

**引用格式:** Liu Yao, Zhang Wenjuan, Zhang Bing, *et al.* Surface Emissivity Image Simulation for Atmospheric Absorption Bands based on Spectral Mixing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(4): 674-682. [刘瑶, 张文娟, 张兵等, . 基于光谱混合的大气吸收通道发射率图像模拟[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(4): 674-682.] doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2017.4.0674

# 基于光谱混合的大气吸收通道发射率图像模拟

刘 瑶<sup>1</sup>, 张文娟<sup>2</sup>, 张 兵<sup>2</sup>, 甘甫平<sup>1</sup>  
(1. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083;  
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094)

**摘要:**提出了一种基于光谱混合的大气强吸收通道地表发射率图像模拟方法,旨在为全链路图像模拟提供地表基础数据。首先,对数据源图像进行端元选择,获取图像端元光谱;然后,通过光谱匹配将地表测量光谱替代图像端元光谱进行丰度反演;最后,基于线性光谱混合模型,结合替代端元在吸收通道的地表测量发射率,实现发射率图像模拟。利用该方法,以 Landsat 8 OLI 多光谱图像为数据源,并假设 JHU 和 USGS 光谱库数据为数据源的地表测量光谱,进行了模拟试验和精度分析。鉴于真实的吸收通道地表发射率图像无法获得,精度分析采用了比较基于该方法模拟的 OLI 通道反射率图像与真实反射率图像的方式。获得的模拟图像总体均方根误差分别为 0.045 和 0.049,说明模拟方法可行且具有较高的精度。

**关 键 词:**光谱混合;大气吸收;地表发射率;图像模拟

**中图分类号:** TP 75      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2017)04-0674-09

## 1 引 言

遥感图像模拟指的是基于对遥感成像过程的分析 and 理解,建立数字模型模拟成像过程中各类因素的影响,以获得模拟的遥感图像。图像模拟最重要的用途之一是为研制中的遥感器进行载荷参数的论证分析。经过数十年的研究,国外遥感图像模拟技术发展相对成熟,已形成能够应用的模型和软件<sup>[1-4]</sup>。以 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  为中心波长的大气强吸收通道被用于红外预警卫星的遥感器上,实现导弹等目标的探测与跟踪<sup>[5-7]</sup>。针对预警卫星的载荷参数设计,需要开展针对这两个大气强吸收通道的图像模拟研究。由于预警卫星应用的特殊性,国外公开的相关技术信息有限;因此,为发展我国的预警卫星系统,需要自主研究针对 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  大气强吸收

通道的图像模拟技术。

全链路的图像模拟通常包括 3 个环节:地表场景模拟、大气辐射传输过程模拟以及遥感器成像过程模拟。大气辐射传输过程模拟通常可基于辐射传输模型(如 MODTRAN, 6S)完成;遥感器成像过程的模拟技术成熟,且与遥感器设计密切相关。由于缺乏该波段相应传感器的具体信息,且已有辐射传输模型能够实现中红外强吸收通道的大气模拟<sup>[8]</sup>,因此 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  大气强吸收通道图像模拟的难点主要在地表场景环节。

地表场景模拟负责地表特征图像(包括地表反射率/发射率图像、温度图像等)的仿真。考虑到地表温度与波长无关,且温度图像可通过反演算法获取<sup>[9]</sup>,本文将针对中红外大气强吸收通道,开展地表发射率图像的模拟研究。

收稿日期: 2016-06-03 ; 修订日期: 2017-06-11  
基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(41325004), 国家科技高分辨率对地观测系统重大专项(30-Y20A06-9003-15/16、11-Y20A32-9001-15/17), 国家自然科学基金项目(41271370)。  
作者简介: 刘 瑶(1988—), 女, 湖北蕲春人, 工程师, 主要从事遥感图像仿真模拟研究。Email: yao.liu\_agrs@foxmail.com。  
通讯作者: 张文娟(1983—), 女, 安徽潜山人, 高级工程师, 主要从事地表辐射传输建模和卫星图像模拟等方面的研究。  
Email: zhangwj@radi.ac.cn。

地表反射率/发射率图像模拟的常用方法可分为 3 类:基于地表测量数据、基于物理模型和基于现有遥感数据。罗切斯特学院研制的 DIRSIG (Digital Imaging and Remote Sensing Image Generation) 系统和 SENSOR (Software Environment for the Simulation of Optical Remote sensing system) 的地表模拟均采用基于地表测量数据的方法<sup>[1,10]</sup>, Guanter 等<sup>[11]</sup>也以地面光谱库数据作为端元,对 SPOT5 的多光谱数据进行丰度反演;然后用获得的丰度和高光谱分辨率的光谱库数据进行光谱混合,生成高光谱地表反射率图像。第二类方法利用地物辐射传输模型(如 PROSPECT<sup>[12]</sup>、GeoSAIL<sup>[13]</sup>、HAPKE<sup>[14-16]</sup>、WASI<sup>[17]</sup>)来实现反射率图像模拟,辐射传输模型通常需要地表生化参量数据作为输入。第三类方法是基于现有遥感器的地表图像,通过空间、光谱等维度的尺度转换,生成待模拟传感器载荷的地表特性图像。图像模拟系统 PICASSO (Parameterized Image Chain Analysis & Simulation Software)即采用了这类方法:以高于待模拟场景分辨率的图像为数据源,经过空间维和光谱维重采样进行地表模拟<sup>[18-19]</sup>。叶泽田等<sup>[20]</sup>利用机载 MIVIS 超光谱成像系统数据,通过光谱模拟生成 SPOT 通道的表现反射率图像,然后进行大气改正处理,定量模拟了 SPOT 的地表反射率图像。

上述 3 种方法中,基于物理模型和基于现有遥感数据的模拟方法都难以应用于中红外的大气强吸收通道:现有辐射传输模型主要适用于可见光到短波红外谱段的地表图像模拟;中红外谱段的辐射模型研究有限,且所需的地表生化参量数据也难以获取;再者,2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  的大气强吸收通道图像也难以进行大气纠正获得地表发射率。基于上述分析,考虑利用吸收通道的地表测量光谱数据,提出一种基于光谱混合模型的方法实现 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  大气强吸收通道的地表发射率图像模拟。

## 2 基于光谱混合的发射率图像模拟

根据光谱混合理论,如果一个像元对应的地面区域包含两种或多种特征地物,该像元即混合像元,像元记录的信号由区域内所有特征地物的光谱共同作用产生。从本质上光谱混合模型分为线性混合和非线性混合两种模型。线性混合模型由于机理简单易于实现更为常用。当像元位于平坦地表区域,假设该区域由  $N$  类均匀分布的同温地物构成,则该像元的发射率可表示为这  $N$  类地物发射率

的线性组合<sup>[21]</sup>:

$$\epsilon(\theta,\varphi)=\sum_{k=1}^Na_k\epsilon_k(\theta,\varphi)$$

(1)

其中: $\theta$  和  $\varphi$  分别为成像时的观测天顶角和方位角。 $a_k$  是第  $k$  类地物在像元内对应地表区域中的面积百分比, $\epsilon_k$  为第  $k$  类地物的发射率。由此可知,在获得像元中各类型地物的面积比例,以及这些地物的吸收通道发射率数据的前提下,即可基于公式(1)模拟计算像元的吸收通道地表发射率。

依据公式(1)的线性混合模型,本文提出的模拟方法以现有多光谱/高光谱图像为数据源:先提取图像中的端元光谱;然后通过光谱匹配,以地表测量光谱替代图像端元光谱对数据源图像进行丰度反演;最后,利用替代端元测量的吸收通道地表发射率,线性混合得到地表发射率模拟图像。

具体的模拟流程由 4 个步骤组成(图 1):①通过端元选择确定数据源图像包含的端元,并获取图像中端元在数据源通道的光谱反射率;②将图像区域的地表测量反射率与步骤①提取的图像端元反射率进行光谱匹配,选择符合匹配条件且匹配度最高的光谱库地物作为替代端元;③采用替代端元光谱(即地表测量的数据源通道反射率)对多光谱/高光谱反射率图像进行丰度反演,获得替代端元的丰度图像;④利用步骤③获得的丰度图和替代端元在吸收通道的地表测量发射率光谱,线性光谱混合得到 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  大气强吸收通道的发射率模拟图像。

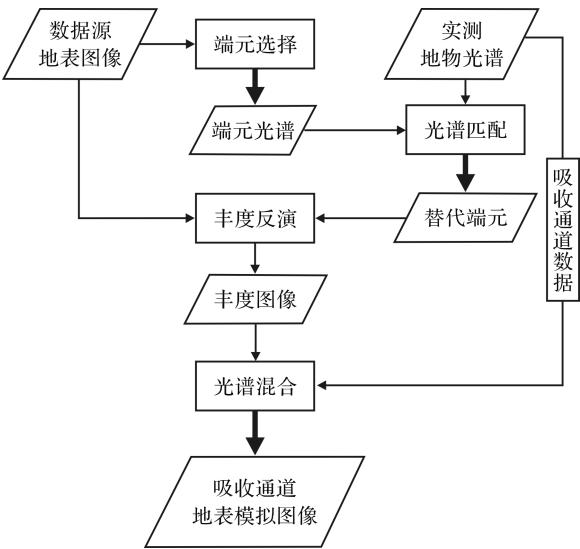


图 1 基于线性光谱混合的发射率图像模拟流程图  
Fig.1 Flow diagram of emissivity image simulation based on linear spectral mixing

### 3 试验与结果分析

以 Landsat 8 的 OLI 遥感图像为数据源,实现本文提出的模拟方法并进行精度评价。

#### 3.1 数据源介绍

OLI 遥感器有 9 个通道,空间分辨率为 30 m,成像宽幅为 185 km×185 km。实验采用了 OLI 遥感器上除全色波段和卷云探测波段以外的 7 个波段。选择 OLI 为数据源的原因主要有两点:首先,光谱解混所需的数据源通道数与端元数有关,考虑到图像通常由多种地物端元构成,OLI 的多通道数据满足光谱解混的基本条件;其次,中红外的辐亮度模拟计算需要地表发射率和温度数据,而 Landsat 8 的热红外通道 TIRS 能够反演得到地表温度图像,因此出于对后续辐亮度模拟工作的考虑,Landsat 8 数据十分适宜作为中红外图像模拟的数据源。

实验图像区域位于美国科罗拉多州,图像中心经纬度为 40.31°N,104.28°W。图像大小为 7 601×7 411,获取时间为 2013 年 6 月 6 日。鉴于丰度反演计算复杂,全图的光谱解混和丰度反演将十分耗时;因此,本文从原始图像中选取了一块具有水体、植被、土壤和人工地物等典型地物的区域作为实验区,实验区图像大小为 700×700。首先,用 ENVI 的 FLAASH 模块<sup>[22-23]</sup>对原始辐亮度图像进行大气纠正,获得地表反射率图像(图 2)。

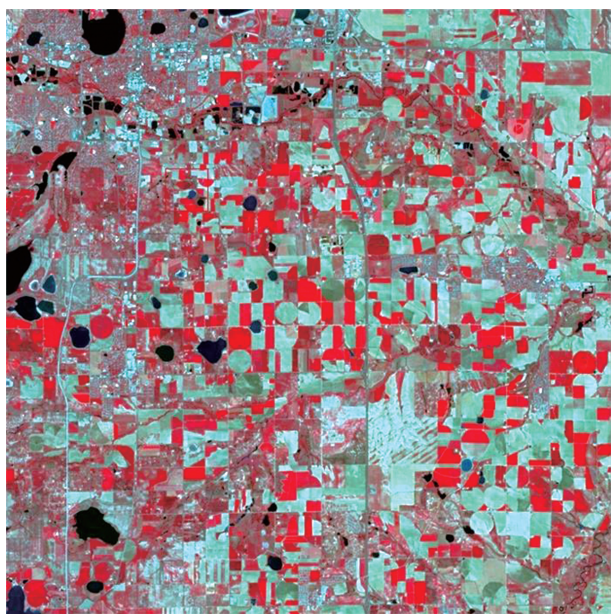


图 2 实验区地表反射率图像的标准假彩色合成图

Fig.2 Standard false color composite of reflectance image in the test area

#### 3.2 试验过程

##### 3.2.1 端元选择

端元选择步骤不是本文的重点,这里直接采用目视解译对实验区图像端元进行快速判断,并提取端元光谱。目视可知图像中包含至少 2 类植被、2 类土壤和 1 类水体,这些自然地物覆盖面积广阔,在图像上成片出现,并表现出均一的光谱特征;人工地物主要为居民区和道路,这些地物空间尺寸小但十分密集,在 30 m 分辨率的数据源图像上表现为光谱信息混杂的成块像元。考虑各类地物的分布情况和数据源波段数量,确定实验区图像端元数为 7,其中植被、土壤和人工地物各 2 个,水体 1 个;并通过 ENVI 的感兴趣区域工具为 7 个端元选择适当面积的图像区域,以所选区域平均光谱作为每个端元的代表光谱,即图像的端元光谱。

##### 3.2.2 光谱匹配

端元光谱提取后,需要与地表测量数据匹配以确定替代端元。光谱匹配策略采用光谱角度填图(Spectral Angle Mapping, SAM)。光谱角度填图将图像的 N 个波段光谱视为 N 维光谱向量。对于两个光谱向量  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  和  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ ,它们之间的广义夹角可表征两者的光谱相似程度,夹角越小,说明越相似<sup>[24]</sup>。通过计算两个向量的广义夹角余弦,可得到其广义夹角:

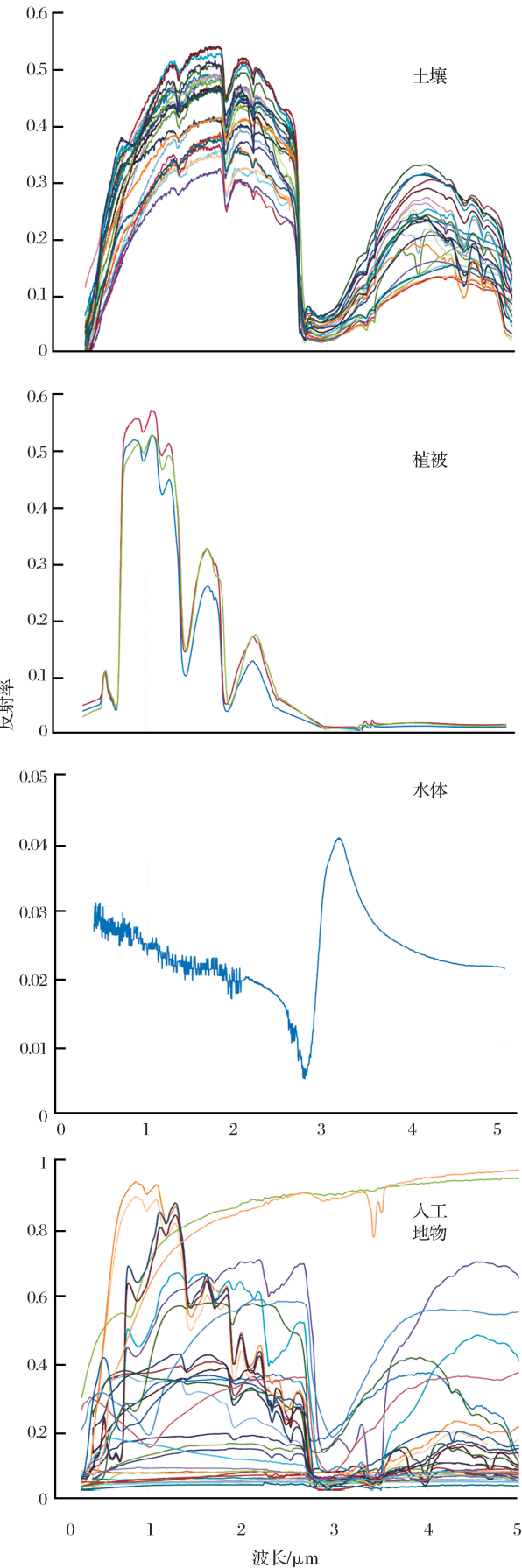
$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}} \quad \theta \in [0, \frac{\pi}{2}] \quad (2)$$

其中:  $\theta$  值越小,光谱间相似性越大。相应地,光谱角余弦  $\cos \theta \in [0, 1]$ ,当  $\theta$  越小,  $\cos \theta$  越接近 1;因此本文直接以光谱角余弦作为光谱匹配基准。通常认为当  $\theta$  超过 10°(即  $\cos \theta < 0.985$ )时,进行匹配的两光谱向量不属于同一类地物。因此,本文的替代端元选择基准为:与图像端元光谱的光谱角余弦不小于 0.985,且光谱角余弦最大。

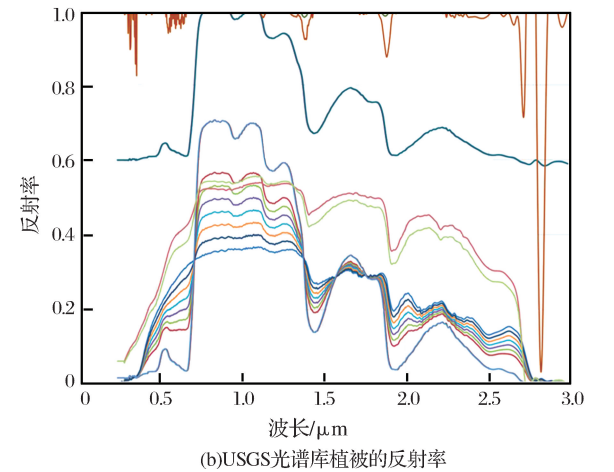
鉴于缺少图像区域的地表光谱库数据,本文实验采用 JHU 和 USGS 光谱库数据,假设光谱库数据涵盖了实验区的端元光谱。用于匹配的光谱库数据包含 JHU 的水体、植被、土壤和人工 4 类共 62 种地物光谱(图 3(a)),以及 USGS 的 15 种植被地物光谱(图 3(b))。为了和图像端元进行光谱匹配,对光谱库数据进行重采样,获得光谱库地物在数据源通道的反射率。

需指出的是,本文模拟方法要求地表数据的光谱测量范围必须同时覆盖数据源通道和待模拟的吸





(a)JHU光谱库地物反射率



(b)USGS光谱库植被的反射率

图 3 用于光谱匹配的光谱库地物反射率

Fig.3 Reflectance from spectral libraries for spectral matching

收通道。USGS 的植被地物光谱的波段范围为  $0.264\sim2.976\text{ }\mu\text{m}$ , 不包括  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  吸收通道的波段范围, 因此这些地物光谱只能作为  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  吸收通道图像模拟时的替代端元。换言之, 对于  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  吸收通道的图像模拟, 植被地物的替代端元只能来自 JHU 光谱库。分别将符合  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  和  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  图像模拟要求的光谱库地物数据, 与端元光谱进行匹配; 被选为替代端元的光谱库地物, 其光谱角余弦分别如表 1 和 2 所示。

表 1 用于  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  吸收通道图像模拟的光谱匹配结果

Table 1 Spectral matching results for the  $2.7\text{ }\mu\text{m}$  absorption band image simulation

图像端元	水体	植被 1	植被 2	人工 1	人工 2	土壤 1	土壤 2
替代端元	tapwater	veg11	veg1	man6	man25	soil7	soil15
$\cos\theta$	0.876	0.986	0.999	0.995	0.998	0.999	0.990

表 2 用于  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  吸收通道图像模拟的光谱匹配结果

Table 2 Spectral matching results for the  $4.3\text{ }\mu\text{m}$  absorption band image simulation

图像端元	水体	植被 1	植被 2	人工 1	人工 2	土壤 1	土壤 2
替代端元	tapwater	veg1	veg1	man6	man25	soil7	soil15
$\cos\theta$	0.876	0.985	0.999	0.995	0.998	0.999	0.993

从表 1 和 2 中可以看到, 水体类地物替代端元 tapwater 的光谱角余弦没有达到不低于 0.985 的标准。这是由于实验中用到的光谱库数据, 符合模拟方法对光谱库数据波长范围的要求的水体类地物只有 tapwater。考虑到水体在数据源通道反射率低, 而且与其他端元的反射率差异明显, 因此以 tapwater 替代图像中的水体端元, 对丰度反演不会造成太大误差。



另外,表 2 显示,在针对 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道进行光谱匹配时,两种植被类型的图像端元匹配的替代端元均为光谱库地物 veg1,且光谱角余弦也都满足不低于 0.985 的要求。这表明两类植被端元在 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的光谱特征非常相似。因此,针对

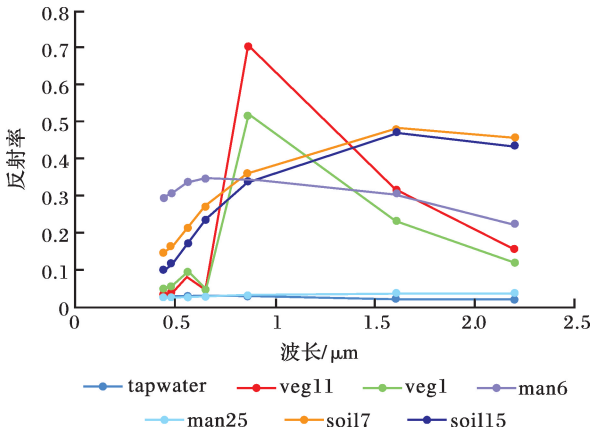


图 4 替代端元在数据源通道(OLI)的反射率

Fig.4 OLI band reflectance of substitute endmember

4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的图像模拟进行端元选择时,原本的 2 类植被地物替代端元都为 veg1,即实际上只需基于 6 类端元进行丰度反演。所有替代端元在数据源通道的反射率如图 4 所示。

3.2.3 丰度反演

针对 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道,采用 3.3 节中光谱匹配获得的替代端元,分别基于 7 个和 6 类光谱库地物端元进行丰度反演。丰度反演采用最小二乘法。线性光谱混合模型中,根据满足约束条件的不同,常见的算法有无约束最小二乘、非负最小二乘(约束 1)和全约束最小二乘(同时满足约束 1 和约束 2)<sup>[25]</sup>。约束 1 和约束 2 分别见公式(3)和(4)。

$$0 \leq a_k \leq 1 \tag{3}$$

$$\sum_{k=1}^N a_k = 1 \tag{4}$$

其中:  $a_k$  即公式(1)中第  $k$  类地物在像元内对应地表区域中的面积百分比。本文采用全约束最小二乘法进行丰度反演,得到的丰度图如图 5 所示。

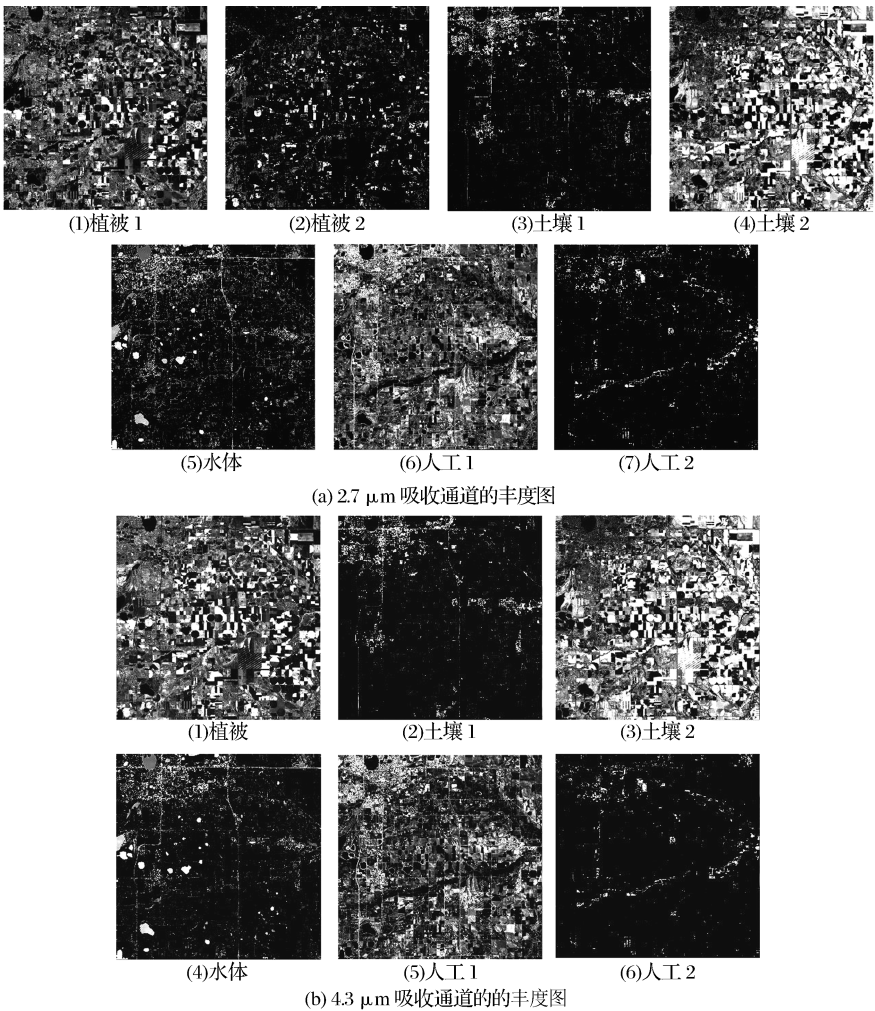


图 5 分别针对 2.7  $\mu\text{m}$  和 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道模拟的丰度反演图像

Fig.5 Abundance images for the 2.7 $\mu\text{m}$  and 4.3  $\mu\text{m}$  absorption band image simulation

3.2.4 光谱混合

基于线性光谱混合模型,利用公式(3)、(4)中反演的丰度图以及光谱库地物在吸收通道的发射率数据,模拟生成吸收通道的地表发射率图像。考虑到遥感器成像过程模拟中需要模拟遥感器波段范围及光谱响应函数的影响,在缺乏吸收通道遥感器载荷信息的情况下,本文对 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道,分别在 2.5~2.9  $\mu\text{m}$  和 4.16~4.55  $\mu\text{m}$  的波长范围内,以 1 nm 和 2.5 nm 为光谱分辨率,模拟生成高光谱通道的发射率图像。具体处理方法为:在光谱混合生成模拟图像之前,对光谱库地物在吸收通道的发射率数据分别按 1 nm 和 2.5 nm 的波长间隔进行插值。

插值处理后,光谱混合模拟得到的 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的地表发射率图像如图 6、7 所示。其中,2.7  $\mu\text{m}$  吸收通道的模拟图像(图 6)为 R-2.5  $\mu\text{m}$ 、G-2.7  $\mu\text{m}$ 、B-2.85  $\mu\text{m}$  伪彩色合成;4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的模拟图像(图 7)则采用 R-4.16  $\mu\text{m}$ 、G-4.3  $\mu\text{m}$ 、B-4.5  $\mu\text{m}$  伪彩色合成。由于地物在 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的波长范围内发射率变化平缓,因此对应的伪彩色合成图像与灰度图像相似。

通过上述步骤获得的吸收通道发射率模拟图像的空间分辨率与数据源一致。假如待模拟遥感器的空间分辨率与数据源有所差异,在完成光谱混合后,还需对模拟的发射率图像进行尺度转换处理获得所需空间分辨率的图像。

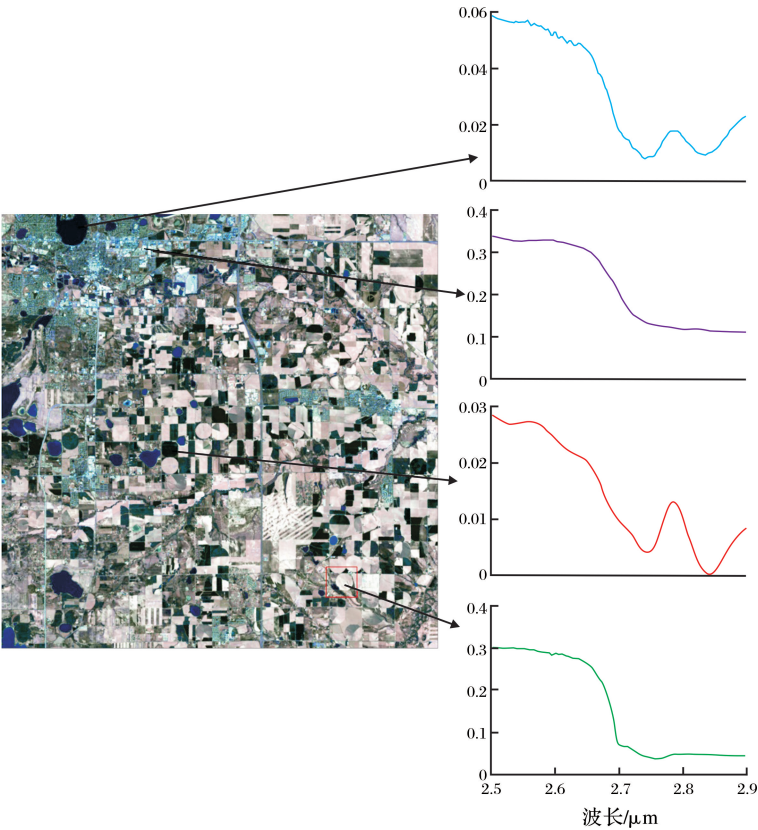


图 6 2.7  $\mu\text{m}$  吸收通道的发射率模拟图像

Fig.6 Simulated surface emissivity images in 2.7  $\mu\text{m}$  absorption band

3.3 精度分析

前文已指出,强吸收通道地表数据的难以获得,无法通过与真实数据比较的方式对模拟方法进行评价。因此,采用本文提出的基于光谱混合模型的地表图像模拟方法,生成数据源 OLI 通道的反射率模拟图像,然后与真实的 OLI 通道反射率图像比较,从而评价模拟方法的可用性和精度。由于实验中分别采用了 7 个和 6 个替代端元对 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  吸

收通道进行图像模拟,因此在精度评价中,OLI 的反射率图像同样分别由两种数目的替代端元经过光谱混合获得。对基于两种替代端元模拟的 OLI 反射率图像,计算了各通道的均方根误差(图 8)和总体均方根误差。由图 7 可知,除 OLI 的通道 6 和通道 7 以外,采用两种数量的替代端元模拟的反射率图像均方根误差均低于 0.05;且总体均方根误差都很小(采用 7 个和 6 个替代端元模拟 OLI 反射率图

像的总体均方根误差分别为 0.045 和 0.049)。由此可见,利用地表测量数据,基于光谱混合模型的地表

图像模拟方法可行,并且能保证模拟结果具有较高的精度。

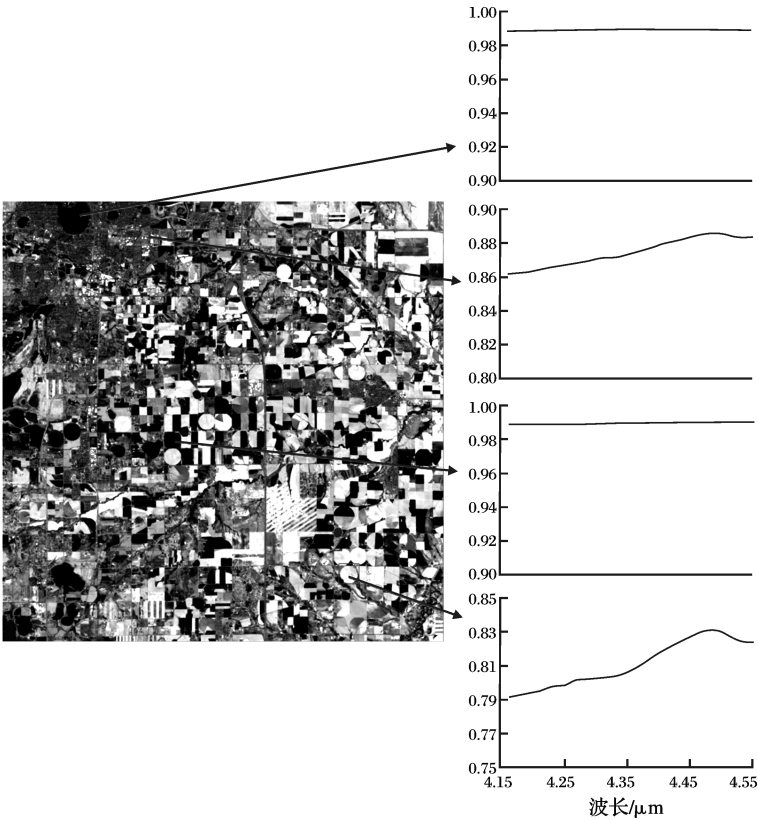


图 7 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的发射率模拟图像  
Fig.7 Simulated surface emissivity images in the 4.3  $\mu\text{m}$  absorption bands

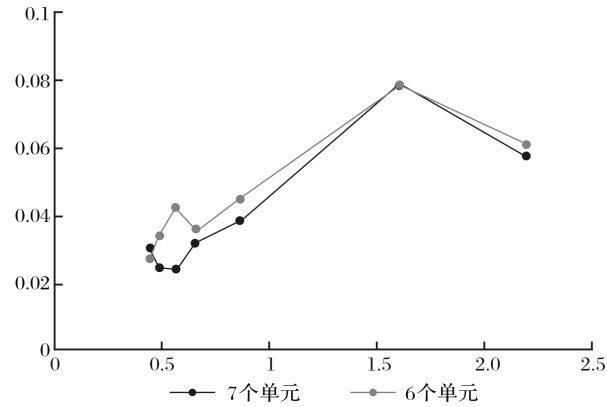


图 8 OLI 通道的反射率模拟图像均方根误差  
Fig.8 RMSE of Simulated Reflectance images in OLI Bands

4 结 语

本文针对以 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  为中心波长的大气强吸收通道,提出了一种基于线性光谱混合模型的地表发射率图像模拟方法。该方法通过光谱匹配的方式,将图像端元用地物的地表测量光谱替代;利用替代端元在 2.7 和 4.3  $\mu\text{m}$  吸收通道的地表数

据,光谱混合得到吸收通道的地表发射率图像。本文研究为中红外大气强吸收通道的地表模拟提供了可行的方法,同时也发现了一些问题,主要结论包括以下 3 点:

- (1)对于大气强吸收通道的图像模拟,基于地表测量数据和光谱混合模型的发射率图像模拟方法解决了吸收通道地表数据难以获取的问题。采用该方法模拟 Landsat 8 OLI 通道的地表反射率图像,与实际反射率图像比较,总体均方根误差分别为 0.045 和 0.049,说明基于光谱混合模型的地表图像模拟方法可行。
- (2)为保证模拟方法的精度,建议采用与数据源图像获取时间相同的地表测量数据作为替代端元。本文试验采用光谱库数据作为替代端元,出现了替代端元和图像端元相似程度不够的情况。但这一问题可通过地表测量数据库的建立得到解决。
- (3)本文试验采用的数据源波段有限,限制了丰度反演时的端元数目。这一问题可通过选择波段数更多的数据源获得改进;此外,通过对图像分块,然



后对不同地块采用不同类型端元进行丰度反演的方式,也可提高模拟方法的适用程度。

考虑到地表测量与图像端元的尺度不同,二者的反射率光谱存在一定差异,因此基于图像端元进行丰度反演结果可能更佳。下一步研究将会开展基于地表数据和图像端元反演的丰度图像的比较与评价工作。

#### 参考文献(References):

- [1] Borner A, Wiest L, Keller P, *et al.* SENSOR: A Tool for the Simulation of Hyperspectral Remote Sensing Systems[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, 55(5):299-312.
- [2] Verhoef W, Bach H. Simulation of Sentinel-3 Images by Four-Stream Surface-atmosphere Radiative Transfer Modeling in the Optical and Thermal Domains[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120:197-207.
- [3] Liu Y, Zhang W, Zhang B. Top-of-Atmosphere Image Simulation in the 4.3 $\mu$ m Mid-infrared Absorption Bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(1):452-456.
- [4] May C M, Maurer T O, Sanders J S. Visible and Thermal Spectrum Synthetic Image Generation with DIRSIG and MuSES for Ground Vehicle Identification Training [C]//Proc. SPIE Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XXVIII, 2017:101780W-101780W-11.
- [5] Ye Qing, Sun Xiaoquan, Shao Li. Analysis of Optimum Detective Wavebands for Infrared Early-warning Satellite[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(3):389-393. [叶庆, 孙晓泉, 邵立. 红外预警卫星最佳探测波段分析[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(3):389-393.]
- [6] Jiang Yue, Deng Lei, Zang Peng. Developmental State and Technical Features of American Space-based Infrared Early Warning System[J]. Journal of Air Force Radar Academy, 2011, 25(2):105-108. [蒋跃, 邓磊, 臧鹏. 美国天基红外预警系统的发展现状和技术特点[J]. 空军雷达学院学报, 2011, 25(2):105-108.]
- [7] Sun Wen, Wang Gang, Yao Xiaoqiang, *et al.* General Situation and Enlightenment of Space-based Infrared Early-warning System of America[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(4):1-7. [孙文, 王刚, 姚小强, 等. 美国天基红外预警系统概况与启示[J]. 传感器与微系统, 2016, 35(4):1-7.]
- [8] Cota S A, Kalman L S. Predicting Top-of-Atmosphere Radiance for Arbitrary Viewing Geometries from the Visible to Thermal Infrared[C]//SPIE Optical Engineering+ Applications. International Society for Optics and Photonics, 2010: 781307-781307-14.
- [9] Li Z L, Tang B H, Wu H, *et al.* Satellite-derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131:14-37.
- [10] Carlson F C. The DIRSIG User's Manual[S]. New York: Rochester Institute of Technology, 2006.
- [11] Guanter L, Segl K, Kaufmann H. Simulation of Optical Remote-Sensing Scenes with Application to the Enmap Hyperspectral Mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(7):2340-2351.
- [12] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A Model of Leaf Optical Properties Spectra[J]. Remote Sensing of Environment, 1990, 34(2):75-91.
- [13] Huemmrich K. The Geosail Model: A Simple Addition to the SAIL Model to Describe Discontinuous Canopy Reflectance [J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 75(3):423-431.
- [14] Hapke B. Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 1. Theory[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4):3039-3054.
- [15] Hapke B, Wells E. Bidirectional Reflectance Spectroscopy: 2. Experiments and Observations[J]. Journal of Geophysical Research, 1981, 86(B4):3055-3060.
- [16] Liang S, Townshend J R. A Modified Hapke Model for Soil Bidirectional Reflectance[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 55(1):1-10.
- [17] Gege P. The Water Color Simulator WASI: An Integrating Software Tool for Analysis and Simulation of Optical In-Situ Spectra[J]. Computers & Geosciences, 2004, 30(5):523-532.
- [18] Cota S A, Bell J T, Boucher R H, *et al.* PICASSO: An End-to-End Image Simulation Tool for Space and Airborne Imaging Systems[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2010, 4(1):43535-43535.
- [19] Cota S A, Lomheim T S, Florio C J, *et al.* PICASSO: An End-To-End Image Simulation Tool for Space and Airborne Imaging Systems II. Extension to the Thermal Infrared: Equations and Methods [M]. San Diego, California: SPIE, 2011: 81580G-1-81580G-25.
- [20] Ye Zetian, Gu Xingfa. Simulation of Remote Sensing Images based on MIVIS Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2000, 29(3):235-239. [叶泽田, 顾行发. 利用 MIVIS 数据进行遥感图像模拟的研究[J]. 测绘学报, 2000, 29(3):235-239.]
- [21] Li Z L, Wu H, Wang N, *et al.* Land Surface Emissivity Retrieval from Satellite Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(9-10):3084-3127.
- [22] Anderson G P, Felde G W, Hoke M L, *et al.* MODTRAN4-based Atmospheric Correction Algorithm: FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) [M]. Orlando, FL: SPIE, 2002:65-71.
- [23] Perkins T, Adler-Golden S, Matthew M W, *et al.* Speed and Accuracy Improvements in FLAASH Atmospheric Correction of Hyperspectral Imagery[J]. Optical Engineering, 2012, 51(11):111707. doi:10.1117/1.0E+51.11.111707.
- [24] Kruse F, Kierein-Young K, Boardman J. Mineral Mapping at Cuprite, Nevada with A 63-Channel Imaging Spectrometer

[J].Photogrametric Engineering and Remote Sensing,1990,56(1):83-92.

[25] Heinz D C,Chang C I.Fully Constrained Least Squares Linear Spectral Mixture Analysis Method for Material Quantification in Hyperspectral Imagery[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(3):529-545.

Surface Emissivity Image Simulation  
for Atmospheric Absorption Bands based on Spectral Mixing

Liu Yao<sup>1</sup>,Zhang Wenjuan<sup>2</sup>,Zhang Bing<sup>2</sup>,Gan Fuping<sup>1</sup>

(1.China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources,Beijing 100083,China ;  
2.Institute of Remote Sensing and Digital Earth ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100094,China )

**Abstract:** A simulation method based on spectral mixing is proposed for surface emissivity image generation in atmospheric absorption bands,in order to provide surface input data for the corresponding end-to-end image simulation. First, endmember selection is conducted on data source to acquire image endmember spectra. Then, substitute endmembers are selected from surface-measured spectra by spectral matching with image endmembers, and used for abundance inversion. Finally, using emissivity spectra of substitute end-member in the absorption bands and abundance maps, emissivity images are simulated based on linear spectral mixing model. In the simulation experiment, Landsat8 OLI images were used as data source, and JHU and USGS spectral library data were assumed to be ground spectra of the test case. Since actual emissivity images in absorption bands are unavailable, accuracy analysis is conducted by comparing OLI reflectance images with its simulations generated by the proposed method. Total RSMEs of simulated OLI images are 0.045 and 0.049, respectively; which shows the image simulation method is feasible and can produce images with high accuracy.

**Key words:** Spectral mixing; Atmospheric absorption; Surface emissivity; Image simulation