

## 东祁连山高寒灌丛六种灌木植物的光谱特征分析

王波<sup>1,2</sup>, 柳小妮<sup>1,2\*</sup>, 王洪伟<sup>3</sup>, 王彩玲<sup>4</sup>, 张德罡<sup>1,2</sup>, 纪童<sup>1,2</sup>

1. 甘肃农业大学草业学院, 甘肃 兰州 730070
2. 草业生态系统教育部重点实验室(甘肃农业大学), 甘肃 兰州 730070
3. 中国人民武装警察部队工程大学, 陕西 西安 710086
4. 西安石油大学计算机学院, 陕西 西安 710065

**摘要** 高寒灌丛是青藏高原生态系统的重要组成部分, 研究高寒灌丛对青藏高原生态系统的系统研究具有重要的意义。但是长期以来, 由于地处偏远而交通欠发达、加之生长条件严酷, 造成青藏高原高寒灌丛相关研究较为困难。遥感探测技术, 可以克服地理及环境造成的困难, 而且可以进行大面积、无损的探测, 因此, 可以采用遥感探测技术进行青藏高原的高寒灌丛研究。传统的高分辨率遥感探测技术, 由于常常采用的是 RGB 三个波段, 对不同植物的辨别精度低, 对应植物的 NDVI 指数和 RVI 指数差异性较小, 不能有效区分各类植被。同时, 高光谱反射率曲线和辐射度曲线, 蕴含上千波段的光谱信息, 若选择某一单一波段来进行植被探测, 则光谱信息损失非常大, 反应出来的灌丛特征不明显, 结果置信度低。为了区别高寒灌丛植被, 利用高光谱技术对灌丛开展光谱特征分析, 为青藏高原灌丛的遥感探测提供理论支持。本研究借助美国 FieldSpec4 高分辨率地物光谱仪, 在东祁连山马牙雪山景区内采集头花杜鹃(*Rhododendron capitatum* Maxim.)、鬼见愁(*Caragana jubata* (Pall.) Poir.)、金露梅(*Potentilla fruticosa* L.)、高山柳(*Salix cupularis*)、甘肃瑞香(*Daphne tangutica* Maxim.)和鲜黄小檗(*Berberis diaphana*)六种典型灌木植物的室内光谱数据, 通过反射率(REF)、吸收率(ABS)及其一阶微分(GREF 和 GABS)的变换, 进一步提高灌木植物光谱曲线间的可辨识度, 分析并筛选出敏感波段, 而后通过各个波段之间的相互组合计算 NDVI' 值和 RVI' 值, 并且以 TM 设置波段计算的 NDVI 值和 RVI 值作为参考, 筛选出优于 TM 波段且差值最大的波段组合确定为最优模型。结果表明: (1) 灌木植物对太阳辐射吸收形成的光谱特征曲线与大多数植物相似, 但与草本植物相比, 灌木植物的第一个波谷发生了左移现象; (2) 灌木植物在某些敏感波段中反映出独有的光谱特征, 通过 REF, ABS, GREF 和 GABS 变换, 可以进一步扩大, 利用这一特点可以筛选出敏感波段, 进行灌丛分类和识别; (3) 六种灌木植物光谱值差异较大, 且数值相对较为稳定的波段有 550~680, 860~1 075, 1 375~1 600 和 1 900~2 400 nm, 因此可选取这四个波段为敏感区进行灌木植物识别; (4) 利用 575~673 和 874~920 nm 敏感波段的 REF 均值或者 685~765, 556~590, 635~671 和 1 117~1 164 nm 敏感波段的 GABS 面积, 计算的 NDVI 值和 RVI 值可以有效辨别六种灌木植物。

**关键词** 东祁连山; 高寒灌丛; 灌木植物; 光谱特征; 分析

**中图分类号**: P237 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1509-08

### 引言

高寒灌丛是由耐寒的中生或早生灌木为优势种而构成的一类植被<sup>[1]</sup>。我国的高寒灌丛广泛分布在青藏高原高寒地

带, 是青藏高原高寒草地生态系统的重要组成部分, 也是我国西北和西南地区、外流流域的重要水源涵养林之一, 面积  $1.164 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 居世界之最<sup>[1]</sup>。长期以来, 由于地处偏远、高寒, 条件严酷, 交通不便, 青藏高原高寒灌丛相关研究较为困难<sup>[2]</sup>, 尤其是缺乏利用地物光谱仪开展的灌木植物分类

**收稿日期**: 2018-05-31, **修订日期**: 2018-10-13

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(31160475, 41301382, 61401439, 41604113, 41711530128)和西安光学精密机械研究所光谱成像重点实验室基金项目资助

**作者简介**: 王波, 1989年生, 甘肃农业大学草业学院硕士研究生 e-mail: wangbonxyc@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: Liuxn@gsau.edu.cn

和特征识别方面的研究。

植物分类是植物研究开发的基础性工作<sup>[4]</sup>，是遥感监测生物多样性动态变化的理论基础<sup>[5]</sup>。传统的灌木植物分类识别及群落特征调查主要依靠人力完成，不仅识别困难、费时费力，更是难以完成大面积的调查。因此，当前迫切需要寻找一种有效、快速、准确、便捷分类识别和监测灌丛的手段。

地物光谱研究自 20 世纪 80 年代开展以来，已经成为现代遥感技术的重要组成部分<sup>[6]</sup>。它不仅是遥感理论研究的重要内容，也是遥感应用研究的重要依据，已经在许多方面开展研究，如利用高光谱对植物含水量<sup>[7]</sup>、植物光谱识别<sup>[8]</sup>、植被光谱特征<sup>[9-11]</sup>、土壤有机质<sup>[12]</sup>、生物量<sup>[13]</sup>等估算和反演研究。这些成果有效解读了地物光谱特征规律，为生产实践提供了宝贵的经验和数据。植被指数一直是研究植被特征最简单、最有效的方法之一<sup>[14]</sup>。本研究以东祁连山高寒灌丛为研究对象，在灌丛生长旺盛期，采集典型灌木植物的光谱数据，并通过变换得到不同灌木植物的 REF, ABS, GREF 和 GABS 特征曲线，分析和筛选出光谱特征波段，构建 NDVI 值和 RVI 值的方法筛选最佳特征波段组合来识别灌木植物，为青藏高原的生态环境保护规划、高寒草原的遥感分类监测和植物信息提取提供科学依据。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段的甘肃省天祝县马牙雪山景区

内，属青藏高原植物亚区。地理位置 37°11′5.544″N, 102°46′28.371″E，海拔 2 878~4 025 m。该区为典型的高寒湿润气候，终年寒冷潮湿，光照充足，辐射强。土壤为山地黑钙土和山地草甸土，土层较薄，厚 80 cm 左右，有机质含量高，约为 16%。降雨量在 375~480 mm 之间，地形雨较多，主要集中在 7 月—9 月份，年均蒸发量 1 600 mm 左右，是年降雨量的 3.8 倍。年平均气温 -0.9 °C，1 月最低温度 -18.3 °C，7 月最高温度 19.6 °C，年日照时数 2 600 h，>0 °C 积温 1 410 °C。水热同期，早晚温差大，不存在绝对无霜期。仅分为冷季和暖季，冷季达 7 个月之久，植物生长期约为 140 d<sup>[2]</sup>。

研究区的灌木植物有 12 科 16 属 30 种，构成以金露梅 (*Potentilla fruticosa* L.)、绣线菊 (*Spiraeachinensis*)、杜鹃 (*Rhododendron*)、柳 (*Salix*)、小檗 (*Berberis*) 等灌丛为主的大面积高寒落叶灌丛和高寒常绿灌丛<sup>[1]</sup>。

### 1.2 研究对象、数据获取与处理

#### 1.2.1 研究对象

在研究区内，选择具有代表性的优势灌木植物(表 1)为研究对象。

#### 1.2.2 光谱数据采集与处理

采用美国 ASD 公司生产的 FieldSpec4 便携式地物光谱仪采集灌木植物光谱数据。其波长范围 350~2 500 nm，囊括了全部可见光(380~780 nm)和部分近红外光(780~2 500 nm)。350~1 000 nm 的范围内，光谱分辨率波长精度为 3 nm，1 000~2 500 nm 波长范围内为 10 nm。采样间隔分别为 1.4 和 2.0 nm，数据输出时重采样间隔为 1 nm<sup>[9]</sup>。

表 1 东祁连山典型灌木植物及其特征<sup>[1]</sup>

Table 1 The typical Shrubs in Eastern Qilian Mountain Alpine

灌木名	拉丁名	科	属	特征
头花杜鹃	<i>Rhododendron capitatum</i> Maxim.	杜鹃花科	杜鹃花属	多呈矮生、密集状，叶片常绿，具茸毛、蜡质、革质和翻卷、花淡紫色
鬼见愁	<i>Caraganajubata</i> (Pall.) Poir.	豆科	锦鸡儿属	又名鬼箭愁，多刺矮灌木，茎多刺，树皮深灰色至黑色
金露梅	<i>Potentilla fruticosa</i> L.	蔷薇科	委陵菜属	树皮纵向剥落，小枝红褐色，小叶片长圆形，两面绿色，花瓣黄色
高山柳	<i>Salix cupularis</i>	杨柳科	柳属	小灌木，小枝紫褐或紫黑色，芽棕褐色，叶椭圆形，两面无毛，叶柄淡黄色
甘肃瑞香	<i>Daphne tangutica</i> Maxim.	瑞香科	瑞香属	常绿直立灌木，枝粗壮，通常二分枝，小枝近圆柱形，紫红或紫褐色，无毛
鲜黄小檗	<i>Berberis diaphana</i>	小檗科	小檗属	落叶灌木，幼枝绿色，老枝灰色，具条棱和疣点，茎刺三分叉，粗壮，淡黄色，叶上暗绿色，侧脉和网脉突起，背面淡绿色，具短柄等特点

为得到不同水热条件下六种灌木植物的光谱特征，避免地形因素引起的误差，每个样地内同一种灌木植物采用 5 点式梅花桩采集方式。2017 年 7 月 28 日，采集 6 种灌木植物植株(包括取上中下 3 部分老叶、新叶、老茎、新茎及花)混合后装入自封袋标号并存于 0~4 °C 的恒温箱中带回甘肃农业大学高山草地试验站，且在当天测定所采植物室内光谱。

光谱采集时，先给仪器接通外接电源，连接叶片夹和外接光源，打开采集器，预热 40 min，待设备稳定后，进行标准白板校正。结束后从自封袋内取出植物样本进行混合，然后随机取出一部分放于叶片夹内闭合夹板，点击采集器进行

数据采集。每采集 15 min 左右再进行一次白板校正，每个点的灌木采集 5 条光谱数据，即同一种灌木共采集 25 条光谱数据。

灌丛群落特征的相关数据(盖度、高度、生物量等)主要来自野外实地调查，通过观察记录植物的种类、长势及部分形态特征。

导出采集数据后，使用自带的 View SpecPro 软件对光谱进行预处理，将同一种灌木植物地物光谱中差异较大的曲线进行剔除，有较大噪声影响的反射率曲线，采取式(1)平滑降噪处理后，计算得到灌丛的原始反射率(REF)。

REF 经过式(2)变换得到吸收率(ABS), 经过式(3)变换得到反射率一阶微分(GREF), ABS 经过式(4)变换得到吸收率的一阶微分(GABS)。

$$REF'_x = \frac{R_{x-2} + R_{x-1} + R_x + R_{x+1} + R_{x+2}}{5} \quad (1)$$

$$GREF(\lambda) = [R(\lambda_{x-1}) - R(\lambda_x)] / (\lambda_{x+1} - \lambda_x) \quad (2)$$

$$ABS(\lambda) = \lg[1/REF(\lambda)] \quad (3)$$

$$GABS(\lambda) = [ABS(\lambda_{x-1}) - ABS(\lambda_x)] / [\lambda_{x+1} - \lambda_x] \quad (4)$$

其中, R 为原始 REF, λ 为波长, 单位是 nm。

对获取的 REF, ABS, GREF 和 GABS 数据进行对比分析, 结合植物的生理生化形态结构等特点, 进而寻找差异性较大的波段作为敏感特征波段, 为利用遥感手段识别不同灌丛提供参考。

### 1.2.3 植被指数的改进与最优波段组合筛选

为了得到更加全面的灌丛信息、更加明显的光谱特征差异用于灌木植物区别, 最好的方法是选择全波段或波段组合。本研究采用归一化植被指数(NDVI')和比值指数(RVI')的计算方式, 筛选最佳波段构建优化的组合模型。

使用 REF, ABS, GREF 和 GABS 特征曲线筛选出的几个敏感波段值代入相应的公式计算改进型的植被指数(DNVI')和 RVI'值, 其中 REF 和 ABS 的敏感波段值代入式(5)和式(6)计算, GREF 和 GABS 的敏感波段值代入式(7)、式(8)和式(9)计算。

REF 和 ABS 计算改进型 NDVI'值和 RVI'值的公式如式(7)和式(8)

$$NDVI' = [B'_{max} - B'_{min}] / [B'_{max} + B'_{min}] \quad (5)$$

$$RVI' = B'_{max} / B'_{min} \quad (6)$$

式中, B'\_{max} 为灌木植物 REF(ABS)最大波段的光谱均值, B'\_{min} 为灌木植物 REF(ABS)最小波段的均值。

GREF 和 GABS 计算改进型 NDVI'值和 RVI'值的公式如式(5)和式(6)

$$NDVI' = [ | S'_{max} | - | S'_{min} | ] / [ | S'_{max} | + | S'_{min} | ] \quad (7)$$

$$RVI' = | S'_{max} | / | S'_{min} | \quad (8)$$

$$S' = [R_i + \dots + R_{i-n}] \quad (9)$$

式中, S' 为光谱在该波段中 REF(ABS)一阶微分的和, |S'\_{max}| 为灌木植物 REF 或者 ABS 一阶微分最大值存在波段的光谱面积, |S'\_{min}| 为灌木植物 REF 或者 ABS 一阶微分最小值存在波段光谱面积。

最后根据相应变换中不同灌木植物改进型 NDVI' 或 RVI' 值之间的最小差异, 选择差异最大的波段组合确定为最优模型。

## 2 结果与讨论

### 2.1 灌木植物光谱特征分析与敏感波段筛选

#### 2.1.1 光谱特征

图 1 为六种灌木植物的 REF[图 1(a)]和 ABS 曲线图。

从六种灌木植物的 REF 和 ABS 曲线[图 1(b)]特征来看, 其光谱曲线变化趋势相似, 波峰、波谷等出现的位置基本一致。整体来看, 鬼见愁的 REF 最小(最高点仅为 0.35),

鲜黄小檗的 REF 稍大(最高点在 0.52), 其余四种灌木植物的光谱 REF 的最高点均在 0.55 以上。ABS 最高的是鬼见愁, 其次是鲜黄小檗, 这与它们的低 REF 相对应。

从图 1(a)可知, 灌木植物的 REF 在 400 nm 附近出现了第一个波谷, 之后开始增大, 且在 490~600 nm 范围内出现了第一个波峰, 在 680 nm 处出现第 2 个波谷, 之后在 760 nm 附近均形成植物所特有的红边。这种红边现象虽然整体趋势相差不大, 但是不同植物之间 REF 还是有区别。

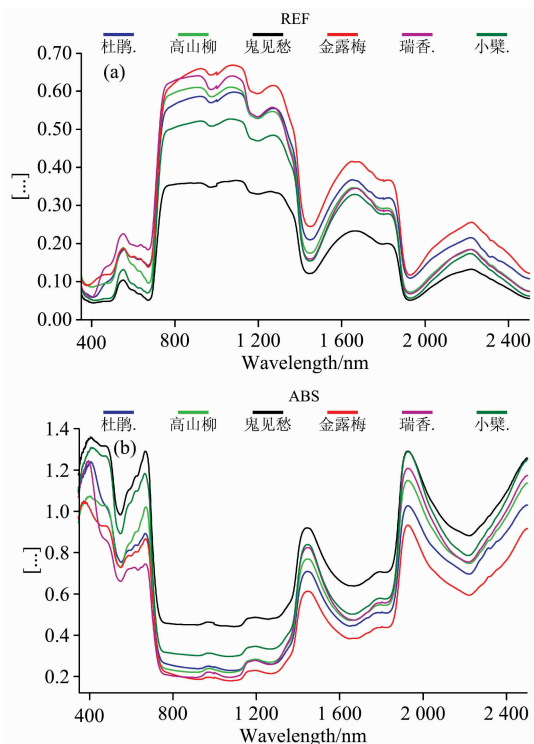


图 1 不同灌木植物的 REF, ABS 曲线

Fig. 1 The spectral reflectance curve of six kinds of Shrubs

在近红光波段(780~1 500 nm)内, REF 一直都保持较高水平。780~890 nm 之间 REF 缓慢增加, 随后 REF 有所降低, 并在 970 nm 附近出现近红外波段的第一个波谷, 但是波谷的吸收深度非常小。之后在 1 060 和 1 270 nm 出现两个反射波峰, 1 200 和 1 450 nm 各出现一个吸收波谷。中红外波段(1 500~2 500 nm)后, 随着波长的增加, REF 总体下降, 并且在 1 650 和 2 225 nm 附近出现两个波峰, 1 800 和 1 925 nm 附近出现两个波谷。

ABS 的变化趋势和 REF 相反[图 1(b)]。

图 1 表明, 红边区域(700~745 nm), 近红外区与短红外 1 区的过渡区(1 350~1 410 nm), 短红外 1 与短红外 2 的过渡区(1 860~1 920 nm), 光谱值斜率突然增大, 不同灌木植物 REF 和 ABS 之间的差异会降低乃至消失。在 550~680, 860~1 075, 1 375~1 600 和 1 900~2 400 nm 波段, REF 和 ABS 较为稳定, 且不同灌木植物光谱值的差异较大。

#### 2.1.2 敏感波段筛选

金露梅的 REF 在 830 nm 后超过了甘肃瑞香, 成为 REF 最大的灌木, 而其相应的 ABS 值明显低于其他几个灌木植

物。鬼见愁的 REF 在所有波段中一直低于其他灌木植物，尤其是在 680~1 350, 1 450~1 850 和 2 200 nm 波峰附近。

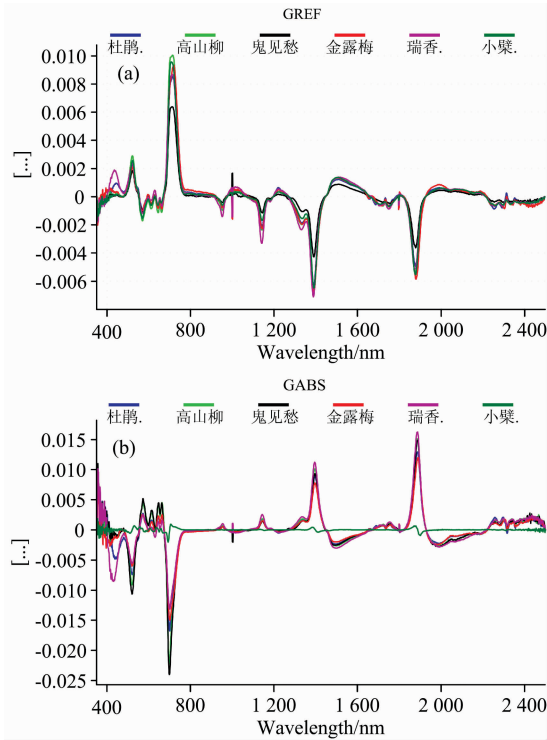


图 2 灌木植物反射率和吸收率一阶微分 (GREF 和 GABS) 曲线

Fig. 2 The curve of GREF and GABS transformed vegetation spectral reflectance

在 450~490 nm(蓝紫光和青光)波段内，正处于开花期(花瓣紫色)的甘肃瑞香和头花杜鹃的 REF 呈现陡峭上升趋势

势，而其他四种灌木植物的 REF 几乎不变。在 550~680 nm 波段内，除甘肃瑞香 ABS 增幅较小外，其余五种灌木植物的 ABS 增幅都在 2 以上[图 1(b)]。这一波段可以有效地对甘肃瑞香加以区分。

图 2 为六种灌木植物全波段一阶微分变换后的 REF 和 ABS(即 GREF 和 GABS)曲线图。

图 2(a)表明，可见光波段的 GREF 均为负值，说明这个波段范围内灌木植物叶片以吸收为主。在 490~750, 920~1 005, 1 100~1 204, 1 300~1 450 和 1 840~1 920 nm 这几个波段，不同灌木植物 GREF 差异非常明显。

不同灌木植物的 GABS 变化[图 2(b)]也非常明显。从全波段来看，鲜黄小檗的 GABS 波动变化很小，近乎一条直线，偶尔会出现轻微的波动，可以很好将鲜黄小檗与其余四种灌木植物区分开。450~780, 1 100~1 450 和 1 850~1 950 nm 的波段内灌木植物的 GABS 值变化较大，差异明显，可以考虑选择这几个波段范围的一个或几个波段作为灌木植物识别敏感区。

2.2 改进型植被指数计算与最优波段组合筛选

REF 和 ABS 曲线的敏感波段相近，图 1 表明，874~920 nm 是光谱反射(REF)最强、吸收(ABS)最小的波段，而 575~673 和 1 928~2 050 nm 这两个波段是光谱反射(REF)最弱，吸收(ABS)最大的波段，而且各个灌木植物在这 3 个波段内的 REF 和 ABS 差异都很大，据此可确定  $B'_{max}$  和  $B'_{min}$  值。同时以 TM 影像的波段(620~690 和 790~960 nm)作为对照，构建不同敏感波段组合模型计算  $NDVI'$  和  $RVI'$ 。

GREF 曲线各个灌木植物差异明显且稳定的波段有 490~550, 685~744, 556~591, 636~668, 933~963 和 1 117~1 164 nm 共六个波段；GABS 曲线中，差异明显且稳定的波段分别为 490~550, 685~765, 635~671, 556~590 和 1 117~1 164 nm(表 2)。

表 2 不同波段组合下 GREF 和 GABS 改进型的  $NDVI'$  和  $RVI'$  计算

Table 2 In different wavelengths combinations  $NDVI'$  and  $RVI'$  values calculated by GREF and GABS

一阶微分	不同波段组合归一化指数与比值指数方案
GREF	$NDVI'_{A}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  -  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF} + S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ] / [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  +  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF} + S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ]$
	$RVI'_{A}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ] / [  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF} + S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ]$
	$NDVI'_{B}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  -  S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ] / [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  +  S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ]$
	$RVI'_{B}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ] / [  S_{933}^{GREF} + S_{1117}^{GREF}  ]$
	$NDVI'_{C}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  -  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ] / [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  +  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ]$
	$RVI'_{C}^{GREF} = [  S_{490}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ] / [  S_{556}^{GREF} + S_{636}^{GREF}  ]$
GABS	$NDVI'_{A}^{GABS} = [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  -  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ] / [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  +  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ]$
	$RVI'_{A}^{GABS} = [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  ] / [  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ]$
	$NDVI'_{B}^{GABS} = [  S_{636}^{GABS}  -  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ] / [  S_{636}^{GABS}  +  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ]$
	$RVI'_{B}^{GABS} = [  S_{636}^{GABS}  ] / [  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS} + S_{1117}^{GABS}  ]$
	$NDVI'_{C}^{GABS} = [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  -  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS}  ] / [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  +  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS}  ]$
	$RVI'_{C}^{GABS} = [  S_{490}^{GABS} + S_{636}^{GABS}  ] / [  S_{556}^{GABS} + S_{635}^{GABS}  ]$

依据 REF, ABS, GREF 和 GABS 构建计算的改进型  $NDVI'$  值与  $RVI'$  值结果见表 3。

REF 和 ABS 的三个光谱组合模式中，575 nm 波段组合

中利用 REF 计算的  $NDVI'$  效果非常好，各个灌木植物在此波段组合下的改进型  $NDVI'$  差值差异最大，相近值的最小差值保持在 0.03 以上，优于对照(TM 波段组合)0.007。TM

波段组合和 575 波段组合中通过 REF 均值计算的改进型的 RVI' 值之间的差别在 0.45 以上。在该组合下依 NDVI' 值和 RVI' 值大小排列的灌木植物顺序一致, 鲜黄小檗 > 鬼见愁 > 高山柳 > 金露梅 > 头花杜鹃 > 甘肃瑞香。

GRES 和 GABS 所有波段组合下(表 3)的不同灌木植物改进型 NDVI' 的差异不大, 不能有效地区分灌木植物。C 组合下计算的 RVI' 值的差异虽然比较明显, 相近值的最小差

值可以达到 0.455, 但是 RVI' 为比值系数, 这个差异还是非常小, 仅仅可以作为参考。B 波段组合下灌木植物 NDVI' 值和 RVI' 值的差异最明显, 2 个相近灌木植物的 NDVI' 的最小差值可以达到 0.034, RVI' 的差值也在 0.3 左右, 且在该组合下 NDVI' 值和 RVI' 值大小排列的灌木植物顺序是一致的, 即鲜黄小檗 > 金露梅 > 头花杜鹃 > 甘肃瑞香 > 鬼见愁 > 高山柳。

表 3 不同波段组合下改进型的 NDVI' 和 RVI' 值  
Table 3 NDVI' and RVI' calculated by different wavelengths combinations

波段组合	头花杜鹃	高山柳	鬼见愁	金露梅	甘肃瑞香	鲜黄小檗	相近指数的最小差值
NDVI <sub>REF</sub>	0.582	0.685	0.713	0.619	0.534	0.736	0.023
NDVI <sub>ABS</sub>	0.554	0.616	0.460	0.613	0.566	0.573	0.003
NDVI <sub>575</sub> <sup>REF</sup>	0.573	0.647	0.677	0.610	0.523	0.717	0.030
NDVI <sub>575</sub> <sup>ABS</sup>	0.556	0.596	0.443	0.623	0.554	0.564	0.002
NDVI <sub>528</sub> <sup>REF</sup>	0.621	0.725	0.674	0.619	0.746	0.733	0.002
NDVI <sub>528</sub> <sup>ABS</sup>	0.577	0.625	0.425	0.612	0.665	0.564	0.013
RVI <sub>REF</sub>	3.784	5.343	5.963	4.245	3.292	6.590	0.492
RVI <sub>ABS</sub>	3.482	4.215	2.705	4.167	3.611	3.685	0.074
RVI <sub>575</sub> <sup>REF</sup>	3.681	4.672	5.200	4.132	3.225	6.073	0.459
RVI <sub>575</sub> <sup>ABS</sup>	3.501	3.950	2.591	4.298	3.845	3.588	0.087
RVI <sub>528</sub> <sup>REF</sup>	4.271	6.279	5.134	4.251	6.884	6.496	0.02
RVI <sub>528</sub> <sup>ABS</sup>	3.886	4.545	2.590	4.366	5.240	3.784	0.102
GRES	0.616	0.556	0.655	0.595	0.498	0.656	0.001
	4.211	3.503	4.794	3.934	2.981	4.816	0.067
	0.729	0.741	0.847	0.725	0.599	0.791	0.004
	6.375	7.707	12.074	6.286	3.992	8.582	0.089
	0.851	0.760	0.777	0.826	0.844	0.833	0.007
	12.045	7.333	7.951	10.522	11.781	10.977	0.455
GABS	0.690	0.577	0.620	0.689	0.640	0.857	0.001
	5.452	3.731	4.262	5.427	4.552	13	0.067
	0.587	0.458	0.501	0.610	0.535	0.818	0.034
	3.84	2.688	3.011	4.133	3.305	10	0.293
	0.763	0.643	0.758	0.758	0.781	0.857	0.000
	7.443	4.606	5.853	7.268	8.151	13	0.175
0.680	0.537	0.548	0.694	0.711	0.818	0.011	
5.243	3.319	3.429	5.536	5.919	10	0.110	

2.3 灌木植物光谱特征分析及敏感波段选择

2.3.1 光谱特征

植物与太阳辐射的相互作用主要体现在叶片的光谱特征。在可见光(400~700 nm)波段内, 影响 REF 的主要是存在于植物叶片中的叶色素, 绝大多数植物在 450 和 670 nm 波段附近形成波谷。灌木植物在 400 nm 附近出现了第一个微小的 REF 吸收谷, 与草本植物出现的第一个光谱吸收谷位置(450 nm)相比, 左移了 50 nm, 这应该是灌木区别于草本植物的一个典型特征。

六种灌木植物的 REF 在 490—600nm 范围内出现了第一个波峰。这一波段内太阳辐射 ABS 低, REF 较强, 是植物叶片光合作用中不能被利用或者利用少的光谱区域, 包含了可见光区域内的整个绿光区和黄光区, 这也是植物叶片呈现绿色的主要原因之一。

在可见光范围内, 灌木植物的 REF 依次为: 甘肃瑞香 > 头花杜鹃、高山柳和金露梅 > 鲜黄小檗 > 鬼见愁, 这与灌木植物叶片叶绿素含量、叶片结构特征及生育期有很大关系<sup>[15]</sup>。甘肃瑞香叶片面积大、叶绿素含量丰富, 它的 REF 也最高。头花杜鹃的叶片虽小, 但是数量多, 质地厚, 叶绿素含量也很高, 但是它的叶片上有一层厚厚的蜡质层阻挡了部分太阳辐射的吸收和反射, 导致其的 REF 值也不高。高山柳叶片面积较大, 但它的叶和花均显淡绿色, 叶柄呈黄色, 即叶绿素含量并不高, REF 较低。金露梅叶片叶绿素含量较高, 正在盛花期, 花瓣屏蔽了部分太阳辐射, 因此它的 REF 也不高。鲜黄小檗叶片较大, 叶绿素含量相对较高, 但是刺茎包围叶片和较短的叶柄造成叶倾角太小, 叶片可接受的有效太阳辐射有限, 加之处在盛花期, 花瓣非常大, 屏蔽了部分太阳辐射和叶片反射, 所以它的 REF 非常低。鬼见愁周身

具刺,叶密集于枝的上部,叶小且量极少,叶绿素含量非常低,这与它 REF 低相一致。

植被与太阳辐射的反射光谱特征不同于裸地、水体、建筑等其他物质。比如,植被的“红边”现象,即在 $<700\text{ nm}$ 附近呈强吸收, $>700\text{ nm}$ 呈高反射。六种灌木植物在 $680\text{ nm}$ 处第二次出现波谷,这一波段包含了红光、橙光的大部分,是植物光合作用吸收最强的波段范围,因此 REF 非常低<sup>[6]</sup>。

在可见光波段( $380\sim 780\text{ nm}$ ),除了红边的波长较大,REF 较强外,其余波段的 REF 都非常低,植物对可见光的吸收能力较强。而且这六种灌木植物都出现了两个明显的由叶绿素吸收红光( $670\text{ nm}$ )和蓝光( $400\text{ nm}$ )造成的吸收波谷。

研究表明叶子的几何特性、冠层结构和对水的需求影响植被的水分含量<sup>[7]</sup>。水分对植被 REF 影响波段包括近红外波段( $700\sim 1\ 300\text{ nm}$ )和短波红外波段( $1\ 300\sim 1\ 900\text{ nm}$ )。所以 $970$ 和 $1\ 200\text{ nm}$ 附近的吸收谷的差异与各个灌木植物的含水量高低有关。此外,在短波红外波段内,除了水分,以各种形式存在的 C 和 N 元素的含量也对光谱的反射有一定的贡献,形成 $1\ 400$ 和 $1\ 900\text{ nm}$ 的吸收谷。

### 2.3.2 敏感波段选择

近年来,许多学者利用地物光谱仪对高寒植被特征波段筛选识别开展了多方面的研究,如李海东等<sup>[11]</sup>对西藏高寒河谷地区优势种的光谱特征分析,得到不同植物在红边位置、红边形状、红谷和纤维素吸收波段的特征差异明显<sup>[12]</sup>;胡远宁等<sup>[12]</sup>对甘南的五种毒杂草 GREF 变换,利用“红谷”、“绿峰”、“红边”、水分吸收、光谱指数和光谱重排等指标,较好地将 5 种毒杂草区分开来<sup>[13]</sup>。

本研究表明,在 $860\sim 1\ 075\text{ nm}$ ,六种灌木植物的光谱值大小依次为:金露梅 $>$ 甘肃瑞香 $>$ 高山柳 $>$ 头花杜鹃 $>$ 鲜黄小檗 $>$ 鬼见愁。但在 $1\ 600\sim 1\ 800$ 和 $1\ 950\sim 2\ 400\text{ nm}$ 波段,六种灌木植物的光谱值依次为:金露梅 $>$ 头花杜鹃 $>$ 甘肃瑞香、高山柳 $>$ 鲜黄小檗 $>$ 鬼见愁。可以利用 REF 和 ABS 的大小顺序对六种灌木植物进行区分,其相应波段的遥感影像也可用于这几种植物的识别。

将 REF 转换为 ABS 即将光谱数据之间的差异进行不同程度的缩放,可使有差异区域更加清晰。 $400\sim 550\text{ nm}$ 波段的 ABS 差值较大,依差值大小可以将这几种灌木植物排列,因此可以考虑利用 ABS 在此波段内的差异识别以上几种灌木植物。在 $550\sim 680\text{ nm}$ 波段内,除甘肃瑞香 ABS 增幅仅为 0.8 以外,其余五种灌木植物的 ABS 增幅都在 2 以上,因此这一波段可以有效地区分出甘肃瑞香。

REF 和 ABS 的一阶微分是反映植物在某段波长区间内的 REF 和 ABS 变化情况,能够较好地反映和解释 REF 和 ABS 的增减幅度。不同灌木植物经 GREF 变换差异非常明显的波段有 $490\sim 750$ , $920\sim 1\ 005$ , $1\ 100\sim 1\ 204$ , $1\ 300\sim 1\ 450$ 和 $1\ 840\sim 1\ 920\text{ nm}$ 这 5 个波段。经 GABS 变换有 $450\sim 780$ , $1\ 100\sim 1\ 450$ 和 $1\ 850\sim 1\ 950\text{ nm}$ 范围内的差异比较明显,因此,可以选择这 3 个波段的组合作为灌木植物

在对应变换下的别敏感区。

### 2.4 NDVI'值和 RVI'值的改进

牛亚龙等对不同生长时期的五种沙生植被原始光谱数据进行 NDVI' 计算分析,得到不同生长时期的“红边参数”、“吸收”参数和时序 NDVI' 数据,其识别植被的效果明显好于其他参数<sup>[13]</sup>。张波等对荒漠—绿洲交错地带典型植被光谱特征研究发现,植物光谱经过 GREF 变换,红边特征差异增大,进行 REF, ABS 和 GREF 三种变换后的光谱数据进行类似 NDVI' 值计算,得到 ABS 变换后计算的 NDVI' 值差别最大,用于草地植物种类区分效果明显<sup>[14]</sup>。王佳鹏等对互花米草(*Spartina alterniflora* Loisel)叶片叶绿素含量进行了反演研究,发现利用高 REF 的 RVI' 和 NDVI' 构建的模型精度高<sup>[15]</sup>。

本研究通过波段组合计算的各种改进后 NDVI' 值或者 RVI' 值差异之间的比较,明显看出使用 REF 变换的 $575\text{ nm}$ 波段组合效果非常好,优于对照 TM 波段计算的 NDVI' 和 RVI'; 经 GABS 变换下的 $685\sim 765$ , $556\sim 590$ , $635\sim 671$ , $1\ 117\sim 1\ 164\text{ nm}$ 的四个波段组合计算的灌丛改进型指数差值最大。因此利用 REF 和 GABS 变换后的光谱数据计算改进后的 NDVI' 值和 RVI' 值来区分六种灌木植物具有比较明显的效果,这种方法明显优于传统的 NDVI' 和 RVI' 计算和经 ABS、GREF 变换下计算的 NDVI' 和 RVI'。

## 3 结 论

通过对研究区灌木植物分布特征、典型灌木植物及其光谱数据的变换处理和分析,各种灌木植物都具有独特的光谱特征,分析得到如下结论:

(1) 灌木植物对太阳辐射吸收形成的光谱特征曲线与多数植物相似。在可见光波段( $400\sim 700\text{ nm}$ )和短波红外光 2 波段( $1\ 900\sim 2\ 500\text{ nm}$ )以吸收为主,近红外( $700\sim 1\ 300\text{ nm}$ )和短波红外 1 波段( $1\ 300\sim 1\ 900\text{ nm}$ )以反射为主。

(2) 灌木植物对不同波段的光谱吸收程度不同,就会形成许多波峰或波谷,其中在吸收较强的光所在的波段形成波谷,吸收弱或者不吸收的波段形成波峰。但是灌木植物的第一个吸收谷出现在 $400\text{ nm}$ 左右,比草本植物左移 $50\text{ nm}$ 。

(3) 灌木植物在某些敏感波段中反映出独有的光谱特征,通过 REF, ABS, GREF 和 GABS 变换,可以将这些特征进一步扩大。利用这一特点可以寻找和筛选敏感波段,作为遥感影像提取波段用于灌木植物分类和识别。六种灌木植物光谱值差异较大,且数值相对较为稳定的波段有 $550\sim 680$ , $860\sim 1\ 075$ , $1\ 375\sim 1\ 600$ 和 $1\ 900\sim 2\ 400\text{ nm}$ ,因此可选取这 4 个波段为敏感区进行植物识别。

(4) 利用 $575\sim 673$ , $874\sim 920\text{ nm}$ 波段的反射率(REF)均值或 $685\sim 765$ , $556\sim 590$ , $635\sim 671$ 和 $1\ 117\sim 1\ 164\text{ nm}$ 波段的吸收率一阶微分(GABS)面积计算的 NDVI 值和 RVI 值的方法可以有效辨别六种灌木植物。

## References

- [1] Chinese Vegetation Commission(中国植被委员会). Vegetation in China(中国植被). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1980. 430.
- [2] ZHANG De-gang, HU Zi-zhi(张德罡, 胡自治). Acta Prataculturae Sinica(草业学报), 2003, (3): 28.
- [3] WEI Huai-dong, CHEN Fang, ZHANG Bo, et al(魏怀东, 陈芳, 张勃, 等). Pratacultural Science(草业科学), 2018, 35(3): 590.
- [4] HAO Fang-fang, CHEN Yan-mei, GAO Ji-xi, et al(郝芳芳, 陈艳梅, 高吉喜, 等). Journal of Ecology and Rural Environment(生态与农村环境学报), 2016, 32(6): 1024.
- [5] ZHANG Jian(张健). 内蒙古大学, 2016.
- [6] QIAO Yu(乔雨). 兰州大学, 2017.
- [7] AN Ru, JIANG Dan-ping, LI Xiao-xue, et al(安如, 姜丹萍, 李晓雪, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2014, 29(2): 202.
- [8] FAN Yun-bao, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, et al(范云豹, 赵文吉, 宫兆宁, 等). Wetland Science(湿地科学), 2016, 14(5): 654.
- [9] Croft H, Chen J M, Zhang Y. Ecological Complexity, 2014, 17(1): 119.
- [10] Hayashi H, Higashino T, Kinjo Y, et al. AcsAppl Mater Interfaces, 2015, 7(33): 18689.
- [11] LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, LIU Bo, et al(李海东, 沈渭寿, 刘波, 等). Journal of Ecology and Rural Environment(生态与农村环境学报), 2014, 30(4): 521.
- [12] HU Yuan-ning, CUI Xia, MENG Bao-ping, et al(胡远宁, 崔霞, 孟宝平, 等). Pratacultural Science(草业科学), 2015, 32(2): 160.
- [13] NIU Ya-long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, et al(牛亚龙, 刘廷玺, 段利民, 等). Journal of Ecology and Rural Environment(生态与农村环境学报), 2017, 33(7): 632.
- [14] ZHANG Bo, NIU Ting, FANG Shi-feng, et al(张波, 牛婷, 房世峰, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(4): 1104.
- [15] WANG Jian-peng, SHI Run-he, ZHANG Chao, et al(王佳鹏, 施润和, 张超, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2017, 32(6): 1056.

## Spectral Characteristics Analysis on Six Shrubs in Different Alpine Brushlands of Eastern Qilian Mountains

WANG Bo<sup>1,2</sup>, LIU Xiao-ni<sup>1,2\*</sup>, WANG Hong-wei<sup>3</sup>, WANG Cai-ling<sup>4</sup>, ZHANG De-gang<sup>1,2</sup>, JI Tong<sup>1,2</sup>

1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Lanzhou 730070, China

3. Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China

4. School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China

**Abstract** As an very important part of the Qinghai-Tibet Plateau ecosystem, it is of great significance to study alpine shrubs. But for a long time, due to the remote location and underdeveloped transportation, as well as the harsh growing conditions, the alpine shrub on the Qinghai-Tibet Plateau has been less studied. Remote sensing detection technology can overcome the difficulties caused by geography and environment and can be used to detect large areas and non-destructive. Therefore, remote sensing detection technology can be used to study alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau. As the traditional high-resolution remote sensing detection technology is often adopted with three bands of RGB, the discrimination accuracy of different plants is low, and the difference of NDVI' index and RVI' index of corresponding plants is small, which cannot effectively distinguish various types of vegetation. At the same time, hyperspectral reflectance curve and irradiance curve contain spectral information of thousands of bands. If a single band is selected for plants detection, the loss of spectral information is very large, and the characteristics of thickets reflected are not obvious, resulting in low confidence. In order to distinguish the alpine shrub vegetation, this paper uses hyperspectral technology to carry out spectral characteristic analysis of the shrub, providing theoretical support for remote sensing detection of the shrub on the Qinghai-Tibet Plateau. The research draws support from FieldSpec4 high resolution spectrometer of the America. It was used to identify 6 shrubs (*Rhododendron capitatum*, *Caragana jubata*, *Potentilla fruticosa*, *Salix cupularis*, *Daphne tangutica* and *Berberis diaphana*) grown in the eastern Qilian Mountains through measuring the reflectance

rate and absorption rate, calculating the first order differential of absorption rate (GREF and GABS) to enlarge the resolution of spectral curve, screening the sensitive wavelength, and then identifying different shrubs by calculating their values with NDVI and RVI. The result indicated that (1) the absorption spectral curves of shrubs were similar with most plants, but their first absorption valley shifted to left; (2) the shrubs performed unique spectral features in some sensitive wavelengths, and these features could be used to improve the resolution by REF, ABS, GREF and GABS transformation to identify the shrublands; (3) The spectral values of the 6 shrubs are different, and the relatively stable wavelengths are 550~680, 860~1 075, 1 375~1 600 and 1 900~2 400 nm. Therefore, these 4 wavelengths can be selected as sensitive areas to identify shrub plants; (4) NDVI and RVI calculated with the REF average value of sensitive wavelengths of 575~673 and 874~920 nm and/or the area value of sensitive wavelengths of 685~765, 556~590, 635~671 and 1 117~1 164 nm could effectively identify 6 shrubs.

**Keywords** Eastern Qilian Mountains; Alpine brushlands; Shrubs; Spectral features; Analysis

(Received May 31, 2018; accepted Oct. 13, 2018)

\* Corresponding author