SSIM(\bar{I}_F, \bar{I}_o) &= [L(I_F, I_o)]^\alpha [C(I_F, I_o)]^\beta [S(I_F, I_o)]^\gamma \\ &= \frac{2\bar{I}_F\bar{I}_o + C_1}{(\bar{I}_F)^2 + (\bar{I}_o)^2 + C_1} \cdot \frac{2\sigma_{I_F}\sigma_{I_o} + C_2}{\sigma_{I_F^2} + \sigma_{I_o^2} + C_2} \\ &\quad \cdot \frac{\sigma_{I_F I_o} + C_3}{\sigma_{I_F}\sigma_{I_o} + C_3} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $L(I_F, I_o)$, $C(I_F, I_o)$, $S(I_F, I_o)$ 分别为结构相似度函数的亮度分量、对比度分量和结构分量, α , β , γ 为亮度分量、对比度分量和结构分量的权值,通常取 $\alpha = \beta = \gamma = 1$, \bar{I}_F , \bar{I}_o 分别为融合图像 I_F 、源多光谱图像 I_o 的灰度均值, σ_{I_F} , σ_{I_o} 和 $\sigma_{I_F I_o}$ 分别为标准差和协方差。 C_1 , C_2 , C_3 为非常小的量,目的是避免分母非常接近零时造成的不稳定,计算时常取 $C_1 = (K_1 L)^2$, $C_2 = (K_2 L)^2$, $C_3 = C_2 / 2$, $K_1 = K_2 = 0.05$, L 为图像总灰度级。

(2) 信息熵(entropy),式为

$$Entropy = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i \quad (6)$$

式中, p_i 为灰度量级 i 在整个灰度级 L 上的分布。

(3) 交叉熵(cross entropy, CE),式为

$$CE(I_o, I_F) = \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 \frac{p_i}{q_i} \quad (7)$$

式中, p_i 为源图像上灰度量级 i 在整个灰度级 L 上的分布, q_i 为融合图像上灰度量级 i 在整个灰度级 L 上的分布。

(4) 清晰度(definition),式为

$$\begin{aligned} Definition &= \frac{1}{MN} \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \\ &\quad \sqrt{\frac{[I(i, j) - I(i, j+1)]^2 + [I(i, j) - I(i+1, j)]^2}{2}} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, M 和 N 为图像的尺寸大小。 $I(i, j)$, $I(i, j+1)$, $I(i+1, j)$ 分别为像元 (i, j) , $(i, j+1)$, $(i+1,$

j) 处灰度值。

空间信息指数中, $SSIM$, 信息熵, 清晰度与图像质量正相关, CE 与图像质量负相关。

1.2 面向对象的分类方法

面向对象的分类方法不针对单个像素,而是考虑由像素异质性准则分割得到的影像对象,其图像分割准则可表示为

$$w_1 \sum_c w_c \sigma_c + w_2 \frac{l}{A} + w_3 \frac{l}{b} \leq h * \quad (9)$$

式中, $h *$ 为异质性阈值, w_1, w_2, w_3 分别为颜色、紧密度、光滑度的权值, σ_c 为对象内部各像元标准差, w_c 为对象内部各像元的权值, 紧密度表示为对象周长与对象面积的比值 $\frac{l}{A}$, 光滑度为对象周长与同

面积对象最短周长的比值 $\frac{l}{b}$ 。

面向对象的分类过程是在 2 个图层上实现的。在图层 1 上对象被分为水体和非水体两大类, 分割尺度为 30, 形状因子与颜色因子分别为 0.6 和 0.4。依据归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)区分水体与非水体。NDWI 值大于 0.2 的对象为水体, 否则为非水体。图层 2 是在图层 1 分出来的“非水体”地物大类上展开的, 尺度为

20, 颜色、形状因子与图层 1 赋值相同。近红外波段平均亮度值大于等于 220 的对象为芦苇沼泽, 小于 220 为其它地物。为了继续细分, 引入归一化差异植物指数(normalized difference vegetation index, NDVI), 近红外波段平均亮度值大于 140 并且 NDVI 大于 0.3 的对象为米草沼泽。新的 NDVI 阈值(0.2)用来区分裸地与剩余未分类出来的地物, 再次利用红波段平均亮度值来区分, 红波段平均亮度值小于 65 为水稻田, 大于 65 为其他地物(包括田间小路等), 之后合并各地物分类结果。最后, 利用随机采样的测试点对分类精度进行评价, 采用混淆矩阵和 Kappa 系数得到分类精度评价结果。

2 实验与分析

2.1 研究区与数据源

研究区位于江苏省盐城市国家级珍禽自然保护区, 为典型的沿海潮淤泥质滩涂湿地。以 2012 年 11 月 1 日获取的 ZY-3 卫星 MS 与 PAN 图像为数据源, 如图 1(a) 和图 1(b) 所示, 其中图 1(a) 是真彩色 RGB 合成图, 大小为 1000×1000 像元。4 种融合方法得到的融合图像分别为图 1(c)、图 1(d)、图 1(e) 和图 1(f)。

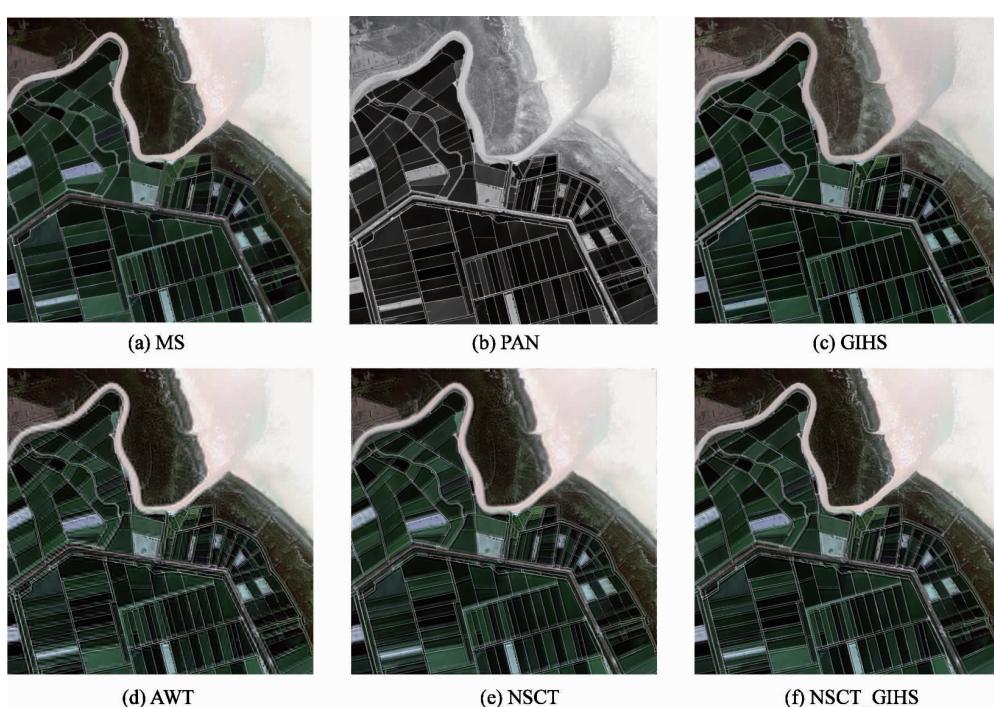


图 1 (a) MS,(b) PAN,(c)~(f) 分别是 GIHS,AWT,NSCT 和 NSCT_GIHS 融合后图像

2.2 融合方法定量评价

采用 CC、RD、RMSE 和 PSNR 4 个光谱指数评价不同融合图像的光谱保真度。不同融合方法得到的光谱信息指数统计结果如表 1 所示。NSCT _ GIHS 融合图像质量最优,体现在最低的 RD 和 RMSE 值,最高的 CC 和 PSNR 值。同时这 4 个光谱指数中,PSNR 和 RMSE 值变化幅度较大, RMSE 值

从 GIHS 到 NSCT _ GIHS 变化幅度是从 34.715 至 18.8949,PSNR 值从 17.2886 到 22.445,除了特有的物理意义外,很好的图像质量区分度是 PSNR 和 RMSE 被广泛用于评价图像质量的原因。这 4 种融合方法相关系数都大于 0.9,也再次说明了本研究采用的 4 种融合方法结果都较好地保持了源图像的光谱特征。

表 1 不同融合方法得到的融合图像光谱信息指数统计

光谱信息指数	融合方法			
	GIHS	AWT	NSCT	NSCT _ GIHS
CC	0.9013	0.9435	0.9461	0.9725
RD	0.6157	0.437	0.4109	0.2915
RMSE	34.715	27.0627	26.3957	18.8949
PSNR	17.2886	18.8877	19.1497	22.4455

采用熵、CE、SSIM 和清晰度 4 个空间信息指数评价不同融合图像的空间保真度。不同融合方法得到的空间信息指数统计结果如表 2 所示。GIHS 融合图像的交叉熵值远远高于 AWT,NSCT 和 NSCT _ GIHS,说明 GIHS 融合图像质量远远低于其余 3 种

融合图像,同时说明了交叉熵对质量差别明显的图像区分度高。同时,NSCT _ GIHS 的 SSIM 最高,SSIM 值从 GIHS 到 NSCT _ GIHS 增加了 0.2912,结构相似度由于综合考虑了图像亮度、对比度和结构度,对图像质量的区分度明显。

表 2 不同融合方法得到的融合图像空间信息指数统计

空间信息指数	融合方法			
	GIHS	AWT	NSCT	NSCT _ GIHS
Entropy	7.5278	7.389	7.3832	7.3888
CE	0.366	0.0526	0.0447	0.0388
SSIM	0.5724	0.7156	0.742	0.8636
Definition	8.9982	10.041	9.7955	10.2177

2.3 面向对象的湿地分类效果比较

基于 ZY-3 源 MS 图像和 MS-PAN 融合图像提取江苏沿海湿地类型,利用随机采样的 200 个测试点对分类精度进行评价,结果如表 3 所示。

对于源 MS 图像,分类总体精度和 Kappa 系数分别为 92.54% 和 0.8914。较优的分类结果归因于 ZY-3 空间分辨率高且光谱信息丰富。然而,芦苇沼泽生产者精度仅为 69.23%,而芦苇沼泽使用者精度是 5 种分类结果中最优的,值为 90.00%,“其它”生

产者精度和使用者精度均低,分别为 77.78% 和 73.68%。

对于 GIHS 融合图像,相较于源 MS 图像,分类总体精度降低,总体精度和 Kappa 系数分别为 83.50% 和 0.7678。米草沼泽、稻田、裸地和“其它”的生产者精度和使用者精度均降低,芦苇沼泽的生产者精度为 91.67%,是 5 种分类结果最高的。GIHS 融合方法得到的融合图像分类结果混淆严重,是由于 GIHS 融合方法严重的光谱扭曲导致的。

表3 不同融合图像的湿地分类结果比较

图像	精度评价	芦苇沼泽	米草沼泽	水体	稻田	裸地	其它
MS	使用者精度/%	90.00	90.63	94.87	96.94	100	73.68
	生产者精度/%	69.23	90.63	100	95.96	100	77.78
	总体精度/%			92.54			
	Kappa 系数			0.8914			
GIHS	使用者精度/%	55.00	95.45	97.37	87.37	100	56.52
	生产者精度/%	91.67	61.76	100	91.21	66.67	56.52
	总体精度/%			83.50			
	Kappa 系数			0.7678			
AWT	使用者精度/%	84.62	90.91	97.37	98.91	100	90.91
	生产者精度/%	84.62	90.91	100	97.85	66.67	95.24
	总体精度/%			95.52			
	Kappa 系数			0.93701			
NSCT	使用者精度/%	80.00	96.88	100	96.91	75	84.21
	生产者精度/%	88.89	91.18	100	96.91	100	84.21
	总体精度/%			95.00			
	Kappa 系数			0.9275			
NSCT _ GIHS	使用者精度/%	75	87.88	100	98.95	100	94.74
	生产者精度/%	69.23	90.63	100	100	100	90
	总体精度/%			96.00			
	Kappa 系数			0.9425			

对于 AWT 融合图像,相较于源 MS 图像的分类效果,除了芦苇沼泽,其余湿地类型分类精度均提高,总体精度和 Kappa 系数分别为 95.52% 和 0.93701。采用 NSCT 融合方法得到的融合图像总体分类效果与 AWT 分类结果接近,总体精度和 Kappa 系数分别为 95.00% 和 0.9275。然而,对于单一地物分类精度却不同,米草沼泽和水体提取精度达到 5 种分类结果最高值,米草沼泽生产者精度和使用者精度分别为 91.18% 和 96.88%,可见,NSCT 融合方法对提取米草沼泽是有利的。

NSCT _ GIHS 融合图像,水体,稻田,裸地生产者精度和使用者精度均为 5 种分类结果中最优值,总体分类结果和 Kappa 系数分别为 96.00% 和 0.9425。芦苇沼泽和米草沼泽分类结果不高,这是由于二者光谱特征相近造成的。从上述分析可知,NSCT _ GIHS 总体分类效果是最优的,这一结论与融合质量定量评价结果是一致的。

3 结 论

本文从定量评价和面向遥感应用的层面对不同融合方法的结果进行评价。定量评价通过构建光谱信息指数和空间信息指数,面向遥感应用的评价方法是基于 ZY-3 MS-PAN 图像的面向对象分类方法。以江苏沿海湿地区为例,分析了 GIHS、AWT、NSCT 和 NSCT _ GIHS4 种融合方法融合效果的差异性。定量评价结果表明,GIHS 变换光谱扭曲严重,AWT 和 NSCT 两种融合方法结果相当,NSCT _ GIHS 融合图像从光谱和空间特征保真度两方面都为最优。面向对象的分类结果表明,NSCT _ GIHS 融合图像的总体分类精度和 Kappa 系数分别为 96.00% 和 0.9425,且多数湿地类型分类精度均有所提高。研究表明,面向对象的湿地分类评价结果与定量评价结果相一致。

参考文献

- [1] 肖锦成, 欧维新, 符海月. 基于 BP 神经网络与 ETM + 遥感数据的盐城滨海自然湿地覆被分类. 生态学报, 2013, 33 (23) : 7496-7504
- [2] Li L, Luo H, Zhu H H, et al. User-oriented image quality assessment of ZY-3 product in agriculture area. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Agro-Geoinformatics: Information for Sustainable Agriculture, Fairfax, USA, 2013. 22-27
- [3] 李芬. 资源三号卫星数据在土地利用遥感监测中的应用研究: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学地球探测科学与技术学院, 2013. 22-72
- [4] 余姚峰. 基于资源三号卫星影像的高铁安全控制区建筑用地信息提取研究: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 2013. 50-60
- [5] Huang X, Wen D W, Xie J F, et al. Quality assessment of panchromatic and multispectral image fusion for the ZY-3 satellite: From an information extraction perspective. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 11 (4) : 753-757
- [6] Qian J, Zhou Q M, Hou Q. Comparison of pixel-based and object-oriented classification methods for extracting built-up areas in arid zone. In: ISPRS Workshop on Updating Geo-Spatial Databases with Imagery & the 5th ISPRS Workshop on DMGISs, Urumqi, Xinjiang, China, 2007. 163-171
- [7] Gao Y, Mas J F, Maathuis B H P, et al. Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches-a case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27 (18) : 4039-4055
- [8] Pankiw J, Piwowar J. Seasonality of imagery: the impact on object-based classification accuracy of shelterbelts. In: Prairie Perspectives: Geographical Essays Vol (13), University of Winnipeg, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2010. 39-48
- [9] Xie Z X, Roberts C, Johnson B. Object-based target search using remotely sensed data: a case study in detecting invasive exotic Australian Pine in south Florida. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63 (6) : 647-660
- [10] Jiang T, Hao M, Zhu H C. The study of remote sensing image fusion based on GIHS transform. In: IEEE 2nd International Congress on Image and Signal Processing, Tianjin, China, 2009. 1-4
- [11] Shensa M. The discrete wavelet transform: wedding the a trous and Mallat algorithms. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1992, 40 (10) : 1-4
- [12] Cunha A L, Zhou J P, Do M N. The nonsubsampled contourlet transform: theory, design, and applications. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15 (10) : 3089-3101
- [13] 卫薇, 王忠武, 汪承义. 一种遥感图像融合质量评价方法. 中国图象图形学报, 2009, 14(8) : 1488-1493
- [14] 陈超, 秦其明, 王金梁等. 农地遥感图像融合质量评价方法比较. 农业工程学报, 2011, 27(10) : 95-100

Quality assessment of fusion of ZY-3 multispectral and panchromatic images for coastal wetland areas

Wu Ruijuan*, He Xiufeng*, Wang Jing**

(* School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

(** China Institute of Land Surveying and Planning, Beijing 100035)

Abstract

The study was conducted to assess the fusion of the ZY-3 satellite's multi-spectral (MS) images and panchromatic (PAN) images from the angles of coastal wetland classification comparison and quantitative analysis. Four MS-PAN fusion methods of generalized intensity-hue saturation (GIHS) transformation, à trous wavelet transformation (AWT), nonsubsampled Contourlet transformation (NSCT) and NSCT-GIHS (NSCT-GIHS combination) were used to achieve the fusion of ZY-3 images, and spectral information indices as well as spatial information indices were utilized to quantitatively assess the quality of the fusion products. The assessment results showed that the fusion quality of the NSCT_GIHS was superior to that of other three fusion methods from the spectral and spatial fidelity view. Meanwhile, an object-based classification approach was developed for coastal wetland mapping. The classification results demonstrated that NSCT_GIHS based image obtained the highest overall accuracy and Kappa coefficient, 96% and 0.9425. It was obvious that wetland classification result was consistent with quantitative assessment.

Key words: ZY-3 satellite, image fusion, image fusion quality assessment, object-oriented classification, coastal wetland