文章编号:1001 - 9014(2010)04 - 0307 - 05

高光谱遥感图像端元提取的零空间光谱投影算法

罗文斐[1*], 钟 亮[2], 张 兵[3], 高连如[3]

(1. 华南师范大学 地理科学学院,广东 广州 510631;2. 中国科学院遥感应用研究所,北京 100101;
3. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心,北京 100190)

摘要:端元提取技术是高光谱遥感图像光谱解混的关键.在线性光谱混合分析中,首先引入了高光谱遥感图像经过零空间光谱投影后具有单形体的凸不变性.在此基础上,提出了零空间光谱投影算法,通过设计各种度量和准则,制定不同的单次端元提取策略,灵活地实现算法.经过证明,零空间光谱投影算法是对基于子空间投影距离算法(包括零空间投影距离算法与经典正交子空间投影算法)的进一步延伸,提供了更多的端元提取策略.实验结果表明,零空间光谱投影算法在模拟图像以及真实高光谱遥感图像中都能够有效地提取出图像中的各种端元.

关 键 词:高光谱遥感;光谱解混;端元;单形体;零空间

中图分类号:TP722 **文献标识码**:A

NULL SPACE SPECTRAL PROJECTION ALGORITHM FOR HYPERSPECTRAL IMAGE ENDMEMBER EXTRACTION

LUO Wen-Fei[1*], ZHONG Liang[2], ZHANG Bing[3], GAO Lian-Ru[3]

(1. School of Geography Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China;
2. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Endmember extraction is the key procedure for spectral unmixing of hyperspectral remote sensing image. In the linear spectral mixture analysis, a convex invariance of simplex was introduced when hyperspectral remote sensing image was projected into null space of spectral signature matrix of endmembers. On the basis of the invariance, a null space spectral projection algorithm (NSSPA) was proposed. One-unit endmember extraction strategies were established to implement the algorithm in a flexible way by designing different metrics and principles. It is proved that the proposed algorithm extends the algorithm based on subspace projection distance, including the classical orthogonal subspace projection (OSP) algorithm and the null space maximal distance algorithm. The algorithm provides diversified strategies for endmember extraction. The experimental results indicate that NSSPA demonstrates excellent performance of endmember extraction both in the simulated and real hyperspectral remote sensing images.

Key words: hyperspectral remote sensing; spectral unmixing; endmember; simplex; null space

引言

高光谱遥感是当前遥感的前沿技术,近十年来发展十分迅速.目前,高光谱遥感已在全球环境、土地利用、资源调查、自然灾害甚至深空探测等多个领域取得了成功的应用.由于硬件等因素的限制,高光谱遥感图像的空间分辨率往往相对较低,导致了图像中的混合像元现象更为严重,因此,光谱解混是高光谱图像分析的关键所在.在光谱解混过程中,端元提取将提取出混合像元中的纯物质成分,这是一个具有挑战性的任务[1].

另一方面,由于高光谱图像在特征空间中具有单形体的几何特征,并且端元位于单形体顶点的特殊位置,这种特殊的结构为端元提取提供了重要的依据. 基于这种特殊的几何结构,人们提出了许多端元提取方法,如纯像元指数(Pixel Purity Index,

收稿日期:2009 - 06 - 02,**修回日期**:2010 - 01 - 25 **Received date**: 2009 - 06 - 02, **revised date**: 2010 - 01 - 25

基金项目:国家 863 项目(2008AA12Z113);国家 973 项目(2009CB723902);国家自然科学基金项目(40901232,40901225)资助

作者简介:罗文斐(1979-),男,广东大埔人,讲师,主要从事高光谱遥感以及遥感图像处理方面的研究.

* **通讯作者**: luowenfei@ irsa. ac. cn.

PPI)算法[2]、N-FINDR(N-FINDR Algorithm)算法[3]、正交子空间投影(Orthogonal Subspace Projection,OSP)[4]算法、顶点成分分析(Vertex Component Analysis,VCA)算法[5]、基于单形体的增长方法[6]、单形体投影方法(Simplex Projection Methods,SPM)[7]、基于空间约束的连续投影算法(Successive Projection Algorithm,SPA)[8]等,这类端元提取方法十分有效,具有广阔的应用前景.

同时,利用零空间投影技术从单形体几何结构中提取顶点信息[9],提供了一种有效的分析方法.本文对这一技术展开更深入的探讨,提出了一种零空间光谱投影算法,该算法的设计更为灵活,能够获得各种不同的端元提取效果.

1 零空间光谱投影的凸不变性

假设当前已被提取的端元向量为 $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\cdots,\mathbf{e}_k$,构成端元矩阵

$$\mathbf{E}^{(k)}=[\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\cdots,\mathbf{e}_k] \quad , \tag{1}$$

其列空间组成端元子空间.

记$\overline{\mathbf{E}}^{(k)}$为$\mathbf{E}^{(k)}$的列空间所对应零空间中的任意一个基,通过$\overline{\mathbf{E}}^{(k)}$把高光谱图像$\mathbf{X}$投影到零空间中,得到新的图像

$$\mathbf{Y}=\overline{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{X} \quad . \tag{2}$$

考虑图像$\mathbf{X}$中的任意像元光谱

$$\mathbf{x}=a_1\mathbf{e}_1+a_k\mathbf{e}_k+\cdots+a_m\mathbf{e}_m \quad , \tag{3}$$

经过$\overline{\mathbf{E}}^{(k)}$投影后得

$$\mathbf{y}=\overline{\mathbf{E}}^{(k)}(a_1\mathbf{e}_1+a_k\mathbf{e}_k+\cdots+a_m\mathbf{e}_m) \quad . \tag{4}$$

又因为$\overline{\mathbf{E}}^{(k)}$是零空间的基,即

$$\overline{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{e}_i=\mathbf{0},i=1,2,\cdots,k \quad , \tag{5}$$

其中$\mathbf{0}$为零向量,因此

$$\begin{aligned}\mathbf{y}&=\sum_{i=1}^{k}a_i\overline{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{e}_i+\sum_{i=k+1}^{m}a_i\overline{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{e}_i\\&=\mathbf{0}\sum_{i=1}^{k}a_i+\sum_{i=k+1}^{m}a_i\mathbf{e}'_i \quad ,\end{aligned} \tag{6}$$

其中,$\mathbf{e}'_i=\overline{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{e}_i$为仍未提取的端元光谱在零空间中的投影.令

$$a'_0=\sum_{i=1}^{k}a_i,a'_j=a_{k+j},j=1,\cdots,m-k \quad , \tag{7}$$

则$\sum_{i=0}^{m-k}a'_i=\sum_{i=0}^{m}a_i=1$、$a'_i\geqslant 0$仍然成立.

因此图像中任意像元光谱在零空间的投影仍然在以$\mathbf{0},\mathbf{e}'_{k+1},\mathbf{e}'_{k+2},\cdots,\mathbf{e}'_m$为端点的新的单形体当中,且其余的端元$\mathbf{e}_{k+1},\mathbf{e}_{k+2},\cdots,\mathbf{e}_m$在零空间投影后的单形体当中对应着不同的非零顶点$\mathbf{e}'_{k+1},\mathbf{e}'_{k+2},\cdots,\mathbf{e}'_m$,而当前端元均被投影到原点处,这一性质称为"零空间光谱投影的凸不变性".

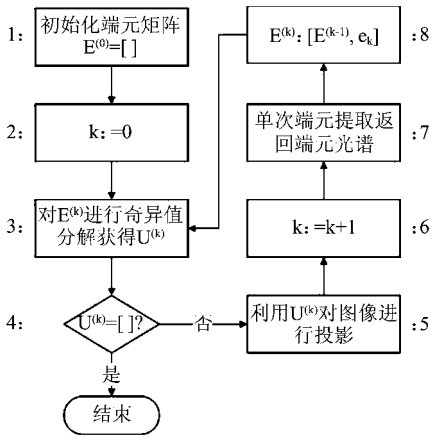


图1 零空间光谱投影算法流程图
Fig. 1 The workflow of NSSPA

2 零空间光谱投影算法

2.1 算法描述

由零空间光谱投影的凸不变性可见,每次在进行端元提取之前,把光谱投影到零空间,待提取的端元必然处于投影后单形体的非零顶点处.这就把复杂的提取单形体所有顶点的问题简化为提取单形体中任意一个非零顶点的问题,由此得到零空间光谱投影算法(Null Space Spectral Projection Angorithm,NSSPA),如图1所示.

算法通过逐步迭代求取新的端元,在每次迭代中,把当前所提取的端元信号组成列向量矩阵,并对当前端元矩阵进行奇异值分解,可求得矩阵列空间对应的零空间的一个标准化正交基$\mathbf{U}^{(k)}$[10],通过$\mathbf{U}^{(k)}$即可把图像投影到零空间当中(见步骤3-5).随着迭代次数的增加,零空间将逐步缩小直至为空,这时端元提取过程结束.

在上述过程中,只要每次迭代提取一个非零顶点,即可保证产生单形体的所有顶点.

因此,单次端元提取(步骤7)是整个算法的关键,通过制定不同的策略,实现对任意一个非零顶点的提取.

2.2 单次端元提取策略

单次端元提取策略的设计过程为:设计与选择端元提取所需的光谱度量,根据度量设计体现单形体非零顶点特征的准则函数,最后制定端元提取策

略的优化准则函数.

假设 $\mathbf{x}$、$\mathbf{y}$ 是经过当前零空间投影后,单形体中的两个 k 维向量,在单次端元提取策略中较为常用的度量有:

$$d(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \left[\sum_{i=1}^{k}(x_i - y_i)^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad , \tag{8}$$

$d(\mathbf{x},\mathbf{y})$ 为欧式距离度量.

$$M(\mathbf{x},\mathbf{y}) = (\mathbf{x}-\mathbf{y})^{\mathrm{T}}\mathbf{C}^{-1}(\mathbf{x}-\mathbf{y}) \quad , \tag{9}$$

其中 $\boldsymbol{C}$ 为图像协方差矩阵,$M(\mathbf{x},\mathbf{y})$ 为 Mahalanobis(马氏)相对距离度量.

$$S(\mathbf{x},\mathbf{y}) = \frac{\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{y}}{\|\mathbf{x}\|\|\mathbf{y}\|} \quad , \tag{10}$$

$S(\mathbf{x},\mathbf{y})$ 为角度余弦度量.

根据上述度量定义以下几种准则:

(1) 原点距离准则

已知原点向量(即零向量)是单形体的一个顶点,定义单形体中任何一点到原点的距离作为准则函数. 当采用欧氏距离作为度量时,得准则函数

$$J_0(\mathbf{x}) = d(\mathbf{x},\mathbf{0}) = \left[\sum_{i=1}^{k}x_i^2\right]^{\frac{1}{2}} \quad . \tag{11}$$

(2) 均值距离准则

把像元与图像均值的距离作为判断的准则,但该准则有可能违背零空间光谱投影算法的非零顶点原则,需要结合原点距离进行修正. 当采用马氏距离作为度量时,得准则函数

$$\begin{aligned} J_1(\mathbf{x}) &= J_0^i(\mathbf{x})\cdot M(\mathbf{x},\bar{\mathbf{x}}) \\ &= J_0^i(\mathbf{x})\cdot(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}})^{\mathrm{T}}\cdot\mathbf{C}^{-1}\cdot(\mathbf{x}-\bar{\mathbf{x}}) \end{aligned} \quad , \tag{12}$$

其中,$\bar{\mathbf{x}}$ 为图像均值,i 为调整参数,且 $i>0$.

(3) 角度余弦与距离的混合准则

仅使用角度余弦度量会出现两个问题:容易受原点端元的干扰,无法分清处于单形体棱上的像元还是端元. 可结合原点距离来解决以上两个问题,由此得到角度余弦与距离的混合准则:

$$J_2(\mathbf{x}) = \frac{S(\mathbf{x},\bar{\mathbf{x}})}{J_0^i(\mathbf{x})} = \frac{\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\bar{\mathbf{x}}}{J_0^{i+1}(\mathbf{x})\cdot\|\bar{\mathbf{x}}\|} \quad . \tag{13}$$

不同的单次端元提取策略设计如表 1 所列.

表 1　不同策略的零空间光谱投影算法

Table 1　Difference strategies for NSSPA

算法编号	算法名称	优化准则
A1	最大原点距离算法	最大化 $J_0(\mathbf{x})$
A2	最大化均值距离算法	最大化 $J_1(\mathbf{x})$
A3	混合准则的端元提取算法	最小化 $J_2(\mathbf{x})$

零空间光谱投影算法通过上述策略实现.

3　算法讨论

3.1　与零空间投影距离算法的关系

如果采用最大化原点距离准则作为单次端元提取策略. 令当前已确定的端元矩阵为 $\mathbf{E}^{(k)}$,根据零空间投影公式,则 J_0 可写为

$$\begin{aligned} J_0(\mathbf{x}) &= (\bar{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{x})^{\mathrm{T}}(\bar{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{x}) \\ &= \mathbf{x}^{\mathrm{T}}\bar{\mathbf{E}}^{(k)\mathrm{T}}\bar{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{x} \end{aligned} \quad . \tag{14}$$

比较最大零空间投影距离算法中的距离公式:

$$\begin{aligned} d &= \|\bar{\mathbf{E}}^{(k)\#}\bar{\mathbf{E}}^{(k)}\mathbf{x}\| \\ &= \mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{x} \end{aligned} \quad , \tag{15}$$

其中,$\bar{\mathbf{E}}^{(k)\#}$ 为 $\mathbf{E}^{(k)}$ 的 Moore-Penrose 广义逆矩阵,$\mathbf{U}^{\mathrm{T}}$ 为 $\mathbf{E}^{(k)}$ 零空间的一个标准化正交基. 显然,当 $\bar{\mathbf{E}}^{(k)}$ 取 $\mathbf{U}^{\mathrm{T}}$ 时,式(14)与式(15)等价.

3.2　与正交子空间投影算法的关系

比较正交子空间投影矩阵:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{I} - \mathbf{E}^{(k)\#}\mathbf{E}^{(k)} \\ &= \mathbf{I} - \mathbf{E}^{(k)}(\mathbf{E}^{(k)\mathrm{T}}\mathbf{E}^{(k)})^{-1}\mathbf{E}^{(k)\mathrm{T}} \end{aligned} \quad , \tag{16}$$

令 $\mathbf{E}^{(k)}$ 的奇异值分解为[15]

$$\mathbf{E}^{(k)} = [\mathbf{U}_1,\mathbf{U}_2]\begin{bmatrix}\sum_1 & \mathbf{0}\\ \mathbf{0} & \mathbf{0}\end{bmatrix}V^{\mathrm{T}} \quad , \tag{17}$$

代入上式最终得:

$$\mathbf{P} = \mathbf{U}_2\mathbf{U}_2^{\mathrm{T}} \quad . \tag{18}$$

又由于零空间投影距离算子 $\bar{\mathbf{E}}^{(k)\#}\bar{\mathbf{E}}^{(k)}$ 等价于 $\mathbf{U}_2\mathbf{U}_2^{\mathrm{T}}$,因此,零空间投影距离算子与正交子空间投影算子等价.

可见,经典的正交子空间投影算法与零空间投影距离算法仅仅是零空间光谱投影算法采用标准正交基、满足最大化 J_0 准则的特例.

4　实验

4.1　模拟图像实验

在实验中,采用 USGS 光谱库提取的 6 条光谱,如图 2 所示. 对这 6 个端元采用不同的丰度比例进行线性混合,生成模拟背景图像,图像大小为 100×100.

在模拟背景图像中,分别添加三种类型的目标,目标光谱如图 3 所示,其中目标一为 Kaolin/Smect,目标二为 Aspen Leaf,目标三为 Cheat Grass,从波形来看,目标一与目标二、目标三差异较大,目标二与目标三具有一定的相似程度.

表2 算法所提取的端元位置坐标
Table 2 Endmember location extracted by NSSPA

A1	A2	A3
(91,58)	(51,3)	(91,58)
(51,3)	(32,43)	(51,3)
(40,24)	(40,12)	(90,98)
(82,77)	(99,5)	(21,18)
(21,18)	(82,77)	(99,5)
(99,5)	(6,50)	(6,50)
(6,50)	(66,77)	(40,12)
(60,12)	(20,12)	(60,12)
(20,12)	(60,12)	(20,12)

分别在背景数据的不同位置以不同丰度添加这些目标,如图4所示. 目标在模拟图像中的最大丰度为20%,因此在位置(20,12)、(40,12)、(60,12)中的像元即是目标的最纯像元,以此作为目标的端元.

在模拟图像中分别利用A1、A2和A3算法连续提取9个端元(算法代号采用表1中的编号),先后提取的端元位置如表2所示.

实验结果表明,使用角度余弦与马氏距离度量的算法对小目标端元的提取比使用欧式距离的算法好,两者都能提取出纯度最高的端元.

4.2 真实图像实验

真实图像实验采用了Cuprite Nevada地区[11]的AVIRIS(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer)高光谱数据(350×350像素,1997年6月19日飞行),如图5所示. 图中包含了多种矿物,其中有五处经过了地面验证属于纯像元,在图中标记为A、M、K、C以及B,分别代表了Alunite、Muscovite、Kaolinite、Calcite以及Buddingtonite五种矿物,其对应的光谱如图6所示.

分别使用三种算法对图像进行端元提取,提取之后的结果与纯像元矿物的光谱进行比较,比较结果如图7所示. 从实验结果可以看出,各算法对这五种矿物的提取效果不一样, A1能较好地提取Alunite、Kaolinite; A2对Buddingonite、Kaolinite、Muscovite三种矿物的提取效果较佳; A3对Kaolinite、Muscovite同样具有较好的提取效果,但对Buddingonite的提取效果不如A2. 可见,采用不同的度量和准则单次端元提取策略,使得零空间光谱投影算法具有各种独特效果.

5 结论

提出了零空间光谱投影算法,该算法通过设计多种单次端元提取的策略,以达到不同的端元提取效果. 通过论证与实验评价可得到以下结论.

(1) NSSPA与传统的投影距离端元提取算法相比,突破了以往算法仅依据欧式投影距离设计思路的局限性,提出了多策略的设计方法,使算法实现更具有灵活性.

(2) 使用角度余弦与马氏距离度量的NSSPA对小目标端元的提取具有较好的效果.

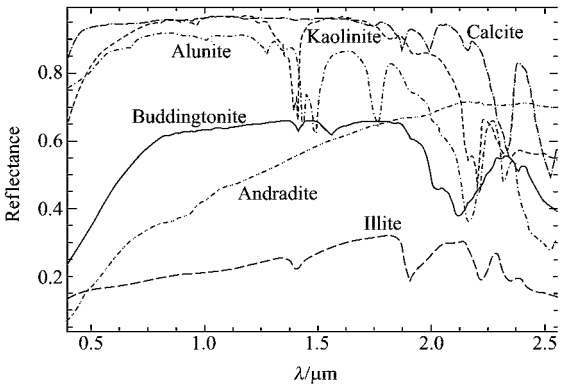


图2 背景端元
Fig. 2 Background endmembers

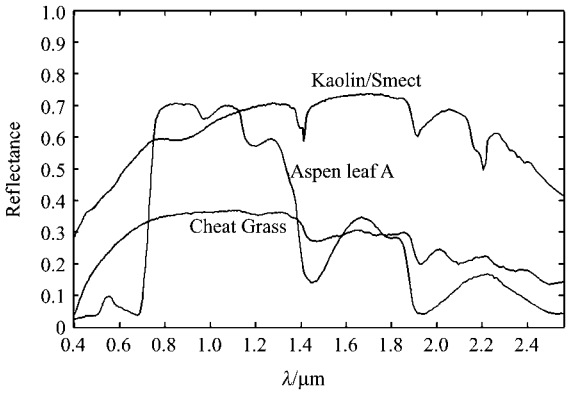


图3 三种目标的光谱
Fig. 3 The spectra of three targets

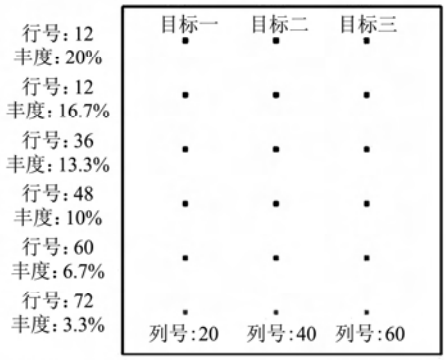


图4 目标丰度及其位置示意图
Fig. 4 Location of the targets and their abundance

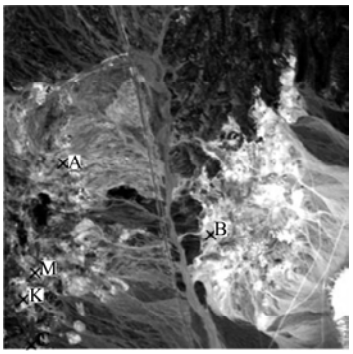


图 5　Cuprite Nevada 地区 AVIRIS 图像(675nm 波段)
Fig. 5　AVIRIS scence of Cuprite Nevada area(675nm band)

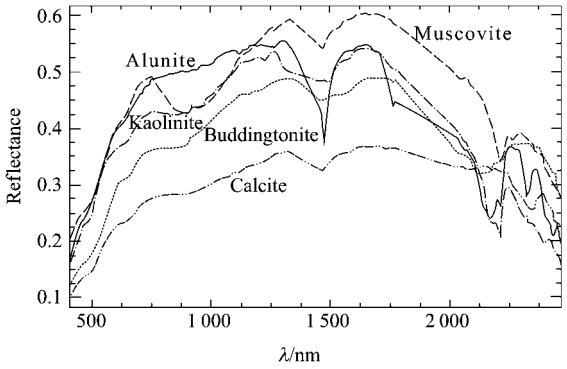


图 6　5 种纯像元矿物的光谱
Fig. 6　Spectra of five pure pixel minerals

(3) 在真实图像检验中,提出的三种不同的单次端元提取策略在端元提取结果中取得了各自独特的效果,多策略的结合,能够有效获取更多有意义的端元.

(4) 本算法仍需进一步改进,探索更多有效的单次端元提取策略,针对实际应用情况,实现多策略选择、更为可靠的端元提取技术.

致谢　感谢 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 提供的 AVIRIS 实验数据以及 ENVI (The Environment for Visualizing Images, ITT 版权所有)提供的光谱库实验数据.

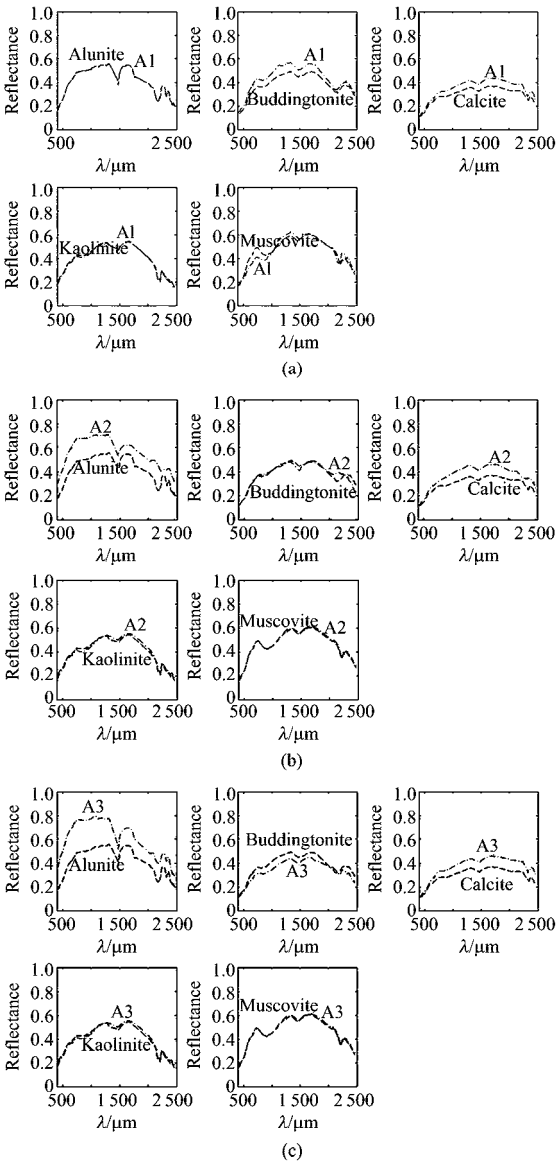


图 7　NSSPA 端元提取的结果比较(a) A1 (b) A2 (c) A3
Fig. 7　Results of endmember extraction by NSSPA(a) A1 (b) A2 (c) A3

REFERENCES

[1] Chang C I. *Hyperspectral data exploitation: Theory and applications* [M]. New Jersey: Wiley-Interscience Press, 2007,1—19.

[2] Boardman J W, Kruse F A, Green R O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data[C]. In Fifth JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena, 1995. CA:JPI,1995,23—26.

[3] Winter M E. N-FINDR: an Algorithm for fast autonomous spectral endmember determination in hyperspectral data [C]. In SPIE Imaging Spectrometry V. San Diego CA, 1999. Washington: SPLE Pub,1999,266—275.

[4] Chang C I. *Hyperspectral imaging: techniques for spectral detection and classification*[M]. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers,2003,73—88.

[5] Nascimento J M P, Dias J M B. Vertex component analysis: A fast algorithm to unmix hyperspectral data[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*,2005,**43**(4):898—910.

[6] Chang C I, Wu C C, Liu W, *et al*. A new growing method for simplex-based endmember extraction algorithm [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*,2006, **44**(10):2804—2819.

[7] Bajorski P. Simplex projection methods for selection of endmembers in hyperspectral imagery[C]. In IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage Alaska,2004. USA:IEEE Press,2004,**5**:3207—3210.

(下转 320 页)

其它因素的交互作用的影响大.

根据本文研究的结果,建议在进行植物叶片的偏振反射及二向反射的研究时要注意以上几种因素的影响作用,尤其是这些因素的交互影响作用.孤立地考虑这些因素对植物叶片偏振反射的影响是不全面的,进而对于现有遥感传感器在植被偏振遥感器的设计提供理论依据.

REFERENCES

[1] Suits G H. The cause of azimuthal variations in directional reflectance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1972, **2**: 175—182.

[2] Hapke B W. *Theory of Reflectance and Emitance Spectroscopy*[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge Univ. Press, 1993.

[3] Li X W, Strahler A H. Geometric optical modeling of aconiferous forest canopy[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **23**(2): 207—221.

[4] HAN Yang, ZHAO Yun-Sheng, ZHAO Nai-Zhuo, *et al*. Effects of multi-angle hyperspectral polarized reflection by forest soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(韩阳,赵云升,赵乃卓,等.森林土壤多角度高光谱偏振反射影响研究初探.**光谱学与光谱分析**),2009,**29**(3):702—706.

[5] HAN Yang, ZHAO Yun-Sheng, ZHANG Li-Li, *et al*. Study on the modeling of hyperspectral polarized reflection of clove lamina with chlorophyll content[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*(韩阳,赵云升,张莉莉,等.丁香叶片叶绿素含量偏振高光谱数学模型反演研究.**光谱学与光谱分析**),2009,**29**(6):1595—1598.

[6] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, *et al*. The POLDER Mission: instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3):598—615.

[7] WAN Yu-Qing, TAN Ke-Long, ZHOU Ri-Ping, *et al*. *Hyperspectral Remote Sensing Application and Investigation*[M](万余庆,谭克龙,周日平,等.**高光谱遥感应用研究**.北京:科学出版社),2006:137—141.

[8] FANG Kai-Tai, MA Chang-Xing. *Even experiment and orthogonal experiment*[M].(方开泰,马长兴.**均匀实验与正交实验**.北京:科学出版社),2001,35—77.

(上接 311 页)

[8] Zhang J K, Rivard B, Rogge D M. The successive projection algorithm(SPA), an algorithm with a spatial constraint for the automatic search of endmembers in hyperspectral data[J]. *Sensors*, 2008, **8**(2):1321—1342.

[9] LUO Wen-Fei, ZHONG Liang, ZHANG Bing, *et al*. An spectral unmixing algorithm for hyperspectral image based on the distance to subspace[J]. *Progress in Natural Science*(罗文斐,钟亮,张兵,等.基于子空间距离的高光谱图像光谱解混算法,**自然科学进展**),2008,**18**(10):1175—1180.

[10] Zhang Xian-Da. *Matrix analysis and applications*[M]. Beijing: Tsinghua University Press(张贤达.**矩阵分析与应用**.北京:清华大学出版社),2004,344-358.

[11] Abrams M, Ashley R, Rowan L, *et al*. Mapping of hydrothermal alteration in the Cuprite Mining District, Nevada, using aircraft scanner images for the spectral region 0.46 to 2.36 mm[J]. *Geology*, 1997, **5**(12):713—718.