

DOI:10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0059

常伟,刘咏梅,庞国伟,高原,王德军.牛心朴子的光谱差异特征参量分析.草业科学,2016,33(11):2165-2172.

Chang W, Liu Y M, Pang G W, Gao Y, Wang D J. Analysis of spectral difference feature parameters of *Cynanchum komarovii*. Pratacultural Science, 2016, 33(11): 2165-2172.



牛心朴子的光谱差异特征参量分析

常伟¹, 刘咏梅¹, 庞国伟¹, 高原¹, 王德军²

(1. 西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 阿拉善左旗腾格里镇动物卫生监督站, 内蒙古 阿拉善盟 750314)

摘要:牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)是分布在西北干旱半干旱荒漠草原的主要毒害草之一。近年来,牛心朴子快速蔓延对当地畜牧业发展和草原生产力的影响日益严重。采用内蒙古阿拉善左旗典型样区内牛心朴子和其它沙地植物的野外实测光谱,通过叶片光谱、冠层光谱及群落样方光谱的对比分析,探讨牛心朴子与其它沙地植物的光谱差异性。结果表明,在 350—2 500 nm 波段,牛心朴子叶片的光谱反射率均高于花的反射率,花的反射光谱未出现明显的蓝谷和绿峰。沙地背景对牛心朴子冠层光谱的影响强烈,冠层光谱是沙地与牛心朴子叶片光谱的综合表征。最大的红边斜率以及 800—1 300 nm 明显的高反射率是牛心朴子与其它沙地植物冠层光谱的主要差异特征。根据不同盖度牛心朴子群落样方光谱的变化规律,选取 4 个特征参量与群落盖度进行线性回归分析表明:利用红边斜率进行群落盖度反演的效果最好, R^2 为 0.781 5。本研究可为牛心朴子分布遥感监测及其盖度定量反演提供科学依据。

关键词:牛心朴子;沙地植物;光谱特征参量;阿拉善左旗

中图分类号:S452;Q945.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0629(2016)11-2165-08*

Analysis of spectral difference feature parameters of *Cynanchum komarovii*

Chang Wei¹, Liu Yong-mei¹, Pang Guo-wei¹, Gao Yuan¹, Wang De-jun²

(1. College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China;

2. Alxa Left Banner Tengger Town Animal Health Inspection Station, Alxa 750314, China)

Abstract: *Cynanchum komarovii* is one of the main poisonous weed distributed in arid and semi-arid desert steppes of northwest china. In recent years, rapid spreading of *C. komarovii* has brought serious harm to local animal husbandry and grassland productivity. With field measured spectra of *C. komarovii* and other psammophyte plants acquired in the typical district of Alxa Left Banner, Inner Mongolia, spectral characteristics of leaf, canopy and community were compared to discuss the differences between *C. komarovii* and other psammophyte plants. The results showed that the reflectance of *C. komarovii* leaf was higher than that of the flower in 350—2 500 nm and the flower spectra did not appear obvious blue valley and green peak. Sand background has strong influence on the canopy spectra of *C. komarovii*, which was the combination of the leaf and sand. The main spectral differences between canopy spectra of *C. komarovii* and other psammophyte plants were the largest red edge slope and obvious high reflectance in 800—1 300 nm. According to spectra changes of *C. komarovii* communities with different coverage, 4 feature parameters were selected to analysis the linear regression between parameters and community coverage which showed red edge slope had the best result ($R^2=0.781 5$). This study provides scientific basis for monitoring and retrieving coverage of *C. komarovii* using remote sensing techniques.

* 收稿日期:2016-01-26 接受日期:2016-06-14

基金项目:农业部公益性行业专项——草原主要毒害草发生规律与防控技术研究(201203062)

第一作者:常伟(1991-),男,河南泌阳人,在读硕士生,主要从事生态环境遥感应用研究。E-mail:changwei0801@163.com

通信作者:刘咏梅(1970-),女,陕西西安人,副教授,博士,主要从事生态环境与植被遥感研究。E-mail:liuyym@nwu.edu.cn

Key words: *Cynanchum komarovii*; psammophyte; spectral feature parameter; Alxa Left Banner

Corresponding author: Liu Yong-mei E-mail: liuym@nwu.edu.cn

毒草蔓延是草地退化的第二大灾害因素,直接威胁到草地生态系统安全和畜牧业的可持续发展^[1]。牛心朴子(*Cynanchum komarovii*)为萝藦科(Asclepiadaceae)鹅绒藤属多年生丛生草本,广泛分布于甘肃、宁夏、陕西、阿拉善及鄂尔多斯的草原、半荒漠及荒漠的沙区^[2],其新鲜茎、叶均有毒,家畜误食会导致腹泻、肝坏死甚至死亡。牛心朴子根系发达,耐干旱抗高温,具有极强的荒漠适应能力^[3],被认为是草原逆行演替过程中最后阶段的指示种^[2]。在内蒙古自治区阿拉善左旗,牛心朴子的分布面积超过 9 800 km²^[4],其快速蔓延是该地区沙质荒漠化程度由中度向重度转化的标志之一^[5],对当地畜牧业生产和生态平衡的影响日益受到人们的关注^[6]。

目前牛心朴子的研究主要集中在化学成分^[7-8]、水分和干旱胁迫^[2,9-10]、提取物^[11-14]、地理分布和资源利用^[15]等方面。草地植物的光谱特征对物种识别具有重要意义^[16],而以牛心朴子分布遥感识别与监测为目标,分析牛心朴子与其它沙地植物的光谱差异性,这方面的研究有待开展。本研究采用阿拉善左旗典型区域内牛心朴子及毛瓣白刺(*Nitraria praevisa*)等沙地植物的野外实测光谱数据,分析牛心朴子及沙地主要植物的光谱特征,提取光谱差异特征参量,并进一步研究牛心朴子群落光谱特征参量与群落盖度的相关性,以期对牛心朴子分布遥感监测及其盖度定量反演提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

阿拉善左旗地处贺兰山西麓,地理范围 103°21′—106°51′ E,37°24′—41°52′ N,总面积为 80 412 km²。地势东南高西北低,海拔 800~1 500 m,区域内山脉高耸、丘陵起伏、沙漠连绵,地貌类型多种多样。气候属典型的大陆性气候,年降水量 80~220 mm,年平均气温 7.2 ℃。植被分布具有明显的地带性规律,从东南向西北依次为草原化荒漠带、典型荒漠带和极寒荒漠带^[17],土壤为灰漠土和风沙土。根据《阿拉善左旗志》,该区域内可利用天然草地面积约 50 000 km²,占全旗总面积的 62.8%。

光谱试验样区位于阿拉善左旗境内腾格里沙漠的南缘,地理位置 37°51′13.553″ N,104°44′3.121″ E。植物组成以旱生、超旱生的灌木和半灌木为主,主要植物

有牛心朴子、毛瓣白刺、沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus*)、刺叶柄棘豆(*Oxytropis aciphylla*)、霸王(*Sarcozygium xanthoxylon*)、沙葱(*Allium mongolicum*)等。区域内植被覆盖度整体较低,为 3%~23%,平均盖度 10%~15%。

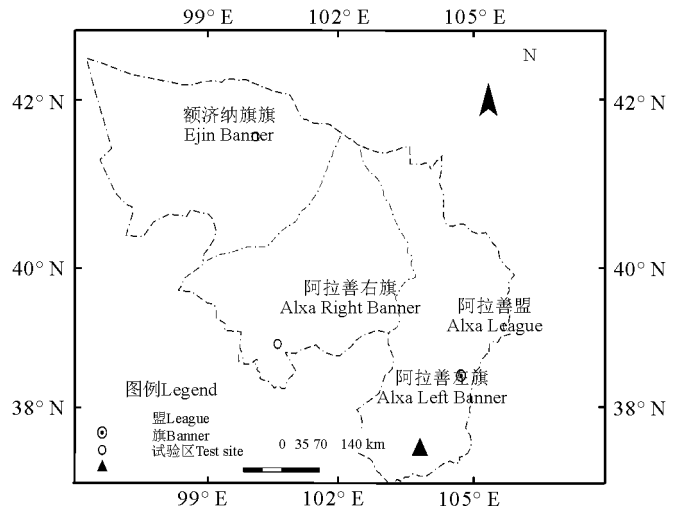


图1 试验区位置图

Fig.1 Location of test site

1.2 数据采集

野外光谱数据采集利用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec[®]4 HI-RES 地物光谱仪,光谱范围 350~2 500 nm,波长精度±0.5 nm,光谱采样间隔 0.1 nm,光谱分辨率 3 nm@700 nm,8 nm@1 400 & 2 100 nm,探测镜头采用 25°视场角。野外采集的光谱主要包括:1)牛心朴子花和叶片光谱;2)牛心朴子群落样方光谱;3)牛心朴子及沙地主要植物的冠层光谱。牛心朴子花和叶片光谱采用叶片夹采集,测量时使被测目标均匀布满整个镜头,每次采集 10 条光谱,重复 3 个样本,求平均值作为该样本的反射光谱值。在光谱测试样地选取不同盖度的牛心朴子群落,布设大小为 1 m×1 m 的样方,测量时探头距样方高度 2.2 m,获取牛心朴子—沙地混合光谱,同时垂直向下拍照获取样方盖度照片,冠层光谱采集时探头与植株冠层相距 10 cm 左右。数据采集前用参考白板对光谱仪进行校准和优化,测量过程中探头垂直向下对准被测目标中心,120°旋转光谱仪探头进行 3 次测量,求平均值作为该样方或植株冠层的反射光谱值。

1.3 牛心朴子样方盖度解译

在试验区内随机选取 21 个牛心朴子样方进行光

谱测量,对样方盖度照片进行几何校正和裁剪,使用格网法估算样方盖度,此过程结合 ArcGIS 10.2 的几何校正 (spatial adjustment)、裁剪 (clip) 和鱼网 (fishnet) 等工具完成 (图 2)。

1.4 数据处理

研究中使用 ViewSpec Pro 6.0 软件对实测光谱数

据进行预处理,筛选并剔除异常值。在 Origin Pro 9.0 软件中,采用平滑 (smooth) 工具,选择移动窗口多项式拟合平滑法 (Savitzky-Golay) 对原始光谱曲线进行降噪处理;采用微分 (differentiate) 工具计算沙地主要植物冠层光谱及牛心朴子样方的一阶微分光谱;利用线性拟合 (linear fit) 工具对牛心朴子群落光谱特征参



图 2 牛心朴子样方盖度解译

Fig.2 Coverage interpretation of *Cynanchum komarovii* quadrat

量与样方盖度进行线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 牛心朴子光谱特征

2.1.1 叶片和花的光谱特征 牛心朴子叶片呈墨绿色,花为靛青色。牛心朴子叶片具有绿色植物的典型光谱特征,在可见光和近红外波段 (VIR-NIR, 350-1 100 nm),由于叶绿素在蓝光和红光波段的吸收作用^[18],在 410 和 670 nm 附近出现吸收谷,在 550 nm 处出现反射率为 0.13 的反射峰;在 700-750 nm 处反射率急剧增高,在 750-1 100 nm 高反射平台的反射率均为 0.7 (图 3)。牛心朴子花的反射光谱未出现明显的蓝谷,由于花青素在绿光波段的吸收率高^[19],其

绿峰并不明显;在 640 nm 处出现反射率为 0.1 的微弱反射峰,并在 670 nm 附近出现吸收谷;在 700-1 100 nm 花的反射光谱曲线与叶片相似,均在 970 nm 附近出现明显的水分吸收深谷,由于叶片表面蜡质^[20]的反射作用,在该区间叶片明显高于花的反射率。在短波红外波段 (SWIR, 1 100-2 500 nm),水分吸收主导叶片与花的光谱反射特性,两者在 1 200、1 450 和 1 930 nm 附近出现强烈的水分吸收深谷,在吸收谷之间形成了 1 270、1 670 和 2 220 nm 附近的反射峰。在整个 350-2 500 nm 波段内,牛心朴子叶片的光谱反射率均高于花的反射率。

2.1.2 冠层光谱特征 在低植被覆盖区,土壤背景是冠层光谱的重要影响因素。研究区内牛心朴子群落结构单一,沙地背景对冠层光谱的影响剧烈 (图 4)。牛心朴子植株冠层光谱是沙地与牛心朴子叶片光谱的综合表征,长势越弱沙地背景的光谱特征越突出。在 VIR 波段 (350-700 nm),随着长势变弱,植株盖度降低,冠层光谱的蓝谷、红谷和绿峰等绿色植被特征减弱或消失,反射率整体升高 (图 5)。其中,长势最差、盖度最低的样本 3 与沙地的反射光谱曲线最接近。在 NIR 波段 (700-1 100 nm),沙地背景使冠层光谱的红边斜率降低,在 970 nm 处的水分吸收谷消失,750-1 100 nm 的高反射率有明显下降,样本 3 与沙地的反射率几乎一致。在 SWIR 波段 (1 100-2 500 nm),牛心朴子光谱对沙地背景的影响更敏感,不同长势牛心朴子的冠层光谱均与沙地的光谱曲线形状一

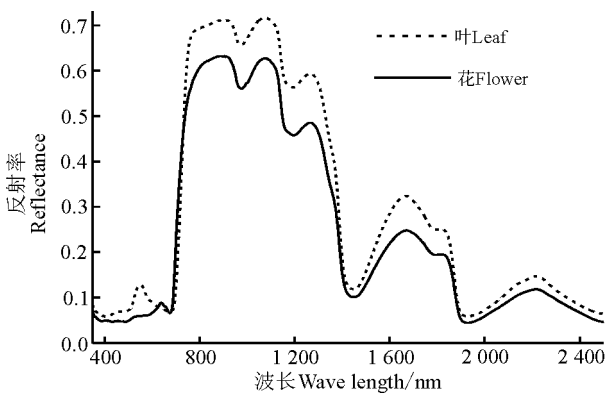


图 3 牛心朴子叶片和花的反射光谱
Fig.3 Reflectance spectra of the leaf and flower of *Cynanchum komarovii*



图4 不同长势牛心朴子样本

Fig. 4 Plants of *Cynanchum komarovii* with different growing situation

注:样本1、样本2和样本3分别表示株高为38、25和10 cm的牛心朴子植株。

Note: Sample 1, sample 2 and sample 3 represent the plants of *Cynanchum komarovii* with the height of 38, 25 and 10 cm, respectively.

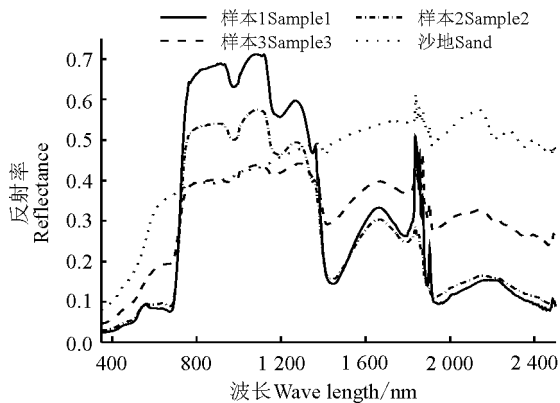


图5 不同长势牛心朴子样本与沙地的反射光谱曲线

Fig. 5 Reflectance spectra of sand and *Cynanchum komarovii* plants with different growing situation

致,并出现沙地特有的1 800—1 900 nm尖锐反射峰;随着长势减弱反射率明显升高,冠层光谱在1 200、1 450 nm处的水分吸收谷及在1 270、1 670 nm处的反射峰均逐渐减弱。与盖度较高的样本1和2相比,低盖度的样本3反射率在该区间有明显上升。总体来看,在800—1 300 nm沙地对冠层光谱的影响稍弱,冠层光谱主要取决于样本冠层结构的差异^[21]。

2.2 牛心朴子与其它沙地植物的光谱差异特征

2.2.1 叶片光谱的差异特征 研究区6种主要沙地植物的叶片反射光谱曲线波形相似,均符合绿色植物光谱规律。由于叶绿素含量及细胞结构的不同,各种沙地植物叶片在整个350—2 500 nm的反射率值有所变化(图6)。牛心朴子与其它5种沙地植物的反射光谱具有一定的差异性。在350—700 nm,沙冬青叶片绿中带白,反射率最高,牛心朴子叶片呈深绿至墨绿

色,反射率最低,反射率大小依次为沙冬青>刺叶柄棘豆>毛瓣白刺>霸王>沙葱>牛心朴子。在800—1 300 nm,沙葱的反射率明显偏低,牛心朴子与其它4种沙地植物的反射光谱曲线趋近而有所混杂。在1 400—2 500 nm,沙冬青反射率最高,沙葱最低,反射率差异在以1 650和2 200 nm为中心的反射峰附近最为突出,反射率从高到低依次是沙冬青>刺叶柄棘豆>毛瓣白刺>牛心朴子>霸王>沙葱。因此,牛心朴子叶片在350—700 nm的最低反射率是其区别于其它5种沙地植物的最明显特征。虽然牛心朴子叶片在该区间的反射率与沙葱叶片相近,但沙葱叶片呈半圆柱状至圆柱状,群落分布和形态结构^[22]与牛心朴子差异较大。以上特征为区分牛心朴子与其它沙地植物群落提供了波段参考。

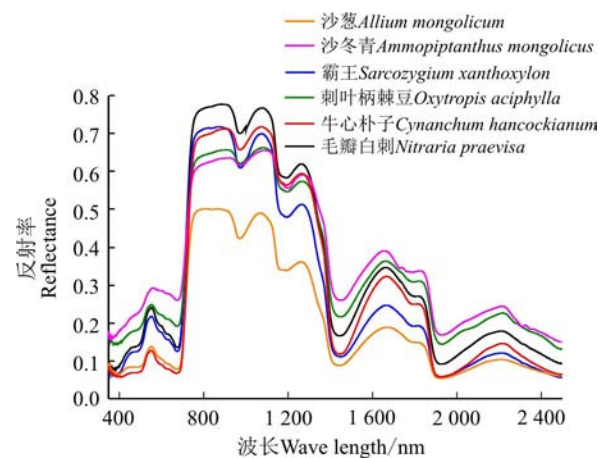


图6 沙地主要植物的叶片光谱

Fig. 6 Leaf spectra of the main psammophyte plants

2.2.2 冠层光谱的差异特征 研究区内主要沙地植物的冠层反射光谱及其一阶微分光谱如图 7 所示, 各种沙地植物冠层盖度均在 40%~60%。结合图 6 可知, 受沙地背景影响, 沙地植物冠层反射率普遍低于其叶片反射率。在 VIR-NIR 波段, 蓝谷消失, 红谷和绿峰受到不同程度的削弱。除刺叶柄棘豆外, 其它沙地植物在 350-700 nm 的反射率均小于 0.2, 同时 800-1 100 nm 的高反射平台均明显降低。在 SWIR 波段, 冠层光谱均呈现沙地反射光谱的尖锐反射峰, 叶片光谱呈现的水分吸收特征减弱, 吸收谷深度减小。

刺叶柄棘豆的叶片退化为针刺, 吸收和反射较少, 其冠层光谱基本与沙地反射光谱曲线一致(图 7), 与其它沙地植物差别较大; 其在 VIR-NIR 波段的 350-700 nm 反射率明显偏高且在 800-1 100 nm 未出现反射率平台, 在 SWIR 波段的 1 400-2 500 nm 反射率亦明显高于其它沙地植物群落。在整个 350-2 500 nm 内, 牛心朴子与毛瓣白刺、沙冬青、霸王和沙

葱的冠层光谱反射特征相似, 但在 800-1 400 nm 具有最高的反射率, 且在 1 086 nm 附近出现反射峰值, 与其它沙地植物具有明显的差异。

牛心朴子的红边斜率明显大于其它沙地植物, 这是一阶微分光谱曲线上最明显的特征。此外, 不同沙地植物的一阶微分光谱在 560、1 140 和 1 400 nm 附近波段表现出了较大差异, 1 400 nm 之后的一阶微分光谱扰动较大。因此, 牛心朴子冠层在 800-1 300 nm 的最高反射率和最大的红边斜率构成了其区别于其它沙地植物的明显特征。

2.3 牛心朴子群落盖度光谱特征参量提取

2.3.1 牛心朴子群落样方光谱特征 对于牛心朴子分布区域来说, 遥感影像的每个像元反映的是牛心朴子-沙地的混合光谱信息, 不同盖度牛心朴子群落的光谱变化规律及其与沙地背景的光谱差异是牛心朴子遥感识别的重要依据。图 8 显示了牛心朴子群落样方的反射光谱变化特征: 1) 在 VIR-NIR 波段的 350-

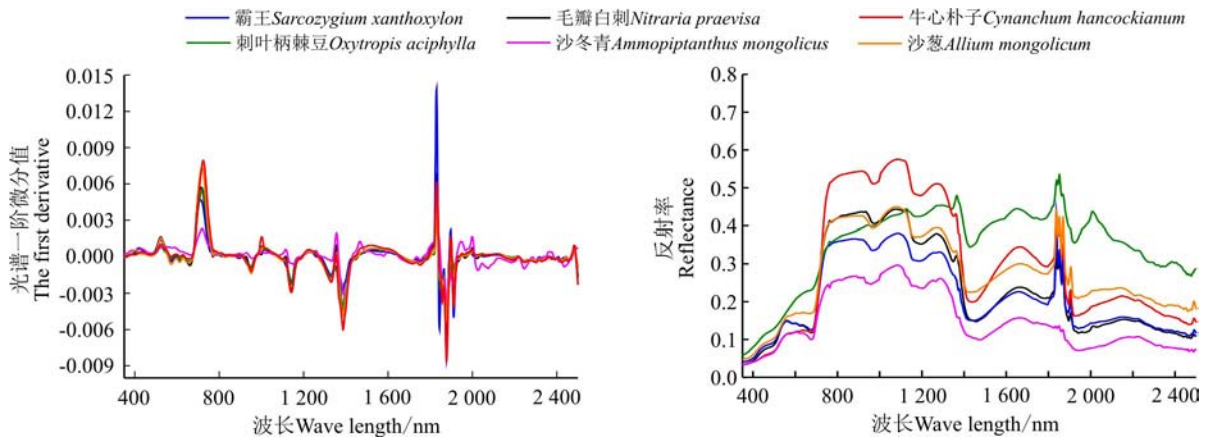


图 7 主要沙地植物冠层反射光谱及其一阶微分

Fig.7 Reflectance and first derivative spectra of the main psammophyte plants

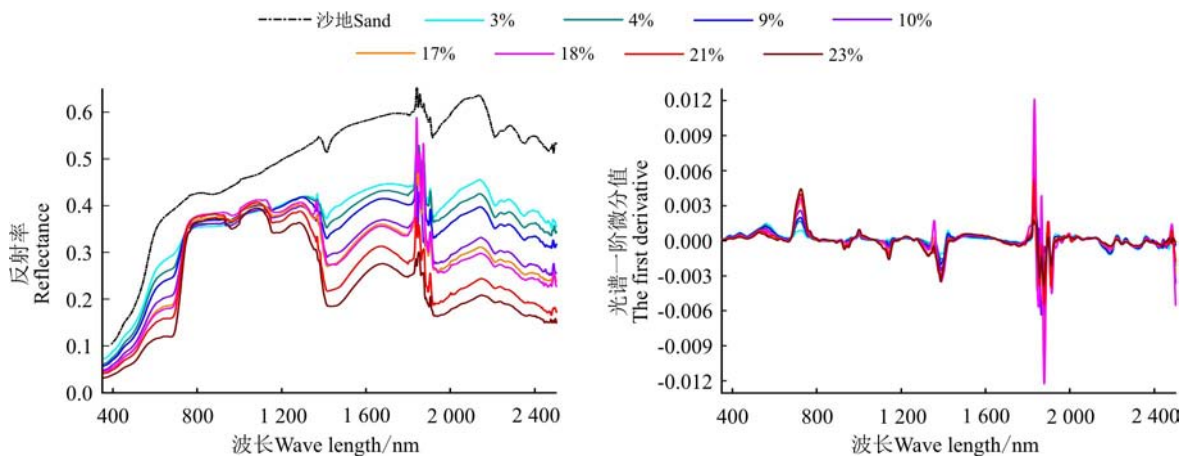


图 8 不同盖度牛心朴子样方反射光谱与一阶微分

Fig. 8 Reflectance and first derivative of *Cynanchum komarovii* quadrats spectrum with different coverage

780 nm、SWIR 波段的 1 100—1 800 和 1 900—2 400 nm,牛心朴子样方反射率随盖度增加而逐渐降低,与沙地背景的差异性增强。2)不同盖度的牛心朴子样方在 600—700、1 450—1 800 和 1 950—2 200 nm 的反射率差异明显,最大差异位置为 680 和 1 670 nm。3)盖度在 10%以上的牛心朴子样方光谱曲线在近红外波段出现反射平台,红谷出现在 680 nm 处,水分吸收谷的对应波长位置在 970、1 200、1 420 和 1 860 nm 附近。

牛心朴子样方一阶微分光谱的变化规律如图 8 所示:1)不同盖度牛心朴子样方的光谱变化特征在一阶微分光谱曲线上得到强化,差异更加明显;2)不同盖度牛心朴子样方一阶微分光谱在可见光波段形状相似,红边位置集中在 725 nm 波长处,红边斜率随盖度的增加而明显变大;3)不同盖度牛心朴子样方的一阶微分光谱在 500—600、680—760 以及 1 350—1 450 nm 这 3 个范围内差异明显,最大差异位置为 560 和 725 nm。

2.3.2 牛心朴子群落盖度光谱特征参量 不同盖度

牛心朴子样方的最大光谱差异体现在反射光谱的 680 和 1 670 nm 以及光谱一阶微分的 560 和 725 nm 处,结合牛心朴子与其它沙地植物的光谱差异特征分析结果,选择这 4 个光谱位置作为特征参量,分别对其与牛心朴子样方盖度进行线性回归分析,进一步探讨 4 个特征参量对牛心朴子群落盖度的敏感性。其中, R_{680} 、 R_{1670} 和 FDR_{560} 、 FDR_{725} 分别表示 680、1 670 nm 处的反射率值及 560、725 nm 处的一阶微分光谱值。

4 个特征参量与牛心朴子样方盖度之间具有很好的线性关系(图 9),决定系数 R^2 均大于 0.50,最大为 0.781 5。 R^2 依次为 $FDR_{725} > FDR_{560} > R_{680} > R_{1670}$, FDR_{725} 即红边斜率,说明红边斜率对牛心朴子群落盖度的变化最为敏感。一阶微分光谱的两个特征参量与牛心朴子样方盖度进行回归分析的 R^2 均优于光谱反射率的两个特征参量,其中,利用 FDR_{725} 进行牛心朴子群落盖度反演的效果最好。因此,可以利用特征参量 FDR_{725} (红边斜率)构建的线性回归方程对牛心朴子群落盖度进行定量反演。

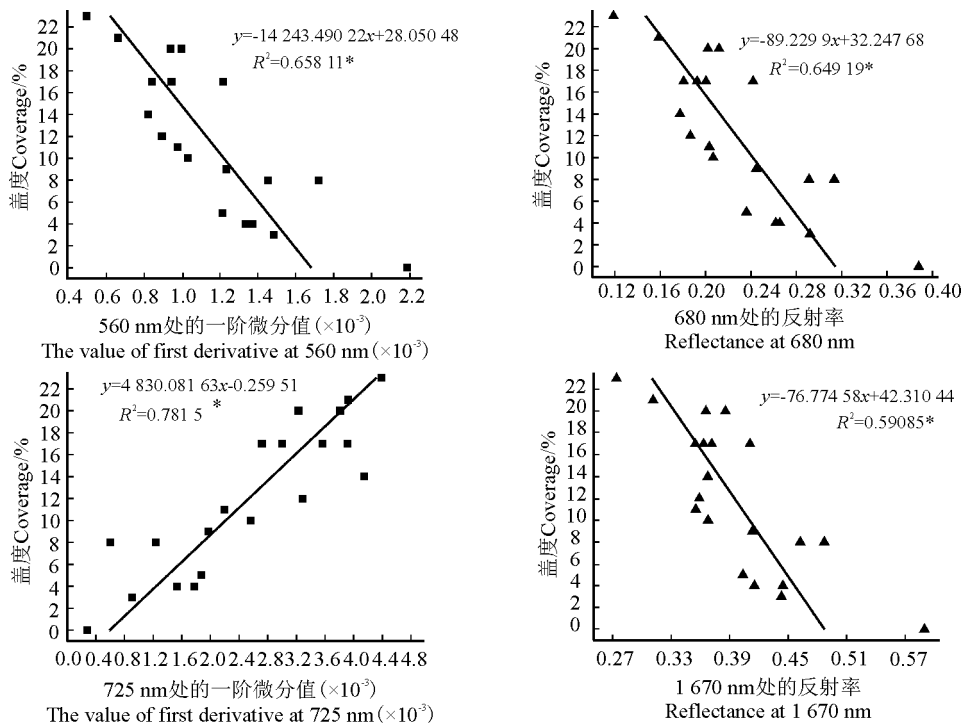


图 9 牛心朴子样方盖度与光谱特征参量的回归分析

Fig. 9 Regression analysis between coverage of *Cynanchum komarovii* quadrats and feature parameter

注: * 表示相关性分析通过($\alpha=0.05$)显著性检验。

Note: *, The correlation analyses passed through the significant test($\alpha=0.05$).

3 讨论与结论

在 350—2 500 nm 波段,牛心朴子叶片的光谱反射率均高于花的反射率,叶片具有典型绿色植被的光

谱特征,而花的反射光谱未出现明显的蓝谷和绿峰。沙地背景对牛心朴子冠层光谱影响强烈,冠层光谱是沙地与牛心朴子叶片光谱的综合表征,长势越弱,盖度越低,沙地背景的光谱特征越突出。

牛心朴子与其它 5 种沙地植物的反射光谱具有一定的差异性。在 350—700 nm 牛心朴子叶片具有明显较低的反射率,使其区别于其它沙地植物的叶片光谱。就冠层光谱而言,最大的红边斜率及 800—1 300 nm 明显的高反射率是牛心朴子与其它沙地植物的主要差异特征。

不同盖度牛心朴子样方的最大光谱差异体现在反射光谱的 680 和 1 670 nm 以及光谱一阶微分的 560、725 nm,选取这 4 个特征参量与牛心朴子盖度进行线性回归分析表明,利用 FDR_{725} (红边斜率) 进行牛心朴子群落盖度反演的效果最好, R^2 达到 0.781 5,利用红边斜率构建的线性回归方程可对牛心朴子群落盖度进行定量反演。

本研究系统分析了牛心朴子的光谱特征及与其它沙地植物的光谱差异性,为牛心朴子的分布调查及盖度反演提供了参考和依据,在此研究的基础上利用多光谱/高光谱影像在典型区域进行牛心朴子分布的遥感提取是下一步开展的研究工作。荒漠地区植被群落结构单一,植被覆盖度较低,土壤背景是牛心朴子遥感识别的重要影响因素之一。本研究结果表明,随着盖度降低,牛心朴子冠层光谱和样方光谱与沙地反射光谱曲线趋于一致而难以被识别。深入分析牛心朴子群落光谱随盖度的变化规律,筛选土壤背景敏感参量,深化土壤背景影响的定量研究有助于提高牛心朴子遥感提取的精度和效率。

参考文献 References:

- [1] 王迎新,王召锋,程云湘,侯扶江.浅议毒害草在草地农业生态系统中的作用.草业科学,2014,31(3):381-387.
Wang Y X, Wang Z F, Cheng X Y, Hou F J. The roles of toxic and harmful grass in grassland agro-ecosystems. Pratacultural Science, 2014, 31(3): 381-387. (in Chinese)
- [2] 郑海雷,黄子琛,董学军.毛乌素沙地油蒿和牛心朴子生理生态学研究.植物生态学与地植物学学报,1997,16(3):197-208.
Zheng H L, Huang Z C, Dong X J. Physiological ecology studies on *Artemisia ordosica* and *Cynanchum komarovii* in the Maowusu sandland. Acta Phytoecologica Et Geobotanica Sinica, 1997, 16(3): 197-208. (in Chinese)
- [3] 陈翠云,赵昕,李新荣.干旱胁迫下牛心朴子的渗透调节机制研究.中国沙漠,2012,32(5):1275-1282.
Chen C Y, Zhao X, Li X R. Osmotic adjustment mechanism of *Cynanchum komarovii* under drought stress. Journal of Desert Research, 2012, 32(5): 1275-1282. (in Chinese)
- [4] 赵宝玉,刘忠艳,万学攀,霍星华,郭玺,王建军,孙莉莎,刘忠艳,史志诚.中国西部草地毒草危害及治理对策.中国农业科学,2008,41(10):3094-3103.
Zhao B Y, Liu Z Y, Wan X P, Huo X H, Guo X, Wang J J, Liu Z Y, Sun L S, Shi Z C. Damage and control of poisonous-weed in Chinese western grassland. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(10): 3094-3103. (in Chinese)
- [5] 孙鹏森,刘世荣.鄂尔多斯地区两种典型沙质荒漠化阶段微气象特征的比较研究.林业科学,2003,39(4):9-15.
Sun P S, Liu S R. Comparison of micro-meteorological characteristics of different stage in desertification area Erdusi. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(4): 9-15. (in Chinese)
- [6] 卢围,宋岩岩,庞龙,赵宝玉,路浩,荣杰,马尧,李蓉,王占新.内蒙古阿拉善草地毒草灾害调查与控制对策.动物医学进展,2011,32(4):71-75.
Lu W, Song Y Y, Pang L, Zhao B Y, Lu H, Rong J, Ma Y, Li R, Wang Z X. Investigation and control measures on toxic plant disasters on grassland in Alax of Inner Mongolia. Progress in Veterinary Medicine, 2011, 32(4): 71-75. (in Chinese)
- [7] An T Y, Huang R Q, Yang Z, Zhang D K, Li G R, Yao Y C, Gao J. Alkaloids from *Cynanchum komarovii* with inhibitory activity against the tobacco mosaic virus. Phytochemistry, 2001, 58(8): 1267-1269.
- [8] Wang L Q, Shen Y M, Xu X, Wei Y Q, Zhou J. Five new C_{21} steroidal glycosides from *Cynanchum komarovii* Al. Iljinski. Steroids, 2004, 69(5): 319-324.
- [9] 李树华,许兴,何军,米海莉,王具宏.水分胁迫对牛心朴子光合生理特性影响的研究.西北植物学报,2004,24(1):100-104.
Li S H, Xu X, He J, Mi H L, Wang J H. Study on photosynthetic physiology characteristic of *Cynanchum komarovii* under water stress. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2004, 24(1): 100-104. (in Chinese)
- [10] 米海莉,许兴,李树华,何军,张源沛,赵天成,马有明.水分胁迫对牛心朴子、甘草叶片色素、可溶性糖、淀粉含量及碳氮比的影响.西北植物学报,2004,24(10):1816-1821.
Mi H L, Xu X, Li S H, He J, Zhang Y P, Zhan T C, Ma Y M. Effects of soil water stress on contents of chlorophyll, soluble sugar, starch, C/N of two desert plants (*Cynanchum komarovii* and *Glycyrrhiza uralensis*). Acta Botanica Boreali-Occidentalia

- Sinica, 2004, 24(10): 1816-1821. (in Chinese)
- [11] 杨敏丽, 李建涛, 剡根姣. 牛心朴子总生物碱与化学农药复配剂对小菜蛾的联合毒力作用. 农药, 2012, 51(4): 307-309.
Yang M L, Li J T, Yan G J. The co-toxicities of mixtures of *Cynanchum komarovii* total alkaloids with chemical pesticides against *Plutella xylostella*. Agrochemicals, 2012, 51(4): 307-309. (in Chinese)
- [12] 剡根姣, 杨敏丽, 李建涛. 牛心朴子与苦豆子两种提取物复配对小菜蛾幼虫的联合毒力作用. 天然产物研究与开发, 2012, 24(7): 969-971, 975.
Yan G J, Yang M L, Li J T. Investigate on the common-toxicity of *Cynanchum komarovii*-*Sophora alopecuroides* mixtures against diamondback moth. Natural Product Research and Development, 2012, 24(7): 969-971, 975. (in Chinese)
- [13] 阿拉侯赛因. 牛心朴子对动物体组织生物化学及血液学影响的研究. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2014.
Al-Mayahi Alaa Hussein Sadoon. Histological, biochemical and hematological effects of *Cynanchum komarovii* Al. Ijinski on animals. PhD Thesis. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014. (in Chinese)
- [14] 郭宏霞. 牛心朴子生物碱中杀虫成分的分离鉴定及杀虫活性研究. 银川: 宁夏大学硕士学位论文, 2013.
Guo H X. Study on the isolation, identification and insecticidal activity of alkaloid from *Cynanchum komarovii*. Master Thesis. Yinchuan: Ningxia University, 2013. (in Chinese)
- [15] 张永康, 赵德惠, 李勇. 牛心朴子的研究进展. 农业科学研究, 2007(1): 52-55.
Zhang Y K, Zhao D H, Li Y. The research progress of *Cynanchum komarovii*. Scientia Agricultura Sinica, 2007(1): 52-55. (in Chinese)
- [16] 胡远宁, 崔霞, 孟宝平, 杨淑霞, 梁天刚. 甘南高寒草甸主要毒杂草光谱特征分析. 草业科学, 2015, 32(2): 160-167.
Hu Y N, Cui X, Meng B P, Yang S X, Liang T G. Spectral characteristics analysis of typical poisonous weeds in Gannan alpine meadow. Pratacultural Science, 2015, 32(2): 160-167. (in Chinese)
- [17] 张凯, 司建华, 王润元, 王小平, 韩海涛, 郭妮. 气候变化对阿拉善荒漠植被的影响研究. 中国沙漠, 2008, 28(5): 879-885.
Zhang K, Si J H, Wang R H, Wang X P, Han H T, Guo N. Impact of climate change on desert vegetation in Alxa region. Journal of Desert Research, 2008, 28(5): 879-885. (in Chinese)
- [18] 洪小芹, 赵志敏, 李鹏, 金小东. 污染水体中蓝藻叶绿素的光谱特征分析. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1596-1599.
Hong X Q, Zhao Z M, Li P, Jin X D. Spectral analysis of *Cyanobacteria chlorophyll* in polluted water. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1596-1599. (in Chinese)
- [19] 刘秀英, 申健, 常庆瑞, 严林, 高雨茜, 谢飞. 基于可见/近红外光谱的牡丹叶片花青素含量预测. 农业机械学报, 2015, 46(9): 319-324, 342.
Liu X Y, Shen J, Chang Q R, Yan L, Gao Y Q, Xie F. Prediction of anthocyanin content in peony leaves based on visible/near-infrared spectra. Transactions of the Chinese Society for Africultural Machinery, 2015, 46(9): 319-324, 342. (in Chinese)
- [20] 何军, 许兴, 李树华, 张源沛, 米海莉, 李明轩. 不同时期牛心朴子和甘草光合蒸腾日变化的研究. 西北植物学报, 2003, 23(10): 1676-1681.
He J, Xu X, Li S H, Zhang Y P, Mi H L, Li M X. Study on diurnal changes of photosynthesis and transpiration of *Cynanchum komarovii* and *Glycyrrhiza uralensis* in different stage. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2003, 23(10): 1676-1681. (in Chinese)
- [21] 张凯, 郭妮, 王润元, 司建华, 王小平. 西北荒漠草甸植被光谱反射特征研究. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1063-1069.
Zhang K, Guo N, Wang R Y, Si J H, Wang X P. Research on spectral reflectance characteristics for desert meadow of north-west China. Advances in Earth Science, 2006, 21(10): 1063-1069. (in Chinese)
- [22] 马全林, 刘世增, 严子柱, 贺访印. 沙葱的抗旱性特征. 草业科学, 2008, 25(6): 56-61.
Ma Q L, Liu S Z, Yan Z Z, He F Y. Drought resistant characteristics of wild *Allium mongolicum*. Pratacultural Science, 2008, 25(6): 56-61. (in Chinese)

(责任编辑 苟燕妮)