

端元匹配的遥感影像地物自适应光谱表征

乔程^{1,2}, 骆剑承¹, 沈占锋¹, 胡晓东¹, 夏列钢^{1,2}

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 光谱信息是遥感识别地物的依据, 而目前已发展的典型地类的光谱指数模型有限, 波谱库中的标准地物类型及其普适性也是有限的. 鉴于此, 提出一种端元匹配的地物自适应光谱表征方法, 通过选取贴合影像本身的端元, 并综合光谱角和距离度量对影像和端元光谱进行综合匹配. 通过 ETM + (Enhanced Thematic Mapper) 影像上对植被、水体与美国地质调查局 (United States Geological Survey, USGS) 波谱库及归一化植被/水体指数的对比实验, 及阴影、裸地等的验证实验, 证实了该方法的有效性和普适性.

关键词: 遥感; 光谱表征; 自适应; 端元选取

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

Adaptive spectral representation of remote sensing objects based on endmember matching

QIAO Cheng^{1,2}, LUO Jian-Cheng¹, SHEN Zhan-Feng¹, HU Xiao-Dong¹, XIA Lie-Gang^{1,2}

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Spectral information is essential for objects recognition in remote sensing imagery. However, objects which have particular indices are rather few, and spectra types of spectral library and their universality are limited either. Therefore, an adaptive spectral representation method of remote sensing objects based on endmember matching is proposed. Proper endmember of imagery itself is selected. Spectral angle and distance, which is between the characteristic vectors of spectra of the interested pixel and a specific endmember, are both considered to form a new way for comprehensive spectral matching. Experiments of vegetation and water were adopted in ETM + (Enhanced Thematic Mapper) images, and were compared to those using USGS (United States Geological Survey) library and normalized difference vegetation index (NDVI) / normalized difference water index (NDWI). Moreover, validations of shadow and bareland images were also carried out to test the effectiveness and universality of the proposed method.

Key words: remote sensing; spectral representation; adaptive; endmember selection

PACS: 07.07.Df

引言

不同地物在各光谱波段所呈现的电磁波性质不尽相同. 这正是遥感识别不同地物的重要标志. 目前为止, 已经发展了多种量化的地物波谱表征方法: 如早期的特征波段阈值区别; 之后, 发展了在多波段的指数模型, 如归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、和归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 等^[1-2]; 近来, 随着高光谱遥感的发展, 利用端元进行光谱匹

配的方法在地物精准识别中得到较为广泛的应用^[3].

上述方法在相应的应用中都获得了较好的效果, 然而, 特征波段阈值方法需要一定的分析才可获得, 并且对于特征不明显的地物则难以获取; 指数模型方法对于诸如植被、水体等特征显著的地物来说较为便捷有效, 对于大多数普遍地物则难以构建; 常用的端元匹配方法一般采用波谱库匹配的方法来查找地物端元, 对于波谱库的依赖较大, 且波谱库中的样本对于特定试验区的适用性也有待商榷. 本文提

收稿日期: 2011-07-16, 修回日期: 2012-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划项目资助 (2011BAH06B02)

Foundation item: Supported by the National Science & Technology Pillar Program of China (2011BAH06B02)

作者简介 (Biography): 乔程 (1986-), 女, 山东平邑人, 博士研究生, 主要研究方向为遥感信息提取, E-mail: qcirsa@163.com.

Received date: 2011-07-16, revised date: 2012-01-18

出了一种通用的端元匹配基础上的地物自适应光谱表征方法,通过地物样本区选取及像元纯净度指数 (Pixel Purity Index, PPI) 计算来获取贴合影像本身的端元,并综合光谱间的光谱角和距离度量影像与端元光谱的匹配度,从而贴切、定量地对地物特征光谱进行表征。

1 端元匹配的自适应光谱表征方法

本文算法流程如图 1 所示。

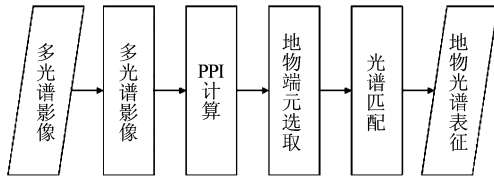


图 1 端元匹配的自适应光谱表征流程

Fig. 1 Flowchart of adaptive spectral representation based on endmember matching

1.1 地物端元自适应选取

对影像进行辐射变换后,在其上选择专题地物的样本区.对样本区影像进行最小噪声分离(MNF)变换,在变换后的样本区内进行 PPI 计算^[4],获得一幅样本区的像元纯度图像,在其上选取具有最大纯净度的像元作为专题地物的端元,并提取其端元光谱.样本中的地物有限并且专题地物占据主导地位.从而,多波段影像也可以采用 PPI 计算提取端元,避免端元数与波段数之间的欠定问题.进一步地,为防止噪声的干扰,对 PPI 值高的像元进行聚类,选取众数种类中的最高值作为端元.

1.2 光谱综合匹配

光谱匹配算法已有许多,如光谱角 (Spectral Angle Mapper, SAM)、光谱特征匹配 (Spectral Feature Fitting, SFF) 方法等^[5,6], 主要都是针对地物的特征吸收波段的匹配.本文实验数据源为多光谱影像,它对地物光谱的表征不如高光谱影像精细,则在光谱匹配方法上应更为详尽.以往的光谱匹配侧重光谱形状,但对于光谱形状相似而反射率分布区间有差异的地物仍然会混淆.本文综合考虑光谱间的距离远近和形状的相似性,利用谱间距离和光谱角构造一种新的综合匹配度指数 (Spectral Matching Index, SMI), 用其计算遥感影像上各像素光谱与专题地物端元光谱的匹配度^[7].

$$SMI(x) = \alpha D'(x) + \beta S'(x) \quad (1)$$

$$D(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - u_i)^2} \quad (2)$$

$$D'(x) = \frac{D(x) - \text{Min}(D(x))}{\text{Max}(D(x)) - \text{Min}(D(x))} \times 255 \quad (3)$$

$$S(x) = \cos^{-1} \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i u_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2}} \right] \quad (4)$$

$$S'(x) = \frac{S(x) - \text{Min}(S(x))}{\text{Max}(S(x)) - \text{Min}(S(x))} \times 255 \quad (5)$$

其中, $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ 为专题端元的光谱特征向量,某像素的特征向量为 $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, n 为特征维数,也即波段数.整体匹配度指数 $SMI(x)$ 如式(1),欧式距离 $D(x)$ 如式(2),光谱角 $S(x)$ 如式(4),且其值域为 $[0, \pi/2]$.此外,分别采用式(3)和式(5)将两个系数归一化到 $[0, 255]$,从而得到具有可比性的 $D'(x), S'(x)$. α, β 分别代表两要素所占的权重,取值范围均为 $[0, 1]$,在本方法将其值都设定为 0.5,以均衡光谱角和距离对光谱匹配的决定作用.最终,得到影像与专题端元的波谱综合匹配度,其值越小匹配度越好.

2 实验

2.1 实验数据

本文选取中国西部的一景 ETM+ 影像的部分区域进行实验,影像大小为 400×400 像素,采用除热红外波段以外的其余 6 个多光谱波段(如图 2(a)).该区域中存在着植被、水体、裸地及阴影等几种典型的自然地物,适于光谱表征实验.

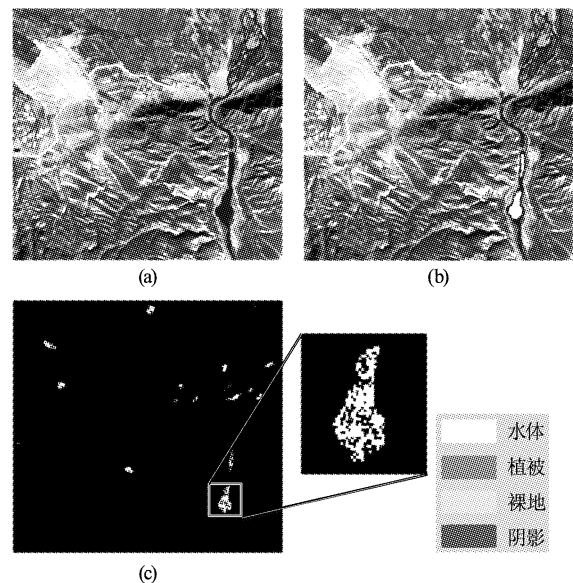


图 2 实验影像(a)和样本区分布图(b)、PPI 影像(c)

Fig. 2 (a) Image in the experimental area (bands combination of 4, 3, 2), (b) Sample regions, (c) PPI image

2.2 实验过程

为了验证方法的有效性与可信度,本文实验设计采用成熟可靠的指数计算和波谱库匹配两种算法与所提方法进行对比验证.其中,指数计算模型,符合地物的光学吸收与反射特性,具有实际的物理意义;波谱库匹配实际为一种统计学方法;本文端元匹配类似于波谱匹配方法,也是一种统计方法,但其典型光谱选取影像自身的端元光谱.由于波谱库中的典型光谱都为特定条件下获取的,从而适用条件有限;而指数模型应用的地物种类也有限,因此端元自适应匹配的方法最为通用.

实验选取样区中植被和水体两种典型地物,借助于它们所具有的 NDVI、NDWI 特征指数,以及 USGS 的 Splib06 中的标准光谱曲线与本文方法对比验证^[8];之后,对不具有特征指数的阴影和裸地进行光谱定量表征实验.

首先,影像需进行辐射定标,将影像的 DN 值转换为实际地物的辐射亮度值,从而可保证后续光谱处理的实际物理意义及正确性.之后,在影像上选择各目标地物的样本区(如图 2(b)所示).对样本区影像进行(MNF)变换,然后在其范围内做 PPI 计算,以增强针对性同时减少计算的复杂度.PPI 计算所得的影像如图 2(c)所示,其中的高值部分采用红色表示.端元在 PPI 的高值部分中选取,并对不同的地类分别进行聚类,选取众数中最高值的像元作为各类的端元.

2.2.1 植被对比实验

从 USGS 波谱库中的植被部分选取与实验区适宜的 Lawn_Grass GDS91 (Green) W1R1Ba AREF,其光谱曲线如图 3(a)所示.由于实验的多光谱影像只在特定的 6 个波段上取值,不如波谱库中的光谱曲线密集;因此,为使二者相匹配,对波谱库中的典型光谱曲线进行抽样,得到其与选取的端元的 6 波段光谱曲线如图 3(b).对抽样后的波谱库曲线采用综合光谱匹配方法对影像进行匹配,得到其 SMI 影像如图 3(c);自适应端元的 SMI 影像如图 3(d).图 3(e)为 NDVI 影像.由于 NDVI 的高值代表植被特征显著,因此两幅匹配影像中采用了颜色的反转显示,以对三种方法的特征显示进行统一:即将低 SMI 值的植被显著区采用亮色显示,而高 SMI 值区采用暗色显示.虽然各种方法的取值范围可能有所不同,但匹配的结果可以看出,三种方法的表征特性是一致的:亮色代表植被的显著区域,暗色代表非植被区,且其强弱程度也清晰展现出来.

进一步地,为了量化地比较 3 种方法,对它们做相关关系计算,并采用 Z 检验方法进行了显著性检验^[9],结果如表 1. NDVI 是公认的植被光谱特征的有效指数,它符合植被的物理光学特性.因此,在缺少实测光谱的情况下,它可以代替地面真实光谱值作为标准来衡量另外两种方法.检验假设方法之间没有显著差异,Z 检验在 $\alpha = 0.05$ (95% 的置信水平)下的阈值为 1.96,若显著性值大于该值,则肯定原假设,方法间不存在显著差异;若低于该值,则否定原假设,即方法间存在显著差异. $\alpha = 0.01$ (99% 的置信水平)下也同理,只是阈值更高,代表不存在显著差异的概率也更高.文中只给出显著性检验的判定结果.

从表 1 中可以看出,波谱库和端元匹配的方法与 NDVI 的相关系数都较高,达到 80% 以上,且它们在 95% 的置信水平上与 NDVI 都没有显著差异;然而,在 99% 的置信水平上,波谱库方法与 NDVI 存在显著差异,而端元方法仍没有显著差异.据此可以说明,端元方法比波谱库方法与 NDVI 不存在显著差异的概率更大;并且,在二者都与 NDVI 不存在显著差异的 95% 的置信水平上,端元方法仍比波谱库方法的相关系数高 3.6%.波谱库与端元的相关系数更高,达到 96.5%,并且在 95% 的置信水平上也没有显著差异;然而,在 99% 的置信水平上,二者有显著差异.从图 3(b)中二者的光谱曲线也可看出,二者的光谱形状是大致相同的,只在取值区间以及第 5 波段的反射值处稍有不同.

表 1 植被不同表征方法间的相关系数与显著性检验表
Table 1 Correlation and significance test among different methods for vegetation representation

方法	相关系数	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
波谱库与 NDVI	0.840	不显著	显著
端元与 NDVI	0.876	不显著	不显著
端元与波谱库	0.965	不显著	显著

综上所述可以推断,自适应端元匹配的方法对植被的光谱表征要优于波谱库.但一般而言,在 95% 的置信水平下没有显著差异,则二者都可以有效代替 NDVI 对植被进行光谱表征.

2.2.2 水体对比实验

与植被实验相同,首先从 USGS 波谱库中的水体部分选取与实验区适宜的 water_mont_mix_a.27299.w1(图 4(a)),并对其在 6 个波段上进行相应采样.波谱库水体光谱经采样后的光谱以及选取的自适应水体端元的光谱如图 4(b)所示,它们相应

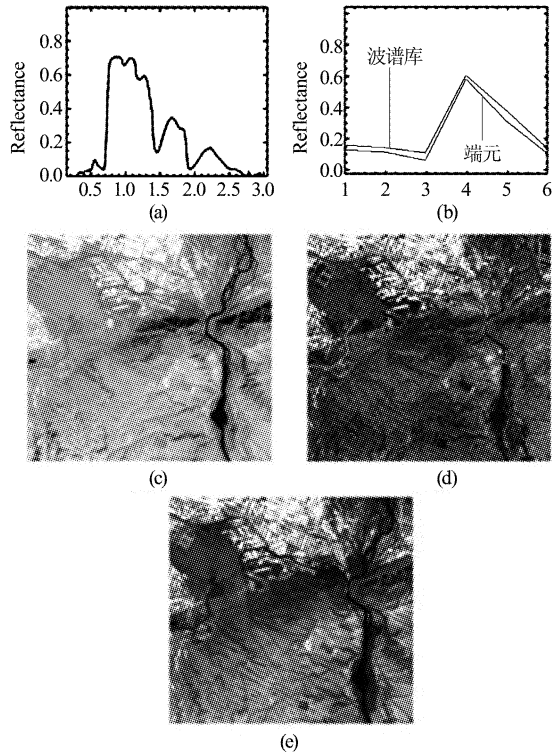


图3 植被匹配 (a) USGS 中植被参考光谱 (b) 波谱库及端元光谱 (c) USGS 的 SMI 影像 (d) 影像端元的 SMI 影像 (e) NDVI 影像
 Fig. 3 Vegetation matching: (a) USGS vegetation spectrum, (b) spectrums of endmember and spectral library, (c) SMI image of USGS spectrum, (d) SMI image of endmember spectrum, and (e) NDVI image

的 SMI 影像如图 4 (c) 和图 4 (d). 图 4 (e) 为 NDWI 影像. 由于 NDWI 也是高值代表水体特征显著, 因此两幅匹配影像中仍采用了颜色的反转显示. 可以看出, 虽然各种方法的取值范围可能有所不同, 但这三种方法对水体的特性表征也是一致的: 亮色的水体区得到了增强, 暗色的非水体区得到了抑制. 然而, 这三种方法对于非水体地物的抑制作用却有差异: 波谱库对左下部植被的抑制作用较为明显; 端元对植被的整体抑制作用较为均衡; NDWI 对左上部的植被的抑制作用较为明显.

三种方法也进行了相关关系计算以及显著性检验, 结果如表 2. 仍以 NDWI 作为检验准则, 可以看出波谱库和端元匹配方法与 NDWI 的相关系数也都较高, 达到 70% 以上, 且它们在 95% 的置信水平上与 NDWI 都没有显著差异; 而在 99% 的置信水平上, 而者都与 NDWI 存在显著差异. 在二者都与 NDVI 不存在显著差异的 95% 的置信水平上, 端元方法仍比波谱库方法的相关系数高 6.5%. 波谱库与端元的相关系数更高, 达到 85.3%, 然而在 95% 及 99% 的置

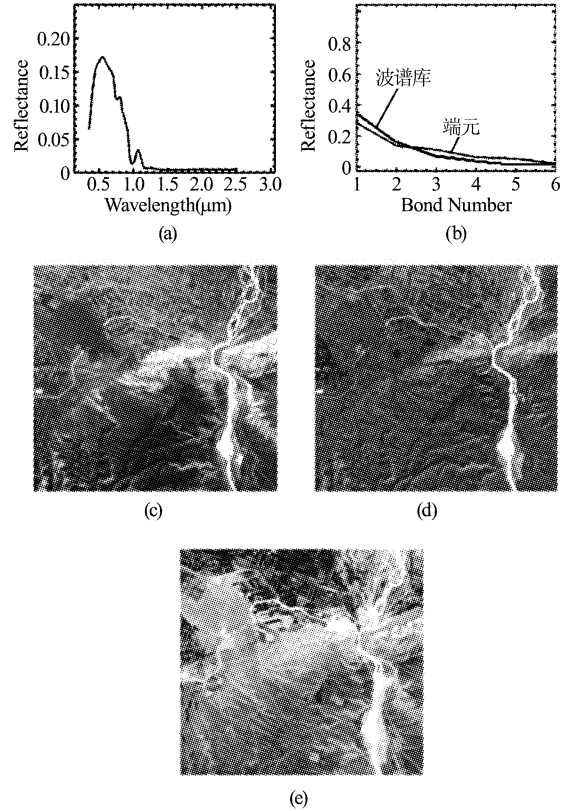


图4 水体匹配 (a) USGS 中水体参考光谱曲线 (b) 波谱库及端元光谱 (c) USGS 的 SMI 影像 (d) 影像端元的 SMI 影像 (e) NDWI 影像
 Fig. 4 Water matching: (a) USGS water spectrum, (b) spectrums of endmember and spectral library, (c) SMI image of USGS spectrum, (d) SMI image of endmember spectrum, and (e) NDWI image

信水平上, 二者都存在显著差异. 从图 3 (b) 中二者的光谱曲线也可看出, 二者的光谱形状也有些不同.

表 2 水体不同表征方法间的相关系数与显著性检验表
 Table 2 Correlation and significance test among different methods for water representation

方法	相关系数	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.01$
波谱库与 NDVI	0.727	不显著	显著
端元与 NDVI	0.792	不显著	显著
端元与波谱库	0.853	显著	显著

综上可以推断, 自适应端元匹配的方法优于波谱库. 但一般而言, 在 95% 的置信水平下没有显著差异, 则二者都可以有效代替 NDWI 对水体进行光谱表征. 值得注意的是, 与植被相比, 此处相关系数的整体降低与水体更易受周围环境的干扰、以及植被的含水性都有密切的关系^[10]. 此外, 波谱库中典型光谱与自适应端元光谱对水体的表征已有显著差异, 更表明了自适应端元选取在多样性地物光谱表征中的鲁棒性与可信度.

2.2.3 阴影/裸地验证实验

前述实验已证实了自适应端元选取的光谱表征的有效性,现选取没有特定光谱指数模型的阴影和裸地,对本文算法做进一步验证.图 5(a)、(b)分别为影像上自适应选取的阴影和裸地端元光谱;图 5(c)和图 5(d)分别为二者的 SMI 影像,图上颜色仍反转显示.由匹配影像上对二者显著区域的增强以及对背景区域的抑制可以看出,本文方法获得的地物光谱表征贴合实际分布状况,并可定量地反映出与端元光谱的匹配程度.

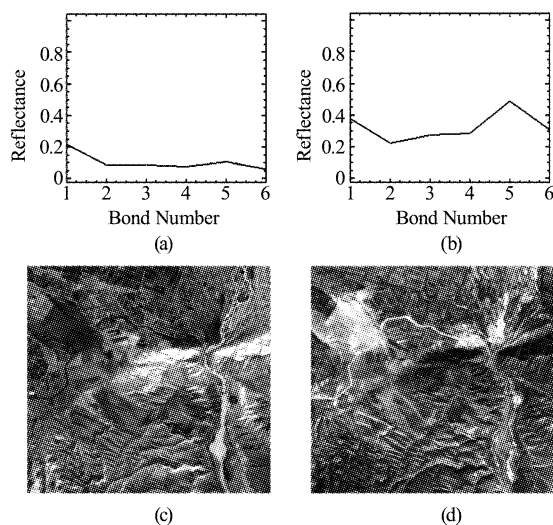


图 5 验证实验 (a) 阴影端元光谱 (b) 裸地端元光谱 (c) 阴影 SMI 影像 (d) 裸地 SMI 影像

Fig. 5 Validation of experimental process (a) Spectrum of shadow endmember, (b) Spectrum of bareland endmember, (c) SMI image of shadow, and (d) SMI image of bareland

获得光谱的定量表征之后,设定阈值分类,可获得地物的初步提取结果.在此,采取最大熵直方图阈值分割^[11],对阴影和裸地进行分类,并对其进行分类精度评价,结果如表 3.

表 3 地物自适应光谱表征分类精度表

Table 3 Accuracies for different methods

类别 \ 地物	阴影	裸地
总精度 (%)	96.2	94.9
Kappa	0.937	0.925

2.2.4 推广验证实验

选取裸土与基岩两,进一步验证在自适应端元匹配在不同时相、不同区域中的应用.实验数据都为 ETM+ 影像,大小都为 510×470 像素.图 6(a)、(b)分别为同一河流区域的夏季和冬季影像,获取时间

为 2007 年;图 6(f)为 2009 年夏季获取的另外一景相似区影像.在前两幅影像上选取裸土、后一幅影像上选取基岩进行实验,它们的端元光谱如图 6(c)中标示的顺序,相应的 SMI 匹配影像分别如图 6(d)、(e)、(g).可以看出,不同时相的地表变化较为明显,所选取的端元也有差异;不同区域相近地区的端元差异则更为显著;然而,各地区自身端元对该区域的表征效果较为贴切.本实验又设计了采用同季相的裸土端元对基岩区域进行匹配,这也类似于从波谱库中选取相似光谱进行匹配.其所得 SMI 影像如图 6(h),从中可以对比出两种不同端元匹配间的差异.

实验对最终结果进行精度评价,见表 4 可以看出,自适应端元匹配对各影像地物的提取效果较好,都在 90% 以上;而采用相近地物端元匹配的提取结果则略差.从而,不同时相和不同区域所需的适宜匹配端元都有所不同,而波谱库典型光谱难以满足该需求,因此本文方法为地物光谱表征与提取的最优选择.

表 4 推广实验分类精度表

Table 4 Accuracies for extended experiments

实验	总精度 (%)	Kappa
夏季裸土	96.7	0.932
冬季裸土	94.3	0.909
夏季基岩	95.1	0.916
裸土匹配基岩	87.5	0.848

3 结论

提出了一种端元匹配的遥感影像地物自适应光谱表征方法,通过对具有光谱指数模型的典型地物如植被、水体的实验以及对阴影和裸地等不具有特定表征指数模型的地物的验证,得出如下结论:1)对于没有特定指数模型的地物,端元匹配方法可以有效对地物光谱进行定量表征,从而更为精确并有普适性;2)自适应端元匹配方法对于影像自身而言更为贴切,可以获得比波谱库中的典型光谱匹配更为有效的结果,并且对于不同时相和不同区域的应用都具有鲁棒性;3)综合光谱角和距离的光谱匹配方法更为全面,可以获得较好的结果.然而,该方法匹配值欠缺明确物理意义,在该方面仍需进一步深入探讨.总之,本文方法为地物光谱表征提供了一种便捷有效的通用性解决途径.

REFERENCES

[1] Lasaponara R, Masini NI. Identification of archaeological

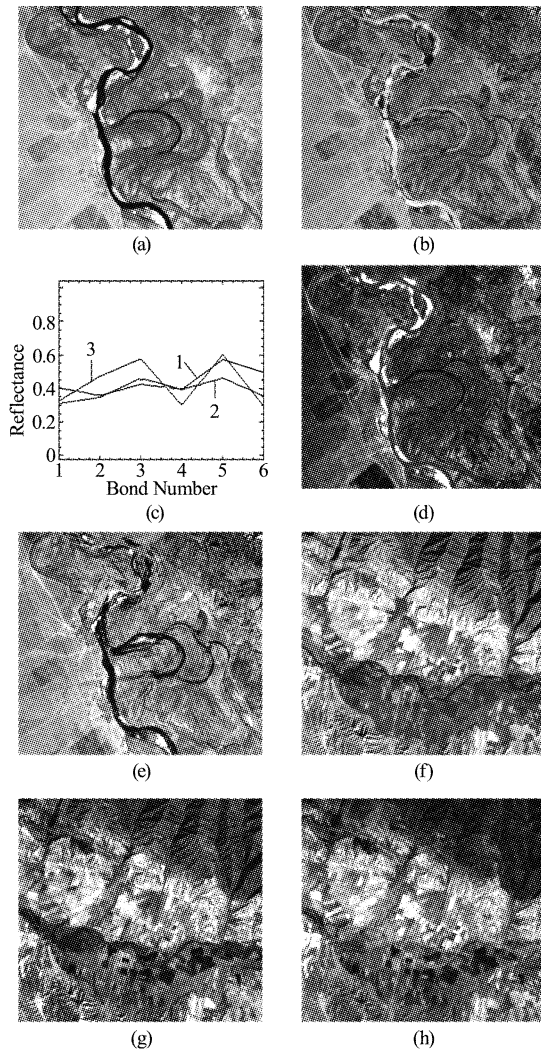


图6 推广验证实验(a)夏季裸土(b)冬季裸土(c)端元光谱(d)夏季裸土端元 SMI(e)冬季裸土端元 SMI 影像(f)基岩影像(g)基岩端元 SMI 影像(h)裸土端元匹配基岩 SMI 影像

Fig. 6 Extended experimental process (a) Summer image of exposed soil, (b) Winter image of exposed soil, (c) Spectrums of endmembers, (d) SMI image of exposed soil in summer, (e) SMI image of exposed soil in winter, (f) image of bedrock, (g) SMI image of bedrock, and (h) SMI image of bedrock using spectrum of exposed soil

buried remains based on the normalized difference vegeta-

tion index (NDVI) from Quickbird satellite data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, **3** (3): 325 - 328.

- [2] MCFEETERS S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17** (7): 1425 - 432.
- [3] HU Pan, TIAN Qing-jiu, YAN Bo-kun. The application of hyperspectral remote sensing to the identification of hydrocarbon alterati[J]. *Remote Sensing for Land & Resources* (胡畔, 田庆久, 闫柏琨. 柴达木盆地烃蚀变矿物高光谱遥感识别研究. *国土资源遥感*), 2009, **2**: 54 - 61.
- [4] LUO Wen-fei, ZHONG Liang, ZHANG Bing, et al. Null space spectral projection algorithm for hyperspectral image endmember extraction[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (罗文斐, 钟亮, 张兵, 等. 高光谱遥感图像端元提取的零空间光谱投影算法. *红外与毫米波学报*), 2010, **29** (4): 307 - 311.
- [5] KRUSE F A, LEFKOFF A B, BOARDMAN J W, et al. The spectral image processing system (SIPS)-interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, **44** (2 - 3): 145 - 163.
- [6] PLAZA, VALENCIA D, PLAZA J. High-performance computing in remotely sensed hyperspectral imaging: the Pixel Purity Index algorithm as a case study[C]. in *Proc. IPDPS Symp.*, 2006, **8**.
- [7] EGOZI A, KELLER Y, GUTERMAN H. Improving Shape Retrieval by Spectral Matching and Meta Similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, **19** (5): 1319 - 1327.
- [8] Clark RN, Swayze G A, Wise R, et al. 2007, USGS Digital Spectral Library splib06a, U. S. Geological Survey, Data Series 231.
- [9] FOODY, G M. Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2004, **70** (5): 627 - 634.
- [10] LUO Jian-cheng, SHENG Yong-wei, SHEN Zhan-feng, et al. Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism [J]. *Journal of Remote Sensing* (骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多元光谱遥感水体信息高精度自动提取. *遥感学报*), 2009, **13** (4): 610 - 615.
- [11] DELON J, DESOLNEUX A, LISANI J L, et al. A non-parametric approach for histogram segmentation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, **16** (1): 253 - 261.

(上接 420 页)

- [9] Wang X, Jiang Z M, Zhu H J, et al. Germanium dots with highly uniform size distribution grown on Si (100) substrate by molecular beam epitaxy[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**: 3543.
- [10] Bottani C E, Mantini C, Milani P, et al. Raman, optical-absorption, and transmission electron microscopy study of size effects in germanium quantum dots [J]. *Appl. Phys Lett*, 1996, **69**: 2409.
- [11] Kanakaraju S, Sood A K In situ Raman monitoring of ultra-

thin Ge films[J]. *Appl Phys*, 1998, **84**: 5756.

- [12] McVay G L, DuCharme A R. Diffusion of Ge in SiGe alloys[J]. *Phys Rev. B*, 1974, **9**: 627.
- [13] Chung H C, Chu W H, Liu C P. Electron transport through individual Ge self-assembled quantum dots on Si [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2006, **89**: 082105.
- [14] WU Zi-Qin, WANG Bing. Thin film growth[M]. Beijing: Science Press(吴自勤, 王兵. 薄膜生长. 北京: 科学出版社), 2001: 123 - 124.