

泰国 THEOS 遥感影像质量评价

姚 成¹, 赵晋陵²

(1. 安徽财贸职业学院电子信息系, 合肥 230601; 2. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 合肥 230039)

摘 要: 选取泰国 THEOS (Thailand earth observation satellite) 卫星影像作为研究对象, 提出从图谱成像质量和专题地类提取性能评价影像应用潜能。采用不同地类的像元均值表征影像的光谱质量; 选取灰度共生矩阵 GLCM (Grey level co-occurrence matrix) 计算得到的角二阶矩 ASM (angular second moment)、相关性 (correlation)、对比度 (contrast) 和熵 (entropy) 评价影像的图像质量; 利用面向对象的分类方法评价影像的地物解析能力。结果表明: (1) 耕地、城市和林地的均值分别为 121.14、73.70 和 137.62, 说明 THEOS 影像对不同地物有较好的区分性能; (2) 对比度和熵的均值最大 (分别为 18.93 和 2.88), 可以用于表征 THEOS 影像丰富的纹理信息; (3) 2 m 分辨率 THEOS 融合影像可以较好地提取均一地类, 但解析多种地类混合的区域效果较差。本研究可为 THEOS 卫星数据在我国的广泛应用提供参考。

关键词: THEOS 卫星; 影像质量评价; 图谱特征; 多光谱遥感

中图分类号: P237

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2015)02-0316-06

Quality evaluation of the THEOS satellite imagery using textural and spectral features

YAO Cheng¹, ZHAO Jinling²

(1. Department of Computer, Anhui Finance & Trade Vocational College, Hefei 230601;

2. Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039)

Abstract: The THEOS (Thailand earth observation satellite) image quality was evaluated through the spectral and texture quality for imaging and the capability for identifying thematic land-cover types of three methods. Firstly, the mean of pixel values were used to assess the spectral discrimination. Secondly, the ASM (Angular second moment), correlation, contrast and entropy, derived from the GLCM (Grey level co-occurrence matrix), were used to represent the texture features of imagery. Finally, the object-oriented classification method was used to identify the thematic land-cover types. The analysis results were as follow. (1) The mean grey values of crop-land, built-up and forestland were 121.14, 73.70 and 137.62, respectively, which indicated that THEOS imagery has good capability in identification of different land cover types; (2) The contrast and entropy (their means were 18.93 and 2.88, respectively) were better to show the texture information; (3) The results were good for homogeneous land covers, but poor for the regions with the mixed types of land covers. This study provides a good reference for a wide utilization of THEOS in China.

Key words: THEOS; image quality assessment; spectral and image features; multispectral remote sensing

泰国 THEOS (Thailand earth observation satellite) 于 2008 年 10 月 1 日, 在俄国 YASNY 发射基地, 搭载 Dnepr 火箭成功发射。其上搭载空间分辨率为 2 m 的全色 (22 km 幅宽) 与 15 m 的多光谱 (90 km 幅宽) 两组传感器, 具有成像周期短、机动性能好等特点。但是, 该影像主要用于城市土地资源调

查、森林火灾监控、矿业、农业、交通、自然资源管理、数字地形模型、地表变化监测等。Liu 等^[1]评价通用物理传感器定位模型 G 在 2 m 分辨率 THEOS 影像几何校正中的性能。Suwanwerakamtorn 等^[2]基于多期 Landsat 和 THEOS 影像监测泰国北部森林保护区中的农业耕作侵占情况。Asadpour 等^[3]

收稿日期: 2014-11-18

基金项目: 安徽省高等教育振兴计划专业带头人项目 (皖教秘人 (2013) 189 号), 安徽省自然科学基金 (1408085QF126) 共同资助。

作者简介: 姚 成, 副教授。E-mail: yao234@163.com

利用实测的马来西亚槟榔屿水质数据和 THEOS 数字影像的光学特性, 构建经验模型预测总悬浮固体量 (total suspended solids, TSS) 参数。Senanayake 等^[4]利用 THEOS 影像计算 NDVI 植被指数, 结合遥感和 GIS 技术提取斯里兰卡首都科伦坡的绿地面积。Lim 等^[5]基于 THEOS 影像数据, 采用两波段算法绘制总悬浮固体量 TSS 的空间分布。

分析上述文献可以发现, THEOS 影像主要应用于东南亚国家。在中国国内, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心自 2011 年 11 月份才开始接收、处理和分发泰国 THEOS 卫星数据, 利用密云、喀什和三亚卫星数据接收站进行 THEOS 卫星数据的接收、处理、存档, 并获得 THEOS 数据在中国的独家商业分发权。针对遥感影像的质量评价, 国内外研究者已经做了一些工作。何中翔等从遥感图像构像质量和几何质量两个方面探讨遥感图像客观质量评价方法^[6]。Wang 等提出了与人眼感知图像失真非常接近的客观评价方法结构相似度算法 SSIM (structural similarity)^[7]。翟亮等提出从几何质量角度评价遥感影像质量的方法^[8]。可以发现, 先前的遥感质量评价方法只是选用某一个指标评价遥感影像的质量, 缺少对影像光谱和成像质量以及对地物解析性能的综合评价。

相比 Landsat 和 SPOT 系列卫星, THEOS 影像在中国的认知度和使用频率都较低。为了丰富我国资源与环境调查的遥感数据源, 有必要对 THEOS 影像的数据质量和专题地类提取性能进行定量评价。本研究选用中国科学院对地观测与数字地球科学中心免费提供的扬州地区 THEOS 样例影像, 从成像质量和专题地类提取 2 个方面, 对影像进行图谱特征解析和土地覆盖类型提取能力评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扬州市地处江苏省中部, 位于长江北岸、江淮平原南端, 北纬 32°15′~33°25′、东经 119°01′~119°54′之间 (图 1)。境内地形西高东低, 属于亚热带季风性湿润气候向温带季风气候的过渡区。图中的 THEOS 影像为直方图均衡化后的效果 (近红外 R、红 G 和绿 B 假彩色合成), 可以看出影像并没有覆盖整个扬州市, 只覆盖了一半多的面积, 但影像范围内地物类型丰富, 主要包括: 水体、耕地、城市不透水层、林地等, 可以为评价 THEOS 影像的成像质量和专题地类提取能力提供良好的数据。

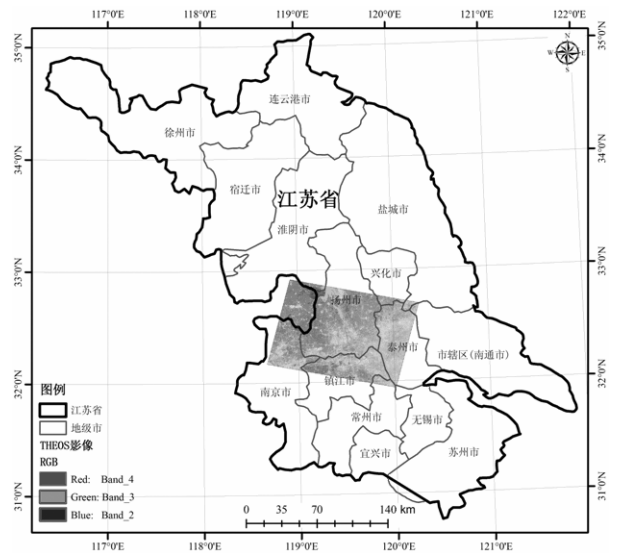


图 1 研究区空间位置图

Figure 1 The location map of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 数据获取与预处理 THEOS 数据产品分为 1A 和 2A 2 种处理级别的 3 种产品类型 (辐射校正、几何校正和 Pan-Sharpned); 采用的坐标系统为 WGS-84, UTM 通用横轴墨卡托投影, 带号为 50N; 包括影像文件与元数据文件 2 部分, 其中影像文件为 GeoTIFF 格式, 文件名为 IMAGERY.TIF; 元数据文件为 XML 格式, 文件名为 METADATA.DIM。表 1 为 THEOS 卫星搭载的传感器技术参数。研究所用样例数据为中国科学院对地观测与数字地球科学中心 (ftp://159.226.224.8) 免费提供的扬州地区泰国 THEOS 卫星影像, 包括 2A 处理级别的多光谱和全色影像。

THEOS 影像预处理包括几何校正和大气校正^[9]。几何校正所需参考影像选取已经做过正射校正的 Landsat GeoCover 产品 (<http://glcf.umd.edu/>)。为了确保两种影像的像元在同一个空间尺度上, 先利用最邻近法 (nearest neighbor) 将 THEOS 影像重采样为 28.5 m, 基于二次多项式进行几何校正, 保证均方根误差 RMSE (Root mean square error) 在 0.5 个像元内 (图 2 为校正前后的全色波段影像对比)。大气校正主要分为 3 个步骤: (1) 利用影像头文件携带的增益系数 (Gains), 将原始影像的 DN (digital numbers) 值转换为传感器处的光谱辐亮度 (公式 1); (2) 将传感器处的光谱辐亮度转换为大气顶层 TOA (Top-of-the-atmosphere) 表现反射率 (公式 2); (3) 将 TOA 表现反射率转换为地表反射率^[9]。

$$L_{\lambda THEOS}^i = \frac{DN^i}{G^i} \quad (1)$$

式中, $L_{\lambda THEOS}^i$ 表示 THEOS 第 i 波段在传感器处的光谱辐亮度 ($Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); DN^i 表示像元在第 i 波段 DN 值; G^i 表示第 i 波段的增益系数 ($Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$).

$$\rho_{TOA}^i = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda}^i \cos(\theta_s)} \quad (2)$$

式中, ρ_{TOA}^i 表示大气顶层的表观反射率 (无量纲); d 表示日地距离 (天文单位); $ESUN_{\lambda}^i$ 表示平均大气外部太阳辐照度 ($Wm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$); θ_s 表示太阳天顶角.

表 1 THEOS 卫星搭载的全色和多光谱传感器参数

Table 1 Specifications of panchromatic and multispectral sensors of THEOS satellite

传感器参数 Sensor parameter	全色 (MS) Panchromatic	多光谱 (PAN) Multispectral
空间分辨率/m Spatial resolution	2	15
成像幅宽/km Image breadth	22	90
光谱范围/ μm Spectral region	0.45~0.90	B1 (蓝 Blue): 0.45~0.52 B2 (绿 Green): 0.53~0.60 B3 (红 Red): 0.62~0.69 B4 (近红外 NIR): 0.77~0.90
成像动态范围/bits Dynamic range of image information	8 或 12	
视场角/ $^{\circ}$ Field angle	1.528	6.438
重访周期/d Revisiting period	26	
侧摆角/ $^{\circ}$ Side sway angle	± 50	

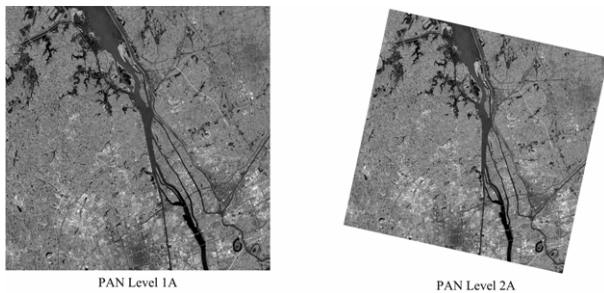


图 2 几何校正前后的 THEOS PAN 影像

Figure 2 Pan images of pre- and post-geometric correction

1.3 研究方法

1.3.1 灰度直方图 (histogram) 灰度直方图表达图像灰度级分布的概率, 反映不同灰度值的像元面积或像元个数在图像中所占的比例 (公式 3)。灰度分布范围则反映了图像信息量的丰富程度, 同一地区的不同图像, 灰度分别范围越大, 表明图像反映的信息越丰富。

$$hist_{DN} = count(DN)/N \quad (3)$$

式中, DN 表示某一像元的值, N 表示影像的总像元数目。

1.3.2 灰度共生矩阵 GLCM (grey level co-occurrence matrix) 纹理信息可以表达遥感影像中目标地物内部色调有规则变化造成的影像结构, 是评价影像空间成像质量的重要指标。GLCM 方法被认为是影像纹理信息分析非常有效方法^[10-11]。常用的统计特征量有对比度 (contrast)、相关性

(correlation)、熵 (entropy)、角二阶矩 ASM (angular second moment) 等 (表 2)。为了降低 THEOS 影像各波段之间的冗余性, 首先对影像进行主成分变换 PCA (principal component analysis), 选取第一主分量计算 GLCM 纹理特征量 (二次统计量), 对影像进行纹理特征评价。

表 2 基于灰度共生矩阵 GLCM 的纹理统计特征量

Table 2 Description of four GLCM texture feature operators

纹理量 Texture feature	计算公式 Computational formula
对比度 Contrast	$f_{contrast} = \sum_{n=0}^{L-1} i-j ^2 \hat{p}(i,j)$
相关性 Correlation	$f_{correlation} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \hat{p}(i,j) \left[\frac{(i-\mu_i)(j-\mu_j)}{\sigma_i \sigma_j} \right]$
角二阶矩 Angular second moment	$f_{ASM} = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \hat{p}(i,j)^2$
熵 Entropy	$f_{entropy} = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \hat{p}(i,j) \ln \hat{p}(i,j)$

表 2 中, L 表示压缩后的影像灰度级数; $\hat{p}(i,j)$ 为灰度共生矩阵中 i 行 j 列的元素, 指归一化后的灰度共生矩阵; μ 为 $\hat{p}(i,j)$ 的均值; σ 为 $\hat{p}(i,j)$ 标准差。

1.3.3 面向对象的分类方法 随着各国高分辨率卫星的陆续发射, 遥感影像的分辨率也在不断提高。传统的基于像元尺度的分类方法已不能满足人们对

分类精度和分类效率的需求。相比之下,面向对象的分类方法能够利用对象丰富的光谱和空间信息(如大小、形状、结构、纹理、分布等)进行图像处理、分析、分类等操作,极大弥补了传统分类方法的不足^[12-15]。该方法首先将影像分割成对象特征,然后在对象的基础上进行分类研究。主要的工作流程分为发现对象和特征提取(图3)。

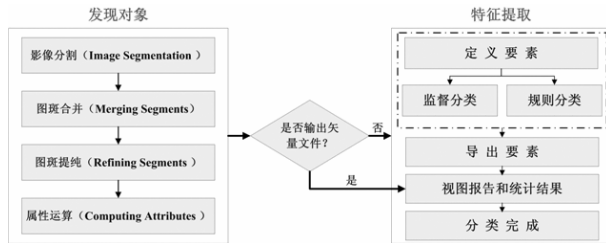


图 3 面向对象的分类流程图

Figure 3 Workflow for the object-oriented classification method

2 结果与分析

2.1 典型地类直方图分布特征

为了减少计算量和程序运行时间,从 THEOS 影像包含的各种地物类型中,选取耕地、城市、林地三种典型土地覆盖类型(图 4A),绘制对应的灰度直方图(图 4B)。从波形的特征点和分布范围可以得出:影像上地物平均辐射亮度为林地(c) > 耕地(b) > 城市(a)。主要原因是地物辐射量的大小决定了灰度值的大小:当图像中的大部分像素为低值时,图像呈现暗特性;反之,则呈现亮特性。图像的灰度分布范围则反映了图像信息量的丰富程度,灰度分布范围越大,表明图像反映的信息越丰富。在城市影像中,主要以建筑物、道路等不透水层为主,大部分像素的 DN 值较小,整体呈现暗色调,但由于包含城市用地、耕地、林地、水体等多种地物类型,所以灰度分布范围大,包含的信息量更丰富;相比城市,耕地和林地以绿色植被为主,在假彩色合成影像中表现为红色区域,两者各波段的波形非常相似。以 3 种地类的近红外波段为例,它们 DN 值的均值分别为:121.14、73.70 和 137.62,说明 THEOS 影像对不同地物类型有较好的区分性能。

2.2 影像纹理特征

为了提高运算效率,减少运算时间,选取包含以城市为主的裁剪影像,对其第一主成分进行纹理分析。首先,对影像进行主成分分析,将第一主成分(PC1)灰度级压缩到 64 级;然后,采用 5×5 的运算窗口,像元对 x 和 y 方向均偏置 1,生成灰度

共生矩阵的角二阶矩、相关性、对比度和熵 4 种纹理特征图像(图 5)。4 种纹理特征量的均值和方差分别为:0.06, 0.02; -34.65, 78.75; 18.93, 9.38; 2.88, 0.57。对比度的均值最大,表明图像的清晰度越高,纹理的沟纹越深,边缘和非均质区域都具有较高的亮度值,成像效果越好;其次是熵的均值,表明图像中纹理复杂程度较大,图像中灰度差异大。由于城市居民地纹理丰富,影像的灰度变化比较大,在不同地物的边界处(道路、河流等),纹理特征值出现跃变,熵、角二阶矩和对比度值都比较大。

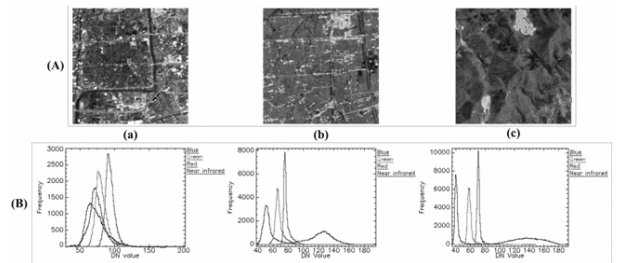


图 4 典型地类的灰度直方图

Figure 4 Histograms of typical land-cover types

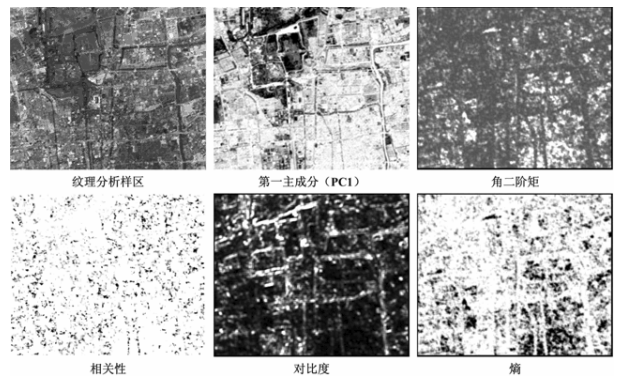


图 5 4 种 GLCM 纹理变量分析图

Figure 5 Figures of four GLCM texture measures

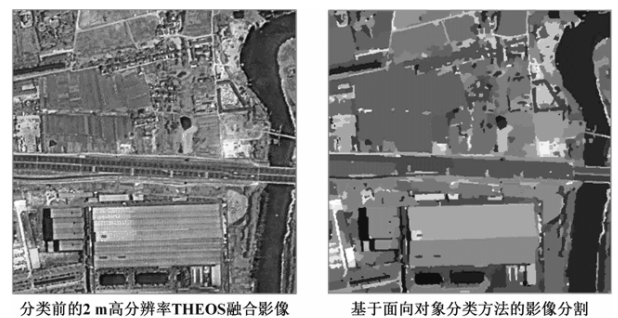


图 6 基于面向对象分类方法得到的分类矢量图

Figure 6 The classified map derived from the fused THEOS image with 2 m resolution

2.3 专题地类解析

基于融合后的 2 m 分辨率影像,利用面向对象的分类方法提取 THEOS 影像中的主要地类,评

价其解析不同地物的能力。为了减少运行时间和计算量,选取包含耕地、建筑用地、林地、水体等多种地物类型的裁剪影像进行分类实验,得到图6所示的不同地类的分类矢量图。由分类结果可知,水体、大块耕地、建筑物、道路、大桥等地物被正确提取,且边缘较为平滑;郊区居民地由于混杂有农田、树木、建筑物等多种地类,使得分类结果较差,不同地类的内部和连接处出现细碎的图斑。

3 讨论

作为泰国第一颗对地观测卫星它搭载2 m 全色(22公里幅宽)与15 m 多光谱(90 km 幅宽)2组传感器,具有成像周期短、机动性能好等特点,可以前后、左右侧摆成像,正常情况下为±30°,紧急情况下可达±50°,从而可实现对同一地区的高频重复观测;其15 m 多光谱数据在一定程度上可以替代LANDSAT-5号卫星数据(已于2011年10月份基本停止成像)。泰国作为与我国邻近的国家,其卫星数据的重点获取区域将会集中于泰国周边区域,将为我国广西、广东、海南等沿海省份以及内蒙、宁夏、甘肃等西北干旱半干旱地区的资源与环境监测提供丰富的遥感数据源。图7所示为覆盖我国境内的已有THEOS卫星数据示意图(图片来源:ftp://159.226.224.8),表明我国大部分地区已经可以利用该遥感数据源开展资源环境相关研究。尤其是利用其2 m 高空间分辨率的优势,用于我国土地资源调查和某些专题地类的高精度解析。

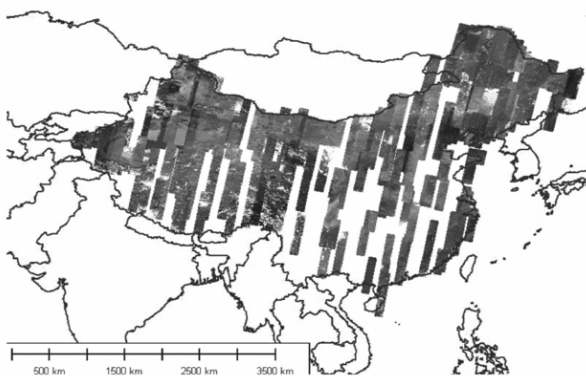


图7 THEOS卫星已有存档数据覆盖图

Figure 7 Cover map of archived THEOS images of China

表3为THEOS与中国HJ1-A/B、中巴资源卫星CBERS-02B、美国Landsat 8等卫星参数对比,可以看出该卫星在多光谱和全色影像的空间分辨率上占优、但在成像幅宽、重访周期和波段数方面一般。因此,在利用THEOS卫星影像进行资源环境监测时,要充分利用其空间分辨率较高的特点,通

过与其他多光谱影像进行融合,可提高其解析地物类型的精度和效率。Phongaksorn等对比了THEOS和Landsat 5 TM的蓝、绿、红和近红外波段的光谱响应曲线(图8)^[9]。可以看出,相比Landsat 5 TM,THEOS 4个波段的光谱范围更宽;蓝、绿和红波段光谱响应交叉范围缩小,表明波段之间的相关性变小,数据冗余降低;光谱响应曲线的斜率更大,同横坐标轴相交几乎为直角,响应的光谱范围更准确。由于传感器探测元件的性能制约以及大气效应的存在,某一波长宽度范围内的入射辐亮度并不能完整地 被 遥 感 器 接 收 并 记 录,理 论 上 决 定 了 不 可 能 出 现 矩 形 的 光 谱 响 应 函 数^[16]。光谱响应曲线的形状越接近矩形,表明传感器记录的辐射能量越多。因此,THEOS 4个波段所能接收的辐射能量更多,且波段之间的信息冗余更少。

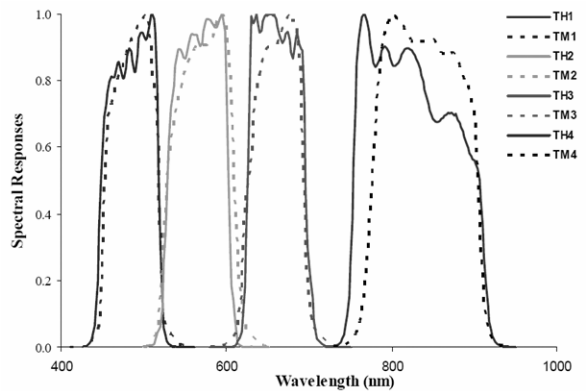


图8 THEOS与Landsat 5 TM光谱响应曲线对比

Figure 8 Comparison of spectral responses between THEOS and Landsat 5 TM

作为新型的遥感数据源,在正式推广应用前必须进行相关的数据质量评价和预处理工作^[17-19]。基于上述分析和THEOS遥感数据刚在中国使用,其相关的数据质量评价和专题应用还未充分开展。中国的研究者利用该影像开展资源环境方面的相关研究较少,只是选取影像的某一方面开展质量评价研究或者针对某一个具体的领域进行专题应用^[20-21];国外的研究主要集中于东南亚相关国家的地类解析与环境调查。本研究选取扬州地区的一景样例影像,在基于图谱特征评价影像质量的基础上,选取融合后的高分辨率影像进行面向对象的专题分类试验,发现THEOS影像由于多光谱波段较少,尤其缺乏短波红外波段,影响了某些地类的分类精度和分类结果的均一性。后续研究可以尝试将THEOS的全色影像与Landsat 8的多光谱影像进行融合,开展更加丰富的专题应用。

表 3 THEOS 与其他卫星的参数对比
Table 3 Comparison of specification among THEOS and other satellites

传感器 Sensor	多光谱影像 Multispectral image				全色影像 Panchromatic image			
	波段设置/ μm Waveband setting	空间分辨率/m Spatial resolution	成像幅宽/km Image breadth	重访周期/d Revisiting period	波段设置/ μm Waveband setting	空间分辨率/m Spatial resolution	成像幅宽/km Image breadth	重访周期/d Revisiting period
THEOS	0.45~0.90(4)	15	90	26	0.45~0.90	2	22	26
HJ1-A/B	0.43~0.90(4)	30	360(单台) 700(二台)	4	-	-	-	-
CBERS-02B	0.45~0.89(5)	20	113	26	0.50~0.80	2.36	27	104
Landsat 8	0.43~2.29(9)	30	185	16	0.50~0.68	15	185	16

4 结论

THEOS 影像上不同地物类型的灰度直方图差异较大,说明该影像对不同地物具有较好的区分度;对其多光谱影像的纹理特征进行解析,证明了影像的纹理信息、清晰度高。同时,THEOS 卫星成像时可以获取同一区域 15 m 分辨率的多光谱影像和 2 m 分辨率的全色影像,将两者进行融合后,可以同时保留多光谱影像的波谱信息和全色影像的纹理信息,极大丰富了影像的地物解析和提取能力。

参考文献:

- [1] Asadpour R, Lim H S, Alashloo M M, et al. A statistical model for mapping spatial distribution of total suspended solid from THEOS satellite imagery over Penang Island, Malaysia [J]. *Journal of Applied Sciences Research*, 2012, 8(1): 271-276.
- [2] Liu S J, Fraser C S, Zhang C S. Georeferencing performance of THEOS satellite imagery [J]. *The Photogrammetric Record*, 2011, 26(134): 250-262.
- [3] Suwanwerakamtorn R, Pimdee P, Mongkolsawat S, et al. The application of satellite data to monitor the encroachment of agriculture on forest reserve in the Phu Luang Wildlife Sanctuary, Loei Province, Northeast of Thailand [J]. *Journal of Earth Science and Engineering*, 2011, 1(3): 169-176.
- [4] Senanayake I P, Welivitiya W D D P, Nadeeka P M. Urban green spaces analysis for development planning in Colombo, Sri Lanka, utilizing THEOS satellite imagery—A remote sensing and GIS approach [J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2013, 12(3): 307-314.
- [5] Lim H S, Matjafri M Z, Abdullah K, et al. A two-band algorithm for total suspended solid concentration mapping using THEOS data [J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(3): 624-630.
- [6] 何中翔, 王明富, 杨世洪, 等. 遥感图像客观质量评价方法研究 [J]. *工程图学报*, 2011(6): 47-52.
- [7] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [8] 翟亮, 唐新明, 张过, 等. 遥感影像压缩质量评价的研究与应用 [J]. *武汉大学学报*, 2009, 34(3): 289-292.
- [9] Phongaksorn N, Tripathi N K, Kumar S. et al. Inter-sensor comparison between THEOS and Landsat 5 TM data in a study of two crops related to biofuel in Thailand [J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(2): 354-376.
- [10] Haralick R M, Shanmugan K, Dinstein I. Textural features for image classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, 3(6): 610-621.
- [11] Ohanian P P, Dubes R C. Performance evaluation for four classes of texture features [J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25(8): 819-833.
- [12] Blaschke T. Object based image analysis for remote sensing [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010, 65(1): 2-16.
- [13] 祖琪, 袁希平, 莫源富, 等. 基于面向对象分类方法在 SPOT 影像中的地物信息提取 [J]. *中国岩溶*, 2011, 30(2): 227-232.
- [14] 陈铁桥, 陈杰, 梅小明, 等. 基于多层次场聚类的高分辨率遥感影像分割方法 [J]. *地理与地理信息科学*, 2013, 29(6): 10-13.
- [15] 明冬萍, 骆剑承, 周成虎, 等. 基于简化随机场模型的高分辨率遥感影像分割方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(26): 28-30.
- [16] Trishchenko A P. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors: Extension to AVHRR NOAA-17, 18 and METOP-A [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(2): 335-341.
- [17] 甘淑, 党承林, 欧晓昆. 云南山区 NPP 遥感监测研究中遥感图像预处理 [J]. *云南大学学报: 自然科学版*, 2002, 24(3): 229-233.
- [18] 王艳萍, 姜纪沂, 林玲玲. 高分辨率遥感影像中道路震害信息的识别方法 [J]. *计算机工程与应用*, 2012, 48(3): 173-175.
- [19] 胡洋, 刁晓环, 王成, 等. Pléiades 卫星影像融合方法与质量评价 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(3): 476-481.
- [20] 黄文斌, 安宏锋, 王之明, 等. THEOS 与 LANDSAT-5-TM 卫星影像在山区土地利用遥感监测方面的比较研究 [J]. *环保科技*, 2013, 19(4): 1-5.
- [21] 靳伟国, 靳丽伟, 张银辉, 等. 新型 THEOS 卫星数据融合质量评价 [J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(10): 2367-2371.