

文章编号: 1001-1498(2006)02-0192-07

# 基于光谱混合分析的荒漠化信息提取 ——以毛乌素沙地为例\*

李晓松<sup>1</sup>, 吴波<sup>2\*\*</sup>, 范文义<sup>3</sup>, 王刚<sup>4</sup>, 杨洪晓<sup>5</sup>, 王妍<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 3. 东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 4. 黑龙江省林业调查规划院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 5. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

**摘要:**采用光谱混合分析(SMA)技术,选取农地、裸沙、沙生植被、水和盐碱地作为基本组分,以位于半干旱区的毛乌素沙地的典型地区为例,进行了荒漠化土地混合像元分解和荒漠化信息提取的尝试,并与穗帽变换和监督分类的结果进行了比较,最后采用实地调查数据和NDVI方法进行了精度验证。研究结果表明:光谱混合分析技术用于荒漠化信息提取具有比较好的效果,效果明显优于常用的NDVI方法。

**关键词:**光谱混合分析(SMA); 荒漠化; 毛乌素沙地; 植被指数(NDVI)

**中图分类号:** TP75 **文献标识码:** A

## Extraction of Desertification Information Based on SMA

### ——A Case Study in Mu Us Sandland

LI Xiao-song<sup>1</sup>, WU Bo<sup>2</sup>, FAN Wen-yi<sup>3</sup>, WANG Gang<sup>4</sup>, YANG Hong-xiao<sup>5</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, CAF, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Forestry, CAF, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 3. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 4. Academy of Forestry Survey and Planning, Harbin 150040, Heilongjiang, China; 5. The College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** In this study, in order to accurately extract desertification information based on remote sensing data, Spectral Mixture Analysis (SMA) was conducted in a typical area of Mu Us Sandland in semiarid region by taking farmland, sands, psammophytic vegetation, water and salinized land as endmembers. A comparison was made among SMA, TC transformation and supervised classification. The accuracy on the result was validated based on field survey data and compared with NDVI method. The result suggested that SMA could be used for extracting desertification information with an obviously better output based on remote sensing data than NDVI method.

**Key words:** Spectral Mixture Analysis (SMA); desertification; Mu Us Sandland; NDVI

荒漠化信息的准确提取是荒漠化监测和评价的基础。在遥感技术尚未普及的早期研究中,荒漠化

信息的提取以野外实地调查为主,因其费时、费力,已很难满足当前荒漠化监测的需要。近年来,随着

收稿日期: 2005-01-04

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2005BA517A04),国家自然科学基金项目(30571528),科技部国际科技合作重点项目(2003DFB00009)

作者简介: 李晓松(1981—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生。

\* \* 通讯作者

遥感技术的迅速发展和普及,利用遥感技术提取荒漠化信息已经成为荒漠化监测与评价的主要手段。基于传统遥感技术的荒漠化监测与评价往往以像元为基本分析单元,把像元看成是均质的。然而,由于目前常用的传感器的空间分辨率不高,在很多地区,一个像元内往往包含不同的土地覆盖类型,一般称为混合像元。在沙丘广泛分布的荒漠化地区,沙丘的迎风坡、背风坡和丘间地植被覆盖往往差异较大,空间异质性非常强烈,因此,混合像元大量存在,以像元为分析单元的传统分析方法在荒漠化信息提取中有很大的局限性。

光谱混合分析技术(Spectral Mixture Analysis, SMA)是一种有效处理混合像元的遥感分析方法,于 20 世纪 70 年代提出,并在 20 世纪 90 年代以来得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。SMA 就是将混合像元分解成不同基本组分的组合,并求得这些基本组分在混合像元中所占的比例,其结果以各基本组分的百分比图像来表示。SMA 使遥感应用由像元级达到亚像元级,使遥感信息得到了更充分的利用,对于荒漠化监测与评价具有重要的实践意义。

毛乌素沙地位于我国北方农牧交错区,是我国荒漠化研究的热点地区之一。农牧交错区人类活动具有规模小、分散、随机的特点,与脆弱的生态系统相互作用,使该地区具有非常显著的景观异质性,即不同类型、不同退化程度的荒漠化土地在空间上组合在一起,构成镶嵌体。该地区各类型沙丘所占面积积极大,其中流动沙丘分布最广。沙丘散见于各种地形部位,各处沙丘面积大小不等,活动和固定程度不一,高度、形态不断变化。由于沙丘分布广泛,打乱了地带性植被和土壤的分布格局,增加了地表景观的破碎程度,使沙地的主要景观要素类型在结构上具有复合性<sup>[4,5]</sup>。吴波<sup>[6]</sup>曾采用目视解译方法对毛乌素沙地具有复合性的异质景观进行了分类制图。本文以毛乌素沙地为例,采用光谱混合分析技术进行了荒漠化信息提取的尝试,并将该方法与常用的遥感分析方法进行了对比,最后通过实地调查进行了精度验证。期望本研究有助于改进荒漠化的遥感信息提取方法,对进一步提高荒漠化监测精度有所裨益。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

毛乌素沙地位于内蒙古、陕西、宁夏的交界地

带,地理位置为 37°27'30"~39°22'30"N, 107°20'~111°30'E,面积约 4 × 10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。毛乌素沙地属半干旱气候,年降水量 250~440 mm,年平均气温 6.0~8.5℃,水热条件比较优越,然而由于人类活动的强烈影响,毛乌素沙地荒漠化过程加剧,流动沙地广布,成为我国干草原和荒漠草原地带最大的流动沙地。该地区沙生植被分布面积最大,其中油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch) 群系是固定、半固定沙丘上的主要群落。滩地主要为草甸植被,盐生植被主要见于盐碱湖滨的盐渍化土壤上。本研究区位于毛乌素沙地腹部乌审旗北部地区,面积 3 444.7 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据预处理

本研究采用的影像为 2001 年 8 月下旬的 ETM 影像,基本无云覆盖。在影像上均匀选取 15 个可明显识别的控制点,并基于多项式校正模型,采用 1:5 万地形图对影像进行了精几何校正,校正后的图像像元均方根误差(RMS)为 0.23 个像元,满足精度要求。为了进一步提高图像精度,采用 Civco 提出的地形校正方法<sup>[7]</sup>,基于用 1:5 万地形图生成的数字高程模型(DEM)对影像进行了地形校正以剔除地形影响。由于缺乏卫星过境时详细的大气剖面资料,无法采用 LORTRAN 或“6S”等大气校正模型,本研究直接采用 Gilbert 模型<sup>[8]</sup>对影像进行了大气校正,最后得到除热红外波段外其它 6 个波段的地表反射率;同时,收集了该地区的地貌、土壤、植被和土地利用等专题图作为遥感分析的必要补充。

### 1.3 SMA 分解模型的选择

国内外学者研究和多种光谱混合分解方法,提出许多光谱混合模型,如线性模型、概率模型、几何光学模型、随机几何模型以及模糊模型等,其中线性光谱混合模型(LSMM)是光谱混合分析最常用的方法,发展较为成熟,可操作性较强。线性光谱混合模型的基本原理是,像元在某一波段的反射率(亮度值)是由构成像元的基本组分的反射率以其所占像元面积比例为权重系数的线性组合。本研究采用线性光谱混合模型来进行混合像元分析。

线性光谱混合模型可用如下公式来描述:

$$F_{ijk} = \sum_{m=1, p} F_{ijm} \cdot e_{ijk} \quad (1)$$

$$F_{ijm} = 1$$

$$0 \leq F_{ijm} \leq 1$$

式(1)中:  $r_{ijk}$  是  $i$  行  $j$  列像元在  $k$  波段的反射率,  $F_{ijm}$  是基本组分  $m$  在  $i$  行  $j$  列像元中所占分量值;  $r_{m,k}$  是基本组分  $m$  在  $k$  波段的反射率,  $e_{ijk}$  为  $k$  波段  $i$  行  $j$  列像元的误差值。

应用该模型的关键是尽可能减少模型中每个像元的误差,即使  $RMS$  最小化。

$$RMS = \left[ \frac{\sum (e_{ijk}^2 / N)}{N} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式(2)中:  $N$  为像元总数,  $e_{ijk}$  为  $k$  波段  $i$  行  $j$  列像元的误差值。解决该模型最常用的方法是最小二乘法,其公式为:

$$\hat{f} = (M^T M)^{-1} M^T X \quad (3)$$

式(3)中:  $\hat{f}$  为基本组分分量矢量,  $M$  为基本组分在不同波段反射率矢量,  $X$  为所有像元在相应波段的反射率。上标  $T$  和  $-1$  分别表示矩阵的转置和逆。

#### 1.4 基本组分的确定

在 LSMM 模型中,基本组分的类型、数量、取值是至关重要的,是影响混合像元分析精度的关键。确定基本组分的原则是残余误差应尽可能小,像元分解后的分量  $f$  的值满足  $0 < f < 1$ <sup>[9]</sup>。基本组分的类型应具有代表性,是研究区内多数像元的有效组成成分。由于 LSMM 模型求解的需要,基本组分的数量不能高于可用传感器的波段数<sup>[10]</sup>。本研究以 ETM 为数据源,热红外和全色波段不参与分析,因此基本组分的数量不能大于 6 个。

采集基本组分光谱信息的常用方法有两种<sup>[11]</sup>: (1)通过实地或实验室的光谱测量获得; (2)运用主成分分析(PCA)从影像数据中提取。前者需要大量地物光谱测量及大气校正工作,难度较大,可操作性较差。目前大部分研究中都采用后一种方法,并取得了较好的效果<sup>[12]</sup>。本研究采用 PCA 法对影像进行主成分分析,通过正交、线性变换将 6 个高度相关的波段压缩为 3 个新的不相关的波段。经过主成分分析,6 个波段的有效信息主要集中于第 1 和第 2 主分量上,其累计信息量占 6 个波段总信息量的 93%,有效地压缩了数据维数,并且去除了原始影像各波段的高度相关。然后,绘制第 1 主成分与第 2 主成分的散点图(图 1)。利用 ENVI 软件的散点图分析功能可以确定散点图的顶端分别对应研究区影像中的农地、裸沙、沙生植被、水和盐碱地。把上述地物作为初选的基本组分采用 LSMM 模型进行分析,结果显示,  $RMS$  小于 10%,能够满足分析需

要,因此可以将农地、裸沙、沙生植被、水和盐碱地作为基本组分。

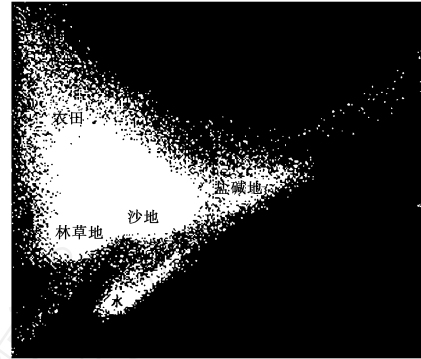


图 1 第 1 主分量和第 2 主分量散点图

基本组分的取值是决定分析精度的关键。一些学者建议利用单个像元的反射率来定义基本组分,但是,研究表明,利用像元均值更能增强样本的空间显著性<sup>[13]</sup>。细致的野外调查和已有图件资料使得能够在影像上识别各个基本组分,对每个基本组分选取 100 个像元作为样本,取其均值作为基本组分在各个波段的参照光谱值。图 2 为基本组分的光谱折线图。

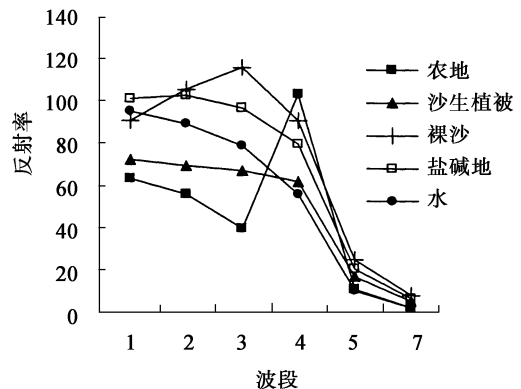


图 2 基本组分光谱折线图

## 2 结果与分析

### 2.1 SMA 分解结果

SMA 的分解结果为各基本组分分量图像与  $RMS$  误差图像(图 3)。图像中白色或较亮颜色表示像元中该基本组分分量比重较高,相反,黑色或较暗颜色则表示像元中该基本组分分量的比重较低。农地与沙生植被分量图像主要反映研究区内的植被分布,裸沙与盐碱地分量图像则主要反映研究区内荒漠化土地的分布,裸沙在整

个区域内都有分布,而盐碱地则主要分布在滩地内,并且多分布于水体(多为盐湖)周围。 $RMS$ 图像反映了模型的精度,图像中较亮地区对应于影

像中的薄云和阴影,因在基本组分中未考虑薄云和阴影,所以带来一定误差。经计算,平均  $RMS$  误差约为 8%,说明结果较为理想。

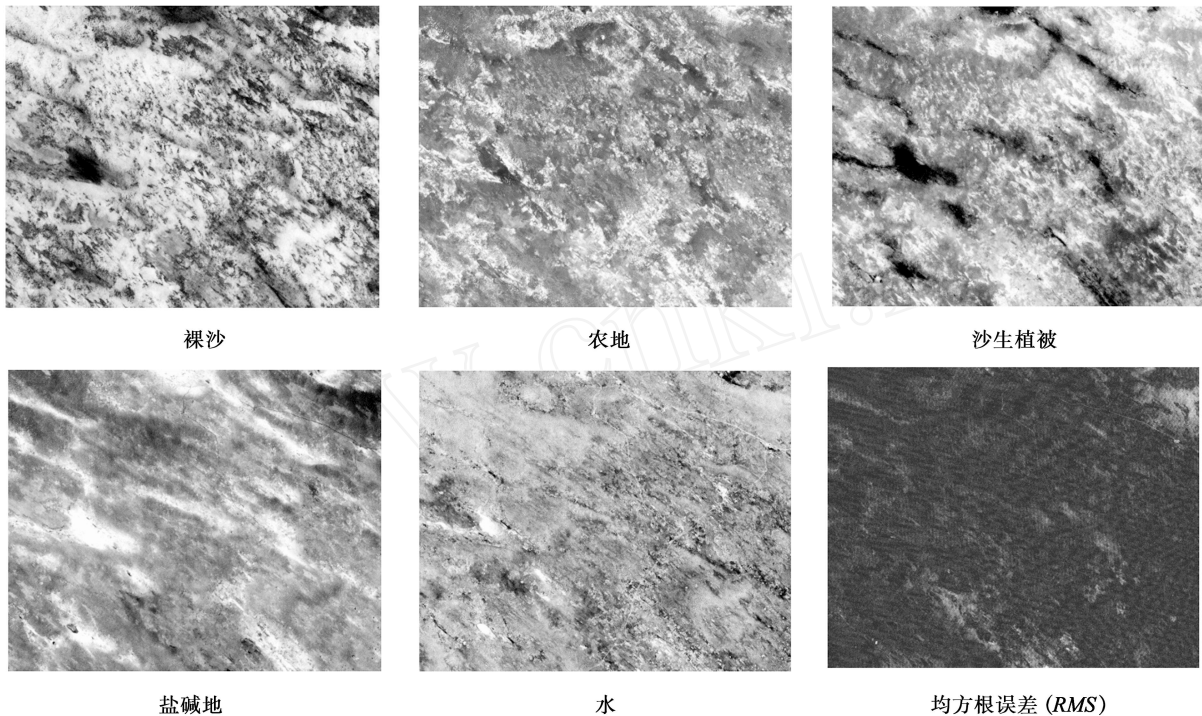


图 3 混合像元分解(SMA)结果图

## 2.2 SMA与其它方法的比较

2.2.1 SMA与穗帽变换的比较 穗帽变换是在多维光谱空间中通过线性变换、光谱空间旋转使植被与土壤的光谱特征得以有效分离的一种遥感分析方法,变换后的第 1 分量(TC1)表征“土壤亮度”,反映土壤光谱信息,第 2 分量(TC2)表征“绿度”,反映植被光谱信息。研究区内 5 个基本组分中,裸沙和盐碱地主要反映土壤信息,农地和沙生植被主要反映植被信息。在利用 SMA 方法对荒漠化土地进行分析时,常常用裸沙和盐碱地分量的和分量作为“荒漠化土地分量”来提取荒漠化土地信息<sup>[14,15]</sup>。本文在研究区内随机取 84 个像元,对 TC1 分量与裸沙和盐碱地分量之和“荒漠化土地分量”进行相关分析,结果见图 4,二者的相关系数达到 0.94,表明利用 SMA 获得的“荒漠化土地分量”与通过穗帽变换得到的“土壤亮度”有比较好的相关性,也从另一个方面说明本研究将 SMA 用于荒漠化地区效果较好;而且, SMA 方法通过裸沙分量和盐碱地可以将沙地和盐碱地信息有效分离,因此采用该方法能够获取更多的荒漠化土地的信息。

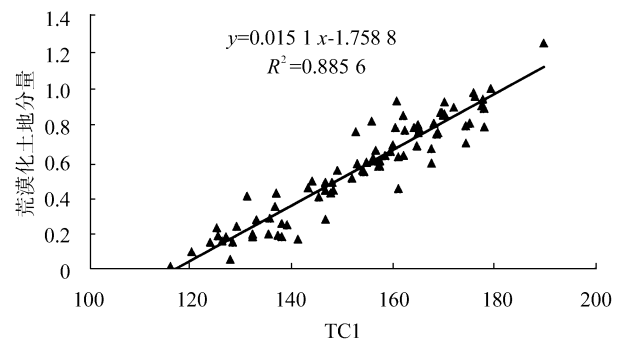


图 4 荒漠化土地分量与穗帽变换第 1 分量(TC1)的相关关系

2.2.2 SMA与监督分类的比较 监督分类是遥感图像分类最常用的方法之一。本研究借助于近年来的野外调查资料和各种专题图对影像进行了监督分类,将研究区分为流动沙地、农田、盐碱地、固定-半固定沙地和水体 5 种土地覆盖类型。根据野外调查数据进行验证,总的分类精度达到 80.56%。事实上, SMA 各基本组分恰与监督分类土地覆盖类型一一对应,即流动沙地中裸沙所占比例最大,农田中农地所占比例最大,固定-半固定沙地中沙生植被所占比例最大,盐碱地中盐碱地所占比例最大,水体中水所占比例最

大。为了检验 SMA 分解结果的准确性,将通过监督分类得到的土地覆盖类型图与利用 SMA 方法得到的各基本组分分量图象进行叠加,计算出每一种土地覆盖类型内各基本组分分量的平均值(表 1)。由表 1 可见,每一种土地覆盖类型恰好以一种基本组分为其主要组分。对角线上的分量值较高(0.748 7~0.902 4),而且显著高于同列中其它元素,因此可以通过 SMA 分量图像将不同的土地覆盖类型区分开。

表 1 混合像元分解(SMA)与监督分类的比较

监督分类结果	面积 / km <sup>2</sup>	裸沙分量均值	农地分量均值	沙生植被分量均值	盐碱地分量均值
流动沙地	1 444.14	0.748 7	0.007 9	0.323 7	0.020 2
农田	805.85	0.322 8	0.902 4	0.012 5	0.115 0
固定-半固定沙地	1 143.71	0.349 4	0.123 5	0.826 5	0.153 3
盐碱地	43.12	0.121 7	0.205 5	0.354 5	0.868 8

### 2.3 荒漠化信息提取

从前文中与穗帽变换和监督分类结果的对比可以看出,SMA 方法通过 5 个基本组分将研究区内的土地覆盖信息进行了有效分离,根据 SMA 的分析结果可以有效提取荒漠化土地信息,裸沙、盐碱地、沙生植被等基本组分不仅能够反映荒漠化土地的空间分布信息,而且也可以通过分量值的大小反映荒漠化程度的信息。本研究采用的 LSM 模型中各分量非负,和为 1,所以 SMA 分解结果的土壤信息(即裸

沙和盐碱地)与植被信息(即农地和沙生植被)强烈负相关,因此用裸沙和盐碱地分量之和作为“荒漠化土地分量”来提取荒漠化土地信息。首先将“荒漠化土地分量”图像拉伸到 [0, 1] 值域区间,然后在近年来野外调查的基础上,根据直方图上特征峰的形状和位置,确定合适的阈值,将研究区内荒漠化土地划分为 4 个等级,即潜在荒漠化土地、轻度荒漠化土地、中度荒漠化土地和重度荒漠化土地(表 2)。经过编码,生成荒漠化土地分布图(图 5)。结果表明,在研究区域内潜在荒漠化土地占 23.6%,轻度荒漠化土地占 13.5%,中度荒漠化土地占 35.6%,重度荒漠化土地占 27.3%。

表 2 荒漠化土地类型划分

荒漠化土地类型	基本特征	荒漠化土地分量
潜在荒漠化土地	未退化的农田;植被覆盖较好的固定沙地,植被盖度大于 40%,结皮发育良好,结皮盖度大于 85%。	< 0.2
轻度荒漠化土地	轻度退化的农田;轻度退化的固定沙地,植被盖度 20%~40%,结皮发育较好,结皮盖度 50%~85%。	0.2~0.45
中度荒漠化土地	半固定或半流动沙地,植被盖度 10%~20%,结皮发育差,结皮盖度 10%~50%。	0.45~0.75
重度荒漠化土地	流动沙地,植被盖度小于 10%,基本无结皮发育。	> 0.75

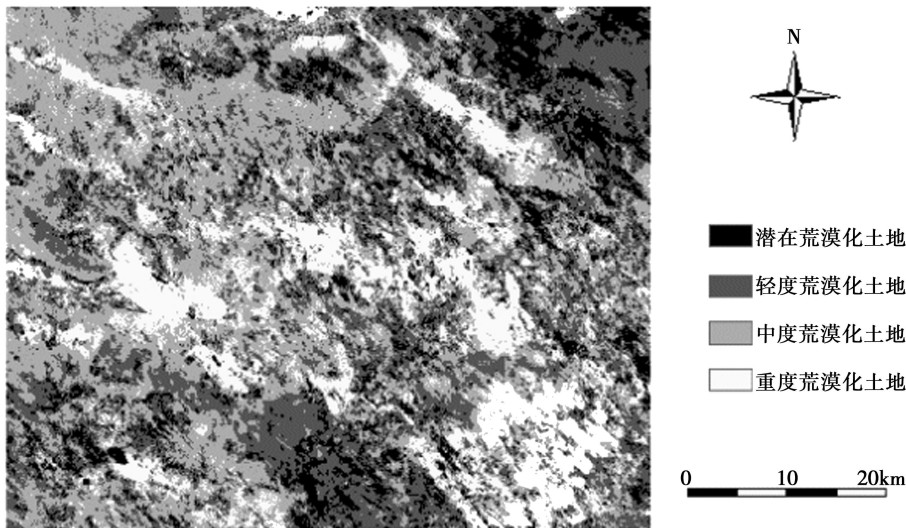


图 5 荒漠化土地分布图

### 2.4 精度分析

本研究采用 Kappa系数法对基于 SMA 的荒漠化信息提取结果进行精度验证。考虑到植被指数 (NDVI) 目前在国内外荒漠化信息提取中的广泛应用<sup>[16]</sup>, 本研究同时基于植被指数 (NDVI) 对研究区荒漠化信息进行了提取, 并对两种方法提取结果的精度进行了比较。Kappa系数的计算公式为:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{M^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \quad (4)$$

其中  $r$  是混淆矩阵的总列数 (即总的类别数),  $X_{ii}$  是混淆矩阵中第  $i$  行  $i$  列 (对角线) 上的像元数 (即正确分类的数目),  $X_{i+}$  和  $X_{+i}$  分别是第  $i$  行和第  $i$  列的总像元数,  $M$  为用于精度评估的总像元数。

借助于近年来野外观测数据与已有的最新的各种专题图件, 选取了包括全部 4 个荒漠化土地类型的共 391 个样点, 分别计算了基于 SMA 和 NDVI 荒漠化信息提取结果的 Kappa 系数, 结果为 0.83 和 0.64, 分类总精度分别达到 87.5% 和 73.4%。表 3 为相应的混淆矩阵。

表 3 混合像元分解 (SMA) 和植被指数 (NDVI) 分析结果的混淆矩阵 (像元数)

观测数据	SMA				NDVI			
	潜在	轻	中	重	潜在	轻	中	重
潜在	62	8	3		50	6	17	
轻		120	5	5	5	99	18	8
中		6	90	6	3	6	80	14
重		7	10	70	5	17	7	58
合计	62	141	108	81	63	128	122	80

精度分析结果表明, 采用 SMA 方法提取荒漠化信息的精度较高, 其结果明显优于 NDVI 方法。原因主要如下: 第 1, 受土壤背景影响, NDVI 对半干旱地区低覆盖度植被检测能力下降<sup>[17]</sup>; 第 2, 作者分别在研究区内典型的固定沙地、半固定沙地、流动沙地、盐碱地、农田和水体内各取一定数量的像元, 比较其“荒漠化土地分量”和 NDVI 的值, 如图 6 所示, NDVI 仅有效分离了农田信息, 但难以有效区分固定沙地、半固定沙地、流动沙地和盐碱地, 而“荒漠化土地分量”对固定沙地、半固定沙地、流动沙地、盐碱地和农田等都可以进行有效分离。因此采用 SMA 方法提取荒漠化土地信息比 NDVI 方法效果更好。

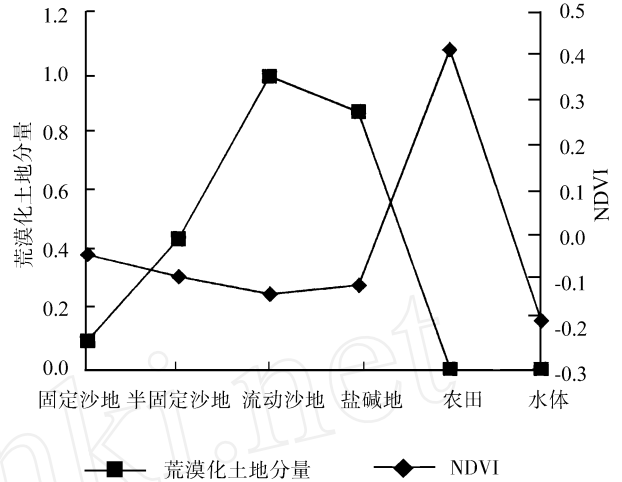


图 6 荒漠化土地分量与植被指数 (NDVI) 比较

### 3 结论与讨论

半干旱区荒漠化土地的突出特点是其镶嵌性, 即不同类型、不同退化程度的荒漠化土地镶嵌在一起, 具有非常显著的空间异质性。SMA 方法可以使不同类型的土地覆盖信息得以有效分离, 并把它们的相对数量在空间上直观地表示出来, 能够在一定程度上反映荒漠化土地的镶嵌特征。研究结果表明, 在土地覆盖类型相对简单但空间异质性比较强烈的荒漠化地区, 采用 SMA 方法提取荒漠化信息是可行的, 具有比较高的精度, 效果好于 NDVI 方法。

在应用 SMA 方法的过程中有些问题值得进一步探讨。本研究采用的 LSMM 模型建立在假设相同地物具有相同的光谱特征以及光谱线性可加的基础上, 其优点是模型简单, 物理含义比较明确, 而且用于混合像元分解效果较好; 但是 LSMM 模型在实际应用中也存在一些问题。首先, 它假设像元的光谱反射率仅为各组成成分光谱反射率的简单相加, 而事实证明, 在大多数情况下, 各种地物的光谱反射率是通过非线性形式进行组合的<sup>[18]</sup>。其次, 模型应用过程中最关键的一步是获取各个基本组分的参照光谱值, 即纯像元下某种基本组分的光谱值, 但在实际操作中各基本组分的典型光谱值很难获得。本研究中, 利用 GPS 精确定位, 对影像上的纯像元区域进行野外验证, 发现影像上的纯像元在地面上皆为一定程度的混合像元。如果用野外或实验室测定的地物光谱作为参照光谱值, 则增加了辐射校正的难度。另外, 如果基本组分数量较多, 等于或超过所用遥感数据的有效波段数量, 将使结果误差偏大。本研究中为了确保基本组分数量小于有效波段数量, 忽略

了影像中云和阴影的影响,在一定程度上造成了相应区域  $RMS$  的增加。不过,随着今后传感器光谱分辨率的提高以及新的混合像元分解模型的应用<sup>[19]</sup>,这个问题应该可以得到很好的解决。

#### 参考文献:

- [1] Maarten T, Gerrit F, Epema. Spectral mixture analysis for mapping land degradation in semi-arid areas [J]. *Geologie en Mijnbouw*, 1999, 77: 153 ~ 160
- [2] Alfredo D. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52: 121 ~ 133
- [3] Asner G P, Wesman C A, Privette J L. Unmixing the directional reflectances of AVHRR sub-pixel landcovers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35 (4): 868 ~ 878
- [4] 北京大学地理系等. 毛乌素沙区自然条件及其改良利用 [M]. 北京: 科学出版社, 1983
- [5] 李孝芳. 荒漠化、沙漠化和干旱化名词释义及其在我国的应用 [A]. 见: 李孝芳. 中国干旱地区自然资源研究 [C]. 北京: 科学出版社, 1988
- [6] 吴波. 沙质荒漠化土地景观分类与制图——以毛乌素沙地为例 [J]. *植物生态学报*, 2000, 24 (1): 52 ~ 57
- [7] John C, PRICE. Calibration of Satellite Radiometers and the Comparison of Vegetation Indices [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 21: 15 ~ 27
- [8] Gilbert M A. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images [J]. *Int J Remote Sens*, 1994, 15 (10): 2065 ~ 2086
- [9] Shimabukuro Y E, Smith J A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29: 16 ~ 20
- [10] Leprieux C, Kerr Y H, Mastorchio S. Monitoring vegetation cover across semi-arid regions: comparison of remote observations from various scales [J]. *Int J Remote Sens*, 2000, 21 (2): 281 ~ 300
- [11] Bateson A, Curtiss B. A method for manual end-member selection and spectral unmixing [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 60: 229 ~ 243
- [12] Smith M O, Johnson P E, Adams J B. Quantitative determination of mineral types from reflectance spectra using principal components analysis [J]. *J Geophys Res*, 1985, 90: 797 ~ 804
- [13] Alfredo D. Satellite remote sensing analysis to monitor desertification processes in the crop-rangeland boundary of Argentina [J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52: 121 ~ 133
- [14] 张熙川, 赵英时. 应用线性光谱混合模型快速评价土地退化的方法研究 [J]. *中国科学院研究生院学报*, 1999, 16 (2): 169 ~ 176
- [15] 卢远, 林年丰. 松嫩平原西部土地退化的遥感动态监测研究——以吉林省通榆县为例 [J]. *地理与地理信息科学*, 2003, 9 (2): 24 ~ 27
- [16] Andrew J E, John F M. Quantifying vegetation change in semi-arid environments: precision and accuracy of spectral mixture analysis and the normalized difference vegetation index [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 73: 87 ~ 102
- [17] Todd S W. Responses to spectral indices to variations in vegetation cover and soil background [J]. *Photogramm Eng Remote Sens*, 1998, 64: 915 ~ 921
- [18] Epema G F. Spatial and temporal variability of field reflectance as a basis for deriving soil surface characteristics from multiscale remote sensing data in Niger [J]. *IIC Journal*, 1994 (1): 23 ~ 28
- [19] Gregory S O. Practical limits on hyperspectral vegetation discrimination in arid and semi-arid environments [J]. *Remote Sensing of Environments*, 2001, 77: 212 ~ 225