

# 灌丛化草原灌木和草本植物光谱特征差异及灌木盖度反演——以内蒙古镶黄旗为例

刘涛宇<sup>1</sup> 赵霞<sup>1\*</sup> 沈海花<sup>1</sup> 胡会峰<sup>1</sup> 黄文江<sup>2</sup> 方精云<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; <sup>2</sup>中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094

**摘要** 灌丛化草原已成为我国干旱、半干旱地区一种重要的植被类型,但目前有关灌丛化草原灌木和草本植物光谱特征以及灌木盖度的遥感反演研究鲜有报道。相比传统的野外调查方法,基于遥感影像的灌木盖度反演为实现长时间、大范围灌丛化草原灌木盖度监测提供了可能。该研究综合利用灌木和草本植物光谱特征差异以及季相差异,以内蒙古镶黄旗灌丛化草原区为例,通过线性模型和多端元混合光谱分解模型,实现了利用中分辨率Landsat卫星影像的灌木盖度反演。对镶黄旗优势灌木和草本植物群落的光谱特征分析表明,小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌木群落的红边斜率、归一化植被指数和改进红边归一化植被指数值均高于以羊草(*Leymus chinensis*)、克氏针茅(*Stipa krylovii*)为优势种的草本植物群落,并且其红边位置有“红移”趋势。两种模型反演所得镶黄旗灌丛化草原区灌木盖度平均值均为13%,绝大多数区域灌木盖度低于25%。相比基于盛夏时节影像的多端元混合光谱分解模型,利用灌木和草本植物季相特征差异建立的基于初秋时节影像的线性模型更适合灌丛化草原灌木盖度的遥感反演。

**关键词** 灌丛化草原; 光谱特征; 灌木盖度; 遥感反演; 线性模型; 多端元混合光谱模型

**引用格式:** 刘涛宇, 赵霞, 沈海花, 胡会峰, 黄文江, 方精云 (2016). 灌丛化草原灌木和草本植物光谱特征差异及灌木盖度反演——以内蒙古镶黄旗为例. 植物生态学报, 40, 969–979. doi: 10.17521/cjpe.2016.0101

## Spectral feature differences between shrub and grass communities and shrub coverage retrieval in shrub-encroached grassland in Xianghuang Banner, Nei Mongol, China

LIU Tao-Yu<sup>1</sup>, ZHAO Xia<sup>1\*</sup>, SHEN Hai-Hua<sup>1</sup>, HU Hui-Feng<sup>1</sup>, HUANG Wen-Jiang<sup>2</sup>, and FANG Jing-Yun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; and <sup>2</sup>Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

### Abstract

**Aims** Shrub-encroached grassland has become an important vegetation type in China's arid and semi-arid region. Our study objective is to explore the spectral features of shrub and grass communities, as well as their empirical relationships with shrub coverage. The quantitative estimation of shrub cover based on medium-resolution Landsat satellite imagery provides the practical basis for long term retrieval of large areas of shrub expansion in the grassland region.

**Methods** Linear models and Multiple Endmember Spectral Analysis Model (MESMA) based on medium resolution Landsat satellite imagery were developed to quantify the shrub coverage in a shrub-encroached grassland region in Xianghuang Banner, Nei Mongol using the spectral features and their seasonal differences between the shrub and grass communities.

**Important findings** Compared to *Leymus chinensis* and *Stipa krylovii* dominated grass communities, *Caragana microphylla* community had a higher normalized difference vegetation index (NDVI), modified red edge normalized difference vegetation index (mNDVI<sub>705</sub>), and red edge slope. The red edge position of *C. microphylla* community shifted to longer wavelengths. The average and the maximum shrub coverage was 13% and 25%, respectively, in the shrub-encroached grassland based on both models. The correlation coefficient of determination ( $R^2$ ) and root mean square error (RMSE) of the linear model was 0.31 and 0.05, respectively. We found that the linear model based on seasonal differences of shrub and grass community was more suitable for retrieving shrub coverage in the study area from medium resolution imagery than the MESMA model that is based on mid-summer images.

收稿日期Received: 2016-03-22 接受日期Accepted: 2016-05-26

\* 通信作者Author for correspondence (E-mail: zhaoxia@ibcas.ac.cn)

**Key words** shrub encroachment; spectral features; shrub coverage; remote sensing; linear model; multiple end-member spectral mixture analysis model

**Citation:** Liu TY, Zhao X, Shen HH, Hu HF, Huang WJ, Fang JY (2016). Spectral feature differences between shrub and grass communities and shrub coverage retrieval in shrub-encroached grassland in Xianghuang Banner, Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 969–979. doi: 10.17521/cjpe.2016.0101

在过去的150年间, 全球干旱、半干旱草原地区灌木植物的多度、盖度和生物量不断增加, 在草原基质上形成了灌木植物团块状散布的斑块植被景观, 称为灌丛化草原(Archer *et al.*, 1988; Mcpherson *et al.*, 1988; Eldridge & David, 2011; 陈蕾伊等, 2014)。目前, 全球10%–20%的干旱半干旱区正经历灌丛化, 仅我国内蒙古小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛化草地就有近510万 $\text{hm}^2$  (Peng *et al.*, 2014)。随着灌木盖度的增加, 原有草原生态系统的光照、热量、水分和养分的空间异质性随之增加(彭海英等, 2014), 从而对干旱、半干旱地区生态系统的结构和功能产生显著影响(Castro & Freitas, 2009)。灌木盖度可以定量地表征灌丛化程度(Jurena & Archer, 2003), 因而准确地评估灌丛化草原的灌木盖度, 对研究灌丛化草原的发生发展及其对生态系统的影响具有重要意义。传统的灌木盖度调查方法主要依靠人力完成对灌木冠幅的测量, 计算灌木的投影面积, 从而得到一定面积内的灌木盖度。这种人工调查方法不仅费时费力, 而且难以完成对大面积灌丛化草原灌木盖度的及时准确监测。多光谱、多时相的遥感数据为及时准确地获取大面积灌丛化草原的灌木盖度提供了可能(Sohn & McCoy, 1997; Hostert *et al.*, 2003; Hamada *et al.*, 2013)。目前, 灌木盖度的遥感反演研究多基于高空间分辨率的航片或米级、亚米级商业卫星影像(Goslee *et al.*, 2003; Laliberte *et al.*, 2004; Myint *et al.*, 2011)。虽然影像空间分辨率高, 能够显著地提高辨识精度(Laliberte *et al.*, 2004; Myint *et al.*, 2011), 但单景覆盖面积小, 价格高昂, 重复获取大范围数据的代价过高; 而中分辨率Landsat系列卫星数据可以免费获取, 且时间序列长(Hostert *et al.*, 2003), 能够实现灌木盖度的动态变化监测。因此, 基于中分辨率遥感影像的灌丛化草原灌木盖度反演研究开始发展。

由于灌丛化草原的灌木斑块(冠幅一般不超过8 m)小于Landsat卫星的空间分辨率(30 m), 灌木斑块所在像元光谱特征是各地物(灌木、草地、土壤、岩石、阴影等)反射光谱的综合反映(Sohn & McCoy,

1997)。混合光谱分解模型(SMA)正是针对混合像元问题在亚像元尺度反演地表覆盖最常用的方法(Adams *et al.*, 1995)。混合光谱分解模型假定像元信息为各端元光谱与其代表地物覆盖度乘积的线性加权, 通过最小二乘法等方法可以求解出各端元的地表覆盖度(Elmore *et al.*, 2000)。一些研究利用简单混合光谱分解模型, 基于灌木和草本植物在可见光、近红外、中红外等波段的特征差异, 反演干旱半干旱区的灌木盖度。比如, Sohn和McCoy (1997)运用此方法成功地提取了美国内华达州长谷地区的灌木盖度; Hostert等(2003)运用该方法获得了希腊克里特岛牧场区1977–1996年的植被动态变化格局。还有一些研究通过改进的混合光谱分解模型, 综合不同时相的Landsat系列影像, 利用灌木和草本植物季相和光谱特征差异, 反演得到了地中海牧区木本和草本植物的盖度(Kuemmerle *et al.*, 2006)。简单混合光谱分解模型的局限性在于为所有像元设定了相同类型的端元, 且每种端元仅有一条光谱曲线。多端元混合光谱分解(MESMA)模型是简单混合光谱分解模型的一种改进, 考虑了同物异谱现象, 允许为每个像元选择不同类型和数目的端元。这种方法通过逐像元建立多个端元不同组合的模型, 能够根据约束条件筛选出拟合误差最小的模型, 从而提高了模型拟合的精度(Roberts *et al.*, 1998)。

另外, 经验回归模型也广泛应用于植被覆盖度的遥感估算, 其核心是通过分析植被的光谱特征, 选取与植被覆盖度相关关系良好的波段、波段组合或植被指数建立回归模型(王宏等, 2008; 徐娜等, 2012)。例如Xiao和Moody (2005)以从高空间分辨率影像中提取的植被盖度代表地表实际植被覆盖度, 建立了Landsat ETM+影像对应点归一化植被指数(NDVI)值与实际植被覆盖度之间的线性关系, 并将其推广至整个区域的植被覆盖度估算。

有关我国灌丛化草原灌木盖度遥感反演的研究相对较少。Zhou等(2013)根据灌木和草本植物抗旱性的差异, 利用10年间灌木和草本植物在干旱年和湿润年NDVI最大值及累积值的差异, 运用

MODIS影像辨识出了内蒙古高原的小叶锦鸡儿灌木。但这一方法依赖于年际降水量的巨大波动,不适用于对灌木盖度变化的动态监测。另外, Cao等(2011)用几何光学模型和混合光谱分解模型,反演出了毛乌素沙地的灌木盖度,但其研究区域为背景相对单一的沙地,并非灌草镶嵌的灌丛化草原。

灌木和草本植物光谱特征差异是灌丛化草原遥感辨识的前提。因此,本研究基于灌木和草本植物光谱特征差异,尝试利用Landsat 8 OLI卫星影像,基于线性回归模型和MESMA模型,以典型灌丛化草原区域——内蒙古镶黄旗为研究区域,发展适合灌丛化草原的灌木盖度遥感反演方法,为实现长时间序列、大范围灌丛化草原的遥感辨识、监测提供实践依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究区域

本研究区域镶黄旗位于内蒙古自治区锡林郭勒盟(113.37°–114.75° E, 41.93°–42.07° N),为我国北方较为典型的灌丛化草原区。研究区属中温带半干旱干旱大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷干燥多风,夏季炎热,雨热同期,年平均气温3.1℃,年降水量267.9 mm。镶黄旗总面积为512 555 hm<sup>2</sup>,草原面积占总面积的97.84%;平均海拔为1 322 m,北部邻近浑善达克沙地,常见固定、半固定沙丘,南部为丘陵和低山。研究区地带性土壤为栗钙土。由于浑善达克沙地的侵入,北部土壤为砂质土,多为固定或半固定沙丘。典型草原区分布最广的为暗栗钙土,灌丛化草原区栗钙土多为砂壤质地,砂性较重(单丽燕, 2004)。研究区域主要优势草本植物为克氏针茅(*Stipa krylovii*)和羊草(*Leymus chinensis*)。常见伴生种有糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、栉叶蒿(*Neopallasia pectinata*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)等。研究区域内优势灌木种为小叶锦鸡儿。

### 1.2 数据采集

以Landsat系列影像空间分辨率(30 m × 30 m)为基本调查单元,于2013年7、8月在镶黄旗典型草原区选取30 m × 30 m具有代表性的灌丛化草原样地和草原样地。在每个30 m × 30 m样地内,选取3组具有代表性的样方(1 m × 1 m, 灌木斑块和纯草本植物斑块),调查样方内植物物种组成、优势种类型、

测量冠层高度,利用Trimble手持差分GPS记录地理坐标。将数码相机置于样方框中心位置,镜头与地面水平,在距冠层顶部1 m高度处对样方框内植被进行垂直拍摄,以减少几何变形带来的误差。同时利用ASD FieldSpec Pro FR 2500地物光谱仪(Analytical Spectral Devices, Boulder, Colorado, USA),测定生长季峰值时期1 m × 1 m内群落冠层反射光谱。该光谱仪所获取的波长范围为350–2 500 nm,输出的波段数为2 150个。群落冠层光谱测定选择在晴朗无云的天气进行,为保证光照条件并减少不同太阳高度角对反射率的影响,测定时间为10:00–14:00。在进行光谱采集时,始终保证探头与地面垂直,高度距冠层1 m左右,每个样方先采集标准白板的光谱,再采集15次冠层光谱,采集结束后再次采集标准白板光谱。

于2013、2014年7–9月在镶黄旗的灌丛化草原地区随机选取30 m × 30 m的样方,用卷尺量取灌木斑块最大长宽作为长轴和短轴,灌木斑块近似为椭圆,计算其面积,从而获得30 m × 30 m样方内的小叶锦鸡儿灌木盖度。

群落冠层光谱测定点共计18个,灌木盖度调查点共计53个,其地理位置及分布如图1。

### 1.3 光谱数据预处理

利用ViewSpecPro软件对光谱曲线进行预处理。由于野外测量光谱受环境影响较大,需要对原始光谱数据进行筛选,以保证光谱数据的有效性。同时,

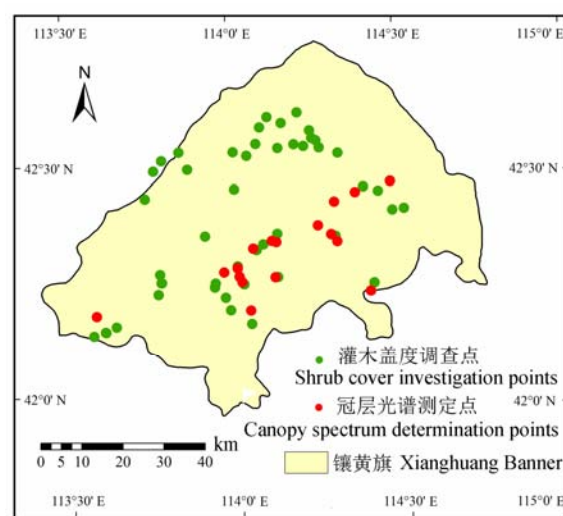


图1 研究区域位置及野外调查点分布图。

Fig. 1 Geographic location of study area and the distributions of field sampling.



对同一个1 m × 1 m样方内群落冠层光谱求取平均值,以削弱光谱仪本身产生的随机噪声,使光谱更加准确地反映植被真实的光谱特性。

为了进一步去除噪声对群落冠层光谱的影响,利用Lowess滤波算法对光谱曲线进行平滑,滤波间隔为30 nm。最终得到93条1 m × 1 m样方尺度的群落冠层光谱曲线。

计算各光谱曲线对应的NDVI、改进红边归一化植被指数(mNDVI<sub>705</sub>)及红边位置(REP)值,以定量表征各群落冠层光谱特征。各指标计算方法如下:

NDVI表征近红外波段和红光波段的差异。计算公式如下:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

其中, $\rho_{NIR}$ 、 $\rho_{RED}$ 分别为近红外和红光波段的反射率值。

mNDVI<sub>705</sub>是NDVI<sub>705</sub>的改进型,它考虑了叶片的镜面反射效应,对叶冠层的微小变化很灵敏(邓书斌和陈秋锦, 2010), 计算公式为:

$$mNDVI_{705} = \frac{\rho_{750} - \rho_{705}}{\rho_{750} + \rho_{705} - 2\rho_{455}} \quad (2)$$

其中, $\rho_{750}$ 、 $\rho_{705}$ 、 $\rho_{455}$ 分别是波长750 nm、705 nm及455 nm处的光谱反射率值。

REP为680–760 nm波长范围内反射率光谱一阶导数最大值所对应的波长,表征植被反射吸收急剧变化的位置。本文通过光谱反射率曲线在红光波段(680–700 nm)和近红外波段(725–760 nm)切线的交点来表征红边位置,相比倒高斯模型等方法,它简单易行(Cho & Skidmore, 2006)。具体计算公式如下:

$$FDR = m_1\lambda + c_1 \quad (3)$$

$$FDR = m_2\lambda + c_2 \quad (4)$$

$$REP = \frac{-(c_1 - c_2)}{(m_1 - m_2)} \quad (5)$$

其中, $FDR$ 为红边区域(680–760 nm波长范围内)光谱反射率的一阶导数, $\lambda$ 为波长;公式(3)为680–700 nm波段光谱反射率曲线的切线,公式(4)为725–760 nm波段光谱反射率曲线的切线, $m_1$ 、 $m_2$ 是系数, $c_1$ 、 $c_2$ 是数项。

以上光谱平滑和指标计算均在Matlab软件中完成。

#### 1.4 1 m × 1 m小样方植被覆盖度自动化提取

野外调查采集到的冠层光谱实际包含混合地物

的特征,而非纯植物光谱。具体来说,在纯草本植物小样方内采集到的冠层光谱实际为草本植物和裸土的混合光谱;在灌木斑块内,采集到的冠层光谱为灌木、灌木内草本植物及裸土的混合光谱。由于植物和裸土的光谱存在显著差异,不同植被覆盖度下的小样方冠层光谱也应存在差异。因此,有必要提取小样方的植被覆盖度,以便分析植被覆盖度不同时冠层光谱的差异。

利用Adobe Photoshop软件裁剪出数码照片中1 m × 1 m样方框内部分,累计样方照片113张。图2A、2B分别表示高低植被覆盖度的草本植物小样方,2C、2D分别表示高低植被覆盖度的灌木小样方。采用归一化指数法从数码照片中提取群落盖度(Woebbecke *et al.*, 1992)。利用C#语言在.NET平台上开发自动化实现提取过程的小软件,比对提取效果,并批量输出小样方植被覆盖度计算结果。小软件对图2A、2B、2C、2D植被覆盖的提取效果如图2E、2F、2G、2H所示。

#### 1.5 遥感影像预处理

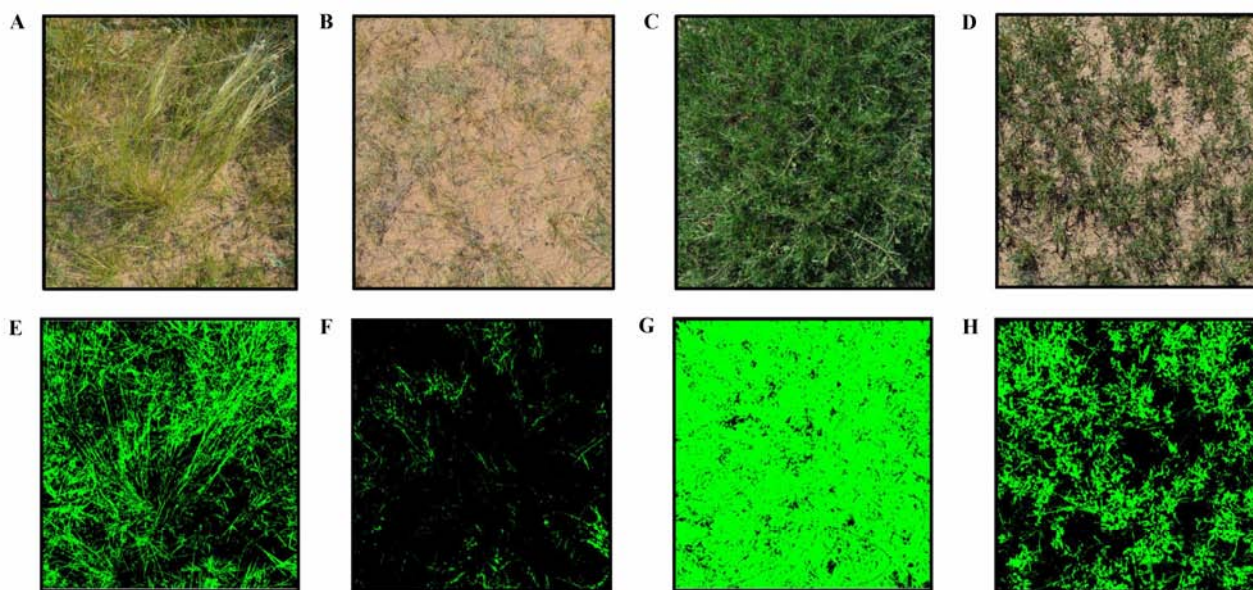
下载覆盖镶黄旗的2013年第117天到第274天和2014年第117天到第274天的Landsat 8 OLI卫星影像,共23景。选取与地面调查同期的两景无云(平均云量小于2.5%)影像:2014年第213天(盛夏时节),2013年第258天(初秋时节),完整覆盖镶黄旗区域。

Landsat 8 OLI卫星影像数据的预处理包括辐射定标、大气校正、镶嵌和裁剪。以上操作均在ENVI 5.1软件中进行,其中,大气校正使用FLAASH模块,镶嵌在Seamless mosaic模块的基础上通过手动编辑接边线完成。

#### 1.6 灌木盖度反演方法

前期工作中,已运用面向对象的分类方法得出了内蒙古镶黄旗灌丛化草原的分布(董洲等, 2014)。本研究继续在灌丛化草原分布区域内,通过线性模型和混合光谱分解模型反演30 m × 30 m像元内灌木盖度。

通过野外调查发现,夏末秋初,研究区草本植物枯黄时期较灌木早。因此同时选用了盛夏时节(2014年第213天)和初秋时节(2013年第258天)的影像,提取野外灌木盖度调查点所在像元的NDVI值,与野外调查灌木盖度建立线性模型,采用五折交叉检验,每次抽取80%的数据用于建模,20%的数据用于检验。最后利用全样本数据建立的线性模型对镶



**图2** 1 m × 1 m小样方照片及植被覆盖自动化提取效果图。A, 植被覆盖度为34%的草本植物小样方。B, 植被覆盖度为4%的草本植物小样方。C, 植被覆盖度为91%的灌木小样方。D, 植被覆盖度为32%的灌木小样方。E, F, G, H分别为软件提取出的A, B, C, D的植被覆盖(绿色部分表示植被覆盖)。

**Fig. 2** Photos of 1 m × 1 m sampling plots and the auto-extracted pictures of vegetation coverage. A, Grass sample plot with a 34% vegetation coverage. B, Grass sample plot with a 34% vegetation coverage. C, Shrub sample plot with a 91% vegetation coverage. D, Shrub sample plot with a 32% vegetation coverage. E, F, G, H the vegetation coverage of A, B, C, D retrieved by the software, respectively (Vegetation coverage was colored green).

黄旗灌丛化草原的灌木盖度进行反演。

本研究将经过光谱预处理的野外实测冠层光谱重采样到Landsat 8 OLI影像的光谱分辨率, 建立参考端元光谱库, 尝试用MESMA模型对2014年8月1日的Landsat 8影像进行分解。MESMA模型在ENVI 4.8 Viper Tools 1.5 (<http://www.vipertools.org/>)模块中进行。依次建立两端元(植被和阴影)和三端元(灌木、草本植物、阴影)混合光谱分解模型, 根据模型成功分解影像的面积, 淘汰只能分解<0.01%影像面积的模型, 筛选端元。最终利用筛选出的14条草本植物光谱和15条灌木端元光谱, 建立三端元(灌木、草本植物、阴影)混合光谱分解模型。值得说明的是, 由于我们需要区分的是灌木群落和草本植物群落, 野外实测的群落光谱实际上已包含了裸土信息, 因此并没有单独将裸土作为地物端元。

对所有模型限制各端元(除阴影)盖度在0–100%之间, 阴影端元盖度<80%, 均方根误差(RMSE) < 0.025, 各个波段的残差不得超过0.025。

## 2 结果和分析

### 2.1 灌木和草本植物光谱特征

调查显示, 镶黄旗境内, 除了少数严重退化样

地, 灌木斑块1 m × 1 m样方内植被覆盖度一般高于50%, 而草本植物小样方内植被覆盖度一般小于30%。根据研究区域优势草本植物及灌木小样方的植被覆盖度范围, 将优势草本植物群落的小样方植被覆盖度划分为<10%、10%–20%、20%–35%区间, 将小叶锦鸡儿群落的小样方植被覆盖度划分为30%–50%、50%–70%、70%–90%区间, 得到图3A、3B、3C。由此可见, 相同优势种, 小样方植被覆盖度不同时, 其光谱曲线也不同。随着小样方植被覆盖度的增加, 各优势草本植物群落及小叶锦鸡儿群落对红光吸收增强, 红边斜率(即红边位置对应反射率曲线的一阶导数值)逐渐增大。优势草本植物群落和小叶锦鸡儿群落在1 400和1 600 nm处分别出现吸收谷和反射峰; 随着植被覆盖度的增加, 1 400 nm处吸收谷的谷值及1 600 nm处反射峰的峰值均逐渐降低。

对以羊草和针茅为优势种的草本植物群落的冠层光谱和小叶锦鸡儿群落冠层光谱进行比较。草本植物群落冠层光谱由以羊草和克氏针茅为优势种的草本植物群落光谱的平均值得到。以小叶锦鸡儿群落光谱的平均值作为灌木光谱。如图3D所示, 羊草群落和针茅群落在可见光波段波形相似; 在近红外



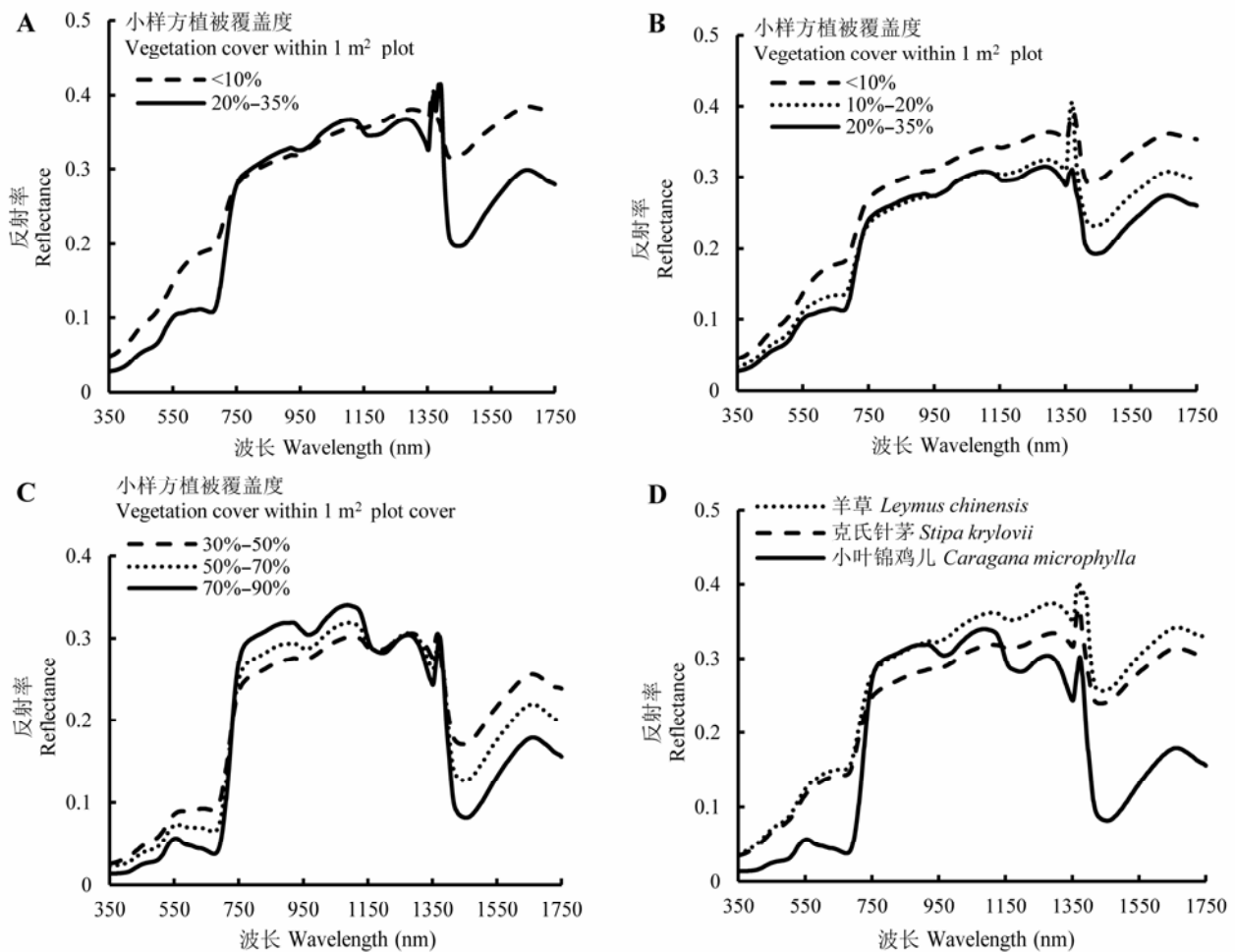


图3 不同小样方植被覆盖度下优势灌木、草本植物群落光谱曲线及灌木光谱比较。A, 不同植被覆盖度下羊草群落光谱曲线。B, 不同植被覆盖度下克氏针茅群落光谱曲线。C, 不同植被覆盖度下小叶锦鸡儿群落光谱曲线。D, 优势灌木、草本植物群落光谱曲线比较。

Fig. 3 Spectral features of different vegetation coverage between the shrub and grass communities. A, Spectra of *Leymus chinensis* with different vegetation coverage. B, Spectra of *Stipa krylovii* with different vegetation coverage. C, Spectra of *Caragana microphylla* with different vegetation coverage. D, Comparison of dominant shrub and grass communities' spectra.

和中红外波段范围内, 羊草优势群落的反射率高于针茅优势群落。而灌木群落与草本植物群落的光谱差异较大: 灌木群落光谱反射率在可见光波段显著低于草本植物; 灌木群落的红边斜率显著高于草本植物; 另外, 在1 350–1 750 nm波段内灌木的反射率显著低于草本植物。

为了定量表示群落冠层光谱随群落盖度的变化, 分别计算了不同群落盖度下优势草本植物及小叶锦鸡儿群落冠层光谱的特征参量( $mNDVI_{705}$ 、 $NDVI$ 值及红边位置 $REP$ )。如表1、表2所示, 随着群落盖度的增加, 羊草、针茅及小叶锦鸡儿群落的 $NDVI$ 、 $mNDVI_{705}$ 及 $REP$ 值均逐渐增加。小叶锦鸡儿群落的 $NDVI$ 、 $mNDVI_{705}$ 值均大于2种优势草本植物

群落, 且红边位置相较于草本植物群落向近红外波段偏移。

## 2.2 灌丛化草原灌木盖度反演

基于上述灌木和草本植物群落光谱特征差异, 利用线性模型和混合光谱分解模型对镶黄旗灌丛化草原的灌木盖度进行反演。

如图4所示, 盛夏时节影像的 $NDVI$ 值和灌木盖度并没有很好的线性关系(图4A), 而初秋时节影像的 $NDVI$ 值与灌木盖度呈现出较好的线性关系(图4C)。线性模型反演所得灌木盖度分布如图5所示。模型反演出的灌丛化草原灌木盖度基本在5%–15%之间, 少数灌木密集地区灌木盖度大于15%, 低灌木盖度区域(<5%)呈零星分布。线性模型五折交叉

表1 不同植被覆盖度优势草本植物群落光谱特征(平均值±标准偏差)  
Table 1 Changes in spectral features with shrub and grass dominancy and vegetation coverage (mean ± SD)

1 m × 1 m小样方植被覆盖度 Vegetation cover within 1 m × 1 m plot	羊草 <i>Leymus chinensis</i>			克氏针茅 <i>Stipa krylovii</i>		
	mNDVI <sub>705</sub>	REP	NDVI	mNDVI <sub>705</sub>	REP	NDVI
<10%	0.17 ± 0.01	705.22 ± 1.46	0.24 ± 0.02	0.19 ± 0.04	704.65 ± 4.20	0.26 ± 0.05
10%–20%	—	—	—	0.23 ± 0.03	702.81 ± 2.52	0.33 ± 0.06
20%–35%	0.35 ± 0.02	708.45 ± 2.32	0.49 ± 0.05	0.27 ± 0.04	702.62 ± 1.29	0.40 ± 0.06

mNDVI<sub>705</sub>, 改进红边归一化植被指数; NDVI, 归一化植被指数; REP, 红边位置。  
mNDVI<sub>705</sub>, modified red edge normalized difference vegetation index; NDVI, normalized difference vegetation index; REP, red edge position.

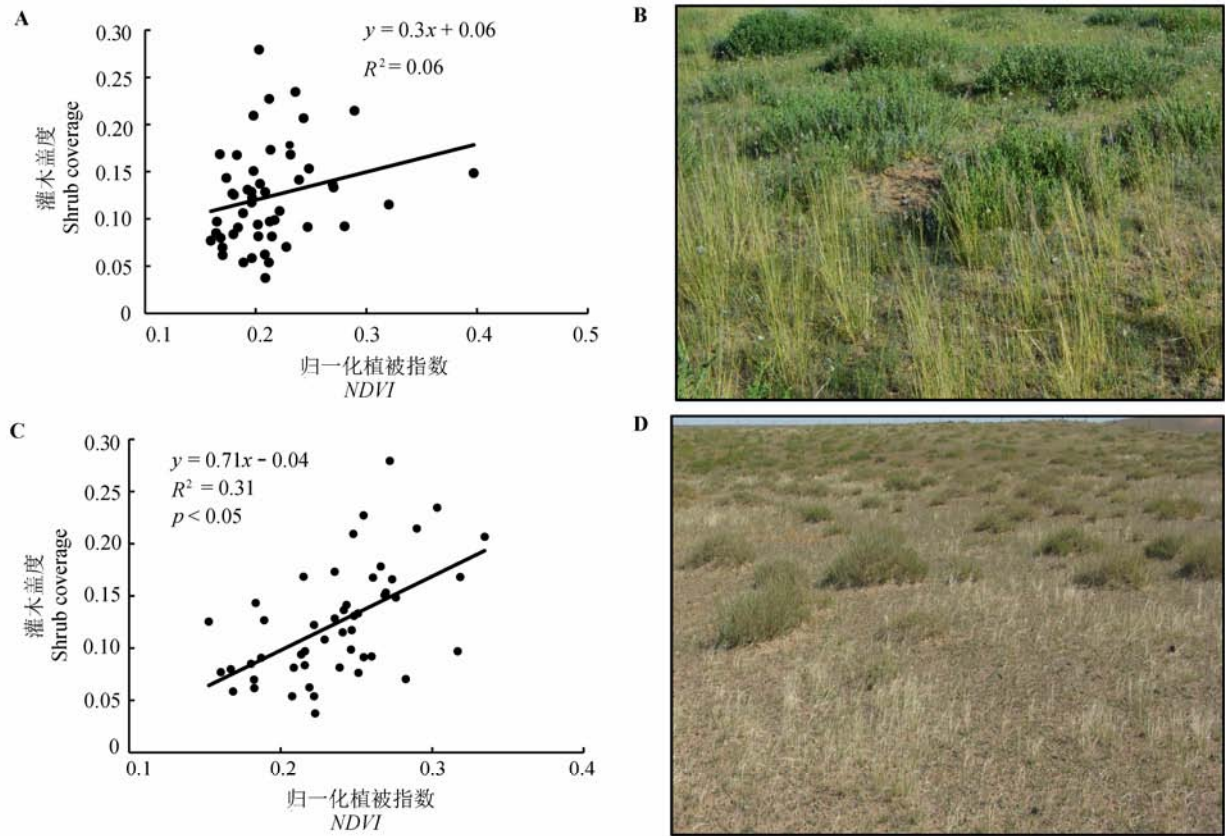


图4 基于不同时相影像的线性模型及不同季节灌丛化草原景观。A, 基于盛夏季影像的线性模型。B, 盛夏季灌丛化草原景观。C, 基于初秋季影像的线性模型。D, 初秋季灌丛化草原景观。

Fig. 4 Linear models based on multi-temporal images and landscape of shrub-encroached grassland in different seasons. A, Linear model in the mid-summer. B, Landscape of shrub-encroached grassland in mid-summer. C, Linear model in early autumn. D, Landscape of shrub-encroached grassland in early autumn. NDVI, normalized difference vegetation index.

表2 不同植被覆盖度小叶锦鸡儿灌木群落光谱特征(平均值±标准偏差)  
Table 2 Spectral features of *Caragana microphylla* by vegetation coverage (mean ± SD)

1 m × 1 m小样方植被覆盖度 Vegetation coverage within 1 m × 1 m plot	小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>		
	mNDVI <sub>705</sub>	REP	NDVI
35%–50%	0.41 ± 0.06	716.15 ± 2.69	0.49 ± 0.07
50%–70%	0.51 ± 0.04	718.78 ± 2.63	0.63 ± 0.08
70%–90%	0.62 ± 0.09	722.94 ± 5.06	0.77 ± 0.11

mNDVI<sub>705</sub>, 改进红边归一化植被指数; NDVI, 归一化植被指数; REP, 红边位置。  
mNDVI<sub>705</sub>, modified red edge normalized difference vegetation index; NDVI, normalized difference vegetation index; REP, red edge position.

检验的决定系数( $R^2$ )平均值为0.31, 均方根误差(RMSE)平均值为0.05 ( $p < 0.05$ )。MESMA模型筛选出的灌木和草本植物端元的反射光谱曲线如图6A所示, 反演所得灌木盖度分布格局(图6B)与线性模型结果基本相似, 即高灌木盖度区域主要分布在镶黄旗东南部地区, 而低盖度区域多位于镶黄旗西北部地区; 但对比线性模型反演结果, MESMA模型反演所得同等盖度灌木分布片区较为破碎, 且高盖度(>25%)灌木分布面积比例增加。利用野外实测灌木盖度对

MESMA模型反演结果进行检验,发现模型模拟结果与实测值相关性较差( $R^2 = 0.03$ ,  $RMSE = 0.09$ )。

对两个模型反演所得灌丛化草原区域内灌木盖度进行统计,发现两模型所得镶黄旗灌丛化草原区灌木盖度平均值均为13% (线性模型反演所得灌

木盖度平均值为13%  $\pm$  4%, MESMA模型反演所得灌木盖度平均值为13%  $\pm$  9%)。但两个模型的反演精度明显不同。

### 3 结论和讨论

结果表明,研究区域内优势草本植物和小叶锦鸡儿灌木群落的光谱特征存在显著差异,表现在小叶锦鸡儿群落 $NDVI$ 、 $mNDVI_{705}$ 值均大于2种优势草本植物群落,且红边位置比草本植物群落向近红外波段偏移。并且,随着小样方植被覆盖度的增加,各优势草本植物群落及小叶锦鸡儿灌木群落的 $NDVI$ 、 $mNDVI_{705}$ 及 $REP$ 值均逐渐增加。

以往有关草原群落冠层光谱研究并没有关注过灌丛化草原灌木和草本植物群落光谱特征的差异(张富华等, 2014),而这一差异是后续反演灌丛化草原灌木盖度的基础。另外,由于在野外条件下采集到的光谱并不是单一种植物的纯光谱,忽略植被覆盖度的影响会对光谱分析的结果造成较大偏差。本研究通过比较同一优势种在不同小样方植被覆盖度下灌草光谱特征的差异发现比较灌草群落光谱特征差异时应考虑植被覆盖度的影响。

本研究基于灌木和草本植物光谱特征的差异,在镶黄旗灌丛化草原区域,通过线性模型和

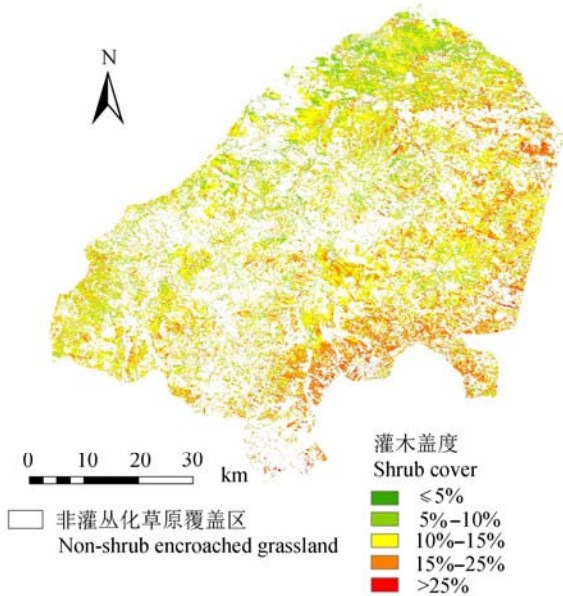


图5 线性模型反演所得镶黄旗灌丛化草原灌木盖度分布图。  
**Fig. 5** Predicted shrub coverage based on the linear model in shrub encroached grassland area in Xianghuang Banner.

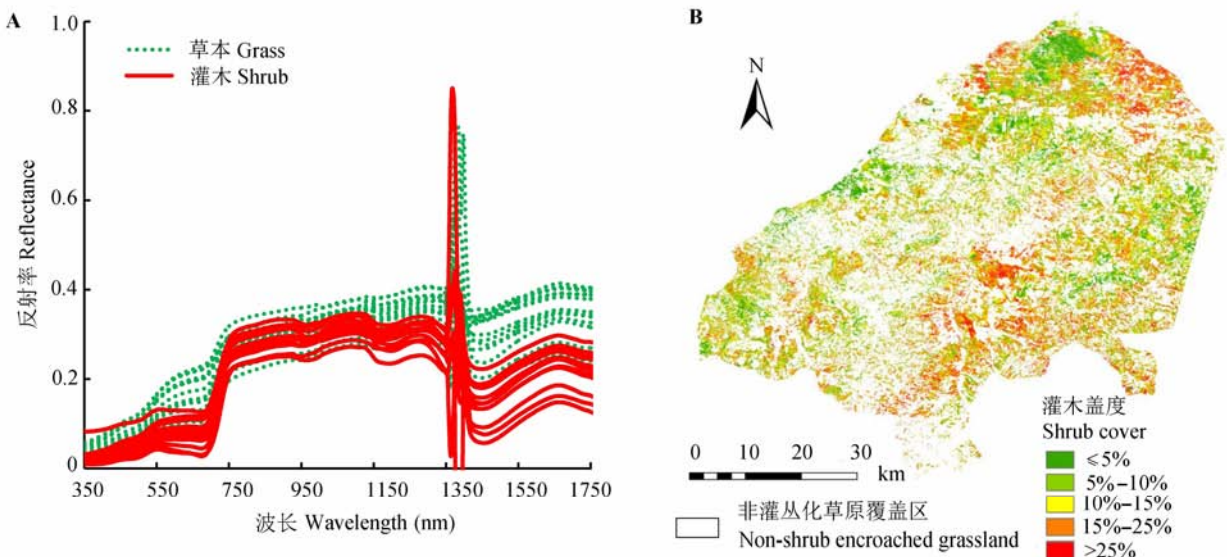


图6 多端元混合光谱分解模型端元光谱及反演所得镶黄旗灌丛化草原灌木盖度分布图。A, MESMA模型端元光谱。B, 镶黄旗灌丛化草原灌木盖度分布图。  
**Fig. 6** Endmember spectra of MESMA model and predicted shrub coverage in shrub-encroached grassland area in Xianghuang Banner. A, Endmember spectra in MESMA model. B, Shrub coverage distribution in shrub-encroached grassland in Xianghuang Banner.



MESMA模型, 实现了利用中分辨率Landsat卫星影像的灌木盖度反演。研究表明, 相比基于盛夏时节影像的多端元混合光谱分解模型, 基于初秋时节影像的线性模型更适合于灌丛化草原的灌木盖度反演。因而基于中分辨率影像的灌丛化草原灌木盖度反演需要综合利用灌木和草本植物光谱特征差异和季相特征差异。

基于初秋时节影像建立的线性模型效果明显好于基于盛夏时节影像建立的线性模型, 这与灌木和草本植物群落的枯萎期存在明显差异(图4D)有关。已有研究表明, 小叶锦鸡儿群落一般从10月上旬(第270天左右)开始枯黄(牛西午, 1998; 范瑛等, 2014), 而针茅和羊草群落的多年平均枯黄期为9月初(陈效逯和李惊, 2009; 师桂花, 2014)。由于小叶锦鸡儿群落的枯黄期显著晚于草本植物, 因而这段时期的影像仅包含了灌木的绿色信息, 使得影像NDVI值与灌木盖度呈现出较好的线性关系。

混合光谱分解模型是一种针对中低分辨率影像混合像元问题进行植被覆盖度反演的有效方法(Adams *et al.*, 1995)。以往研究表明混合光谱分解模型相比简单线性模型能更为准确地估算半干旱地区的植被覆盖度。比如, Elmore等(2000)通过比较混合光谱分解模型和基于NDVI植被指数的线性模型对美国加州欧文谷荒漠草原植被覆盖度的反演精度发现, 相对于线性模型, 混合光谱分解模型与5年地面实测数据的拟合关系更好。Cao等(2011)运用HJ-1B影像对内蒙古乌审旗毛乌素沙地灌木盖度提取的研究同样表明, 混合光谱分解模型的方法对灌木盖度的提取结果与地面实测数据拟合效果优于线性模型。虽然这些研究表明混合光谱分解模型比线性模型对植被覆盖度的估算更为准确(Sohn & McCoy, 1997; Roberts *et al.*, 1998; Hostert *et al.*, 2003), 但其研究对象背景单一, 并非灌丛连续的灌丛化草原。而本研究的对象为灌丛化草原的灌木盖度, 不同于总的植被覆盖度, 待分解的端元不是属于不同地物类型的植被和土壤, 而是同属植被的灌木和草本植物。Smith等(1990)以及Asner (1998)的研究表明, 群落结构和物种组成是影响混合光谱分解模型和地面实测数据拟合效果的重要因素。

因此, 本研究中线性模型结果优于多端元混合光谱分解模型的原因主要可归结为以下两个方面。其一, 研究中多端元混合光谱分解模型基于盛夏时

节影像建立, 而线性模型基于初秋时节影像建立。虽然研究区内小叶锦鸡儿灌木和优势草本植物群落在盛夏时节的冠层光谱存在差异, 但由于灌丛化草原为灌丛连续体, 盛夏时节灌木和草本植物同时呈现植被光谱特征, 单从光谱特征上可能难以对中分辨率Landsat影像进行亚像元灌木和草本植物群落区分。而初秋时节草本植物已枯黄, 像元的绿色信息基本反映了灌木的盖度, 避免了灌丛光谱特征差异不明显对结果造成的干扰, 从而呈现出与野外调查灌木盖度较好的拟合效果。今后的研究应当补充对初秋时节灌丛化草原灌木和草本植物群落光谱的测定, 基于初秋时节影像建立相应的多端元混合光谱分解模型。野外调查表明, 同一草本植物群落, 当其小样方内植被覆盖度不同或伴生种不同时, 光谱曲线均会产生差异。由于野外调查的局限性, 我们测定的冠层光谱并不能穷尽研究区内草本植物群落的空间异质性, 这可能是造成混合光谱分解模型反演结果差的另一原因。

**基金项目** 国家自然科学基金(31330012)。

## 参考文献

- Adams JB, Sabol DE, Kapos V, Almeida Filho RA, Roberts DA, Smith MO, Gillespie AR (1995). Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 52, 137–154.
- Archer S, Scifres C, Bassham CR, Maggio R (1988). Autogenic succession in a subtropical savanna: Conversion of grassland to thorn woodland. *Ecological Monographs*, 58, 111–127.
- Asner GP (1998). Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64, 234–253.
- Cao C, Chen W, Li G, Jia H, Ji W, Xu M, Gao M, Ni X, Zhao J, Zheng S (2011). The retrieval of shrub fractional cover based on a geometric-optical model in combination with linear spectral mixture analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37, 348–358.
- Castro H, Freitas H (2009). Above-ground biomass and productivity in the Montado: From herbaceous to shrub dominated communities. *Journal of Arid Environments*, 73, 506–511.
- Chen LY, Shen HH, Fang JY (2014). Shrub-encroached grassland: A new vegetation type. *Chinese Journal of Nature*, 6, 391–396. (in Chinese with English abstract) [陈蕾伊, 沈海花, 方精云 (2014). 灌丛化草原: 一种新的植被景观. *自然杂志*, 6, 391–396.]

- Chen XQ, Li J (2009). Relationships between *Leymus chinensis* phenology and meteorological factors in Inner Mongolia grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 10, 5280–5290. (in Chinese with English abstract) [陈效逯, 李惊 (2009). 内蒙古草原羊草物候与气象因子的关系. 生态学报, 10, 5280–5290.]
- Cho MA, Skidmore AK (2006). A new technique for extracting the red edge position from hyper-spectral data: The linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*, 101, 181–193.
- Deng SB, Chen QJ (2010). *Spectral Characteristics of Vegetation and Vegetation Index Summary*. The Application of Remote Sensing China Association 2010 Conference and Regional Remote Sensing and Industrial Development Forum. China Association of Remote Sensing Application, Beijing. 9. (in Chinese) [邓书斌, 陈秋锦 (2010). 植被波谱特征与植被指数综述. 中国遥感应用协会2010年会议暨区域遥感发展与产业高层论坛论文集. 中国遥感应用协会, 北京. 9.]
- Dong Z, Zhao X, Liang D, Huang WJ, Peng DL, Huang LS (2014). Remote sensing identification of shrub encroachment in Xianghuangqi, Nei Mongol. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 11, 152–158. (in Chinese with English abstract) [董洲, 赵霞, 梁栋, 黄文江, 彭代亮, 黄林生 (2014). 内蒙古灌丛化草原分布特征的遥感辨识. 农业工程学报, 11, 152–158.]
- Eldridge DJ, Bowker MA, Maestre FT, Roger E, Reynolds JF, Whitford WG (2011). Impacts of shrub encroachment on ecosystem structure and functioning: Towards a global synthesis. *Ecology Letters*, 14, 709–722.
- Elmore AJ, Mustard JF, Manning SJ, Lobell DB (2000). Quantifying vegetation change in semiarid environments. *Remote Sensing of Environment*, 73, 87–102.
- Fan Y, Li XY, Li GY (2014). Variation characteristics of shrub phenology in grassland of Inner Mongolia based on MODIS. *Journal of Arid Meteorology*, 6, 902–908. (in Chinese with English abstract) [范瑛, 李小雁, 李广泳 (2014). 基于遥感数据的内蒙古草原灌丛物候变化研究. 干旱气象, 6, 902–908.]
- Goslee SC, Havstad KM, Peters DC, Rango A, Schlesinger WH (2003). High-resolution images reveal rate and pattern of shrub encroachment over six decades in New Mexico, USA. *Journal of Arid Environments*, 54, 755–767.
- Hamada Y, Stow DA, Roberts DA, Franklin J, Kyriakidis PC (2013). Assessing and monitoring semi-arid shrublands using object-based image analysis and multiple endmember spectral mixture analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 3173–3190.
- Hostert P, Roder A, Hill J (2003). Coupling spectral unmixing and trend analysis for monitoring of long-term vegetation dynamics in Mediterranean rangelands. *Remote Sensing of Environment*, 87, 183–197.
- Jurena PN, Archer S (2003). Woody plant establishment and spatial heterogeneity in grasslands. *Ecology*, 84, 907–919.
- Kuemmerle T, Roder A, Hill J (2006). Separating grassland and shrub vegetation by multivariate pixel-adaptive spectral mixture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3251–3271.
- Laliberte AS, Rango A, Havstad KM, Paris JF, Beck RF, Mcneely R, Gonzalez AL (2004). Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 93, 198–210.
- Mcpherson GR, Wright HA, Wester DB (1988). Patterns of shrub invasion in semiarid Texas grasslands. *The American Midland Naturalist*, 120, 391–397.
- Myint SW, Gober P, Brazel A, Grossman-Clarke S, Weng Q (2011). Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1145–1161.
- Niu XW (1998). Biological characteristics of *Caragana microphylla*. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 4, 123–130. (in Chinese with English abstract) [牛西午 (1998). 柠条生物学特性研究. 华北农学报, 4, 123–130.]
- Peng HY, Li XY, Tong SY (2014). Advance in shrub encroachment in arid and semiarid region. *Acta Prataculturae Sinica*, 23, 313–322. (in Chinese with English abstract) [彭海英, 李小雁, 童绍玉 (2014). 干旱半干旱区草原灌丛化研究进展. 草业学报, 23, 313–322.]
- Roberts DA, Gardner M, Church R, Ustin S, Scheer G, Green RO (1998). Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, 65, 267–279.
- Shan LY (2004). *Spectrum Analysis and Information Obtaining on TM Image of Xianghuang Banner Grassland in Inner Mongolia*. Master degree dissertation, Gansu Agricultural University, Lanzhou. 4–9. (in Chinese with English abstract) [单丽燕 (2004). 内蒙古镶黄旗草原TM影像的波谱分析及信息提取. 硕士学位论文, 甘肃农业大学, 兰州. 4–9.]
- Shi GH (2014). Effects of climate change on phenophase of forage grass in Xilinguole typical grassland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 29, 197–204. (in Chinese with English abstract) [师桂花 (2014). 气候变化对锡林郭勒盟典型草原天然牧草物候期的影响. 中国农学通报, 29, 197–204.]
- Smith MO, Ustin SL, Adams JB, Gillespie AR (1990). Vegetation in deserts: I. A regional measure of abundance from multispectral images. *Remote Sensing of Environment*, 31, 1–26.
- Sohn Y, McCoy RM (1997). Mapping desert shrub rangeland using spectral unmixing and modeling spectral mixtures with TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 707–716.

- Wang H, Li XB, Long HL, Xu X, Zhang C (2008). Simulating vegetation fractional coverage for temperate grassland in Northern China combining *NDVI* with precipitation time series from 1982 to 1999. *Journal of Basic Science and Engineering*, 4, 525–536. (in Chinese with English abstract) [王宏, 李晓兵, 龙慧灵, 许旭, 张程 (2008). 整合1982–1999年*NDVI*与降雨量时间序列模拟中国北方温带草原植被盖度. 应用基础与工程科学学报, 4, 525–536.]
- Woebbecke DM, Meyer GE, von Bargaen K, Mortensen DA (1992). Plant species identification, size, and enumeration using machine vision techniques on near-binary images. *SPIE Optics in Agriculture and Forestry*, 1836, 208–212.
- Xiao J, Moody A (2005). A comparison of methods for estimating fractional green vegetation cover within a desert-to-upland transition zone in central New Mexico, USA. *Remote Sensing of Environment*, 98, 237–250.
- Xu N, Ding JL, Liu HX (2012). Extraction of vegetation information in arid area based on *NDVI* and *LSMM*: A case study of Turpan. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 7, 52–57. (in Chinese with English abstract) [徐娜, 丁建丽, 刘海霞 (2012). 基于*NDVI*和*LSMM*的干旱区植被信息提取研究——以新疆吐鲁番市为例. 测绘与空间地理信息, 7, 52–57.]
- Zhang FH, Huang MX, Zhang J, Bao G, Bao YH (2014). Identification of grass species based on hyperspectrum—A case study of Xilin Gol Grassland. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (7), 66–69. (in Chinese with English abstract) [张富华, 黄明祥, 张晶, 包钢, 包玉海 (2014). 利用高光谱识别草地种类的研究——以锡林郭勒草原为例. 测绘通报, (7), 66–69.]
- Zhou Y, Chen J, Chen XH, Cao X, Zhu XL (2013). Two important indicators with potential to identify *Caragana microphylla* in Xilin Gol grassland from temporal *MODIS* data. *Ecological Indicators*, 34, 520–527.

责任编辑: 梁存柱 责任编辑: 王 威



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览