

祁连山金强河河谷区域高寒灌丛群落海拔梯度影响特征与光谱变化

王 波¹, 柳小妮¹, 王洪伟², 王彩玲³, 纪 童^{1,2}, 孙守江¹

(1. 甘肃农业大学 草业学院/草业生态系统教育部重点实验室/甘肃省草业工程实验室/中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070; 2. 中国人民武装警察部队工程大学, 陕西 西安 710086; 3. 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部分,研究高寒灌丛对青藏高原生态系统的研究具有重要意义。光谱遥感技术作为近年来发展迅速的遥感探测技术,可以实现高空间分辨率和高光谱分辨率的地物大面积无损探测。研究高寒灌丛的光谱变换特性有助于光谱遥感技术在青藏高原生态系统研究中的应用。选取青藏高原祁连山东段的甘肃省天祝县金强河河谷区域,根据海拔高度的变化,从2 900 m到3 600 m的阴坡,每100 m设置一个样地,采集每块样地的光谱数据。对采集的光谱数据进行平滑降噪处理后,通过反射率(REF)、吸收率(ABS)及反射率和吸收率的一阶导数(GREF和GABS)变换,分析了灌丛群落和光谱特征随海拔梯度的变化规律。主要结论如下:1)群落多样性的空间格局中,物种多样性随海拔梯度的变化极显著,光谱REF与 α 多样性随海拔升高均呈现倒“V”字形变化。 α 多样性最高的海拔梯度与群落光谱REF最大的值均集中在中间海拔区域(3300~3400 m);2)灌丛含水率随海拔梯度的变化呈“N”字形,即灌丛含水率与群落光谱REF随海拔梯度的增加先升高后下降再升高;3)群落高度、生物量和茎叶比对灌丛群落光谱特征的影响较明显。阴坡灌丛群落光谱REF与生物量、茎叶比随海拔梯度的增加呈反“N”形变化;4)千里香杜鹃和头花杜鹃灌丛在整个灌丛群落中占有关键地位,其群落特征的变化对灌丛光谱特征的影响明显。

关键词:东祁连山;高寒灌丛;海拔梯度;群落特征;光谱特征

中图分类号:P237 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2020)01-0017-11

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2020.01.003

高寒灌丛是由耐寒的中生或旱生灌木为优势种而构成的一类植被^[1]。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、西南地区和外陆流域的重要

水源涵养林之一^[2]。长期以来,由于青藏高原高寒地区自然条件严酷,交通不便,对青藏高原高寒灌丛的相关研究较少,研究大多集中在不同生长发育期灌丛形态特征和生理生化变化规律,变化机理、确定灌丛植物最佳利用时期等方面^[3]。

遥感探测技术,可以克服地理位置及环境因素造成的困难,进行大面积和无损的探测。地物光谱是现代遥感技术的关键组成部分^[4]。它不仅是遥感理论研究的重要内容,也是遥感应应用研究的重要依据,已经在许多方面开展研究^[5],如利用高光谱进行植物光谱识别、植物含水量^[6-7]、土壤有机质^[8]、生物量^[9]等的估算和反演研究,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。

因此,以东祁连山高寒灌丛群落为研究对象,在灌

收稿日期:2019-05-09; **修回日期:**2019-05-20

基金项目:国家自然科学基金(31160475,41301382,61401439,41604113,41711530128);“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-),男,宁夏盐池人,在读硕士。

E-mail:wangbonxyc@163.com

柳小妮为通讯作者。

E-mail:Liuxn@gsau.edu.cn

丛生旺盛期,通过不同海拔梯度灌丛群落分布和形态特征的实地调查,灌丛野外和室内光谱数据的采集,分析不同海拔梯度灌丛群落光谱的特征曲线和其形态、群落之间的相关性,探讨高寒灌丛群落光谱特征随海拔梯度的变化关系,以期为实现青藏高原高寒灌丛植物和群落的遥感分类和动态监测提供理论依据。

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

研究区位于祁连山东段的甘肃省天祝县金强河河谷区域(N 37°11′5.544″,E 102°46′28.371″),属青藏高原植物亚区。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%。年均降水量在 375~480 mm,地形雨较多,主要集中在 7、8 和 9 月。年平均气温-0.9℃,1 月最低温度-18.3℃,7 月最高温度 19.6℃,年日照时数 2 600 h,>0℃年积温 1 410℃。水热同期,早晚温差大,不存在绝对无霜期。此地仅分为冷季和暖季,冷季达 7 个月之久,植物生长期约为 140 d^[10]。

灌木植物有 12 科 16 属 30 余种,构成了以金露梅(*Potentilla fruticosa*)、绣线菊(*Spiraea chinensis*)、杜鹃属(*Rhododendron*)、柳属(*Salix*)为主的大面积高寒落叶灌丛和高寒常绿灌丛^[11]。

1.2 研究方法

1.2.1 样带设置 为全面观测研究区内高寒灌丛群落光谱特征随海拔梯度的变化规律,沿金强河流域设置了一个宽 10 km、长 30 km 的样带,样带内海拔从 2 900 m 的河谷地带延伸至海拔 3 800 m 高山地带。依据海拔设置 8 个梯度(2 900、3 000、3 100、3 200、3 300、3 400、3 500、3 600 m)的等高样线。

1.2.2 实地调查 2017 年 7 月 11 日至 8 月 3 日,在每个样地设置 3~5 个重复,分种调查灌丛群落的多度、盖度、高度、鲜生物量等指标,同时采集群落野外光谱数据。

采用标准株法分种取每株灌木的老叶、新叶、老茎、新茎及花的混合样装入自封袋,并存于 0~4℃的恒温箱中带回实验室,测定混合样室内光谱。每种灌木随机取 500 g 鲜样带回实验室,立即剪碎装入布袋,置于干燥箱内在 65℃下烘干后称重,并记录干重(B)、

含水率(MC)、干鲜比(DR)和茎叶比(SLR)。

1.2.3 光谱数据采集 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 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 的波长,光谱分辨率波长精度为 3 nm,1 000~2 500 nm 波长为 10 nm。采样间隔分别为 1.4 nm 和 2.0 nm,数据输出时重采样间隔为 1 nm。

确保天空晴朗无云、无风或者风力小于 3 级,每日 9:30 至 14:30 进行。先将设备连接野外采集枪头预热 10~15 min,并进行白板标定,测量时测量人员面向太阳站在灌丛正后方,枪头垂直地面且确保距离灌丛冠层 50 cm,对样方内的每一种灌丛进行光谱采集,每株灌丛采集 10 次光谱数据。在测量时,每间隔 10~15 min 必须重新进行一次白板标定。

室内光谱采集光源为叶片夹自带光源,主要测定各个海拔梯度下的优势灌丛植物。采集光谱时先给仪器接通外接电源,连接叶片夹,并打开自带光源。打开数据采集器待数据输出稳定后,预热 40 min,进行白板标准校正。之后从自封袋内取出植物样本进行混合,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。

1.3 数据处理

1.3.1 多样性指数 采用 Shannon-Wiener 多样性指数、丰富度指数、均匀度指数和 Morista-Horn 指数对灌丛群落的 α 和 β 多样性指数进行测定,多度指标选用植物个体数^[12]。

用于测度群落物种多样性的计算公式

1) α 多样性

Shannon-Wiener 多样性指数 H' :

$$H' = -\sum P_i \log P_i \quad (1)$$

P_i 是一个个体属于第 i 类物种的概率。

$$\text{丰富度指数 } Q: Q = \frac{S}{\log N} \quad (2)$$

S 为样地中物种的总数, N 为样地中个体总数。

$$\text{均匀度指数 } J: J = \frac{H'}{\log S} \quad (3)$$

2) β 多样性

Morista-Horn 指数 C_{MH} :

$$C_{MH} = \frac{2\sum (an_i - bn_i)}{(da + db)aN - bN} \tag{4}$$

aN 为样地 A 的物种数目, bN 为样地 B 的物种数目, an_i 和 bn_i 为样地 A 和 B 中第 i 种的个体数目。

1.3.2 光谱数据处理 从数据采集器导出光谱数据后,使用自带的 View SpecPro 软件对光谱进行预处理,将每一海拔梯度灌丛群落和每一种灌木植物的光谱数据中差异较大的或者噪声影响较大的光谱反射率(REF)曲线剔除后,剩余光谱采取公式(5)平滑降噪处理后,计算得到灌丛的原始 REF。

REF 经过公式(6)变换得到吸收率(ABS),经过公式(7)变换得到反射率一阶微分(GREF),ABS 经过公式(8)变换得到吸收率的一阶微分(GABS)。

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

$$GREF(\lambda) = [R(\lambda_{x-1}) - R(\lambda_x)] / [\lambda_{x+1} - \lambda_x] \tag{6}$$

$$ABS(\lambda) = \lg[1/REF(\lambda)] \tag{7}$$

$$GABS(\lambda) = [ABS(\lambda_{x-1}) - ABS(\lambda_x)] / [\lambda_{x+1} - \lambda_x] \tag{8}$$

式中, R 为原始 REF, λ 为波长,单位是 nm。

对比分析获取的 REF、ABS、GREF、GABS 数据,结合不同海拔梯度的群落结构、形态特征,寻找敏感特征波段分析海拔梯度下光谱变化规律。

1.3.3 数据统计与分析 采用 Excel 2016 进行数据统计,灌丛光谱曲线变换和绘制采用 View Specpro 软件,相关性分析采用 R 语言进行。

2 结果与分析

2.1 不同海拔梯度下高寒灌丛群落特征

2.1.1 群落组成与分布 海拔 2 900~3 600 m,灌丛

群落垂直分布差异性明显,依据植被特征可分为以下 4 个海拔区段:

海拔 3 000 m 以下区域,有农牧民居住,以人工饲草地和冬季草场为主,并建有大量围栏保护。该区段内空气湿度小,风大,不适合杜鹃类灌丛生长,在部分较湿润小环境区域内生长少量金露梅—高山绣线菊灌丛。该海拔梯度内受人为因素和高原鼠害影响,原生植被大部分被破坏。

海拔 3 000~3 200 m 区域,地形特征主要以沟谷为主,河漫滩主要以柳灌丛为主。沟谷近河口的灌丛植被差异明显,除阶地有少量金露梅灌丛分布外,大多为千里香杜鹃(*R. thymifolium*)和头花杜鹃(*R. capitatum*),并生活着大量甘肃瑞香(*Daphne tangutica*)。随海拔高度上升,植被水热条件越来越相似直至一致,植被之间的差异趋于相似,并以千里香杜鹃和头花杜鹃灌丛成为这个海拔区段中的绝对优势类型(表 1)。

千里香杜鹃和头花杜鹃在海拔 3 000 m 梯度时出现,随海拔梯度的增加,其盖度和密度也在增加,在海拔 3 200 m 左右时最大,分别为 22%和 27%。然后其盖度和密度随海拔梯度的增加逐渐下降。仅次于千里香杜鹃和头花杜鹃的优势种是柳,其高度接近以上两种杜鹃,以较大的盖度与杜鹃相伴而生。也有一定比例的鬼箭锦鸡儿与金露梅生长在灌丛间隙,植株相对矮小。高山绣线菊、红花忍冬和甘肃瑞香等也有零星分布。

海拔 3 300~3 600 m 区域,主要包括代乾、红疙瘩村部分及马牙雪山的大阴坡。千里香杜鹃和头花杜鹃逐渐减少,甘肃瑞香和青海杜鹃(*R. qinghaiense*)的盖度和密度逐渐增大,成为优势种。

海拔 3 600m以上区域,几乎没有千里香杜鹃和头

表 1 不同海拔梯度灌丛群落的密度和盖度

Table 1 Density and coverage of shrub communities at altitude gradient

海拔/m	千里香杜鹃		头花杜鹃		甘肃瑞香		青海杜鹃	
	密度 /(株·m ⁻²)	盖度/%	密度 /(株·m ⁻²)	盖度/%	密度 /(株·m ⁻²)	盖度/%	密度 /(株·m ⁻²)	盖度/%
3 000	0.27	12.3	0.24	14.7	/	/	/	/
3 100	0.232	14.7	0.348	23.8	/	/	/	/
3 200	0.22	22.78	0.328	26.38	0.05	6.2	0.014	4.3
3 300	0.213	13.3	0.247	15.3	0.129	9.29	0.095	18.6
3 400	0.217	12.5	0.123	8.26	0.207	14.5	0.189	25.8
3 500	0.212	9.7	0.146	6.6	0.124	9.1	0.177	21.6
3 600	/	/	/	/	0.17	9.61	0.38	46

花杜鹃的分布。高海拔、低温、高寒高湿的气候环境造成金露梅及其他温性灌木在这一区域也未见分布,因此,该梯度内灌木成分较为单一。该梯度内主要分布柳灌丛,与青海杜鹃相伴而生,少量分布的鬼箭锦鸡儿因受牛羊的干扰程度较小,所以其植株较高。这一区域内灌木层盖度较大,因此灌木丛下阴暗潮湿的环境中生长着发育良好的苔藓植物,形成了 15~25 cm 的地被层,盖度在 80%以上(表 1)。

表 2 不同海拔梯度高寒灌丛群落的 α 多样性
Table 2 α diversity of shrub communities at altitude gradient

指标	海拔/m						
	3 000	3 100	3 200	3 300	3 400	3 500	3 600
H'	2.257 ^{ab}	2.305 ^{ab}	2.38 ^a	2.537 ^a	2.485 ^a	2.308 ^{ab}	2.109 ^b
Q	2.789 ^{bc}	3.078 ^b	3.314 ^{ab}	3.672 ^a	3.087 ^b	2.590 ^c	2.200 ^d
J	0.741 ^a	0.725 ^a	0.731 ^a	0.761 ^a	0.793 ^a	0.784 ^a	0.671 ^{ab}

注:同行不同小写字母表示海拔梯度下灌丛群落 α 多样性差异显著($P<0.05$)

不同海拔梯度灌丛群落的 β 多样性指数测度结果表明,随着海拔梯度的增加, C_{MHI} 值逐渐降低,说明群落间的异质性增加。以海拔最低的区域(3 000 m)与海拔最高的区域(3 600 m)群落之间异质性程度最高;而处于低海拔地段的两个相邻群落之间(3 100 m 和 3 200 m)的异质程度最小。比较处于最低海拔群落

2.1.2 生物多样性 随海拔梯度的增加,群落的 Shannon-Wiener 指数(H')、丰富度(Q)都呈现先增加后降低的趋势,在海拔 3 300 m 附近最高。 Q 与 H' 随海拔的变化趋势相似,在 3 000~3 300 m,随海拔梯度的上升而上升,3 300 m 最大,之后随着海拔的升高而减小,3 600 m 降至最低,但 Q 随海拔梯度的变化程度明显大于 H' 。不同海拔梯度下,灌丛群落的 J 变化差异非常小,在 0.05 水平上不显著(表 2)。

(3 100 m)与其他群落间的 C_{MHI} 值后可以发现,其相互间的异质程度随海拔的升高而加大(表 3)。

2.1.3 群落特征 在 3 000 m 以下的低海拔梯度和 3 400 m 以上的高海拔梯度内,不同灌丛植物高度均在 0.6 m 以下。中海拔梯度(3 100~3 300 m)下,各种灌丛植物的高度均在 0.85 m 上下浮动(图 1)。

表 3 不同海拔梯度灌丛群落的 β 多样性(C_{MHI})
Table 3 β diversity shrub communities at altitude gradient

海拔/m	3 000	3 100	3 200	3 300	3 400	3 500	3 600
3 000	1						
3 100	0.934 1	1					
3 200	0.921 8	0.983 5	1				
3 300	0.840 2	0.872 2	0.916 8	1			
3 400	0.791 9	0.841 9	0.866 6	0.939 5	1		
3 500	0.778 6	0.845 3	0.872 7	0.905	0.967 7	1	
3 600	0.708 9	0.829 4	0.840 2	0.823 3	0.917 2	0.969 5	1

阴坡金露梅灌丛的生物量在不同海拔梯度上差异较小,均在 3.3 kg/m²左右。随着海拔梯度的升高,头花杜鹃和千里香杜鹃的生物量显著增加,在 3 100 m 时头花杜鹃的生物量达到 6.37 kg/m²,而后降低但始终维持在 4 kg/m²上下,在 3 600 m 梯度下降至 3.44 kg/m²(图 2)。千里香杜鹃在 3 100 m 海拔出现,其生

物量随海拔梯度的升高先上升后下降,3 600 m 左右最小,仅 3.42 kg/m²。甘肃瑞香在海拔 3 300 m 梯度内出现,生物量随海拔梯度的增加而升高,在 3 500 m 附近下降,至 3 600 m 梯度生物量减少了 1 kg 左右。青海杜鹃在海拔 3 500 m 左右才开始出现,但是在高海拔范围内占有绝对优势。

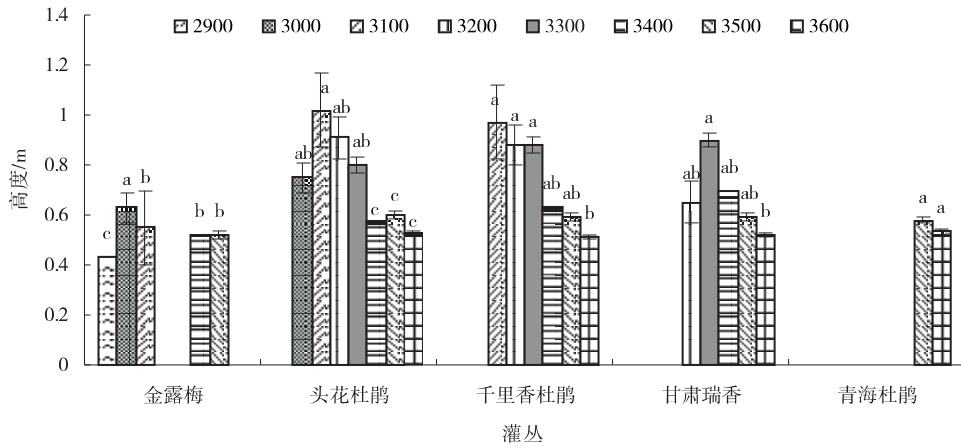


图 1 阴坡灌丛高度随海拔梯度的变化

Fig. 1 Height of shrubs on shady slope at altitude gradient

注:不同小写字母表示海拔梯度下不同灌丛差异显著($P < 0.05$),下同

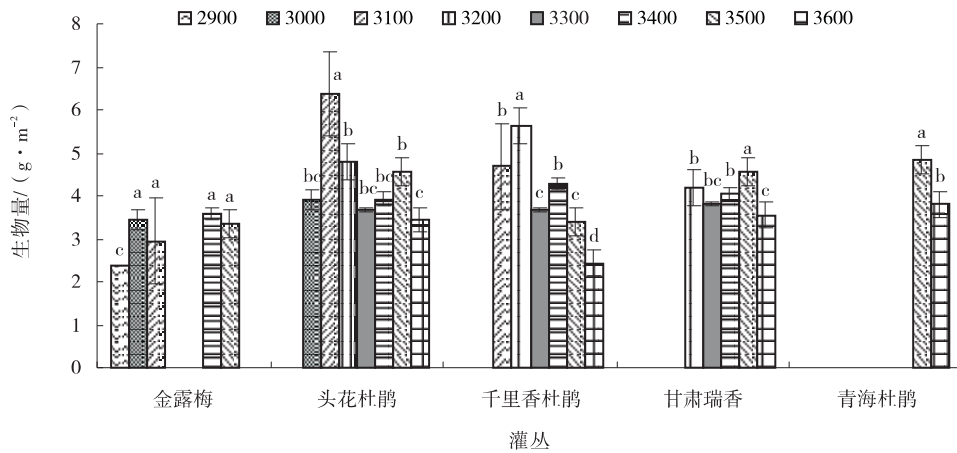


图 2 阴坡灌丛生物量随海拔梯度的变化

Fig. 2 Biomass of shrubs on shady slope at altitude gradient

不同灌丛植物种间的含水率差别非常小(图 3)。

右),不随海拔梯度变化。

在低海拔(2 900~3 000 m)梯度内,金露梅的含水率一直较低,保持在 0.3 上下。但是在其他海拔梯度下灌丛植物含水率均保持在相对较高的水平(0.6 左

茎叶比随着海拔梯度的升高呈现先上升后下降变化规律(图 4),且不同灌丛植物茎叶比差异较大。千里香杜鹃和头花杜鹃的茎叶比在整个阴坡茎叶比中占

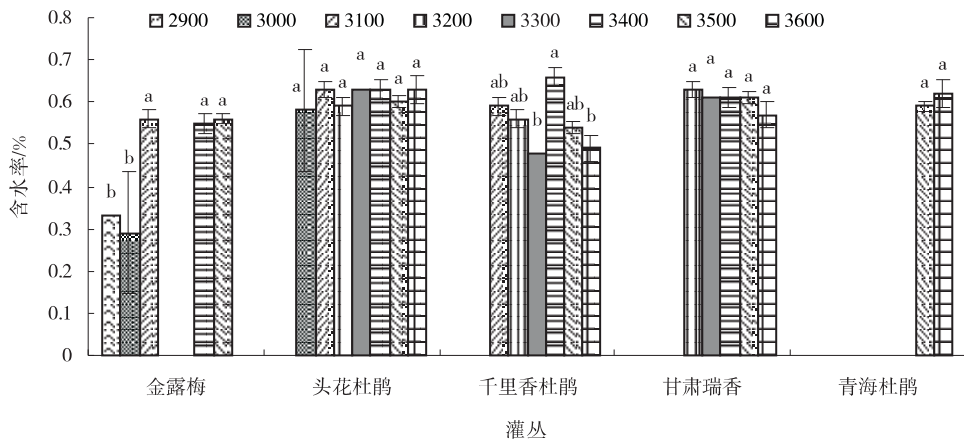


图 3 阴坡灌丛含水率随海拔梯度的变化

Fig. 3 Water content of shrubs on shady slope at altitude gradient

比最大,达 50%以上。金露梅灌丛的茎叶比随着海拔梯度的上升而增大,至 3 400 m 达到最大值,之后迅速降低。甘肃瑞香在海拔 3 200 m 开始出现,茎叶比在 3 200 m 最大,可达 7.54,而后一直下降。青海杜鹃在 3 500 m 以后出现,茎叶比值并不高。

灌丛群落干鲜比在不同海拔梯度的差异也较小,无论是不同海拔梯度灌丛还是不同灌丛植物,干鲜比变化差异均在 0.4 上下浮动,变化差异性不显著($P \geq 0.05$)(图 5)。

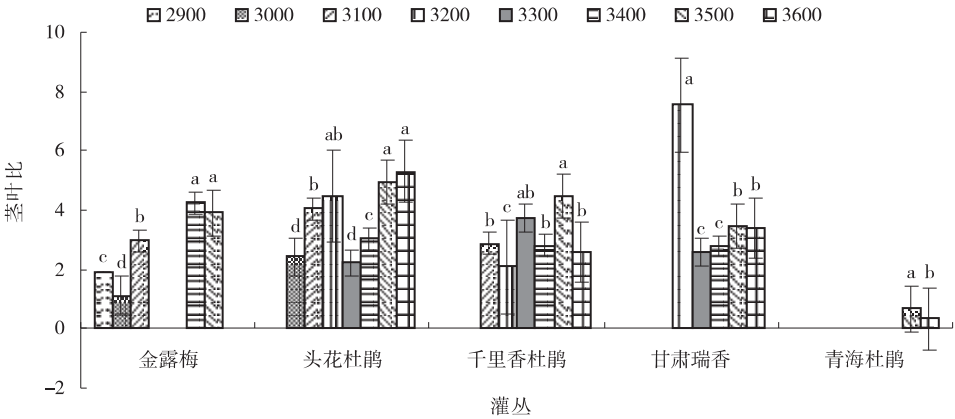


图 4 阴坡灌丛茎叶比随海拔梯度的变化

Fig. 4 Stem to leaf ratio of shrubs on shady slope at altitude gradient

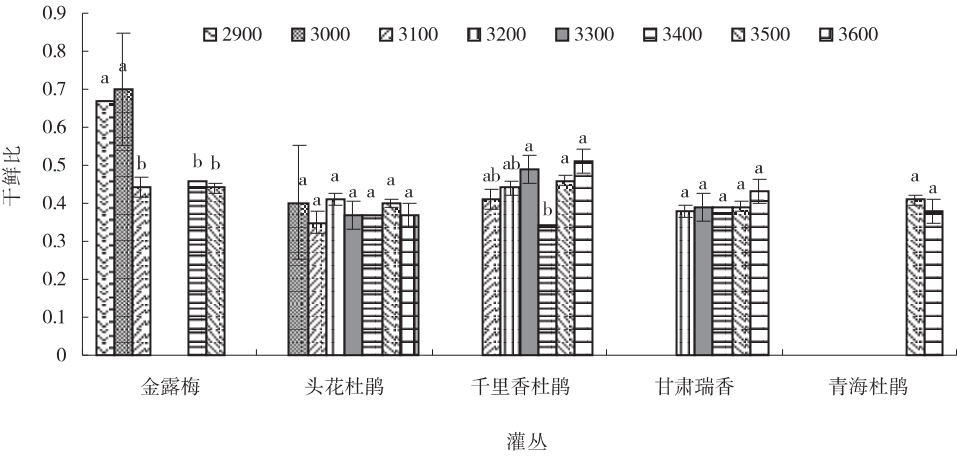


图 5 阴坡灌丛干鲜比随海拔梯度的变化

Fig. 5 Changes of DR of shady shrubs at altitude gradient

2.2 群落光谱特征

阴坡不同海拔梯度灌丛的光谱 REF 曲线变化趋势与阳坡相似,但数值较阳坡小很多,且不同海拔梯度 REF 值的变化差异不明显(图 6)。

在可见光波段(350~760 nm),可明显地看出 3 400 m 梯度的 REF 最高。在 350~410 nm,3 200 m 梯度的 REF 最低(0.062),只是在这一波段内其他海拔梯度 REF 变化没有明显规律,互有交汇。但在 410~780 nm,REF 最小的海拔梯度是 2 900 m。

近红外波段(780~1 500 nm),不同海拔梯度灌丛的光谱曲线差异比较大。其中光谱 REF 由大到小的排列顺序发生了变化,海拔 3 400 m 处的 REF 仍最高

(0.66),但 3 200 m 梯度的 REF 降为最小(0.50)。光谱 REF 随海拔梯度的变化无相似性,在 2 900~3 000 m 梯度,REF 随海拔的升高而升高,3 000~3 200 m 梯度,光谱 REF 随海拔的上升而降低。3 200 m 梯度以后 REF 迅速上升,至 3 400 m 出现最大值,之后下降至 3 500 m 而后到 3 600 m REF 出现略微上升,无明显规律可循。

1 500~1 900 nm 和 2 100~2 500 nm 波段,3 000 m 海拔梯度时的 REF 最大,3 500 m 梯度下的 REF 最小,但是这一波段内其他海拔梯度光谱特征变化并不明显。

1 901~2 099 nm 波段,各个海拔梯度灌丛的光谱

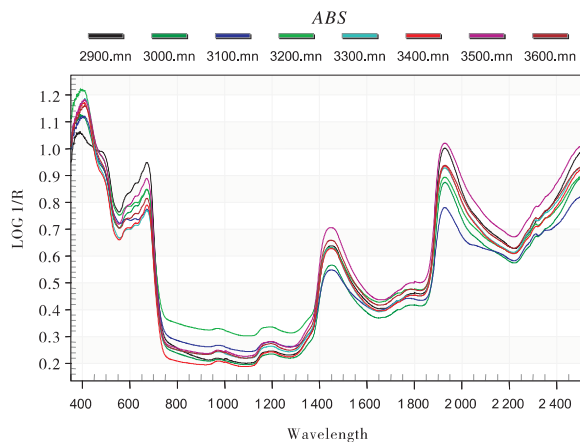
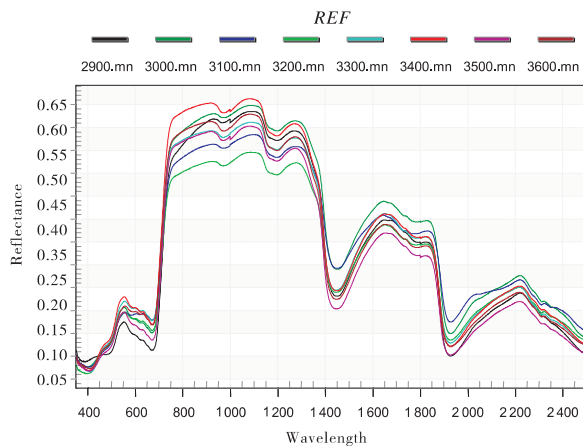


图 6 不同海拔梯度下阴坡灌丛群落光谱特征

Fig. 6 Spectral characteristics of shrub communities on shady slopes at altitude gradient

差异明显:2 900~3 100 m 海拔,光谱 REF 随海拔梯度的上升而增大且在 3 100 m 处最大;3 100~3500 nm,光谱 REF 随海拔梯度的升高而降低,3 500 m 以后则随着海拔梯度的升高而减小。

吸收率 ABS 的表现与 REF 相反。

2.3 不同海拔梯度同一灌丛群落光谱特征

不同海拔梯度下同种灌丛的光谱 REF 和 ABS 差异非常大。

3 200 m 和 3 400 m 的海拔梯度,千里香杜鹃的 REF 和 ABS 近乎一致,没有明显差异,3 100、3 300、3 500 m 和 3 600 m 海拔梯度下的 REF 和 ABS 差异

较大(图 7)。

在可见光波段(350~760 nm),3 200 m 和 3 400 m 千里香杜鹃灌丛的 REF 最高(0.235)。最小值存在的海拔高度在整个波段内多次出现变化和交替,350~550 nm 波段,REF 较为集中,而且噪声较大,不易区分,故这一波段不予考虑。550~760 nm 波段,REF 最小的海拔梯度较为清晰的显现,海拔 3 300 m,值为 0.146。在 760~1 500 nm 波段,也可明显辨别,海拔 3 200 m 和 3 400 m 梯度的 REF 依旧最大,最大值为 0.64,而 REF 最小的海拔又变成了 3 100 m,值为 0.53 (图 7)。

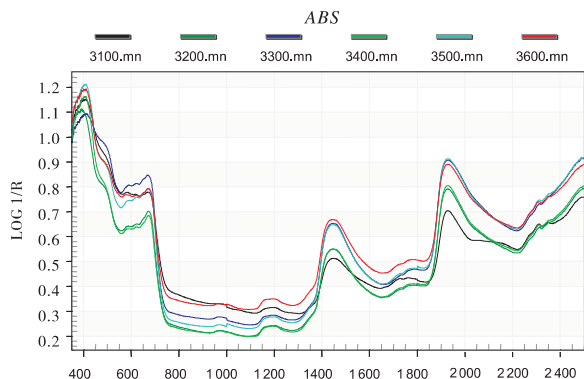
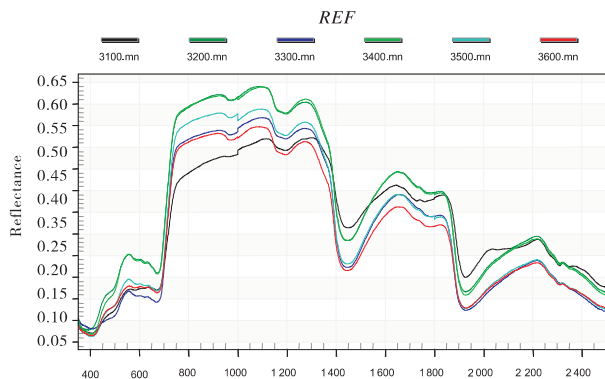


图 7 不同海拔梯度下千里香杜鹃灌丛光谱特征

Fig. 7 Spectral characteristics of *Thymus australis* community at altitude gradient

头花杜鹃灌丛在不同海拔梯度下的光谱 REF 值和 ABS 值差异非常大,在 550~760 nm 波段,海拔 3 400 m 的 REF 最大,值为 0.249,3 500 m 的 REF 最小,值为 0.124。在红边波段内,3 200 m 梯度下的光谱出现跃迁,成为最小(0.532)。在红光波段和近红外光波段内,3 000 m 梯度的光谱 REF 一直保持最大,为 0.709,但是 REF 最小的海拔梯度一直在变化(图 8)。

从全波段看,在 780~1 350 nm 波段,可以明显看出光谱随海拔梯度的变化规律:海拔 3 000~3 200 m, REF 随海拔的增高而减小,3 200 m 最小;而后从 3 200 开始增大,至 3 400 m 梯度 REF 达最大后,开始回降,至 3 600 m 最小。光谱的 ABS 在可见光波段,各个梯度的差异大于 REF,其他波段差异不明显(图 8)。

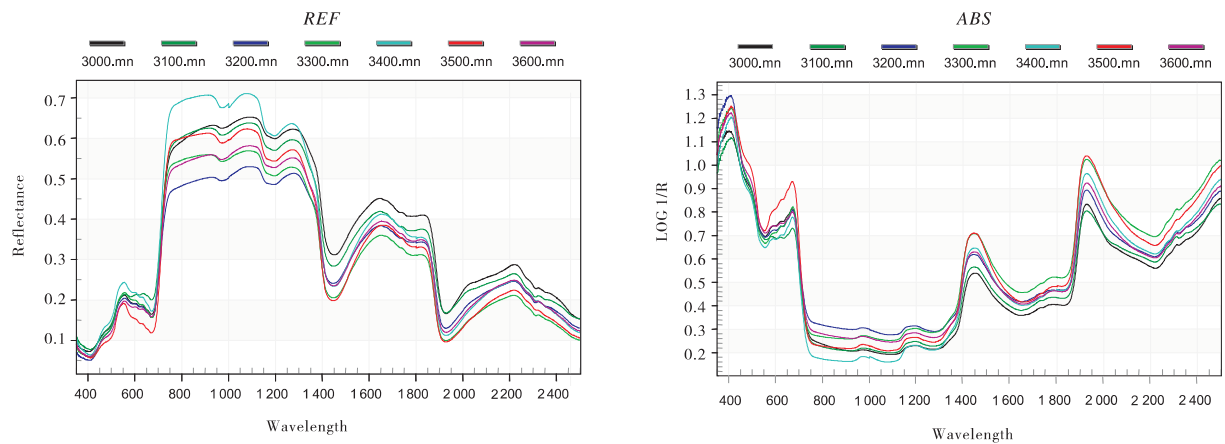


图 8 不同海拔梯度下头花杜鹃灌丛光谱特征

Fig. 8 Spectral characteristics of *Rhododendron capitatum* community at altitude gradient

3 讨论

海拔梯度差异包含了温度、湿度、光照和土壤条件等诸多环境因子的剧烈变化(如随着海拔的增加,环境条件愈来愈恶劣,尤其是低温胁迫等更加剧烈)^[16]。而温度,水分和土壤肥力等环境因子又极大地影响了植物的生长,进而导致植物生理生化特性和群落结构以及形态特征的变化。不同海拔上,灌丛群落特征差异必将导致种群的可塑性变化,从而影响种群的空间分布格局,因而海拔梯度的差异是研究灌丛群落格局变化的理想区域^[117]。

3.1 不同海拔梯度下灌丛的生物多样性

α 多样性主要受到群落类型,海拔和坡向的影响。高寒灌丛群落 α 多样性在不同群落类型间差异显著,并且随海拔升高,坡向从东到西, α 多样性增大^[18]。

不同灌丛植物所需水热资源在海拔梯度上的分布格局,由群落的多样性表现出来^[19]。尤其是在高海拔地区,低温对灌丛分布范围有着极大的影响,不同灌丛物种的抗寒性是影响灌丛多样性非常重要的因素。但群落除了受海拔影响外,同时还受其他因素的影响。中海拔地带是大多数物种的适宜生长区,也是中心分布,从中心外拓展,群落内的物种则因不能适应生态环境的变化而逐渐消失,最终导致多样性的下降。高寒灌丛群落的多样性和丰富度在中海拔梯度(3 200~3 400 m)也最高,这种多样性的变化趋势充分反映了高寒灌丛的生长适宜区分布格局。

高寒灌丛的 β 多样性随海拔的变化也增大,但变化不显著,不同群落间的种类组成较相似,如千里香杜

鹃和头花杜鹃在 3 600 m 海拔以下的区域都有分布。

3.2 群落特征

灌丛群落特征的变化与灌丛植物种类组成、植物形态结构有着明显的关系^[20]。灌丛高度随海拔梯度的变化非常明显,在 2 900~3 100 m,高度随海拔的升高迅速增高,并在 3 200 m 梯度下达到最大值。从 3 200 m 开始随海拔高度的上升缓慢下降。生物量随海拔梯度的变化趋势和高度一致,很有规律,随海拔梯度呈现先升高后降低,在 3 100~3 200 m 附近达到最大值,其他海拔梯度下灌丛生物量变化较小。除温度限制的高海拔区域,低海拔区域的高度、生物量都也偏低,这主要是人为因素和家畜采食造成的。

含水率在低海拔梯度附近也最低,主要是因为低海拔区域内人为活动与家畜采食频繁造成灌丛叶量非常少,大部分为老枝或者茎秆部分,本身含水率非常低,也导致灌丛茎叶比低、干鲜比非常高。茎叶比在整个海拔梯度内的变化幅度很大,从 2 900~3 200 m 随着海拔梯度的上升迅速上升,在 3 200 m 之后开始下降,在 3 300~3 500 m 变化较小,之后在 3 500 m 以后又迅速降低。灌丛干鲜比在低海拔梯度内随海拔梯度的升高而降低,2 900 m 梯度最大,3 200 m 梯度最小,接近中高海拔梯度后,略微上升,并保持相对稳定。

3.3 不同海拔梯度下灌丛群落光谱特征

不同海拔梯度灌丛的 REF 区别较明显的第 1 个波段为 450~760 nm,由大到小为 3 400,3 300,3 600,3 000,3 100,3 200,3 500,2 900 m。第 2 个波段为 760~1 150 nm,基本上是海拔 3 400 m 处的 REF 最高,3 200 m 海拔处较低。

植被对太阳辐射的吸收形成光谱曲线的波谷,反射形成波峰^[15]。水分通常在特定波段吸收太阳辐射,所以含水率高的植被特定波段的光谱 *REF* 较低。魏怀东等^[16]利用高光谱进行典型荒漠植物含水率与冠层光谱的关系研究,实地测定了 10 种典型荒漠植物的冠层光谱曲线,研究表明,冠层水分含量指数与植被水分实测值具有较高的一致性,可以反映荒漠植被含水率变化。

东祁连山阴坡气候阴湿寒冷,地上主要形成了灌木层和苔藓层。随海拔升高,湿度增加,尤其是 3 200 m 左右,含水率较高,相应地光谱反射率低。3 400 m 左右,含水率也高,但光谱反射率反而也高,主要是该海拔高度,以开白花的青海杜鹃灌丛占优势。

依据不同海拔梯度光谱在全波段内发生重排的现象,千里香杜鹃和头花杜鹃灌丛也在不同海拔梯度下的 *REF* 变化分为 3 个波段,但是 350~450 nm 波段噪声较大,不同海拔梯度 *REF* 发生了叠加,无法进行有效区分,故舍去。

千里香杜鹃在 450~760 nm 波段,不同海拔梯度灌丛的 *REF* 由大到小为 3 200,3 400,3 500,3 600,3 100,3 300。在 760~2 500 nm 波段不同海拔梯度灌丛的 *REF* 进行了重排,由大到小分别为 3 200,3 400,3 500,3 300,3 600,3 100 m。头花杜鹃在 450~690 nm 波段,不同海拔梯度灌丛的 *REF* 由大到小为 3 400,3 300,3 000,3 100,3 200,3 600,3 500 m。在 691~2 500 nm 波段由大到小分别为 3 400,3 000,3 100,3 500,3 600,3 300,3 200 m。

千里香杜鹃灌丛的光谱 *REF* 与含水率、高度、干鲜比、生物量、茎叶比都有着较高的相关性。生物量与群落光谱 *REF* 在整个海拔梯度内变化的规律一致,含水率和高度与群落光谱 *REF* 在中高海拔梯度(3 300~3 600 m)有着相似的变化趋势。干鲜比在高海拔(3 400~3 600 m)梯度内与灌丛光谱 *REF* 变化规律相近,但是趋势相反。茎叶比与灌丛群落光谱 *REF* 的 760~2 500 nm 波段的中高海拔(3 300~3 600 m)梯度内随海拔梯度的变化趋势一致。即千里香杜鹃灌丛的光谱 *REF* 与含水率、高度、干鲜比、生物量、茎叶比都有着较高的相关性。

头花杜鹃灌丛的 *REF* 与植被特征在不同海拔梯度下的变化规律很少一致,没有相关性。但分析发现,头花杜鹃灌丛群落光谱 *REF* 与阴坡灌丛群落光谱

REF 在不同海拔梯度下的变化规律相似,趋势一致。

由此可以反映出千里香杜鹃和头花杜鹃灌丛在整个灌丛群落中占有关键性的地位,其群落特征的变化对整个阴坡灌丛群落光谱特征的影响非常明显。

4 结论

选择青藏高原祁连山东段的甘肃省天祝县金强河谷区域,首先,以海拔高度为自变量,分析不同海拔高度下高寒灌丛的植物群落特征和光谱特征,研究其相关性,得到如下结论:

1)在群落多样性的空间格局中,物种多样性在海拔梯度变化是极显著的;而且灌丛群落光谱 *REF* 与 α 多样性随海拔升高均呈现倒“V”字形变化,在低海拔区间内随海拔的上升而升高,在高海拔梯度内随海拔的升高而减小。 α 多样性最高的海拔梯度与群落光谱 *REF* 的最大值均集中在中海拔(3 300~3 400 m)区域。

2)灌丛群落特征生物量、茎叶比、高度对灌丛群落光谱特征的影响较明显:阴坡灌丛群落光谱反射率 *REF* 与生物量、茎叶比、冠高比都随海拔梯度升高呈“V”字形变化;含水率与群落光谱 *REF* 随海拔梯度的变化趋势相反,呈正“N”字形趋势。

3)千里香杜鹃和头花杜鹃灌丛在整个灌丛群落中占有非常关键性的地位,其群落特征的变化对灌丛光谱特征的影响明显。千里香杜鹃灌丛的含水率、茎叶比、生物量、高度、干鲜比与阴坡灌丛群落光谱 *REF* 随海拔梯度变化规律一致,头花杜鹃灌丛光谱 *REF* 与阴坡灌丛群落光谱 *REF* 在不同海拔梯度下的变化规律一致。

参考文献:

- [1] 高丽楠,张宏,肖艳. 青藏高原东缘 2 种优势灌木的光合特性研究[J]. 河南农业科学,2016,45(6):96-103.
- [2] 王庆慧,李婧贤,彭羽,等. 我国灌丛生态系统服务功能价值评估[J]. 江苏农业科学,2019,47(4):233-237.
- [3] 司慧娟. 青海省国土空间综合功能分区与管制研究[D]. 北京:中国地质大学,2018.
- [4] 马有国,杜学惠. 森林健康评价的遥感技术研究[J]. 森林工程,2019,35(2):37-44.
- [5] 闫岩,陈英富,赵国春,等. 内蒙古中东部浅覆盖区荒漠化的驱动因素及其演化的地质依据[J]. 地质与勘探,2019(2):630-640.
- [6] 初晓辉,陈功,张银,等. 施氮水平对马蹄金草坪反射光谱

特征及光合色素含量的影响[J]. 草原与草坪, 2014, 34(3): 62—66.

[7] 魏怀东, 陈芳, 张勃, 等. 民勤 10 种典型荒漠植物冠层光谱与含水率的特征分析[J]. 草业科学, 2018, 35(3): 590—596.

[8] 王永敏, 李西灿, 田林亚, 等. 土壤有机质含量地面高光谱估测模型对比分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 110—116.

[9] 赵钰, 李振海, 杨贵军, 等. 基于冬小麦冠层高光谱的干生物量监测[J]. 山西农业科学, 2019(4): 536—540.

[10] 任灵, 袁子茹, 陈建纲, 等. 东祁连山不同利用方式下高寒草甸草原土壤养分特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2016, 51(6): 70—75.

[11] 魏巍. 东祁连山灌-草交错带植物多样性格局及界面因子特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.

[12] 刘华峰. 降水变化对准噶尔荒漠植物种子萌发及其群落多样性的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2018.

[13] 孙鹏. 三江源区不同退化梯度高寒草原植被高光谱特征研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.

[14] 项巧巧, 申广荣, 吴裕, 等. 上海典型植被夏季与冬季的光谱特征分析[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2018, 36(5): 14—21.

[15] 赵阳, 成晨, 杨璐璐, 等. 高光谱的草本植物水分含量检测模型构建[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 894—898.

[16] 王力. 青藏高原东北部农作物与牧草物候特征及其对气候变化的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.

[17] 杨庚, 曹银贵, 罗古拜, 等. 生态系统恢复力评价研究进展[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(3): 508—513.

[18] 王丹澜, 李跃进, 张昊, 等. 农牧交错带退耕还草区不同土壤类型的植被群落特征研究[J]. 北方农业学报, 2019, 47(1): 97—104.

[19] 许金石. 秦岭北坡生境梯度上植物群落构建研究[D]. 西安: 西北大学, 2018.

[20] 赵志军, 单贵莲, 段新慧, 等. 干旱胁迫对 3 种冷季型草坪草光谱反射率及生理特征的影响[J]. 草原与草坪, 2016, 36(6): 23—29.

[21] 朱凤荣. 干旱胁迫对三种草本植物生理生化特性的影响[J]. 湖北农业科学, 2019(6): 88—91.

[22] 徐驰, 陈功, 杨红丽, 等. 不同草坪草冠层反射光谱特征的比较研究[J]. 草原与草坪, 2010, 30(2): 62—65.

[23] 臧红婷, 刘焕军, 张新乐, 等. 基于因子分析的黑土反射光谱特征的主要影响因素[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(10): 148—151.

Characteristics and spectral variation of alpine shrub communities with different altitudes in Jinqiang River valley in eastern Qilian Mountains

WANG Bo¹, LIU Xiao-ni¹, WANG Hong-wei², WANG Cai-ling³,
JI Tong^{1,2}, SUN Shou-jiang¹

(1. College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University/Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education/Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province/ Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China;
2. Engineering University of CAPF, Xi'an 710086, China; 3. Xi'an Shiyou University, School of Computer Science, Xi'an 710065, China)

Abstract: As a component of Qinghai-Tibetan Plateau ecosystem, alpine shrubs play an important role. As a fast developing remote sensing technology in recent years, hyperspectral remote technology can be used to investigate large area with high spatial resolution and spectral resolution. In order to explore the spectral characteristics of alpine shrubs at different elevation gradients, 8 sampling zones distributed on the shady slope from 2 900 to 3 600 m with 100 m interval were selected in Jinjiang River valley in the eastern part of Qilian Mountains on the Qinghai-Tibet Plateau, Tianzhu County of Gansu Province, to collect the field spectral data and indoor spec-

tral data of dominant shrub communities by using FieldSpec4 spectrometer. After the smooth noise reduction of the spectral data, the data were analyzed through reflectivity (REF), absorptivity (ABS) and first derivative transformation of reflectivity and absorptivity (GREF and GABS). The result indicated that 1) the species diversity changed significantly at altitude gradient, and spectral REF and α diversity index showed an inverted 'V' shape. The altitude gradient with highest α diversity index and the maximum REF value of the community spectrum were concentrated in the middle altitude area (3 300~3 400 m); 2) the shrub water content showed a 'N' shape with the increase of altitude, i. e., with the increase of altitude, the shrub water content and the community spectral REF first increased, then decreased and then increased; 3) the spectral characteristics of shrub communities were significantly affected by the community height, biomass and stem/leaf ratio. With the increase of altitude, they showed an inverse 'N' shape. 4) *Rhododendron thymifolium* and *Rh. capitatum* dominated the shrub community, and significantly affected the spectral characteristics.

Key words: eastern Qilian Mountains; alpine shrub community; altitude gradient; community characteristics; spectrum characteristics

(上接 16 页)

Dynamics in carbohydrate content of forbs in Hulunbeier meadow steppe

SONG Qian, XIAO Hong, CHAI Jin-long, YANG He-long, RONG Yu-ping

(College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Carbohydrates are important energy substances for plant morphogenesis, regreen, regrowth and resistance to environment stress. It is the basis of grassland rational utilization to understand seasonal dynamics in carbohydrate content in grassland plants. In this study, the seasonal dynamics and interannual variations of soluble sugar and reducing sugar in shoot, stem base and root of 8 forbs (*Potentilla bifurca*, *P. tanacetifolia*, *Sanguisorba officinalis*, *Serratula centauroides*, *Pulsatilla turczaninovii*, *Carex pediformis*, *Allium senescens*, *Bupleurum scorzoneri folium*) in meadow steppe in Hulunbeier were studied. The results showed that the content of soluble sugar and reducing sugar in shoot of tested plants increased and thereafter decreased from April to September in 2016, and reached the maximum at the end of July. The content of soluble sugar in stem base and root decreased obviously from April to May, which showed a trend of 'declining-rising-declining'. However, at the end of August 2015, the soluble sugar content in root of *Potentilla bifurca*, *Sanguisorba officinalis*, *Serratula centauroides*, *Pulsatilla turczaninovii*, *Carex pediformis* and *Bupleurum scorzoneri folium* began to rise slowly. The accumulation of soluble sugar in root of tested plants was seriously inhibited in drought year (2016). Therefore, it suggested that the suitable grazing period was June to the end of August, and the grazing intensity should be reduced or grazing rest in advance in drought years to ensure the sustainable utilization of grassland.

Key words: meadow steppe; forbs; soluble sugar; reducing sugar