

环青海湖地区天然草地时序光谱特征参量分析

张风丽¹, 尹 球¹, 匡定波¹, 李凤霞², 周秉荣²

(1. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 2 青海省气象科学研究所, 青海 西宁 810001)

摘要: 获取了环青海湖地区 4 类主要天然草地 2003 年 5~10 月共 16 个时相的地面高分辨率光谱数据, 并利用植被指数技术、导数光谱技术、植被光谱维特征提取模型及包络线归一化技术提取了多个光谱特征参量, 通过对各参量在生育期内分布规律的分析, 给出了能较好地表征草地生长发育规律时序特征参量的具体分布; 最后计算了 4 类天然草地各时序特征参量的平均散度, 结果表明黄边位置 λ_Y 、红边位置 λ_R 、红边斜率 S_V 、绿峰半高宽 λ_G 、红谷半高宽 λ_R 、去包络红谷净面积 A_R 和归一化植被指数 NDV I 对于天然草地分类更有效。

关键词: 天然草地; 时序光谱特征参量; 生育期; 散度

文章编号: 1000-0933(2005)12-3155-06 **中图分类号:** S127 **文献标识码:** A

Analysis of time series spectrum feature parameters derived from dom inant natural grasslands in the region around Qinghai lake

ZHANG Feng-Li¹, YIN Qiu¹, KUANG Ding-Bo¹, LI Feng-Xia², ZHOU Bing-Rong² (1. Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China; 2. Meteorological Research Institute of Qinghai Province, Xining 810001, China). Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(12): 3155~ 3160.

Abstract Grassland shows distinguishable seasonal patterns at different growth stage, while at a given time the growth rhythm of different grasslands diverges greatly. Those changes can be recorded in spectroscopic measurement performed at different time. Thus, remote sensing is found extremely useful for the study on grassland ecology.

This letter reports the remote sensing investigation on natural grasslands including alpine dry steppe, mountainous dry steppe, paludification meadow and mountainous meadow around Qinghai lake, with the measurement being performed on seven selected measuring spots. Ground hyperspectral data was collected at sixteen consecutive times from May to October in 2003 using GER 1500 spectrometer with strict calibration. The vegetation index, derivative spectrum, vegetation spectral feature extraction model, and continuum normalization technology are used to extract many spectrum feature parameters. The analysis on the time patterns of those feature parameters gives 14 time series spectrum feature parameters that clearly reflect the development of the grasslands. The 14 parameters are green peak position λ_G , yellow edge position λ_Y , red valley position λ_R , red edge position λ_V , slope of yellow edge S_Y , slope of red edge S_V , net height of green peak H_G , net depth of red valley with continuum removing H_R , width of green peak at half height λ_{Gc} , width of red valley at half height λ_{Rc} , net area of green peak A_G , net area of red valley with continuum removing A_R , position difference of red valley and green peak λ_{RG} , and normalized difference vegetation index NDVI. The four kinds of natural grasslands show different spectral features. Thus, our preliminary measurement indicates that it is possible to use the experimental technique to sort the grasslands. It is expected that the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271084); 上海市科技发展基金资助项目(011661077); 中国科学院二期知识创新工程资助项目

收稿日期: 2004-09-06; **修订日期:** 2004-11-28

作者简介: 张风丽(1978~), 女, 山东人, 博士生, 主要从事生态环境遥感与高光谱遥感应用研究 E-mail: flizhang@163.com.

致谢: 地面数据获取得到了青海省海北牧业气象试验站马宗泰高工和娄海萍站长, 及严应存、杨春玲等工程师的大力帮助; 青海省刚察县草原站张生远高工和青海省海北州草原总站王志宏高工在草地类型鉴定和实验点布置方面提供了宝贵建议, 在此一并致谢!

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 40271084); Shanghai Science and Technology Development Foundation (No. 011661077); Second Round Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Science

Received date: 2004-09-06; **Accepted date:** 2004-11-28

Biography: ZHANG Feng-Li, Ph. D. candidate, mainly engaged in application of ecological and hyperspectral remote sensing. E-mail: flizhang@163.com

detailed experiment by increasing number of the data samplings would lead to accurate grassland classification. Among all those parameters, it is found that λ_V , λ_N , S_V , λ_{VG} , λ_{VR} , A_R and $NDVI$ appear to be more important than the others.

Key words: natural grassland; time series spectrum feature parameter; growth period; divergence

遥感技术是草地生态监测的重要手段,并已得到深入广泛的应用^[1]。草地生长发育具有明显的季相节律,在不同生长阶段其内部成分结构和外部形态均会有所变化,同时不同草地类型表现为生长规律的差异,在光谱特征上亦有所反应,因此可将多时序光谱信息的应用作为草地生态遥感监测和分类的另一出发点^[2~5]。本文以环青海湖为研究区,利用2003年5~10月获取的4类主要天然草地16个时相的地面高分辨率光谱数据,并利用植被指数、导数光谱技术、植被光谱维特征提取模型及包络线去除技术,提取并分析了各类草地多种光谱特征参数在生育期内的分布规律,最后利用散度准则函数初步评价了各时序光谱特征参数用于草地分类的潜力。

1 研究区与数据获取

环青海湖片草地是全国北方重点牧区之一,草地面积广阔,牧草种类繁多,营养价值丰富,是青海省主要畜牧业基地。按照青海省天然草地分类系统,环青海湖片草地主要包括山地干草原类、高寒干草原类和高寒草甸类,其中高寒草甸类又可分为高山草甸亚类和沼泽化草甸亚类^[6]。高寒干草原主要分布在环青海湖北部、中部山区的干旱阳坡和部分丘陵地区,以耐寒抗旱的丛生禾草为建群种,主要优势种为紫花针茅。山地干草原主要分布在青海湖北岸湖滨平原和南部丘陵边缘,以旱生丛生禾草为建群种,主要优势种为芨芨草、扁穗冰草。高山草甸亚类是高寒草甸类的典型和主体,主要分布在刚察县北部、中部山区的阴坡地带,主要优势种为高山嵩草、矮生嵩草、线叶嵩草、黑褐苔草。沼泽化草甸亚类主要分布在环青海湖北部默勒河流域滩地,主要优势种为藏嵩草、甘肃嵩草。根据研究区草地分布和具体实验条件,在青海湖东北部共布置7个测点(图1),各测点所属类型如表1所示。

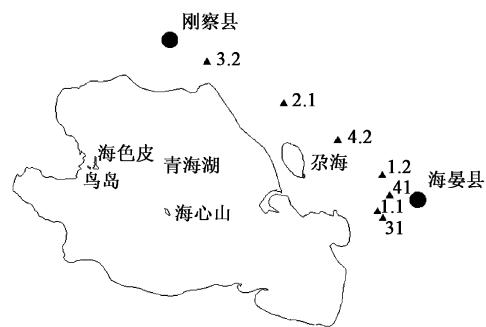


图1 测点分布示意图

Fig 1 Distribution of the seven measuring spots

表1 各测点所属草地类型

Table 1 Type ascriptions of each measuring spot

测点 Spot	所属类型(青海省天然草地分类系统)		
	类 Class	组 Group	型 Type
1.1 高寒干草原类 A	禾草草地组 Grasses	紫花针茅草地型 <i>Stipa purpurea</i>	
1.2 高寒干草原类 A	禾草草地组 Grasses	紫花针茅草地型 <i>Stipa purpurea</i>	
2.1 山地干草原类 M	禾草草地组 Grasses	芨芨草草地型 <i>Achnatherum sp. lendens</i>	
3.1 高寒草甸类沼泽化草甸亚类 Paludification meadow	莎草草地组 Cyperus	甘肃嵩草草地型 <i>Kobresia kansusnsis</i>	
3.2 高寒草甸类沼泽化草甸亚类 Paludification meadow	莎草草地组 Cyperus	藏嵩草+苔草草地型 <i>Kobresia tibetica</i> + <i>Carex</i>	
4.1 高寒草甸类高山草甸亚类 M	莎草草地组 Cyperus	矮生嵩草草地型 <i>Kobresia humilis</i>	
4.2 高寒草甸类高山草甸亚类 M	莎草草地组 Cyperus	矮生嵩草+杂类草草地型 <i>Kobresia humilis</i> + <i>Forb</i>	

参照研究区各类草地生长周期,于2003年5月到10月对所选测点共进行了16次光谱测量(表2)。实验选择晴朗无云天气进行,每10d 1次,并根据天气情况在前后5d内调整,受天气影响,7月下旬实验未进行。光谱测量采用美国地球物理及环境公司研制的GER 1500 地物光谱仪。该仪器共512个通道,波长范围350~1050nm,视场角3×0.1°,光谱分辨率3nm。仪器经严格室内定标,性能稳定。

表2 16次实验日期

Table 2 Date of 16 experiments

实验次数 Time	1	2	3	4	5	6	7	8
日期 Date	5月10日 10 May	5月19日 19 May	5月29日 29 May	6月9日 9 June	6月19日 19 June	6月30日 30 June	7月9日 9 July	7月19日 19 July
实验次数 Time	9	10	11	12	13	14	15	16
日期 Date	8月11日 11 Aug	8月18日 18 Aug	8月29日 29 Aug	9月9日 9 Sep.	9月19日 19 Sep.	9月28日 28 Sep.	10月14日 14 Oct	10月21日 21 Oct

光谱测量时在每测点设置3个覆盖度不同的子区,以子区为单位获取光谱。每个子区分别记录时间、GPS、云量、能见度、天气现象、实地照片,并测量草层高度和覆盖度。光谱测量时仪器探头垂直向下,与待测牧草和参考白板距离都保持1m左右。为减小随机误差影响每个子区测量9次,取均值作为该子区反射光谱;为减少大气变化影响,牧草与参考白板测量交替进行,每测量牧草3次就重新获取白板光谱。测量时间控制在10:00~16:00之间。

2 光谱特征参量分析方法

图2给出了8月中旬高寒干草原的反射光谱曲线。可以看出健康绿色草地在可见光(400~700nm)与近红外波段(700~950nm)反射特征差异很大,实际应用中常利用这两个波段的组合形成各种植被指数^[7]。本文采用目前应用最广的归一化植被指数NDVI(Normalized Difference Vegetation Index),且红光波段Red取680nm,近红外波段NIR取780nm(图2),计算公式采用:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

式中, ρ_{NIR} 与 ρ_{Red} 分别为近红外波段NIR与红光波段Red所对应反射率。

在草地光谱测量中土壤、凋落物等以低频噪声形式影响目标光谱,因此可利用一阶导数运算 $\rho(\lambda) = \frac{\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$ 予以限制和消除^[8],式中 λ 为 i 波段波长, $\rho(\lambda)$ 为 i 波段反射率, $\rho(\lambda)$ 即为 i 波段一阶导数光谱值。图2给出了高寒干草原对应的一阶导数光谱曲线,可以看出导数光谱运算可以大大强化草地红边(680~750nm陡峭爬升脊)特征。

针对植被研究,谭倩等提出利用植被光谱维特征提取模型(Vegetation spectral feature extraction model-VSFEM)控制和模拟植被光谱曲线^[9]。该模型在380~1000nm范围内选取8个特征位置M、B、G、Y、R、V、I₁、I₂,图3利用高寒干草原反射光谱给出了其分布。 $M(\lambda_M, \rho_M)$ (蓝紫波段吸收谷)对应350~500nm反射光谱最小值, $B(\lambda_B, \rho_B)$ (蓝边)对应450~550nm反射光谱拐点, $G(\lambda_G, \rho_G)$ (绿峰)对应510~580nm反射光谱最大值点, $Y(\lambda_Y, \rho_Y)$ (黄吸收边)对应550~650nm反射光谱拐点, $R(\lambda_R, \rho_R)$ (红谷)对应600~720nm反射光谱最小值, $V(\lambda_V, \rho_V)$ (红边)对应680~760nm反射光谱拐点, $I_1(\lambda_{I_1}, \rho_{I_1})$ 为反射光谱包络线在670~800nm第1个包络点, $I_2(\lambda_{I_2}, \rho_{I_2})$ 对应780~950nm反射光谱最大值。其中M、G、R、I₂为相应波长范围内一阶导数光谱最近极小值点(图2),B、Y、V对应一阶导数光谱在相应波长范围极大或

极小值点(图2),而I₁通过计算反射光谱的包络线(Continuum)得到。图3给出了G到I₁间反射光谱的包络线,其计算过程可参考文献^[10]。

包络线归一化(又称包络线去除)可有效突出吸收和反射特征,是一种有效的光谱分析方法^[10, 11],利用*i*波段反射率 ρ_i 除以*i*波段对应包络线值实现,图4给出了G到I₁间包络线归一化结果。

3 结果与分析

3.1 各类草地时序光谱特征参量分布

VSFEM模型^[9]不仅可以表征草地光谱主要特征,还可以得到一系列与波形相关的特征参量。草地在不同生长发育阶段,其内部结构和外部形态均发生一系列周期性变化,导致其物理光学特征也随之发生变化,并被称之为季相节律^[5]。本文分析了4类天然草地多种特征参量在整个生育期内的变化规律,并给出了几种能较好地表征草地生长发育规律时序特征参量的具体分布(图5)。

λ_G 、 λ_Y 、 λ_R 、 λ_V 分别为绿峰G、黄边Y、红谷R、红边V所对应波长。 S_Y 为图3直线RG的斜率,计算方法为 $S_Y = (\rho_G - \rho_R) / (\lambda_G - \lambda_R)$, S_V 为红边V所对应一阶导数值(图2)。 H_G 表示图3绿峰G到直线MR的纵向距离,计算方法为 $H_G = \rho_G - ((\rho_R - \rho_M) / (\lambda_R - \lambda_M)) \times (\lambda_G - \lambda_R) + \rho_R$, H_R 为图4红谷R所对应包络线归一化值。 λ_{BG} (图3)表示绿峰在 $H_G/2$ 处波长宽度,用BY的水平距离近似表示, λ_{GR} (图3)表示红谷净深一半 $H_R/2$ 处的波长宽度,用YV的水平距离近似表示。 A_G 为图3曲线MBGYR和直线MR所围面积,反映绿峰净强度, A_R 为图4包络线归一化曲线GRI₁与GI₁所围面积。 λ_{GR} 为红谷R与绿峰G对应波长差(图3)。

牧草返青初期,绿反射峰和红吸收谷都不明显,表现在图5绿峰位置 λ_G 较靠近长波长方向,绿峰净高度 H_G 、绿峰面积 A_G

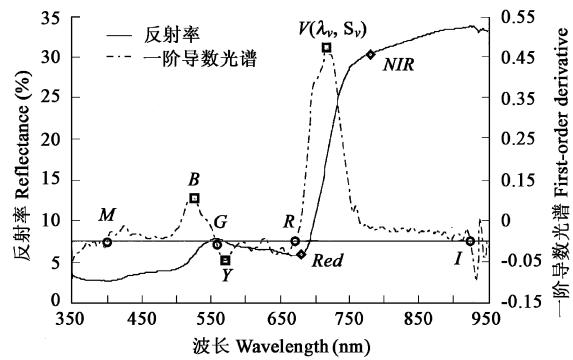


图2 高寒干草原反射及一阶导数光谱

Fig. 2 Reflectance and first-order derivative spectrum of alpine dry steppe

(呈负值)较小, 较开阔绿峰对应的半高宽 λ_{WG} 值较大; 而红谷位置 λ_R 、红边位置 λ_V 较靠近短波长方向, 红边斜率 S_V 、去包络线后红谷净深 H_R 、红谷半高宽 λ_{VR} 、去包络线后红谷净面积 A_R 值都较小; 而此时介于 G 和 R 之间的黄边位置 λ_Y 较靠近长波长方向且斜率 S_Y 较大, RG 的位置差 λ_{RG} 和 $NDVI$ 值较小。随生育期推进进草地外貌特征发生明显变化, 光谱特征也发生相应变化, 表现为草地对可见光吸收增加, 对近红外反射增强, 且对红光吸收大于蓝光, 对蓝光吸收大于绿光, 因此绿峰和红谷都越来越明显, 特别是红谷不断加深加宽。草地内部成分及外貌特征的变化导致各特征参数也发生相应变化, 主要表现在绿峰位置 λ_G 向蓝光方向偏移, 红谷位置 λ_R 、红边位置 λ_V 向近红外方向偏移(即红移^[5, 12]), 绿峰净高 H_G 、去包络线后红谷净深 H_R 、绿峰面积 A_G 、去包络线后红谷净面积 A_R 增大且达峰值后趋于稳定, 由于红谷的加深加阔红边斜率 S_V 和红谷半高宽 λ_{VR} 逐渐变大, 而绿峰由于受到挤压半高宽 λ_{WG} 变小, 该阶段黄边位置 λ_Y 逐渐向短波长方向偏移且斜率 S_Y 减少并最终达负值, RG 位置差 λ_{RG} 和 $NDVI$ 值逐渐增大。生长盛期过后, 随草地黄枯光谱特征亦发生相应变化, 从图 5 可以看出该时间段各特征参数呈与前一阶段相反的变化趋势。

3.2 时序光谱特征参数对草地分类潜力分析

由上可见, 图 5 所示各时序特征参数在一定程度上反映草地生长发育内在规律, 同时还可以看出不同草地类型所对应的同种时序参数在形状和强度上存在明显差异, 因此可考虑作为草地分类的鉴别性标志。为探讨各参数对于分类的有效性, 最理想的是使用分类错误率^[13]。本实验测点样本偏少无法直接进行分类实验, 因此利用与错误率有单调关系的散度准则函数^[13]作为类别可分离性判据评价这些特征参数对于分类的有效性。

类别 ω 与 ω' 的散度 $J_{D_{ij}}$ 定义为两类总的平均可分性信息, 假设样本正态分布则有:

$$J_{D_{ij}} = \frac{1}{2} \text{tr}(\Sigma_i^{-1} + \Sigma_j^{-1}) - \frac{1}{2} (\mu_i - \mu_j)^T (\Sigma_i^{-1} + \Sigma_j^{-1}) (\mu_i - \mu_j) \quad (1)$$

式中, Σ_i 、 Σ_j 分别为 ω 和 ω' 类的协方差矩阵, μ_i 、 μ_j 为 ω 和 ω' 类的均值。实验表明散度与误判概率(或其上下界)之间存在单调关系, 散度增加时分类错误率减小。

对于多类问题($c > 2$), 可采用加权和的方法综合各类对散度, 但直接应用(1)式可能会导致散度较大类对掩盖散度较小类对对分类能力的影响, 这就意味着较大的散度不一定对应着较高的分类识别率。为改善这种情况, 对散度 $J_{D_{ij}}$ 进行变换使其对小散度较为敏感:

$$J_D^{(T)} = 1 - \exp(-J_{D_{ij}}/8) \quad (2)$$

则总的平均散度 $J_D^{(T)}$ 为:

$$J_D^{(T)} = \sum_{i=1}^{c-1} \sum_{j=i+1}^c p(\omega_i)p(\omega_j) J_{D_{ij}}^{(T)} \quad (3)$$

式中, $p(\omega_i)$ 、 $p(\omega_j)$ 分别为 ω_i 和 ω_j 类出现的先验概率, c 为类别数目。 $J_D^{(T)}$ 增加了散度较小类对对分类能力的影响, 具有更可靠的可分性判断能力。特征参数对应的散度越大, 则对于区分相应的类就越有效。表 3 给出了 4 类天然草地各时序光谱特征参数的散度。

由表 3 可以看出, 利用黄边位置 λ_Y 、红边位置 λ_V 、红边斜率 S_V 、绿峰半高宽 λ_{WG} 、红谷半高宽 λ_{VR} 、去包络红谷净面积 A_R 和归一化植被指数 $NDVI$ 计算得到的平均散度较大, 即利用这些时序参数对 4 类天然草地分类时对应着较高的识别率, 因此它们对于天然草地分类更有效, 值得进一步深入研究。

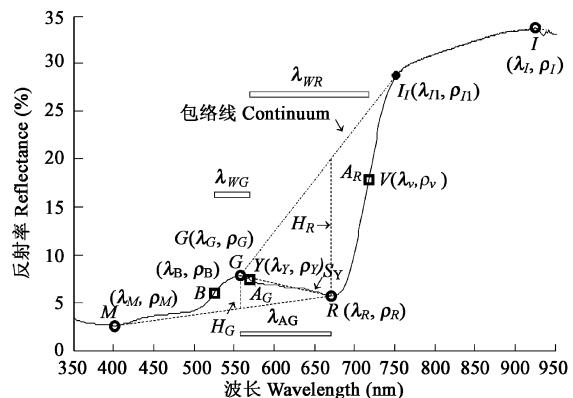


图 3 高寒干草原反射光谱及包络线

Fig. 3 Reflectance spectrum and continuum of alpine dry steppe

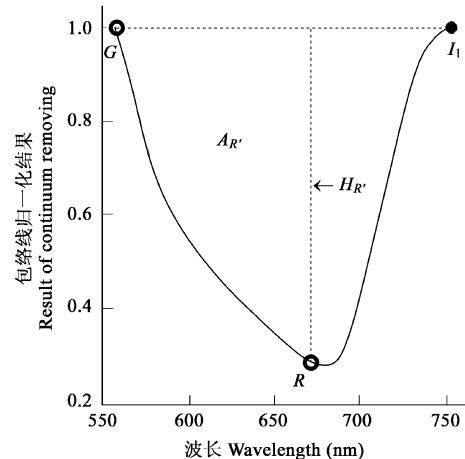


图 4 高寒干草原 G 到 I_1 波长范围反射光谱包络线归一化结果

Fig. 4 Continuum removing of alpinedry steppe reflectancespectrum between G and I_1

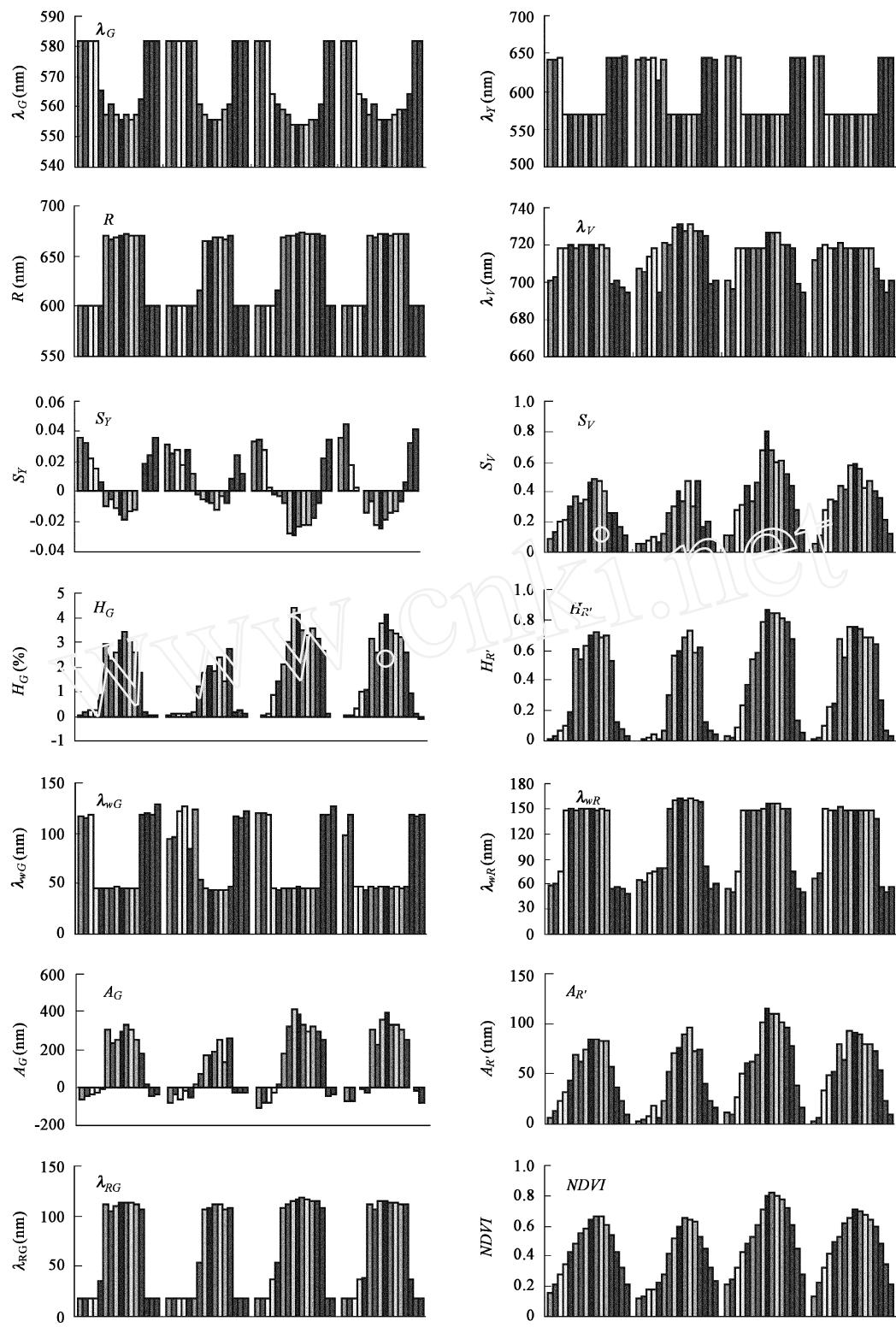


图 5 4类天然草地各时序光谱特征参量在生育期内变化规律

Fig. 5 Change rule of time series spectrum feature parameters through growth period for 4 natural grasslands

各图间隔的 4 类从左到右依次为高寒干草原、山地干草原、沼泽草甸、高山草甸，每类对应的 16 个时相见表 2。From left to right the separated 4 types are alpine dry steppe, mountainous dry steppe, paludification meadow, and mountainous meadow in turn. And date of 16 time sequences is listed in table 2.

表3 天然草地各时序光谱特征参数散度

Table 3 Divergence of time series spectrum feature parameters of natural grasslands

特征参数 Feature parameter	λ_G	λ_V	λ_R	λ_V	S_V	S_V	H_G
$J_D^{(T)}$	0.7318	0.7500	0.7074	0.7468	0.7242	0.7431	0.7044
特征参数 Feature parameter	H_R	λ_{RG}	λ_{VR}	A_G	A_R	λ_{RG}	$NDVI$
$J_D^{(T)}$	0.7278	0.7494	0.7496	0.7366	0.7467	0.6600	0.7440

4 讨论

草地季相节律变化可在光谱上有所反应,因此可作为草地生态监测的另一出发点。本文利用环青海湖地区4类天然草地16个时相的地面光谱数据,分析了14个特征参数绿峰位置、黄边位置、红谷位置、红边位置、黄边斜率、红边斜率、绿峰净高度去包络线后红谷净深度、绿峰半高宽、红谷半高宽、绿峰净面积、去包络线后红谷净面积、红谷绿峰位置差及归一化植被指数在草地生育期内的分布规律。它们在生育期内的规律变化一定程度上反映了草地生长发育过程;同时可以看出不同草地类型的同种时序光谱参数存在明显差异,可考虑作为草地分类的鉴别性标志。因样本有限本文利用散度作为可分判据对利用各时序参数区分天然草地的潜力进行了分析,并得出黄边位置 λ_V 、红边位置 λ_R 、红边斜率 S_V 、绿峰半高宽 λ_{RG} 、红谷半高宽 λ_{VR} 、去包络红谷净面积 A_R 和归一化植被指数 $NDVI$ 对于草地分类的潜力更大。本文结论可为航天、航空多时序遥感应用提供借鉴和参考。

References

- [1] Tueller P T. Remote sensing technology for rangeland management applications. *Journal of Range Management*, 1989, **42**(6): 442~453.
- [2] Sheng Y W, Chen W Y, Xiao Q G, et al. Macro-classification of plant using meteorological satellite vegetation index in China. *Chinese Science Bulletin*, 1995, **3**(4): 68~71.
- [3] Agrawal S, Joshi P K, Shukla Y, et al. SPOT VEGETATION multi-temporal data for classifying vegetation in south central Asia. *Current Science*, 2003, **84**(11): 1440~1448.
- [4] Wolter, P T, Mladenoff D J, Host G E, et al. Improving forest classification in the Northern Lake States using multi-temporal landsat images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995, **61**(9): 1129~1143.
- [5] Zhao Y S. Vegetation remote sensing. In: Huang R H ed. *Principle and method of remote sensing application and analysis*. Beijing: Chinese Scientific Press, 2003. 366~412.
- [6] Wan Y B. The exploitation and environment protection of Qinghai grasslands. *Prata Culture of Qinghai*, 1992, **1**(4): 17~21.
- [7] Tian Q J, Min X J. Advance in study on vegetation indices. *Advance in Earth Science*, 1998, **13**(4): 327~333.
- [8] Chen S P, Tong Q X, Guo H D. Hyperspectral remote sensing mechanism and material recognition. In: Chen S P ed. *The research on remote sensing mechanism*. Beijing: Chinese Scientific Press, 1998. 139~233.
- [9] Tan Q, Zhao Y C, Tong Q X, et al. Feature extraction model in vegetation spectrum dimension. *Remote Sensing Information*, 2001, **1**(1): 14~18.
- [10] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing application. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**(1): 6329~6340.
- [11] Pu R L, Gong P. Application of hyperspectral remote sensing in geology. In: Pu R L. *Hyperspectral remote sensing and its applications*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 47~80.
- [12] Miller J R. Season patterns in leaf reflectance and red edge characteristics. *Int J Remote Sens*, 1991, **12**(7): 1509~1523.
- [13] Sun J X. Feature extraction and selection. In: Pan S ed. *Modern pattern recognition*. Changsha: Publishing House of National University of Defense Technology, 2002. 190~242.

参考文献:

- [2] 盛永伟, 陈维英, 肖乾广, 等. 利用气象卫星植被指数进行我国植被的宏观分类. *科学通报*, 1995, **40** (1): 68~71.
- [5] 赵英时. 植物遥感. 见: 黄荣辉主编. 遥感应用分析原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 2003. 366~412.
- [6] 万育彬. 青海省草地资源开发利用与环境保护. *青海草业*, 1992, **1** (4): 17~21.
- [7] 田庆久, 闵祥军, 等. 植被指数研究进展. *地球科学进展*, 1998, **13** (4): 327~333.
- [8] 陈述彭, 董庆禧, 郭华东. 高光谱分辨率遥感信息机理与地物识别. 见: 陈述彭主编. 遥感信息机理研究. 北京: 科学出版社, 1998. 139~233.
- [9] 谭倩, 赵永超, 田庆禧, 等. 植被光谱特征提取模型. *遥感信息*, 2001, **1**(1): 14~18.
- [11] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感在地质调查中的应用. 见: 浦瑞良主编. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社, 2000. 47~80.
- [13] 孙即祥. 特征提取与选择. 见: 孙即祥主编. 现代模式识别. 国防科技大学出版社, 2002. 190~242.