

黄河源5种高寒植物光谱特征分析及识别

刘志刚,关文昊,何国兴,蒲小鹏,纪童,杨军银,李强,柳小妮

(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)

摘要:玛多县高寒草甸是黄河源区草地生态系统的重要组成部分,研究其主要植物地面光谱特征和植被指数是实现物种识别的基础。本研究使用地物光谱仪采集黄河源头在旺盛生长时期的5种常见高寒植物的光谱,将原始光谱数据进行转换和分析,筛选敏感波段组合计算归一化植被指数(NDVI)和比值植被指数(RVI),以探索分类和识别5种植物的最佳方法。研究结果如下:1)5种高寒植物在可见光与近红外波段的光谱与植物特有的光谱特征相符,但相互存在明显差异;2)反射率(REF)和吸收率(ABS)的一阶微分(GREF和GABS)变换扩大了5种高寒植物的光谱特性,相对稳定的波长范围为520~595、880~1 100 nm、717~737和943~958 nm;3)5种植物在ABS及GABS转化下的490~530 nm和780~820 nm组合计算的NDVI和RVI差异明显大于全波段组合计算的NDVI和RVI,而且优于其他组合的NDVI和RVI。综上所述,运用一阶微分处理敏感波段反射率和吸收率优化植被指数可以提高黄河源区5种高寒植物的识别效果。

关键词:黄河源;高寒植物;光谱特征;植被指数;识别

中图分类号:Q948.15 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)04-0023-08

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2022.04.004



高寒草甸是黄河源区的重要自然资源,自1970年以来,在自然和人为因素(例如气候变化和过度放牧)的共同影响下,该地区的草地呈现出明显的退化趋势^[1],表现为可食牧草的产量、营养价值和适口性下降,土壤条件恶化,鼠害和害虫增加,生物多样性减少以及丧失草原自我恢复的功能等^[2-3]。准确、实时获取黄河源区高寒草地物种组成的变化对草地的实时

监测具有重要意义。然而黄河源区自然条件严酷^[4],交通不便,人工监测费时费力,不适合大规模监测^[5]。因此,迫切需要一种有效、快速、准确和方便的手段对植物进行分类、识别和监测。

传统的多光谱遥感技术可以识别植被的主要类型,但由于草地光谱具有很大的相似性,所以多光谱传感器难以准确地识别草地植物^[6]。高光谱技术不仅具有高分辨率、多波段和连续性的特点,而且能够满足连续性和光谱可分性的要求,为草地监测提供了一种全新的方法^[7],在林业、农业、生态和环境等许多领域发挥着重要作用^[8]。如何利用高光谱遥感探测草地群落组成信息是目前的难题之一^[9]。

为了提高植物物种光谱分类的准确性,研究者通常采用原始光谱转换的方法,如宋仁飞等^[10]对原始反射光谱进行导数、对数和倒数对数运算,一定程度上提高了植物分类识别的准确性;刘秀英等^[11]以光谱性质相似的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*)作为主要研究对象,分析了原始光

收稿日期:2021-03-22; **修回日期:**2021-06-08

基金项目:甘肃省新一轮草原补奖效益评估及草原生态评价研究(XZ20191225);超低空微遥感技术在草原监测中的应用研究推广及示范(034-036268);东祁连山高寒草地态监测(034-036260);甘肃省林草局“东祁连山高寒草地群落监测研究”(GSLC-2020-5)

作者简介:刘志刚(1996-),男,甘肃武威人,硕士研究生。

E-mail:571403039@qq.com

柳小妮为通信作者。

E-mail:Liuxn@gsau.edu.cn

谱、一阶微分光谱和一阶微分倒数对数变换,结果表明光谱变换是一种有效的植物分类识别方法;韩万强等^[12]研究发现,反射率(REF)、吸收率(ABS)及其一阶微分(GREF和GABS)的转换可以进一步增大伊犁绢蒿荒漠草原3种主要植物的光谱特征。敏感波段筛选也逐渐成为学者们用来识别植物特征的热点,如王波等^[13]筛选出6种灌木植物间差异相对稳定的波段以识别灌木植物,取得了较好的效果;韩万强等^[12]对伊犁荒漠草原3种主要植物的光谱特征进行了研究,并利用所选波段对植物进行了有效区分。另外,黄锦等^[14]的研究结果表明高光谱植被指数可以作为湿地植物分类的依据,舒田等^[15]研究发现比值植被指数(RVI)可以识别7种不同作物。

在植物的高光谱分类识别研究中,对原始光谱的反射率分析较多,很少使用导数和一阶微分形式。而且,归一化植被指数(NDVI)和比值植被指数(RVI)是构建植被指数最常用的两种形式,但不同的学者对其波长的选择持有不同的观点^[16-17]。因此,本研究以黄河源牛头碑附近高寒草甸5种常见的高寒植物为研究对象,在植物生长旺盛期采集光谱数据,通过原始光谱数据的导数和一阶微分转换,构建植被指数筛选最佳的波段组合来识别这5种植物,为高寒草甸植物信

息的提取和遥感监测提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

玛多县是典型的高原大陆性气候,干湿季明显。年均气温为 -3.67°C ,年均降水量为321 mm,6~9月的降水量约占全年的75%^[18]。该地区草地类型为高寒草甸和高寒草原,分别占草地总面积的76%和23%^[19]。措日尕则山地区以高寒草甸为主,植被类型以耐寒多年生草本植物或高寒灌丛组成的矮草群为主的草原^[20],由于植物种类随环境的变化而异,可分为高山嵩草草甸、高山杂草草甸、高山草原草甸和沼泽草甸^[21]。以高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)为优势种的牛头碑附近高寒草甸已发生不同程度的退化,群落已逐渐演替为以菊科(Asteraceae)、蓼科(Polygonaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、玄参科(Scrophulariaceae)等杂类草植物为优势种的群落。珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、风毛菊(*Saussure japonica*)、蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)、雪白委陵菜(*Potentilla nivea*)、棉毛茛(*Ranunculus membranaceus*)等是主要植物。

本研究以玛多县措日尕则山顶峰牛头碑(海拔4 610 m)附近的5种常见植物(表1)为研究对象。

表1 优势植物及其特征

Table 1 Plants and their characteristics

植物名	拉丁名	科	属	特征
珠芽蓼	<i>Polygonum viviparum</i>	蓼科	蓼属	多年生草本。茎直立,单枝,高15~40 cm,通常2~4茎丛生
风毛菊	<i>Saussure japonica</i>	菊科	风毛菊属	越年生草本,高50~150 cm。茎直立,基部直径1 cm,通常无翼,很少具翼,疏生短柔毛和金色小腺点
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科	蒲公英属	叶缘有时有波状齿或羽状深裂,基部变窄为叶柄,叶柄和主脉常为红紫色,花葶上部为紫红色
雪白委陵菜	<i>Potentilla nivea</i>	蔷薇科	委陵菜属	叶缘有时有波状齿或羽状深裂,基部变窄为叶柄,叶柄和主脉常为红紫色,花葶上部为紫红色
棉毛茛	<i>Ranunculus membranaceus</i>	毛茛科	毛茛属	多年生草本。茎直立,高3~10 cm,有分枝,全部呈棉状和银白色

1.2 光谱数据采集及处理

1.2.1 光谱数据采集 2019年8月10日,用ASD(ASD FieldSpec®4 Hi-Res NG, USA)地物光谱仪进行植物光谱采集。该仪器的波长为350~2 500 nm,光谱分辨率为3 nm@700 nm和6 nm@1 400/2 100 nm。采样间隔在350~1 000 nm波段为1.4 nm,在

1 001~2 500 nm波段为1.1 nm。

每种植物选择10个测试点,每个测试点选择6株植物,每株植物测量3次光谱,即每株植物获得60个光谱样本,最后取平均值。测量光谱前,清除待测植物周围的其余杂物,并在测量每个点之前用标准白板进行校正,以减少天气变化带来的误差。测量时间在

10:00 到 14:00。天气晴朗无风,探头距离植物冠层顶部约 1.5 m,垂直向下。

1.2.2 光谱数据处理 利用地物光谱仪的 View SpecPro 软件对植物光谱数据进行预处理,剔除同一植物地物光谱差异较大的数据。

由于光谱曲线受外界环境和噪声的影响较大,所以用公式(1)进行移动平滑和去噪,计算出各植物的原始反射率(REF),用公式(2)得到 ABS,用公式(3)得到 GREF,用公式(4)得到 GABS。

$$REF(\lambda) = \frac{R_{\lambda-2} + R_{\lambda-1} + R_{\lambda} + R_{\lambda+1} + R_{\lambda+2}}{5} \quad (1)$$

$$ABS(\lambda) = \lg[1/REF(\lambda)] \quad (2)$$

$$GREF(\lambda) = [REF_{\lambda+1} - REF_{\lambda-1}] / [(\lambda + 1) - (\lambda - 1)] \quad (3)$$

$$GABS(\lambda) = [ABS_{\lambda+1} - ABS_{\lambda-1}] / [(\lambda + 1) - (\lambda - 1)] \quad (4)$$

式中, R 为原始反射率, λ 为波长(nm)。

通过对 REF、ABS、GREF 和 GABS 数据的分析,确定差异明显的特征波段。

1.3 敏感波段和植被指数筛选

本研究通过归一化植被指数(NDVI)和比值指数(RVI)的计算方式,将筛选出的不同的波段的平均值分别代入式(5)、式(6)中,获得不同波段组合的植被指数。

$$NDVI = (R_{\lambda} - R_{\bar{x}}) / (R_{\lambda} + R_{\bar{x}}) \quad (5)$$

$$RVI = R_{\lambda} / R_{\bar{x}} \quad (6)$$

式中, R_{λ} 、 $R_{\bar{x}}$ 为筛选波段组合光谱平均值。

最后,根据不同植物在相应变换中的改进 NDVI 值或 RVI 值之间的最小差异,选择差异最大的波段组合作为最佳识别参数。

2 结果与分析

2.1 光谱特征

5种植物的光谱曲线特征变化趋势基本相似,峰谷位置基本相同,但不同植物的光谱特征有明显的差异(图1)。

5种植物的 REF 在 400 nm 附近出现第 1 个低谷,后开始增加,第 1 个峰值出现在 560 nm,第 2 个波谷出现在 675 nm,在 760 nm 附近形成植物特有的红边现象;虽然这种红边现象的总体趋势没有太大差异,但不同植物之间的 REF 仍然存在差异;在近红光波长(750~1 300 nm)内,5种植物的 REF 一直保持较高水平;在 750~920 nm REF 缓慢增加,随后 REF 有所减小,近红外波段的第 1 个波谷出现在 970 nm 附近,但波谷的吸收深度很小;在 1 070 和 1 270 nm 处有两个反射峰,在 1 190 和 1 450 nm 处有一个吸收谷;在中红外波段(1 500~2 500 nm),随着波长的增加,REF 普遍降低,在 1 670、1 830 和 2 220 nm 附近有 3 个波峰,在 1 785 和 1 920 nm 附近有 2 个波谷。

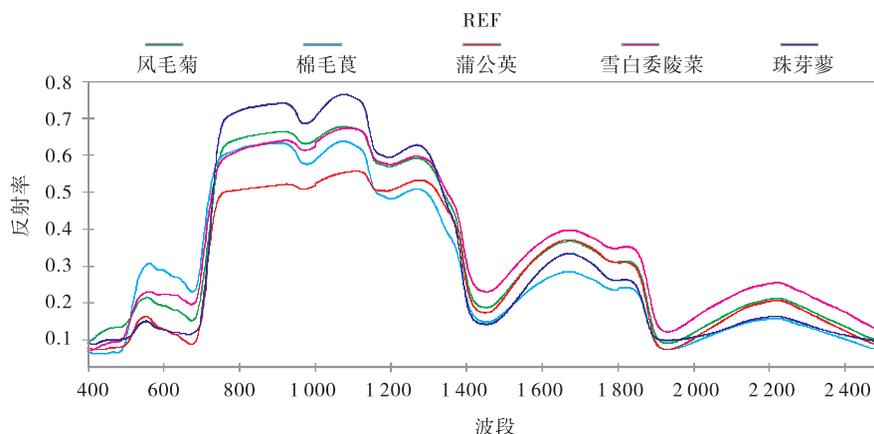


图 1 不同植物的反射率

Fig. 1 Reflectivity REF curves of different plants

光谱值的斜率在红光区(680~755 nm)、近红外区与短红外区 1 的过渡区(1 280~1 410 nm)、短红外区 1 与短红外区 2 的过渡区(1 840~1 920 nm)突然增大,不同植物间的 REF 差异会减小;在 870~1 090 nm 处,

5种植物的光谱值大小顺序为:珠芽蓼>风毛菊>雪白委陵菜>棉毛茛>蒲公英。在 2 010~2 400 nm 波段,5种植物的光谱值大小顺序依次为:雪白委陵菜>风毛菊>蒲公英>珠芽蓼>棉毛茛。

REF 在 540~75、880~1 080、1 160~1 230、1 620~1 780 和 2 010~2 430 nm 波段较为稳定,不同植物的光谱值差异较大。

2.2 敏感波段筛选

蒲公英的 REF 在 605~1 150 nm 波段始终低于其他植物,风毛菊的 REF 在 450~490 nm 波段呈陡升趋势,而其他 4 种植物的 REF 变化不大,这一波段能有

效区分风毛菊。珠芽蓼的 REF 在 730~1 300 nm 波段始终最大,风毛菊的 REF 在 1 110~1 400 nm 和 1 540~1 880 nm 处与雪白委陵菜的 REF 相似。

不同植物 GREF 在 717~737、943~958 和 1 375~1 390 nm 有明显差异(图 2);在 480~510、1 100~1 160 和 1 880~1 895 nm 波段的 GABS 值有明显差异,可以选择上述波段为 5 种植物的识别敏感区。

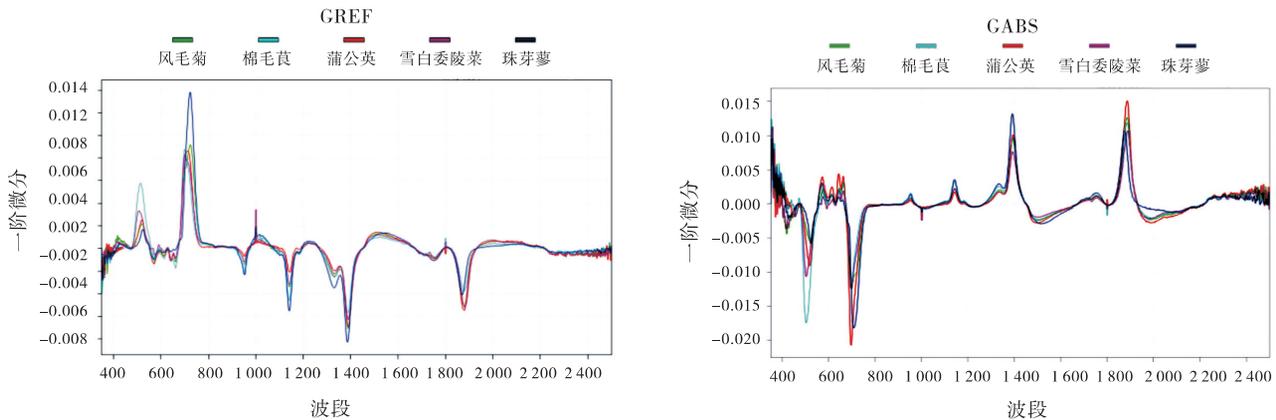


图 2 反射率和吸收率一阶微分(GREF和GABS)曲线

Fig. 2 First order differential curves of reflectivity and absorptivity

2.3 植被指数的改进

在 REF 与 ABS 的 4 种光谱组合中,520~595 和 880~1 100 nm 波段组合的 REF 和 ABS 得到的 NDVI 效果更好,该波段组合中 5 种植物的改进 NDVI 差值最大(0.033 6 和 0.036 7),优于对照 400~780 和 780~1 300 nm 组合下的 NDVI 值(0.018 5 和 0.010 9)。在 520~595 和 880~1 100 nm 的波段组合下,ABS 得到的改进 RVI 较好,该波段组合中 5 种植物的差异值最大为(0.393 6),优于对照在 400~780 nm 和 780~1 300 nm 时的 RVI 值(0.009 1)(表 2)。

在这 2 个波段组合下,改进型 NDVI 和 RVI 值大小顺序一致,依次为:珠芽蓼>风毛菊>雪白委陵菜>蒲公英>棉毛茛。

在 GREF 和 GABS 的 3 种光谱组合中,717~737 和 943~958 nm 组合的 RVI 效果较好,5 种植物的改进 RVI 差异值最大(0.507 4),优于 400~780 和 780~1 100 nm 的对照组合(0.030 6)(表 3)。在 2 个波段组合下的改进型 NDVI 和 RVI 值大小顺序一致,依次为 蒲公英>风毛菊>珠芽蓼>雪白委陵菜>棉毛茛。

在 480~510 和 1 880~1 895 nm 的组合中,通过一阶微分 GABS 得到的 NDVI 值较好,该组合中 5 种植物的差异值最大(0.064 8),优于对照 400~780 和

780~1 100 nm 处的 NDVI 值(0.028 5)。

3 讨论

3.1 高寒植物光谱特征

草地植被的光谱 REF 与冠层形态结构、叶片内部结构和不同化合物含量密切相关,并受叶片含水量、叶绿素含量、植被覆盖度、生长期、土壤条件和大气条件的影响^[22-23]。在可见光区域,叶片叶绿素含量是影响光谱 REF 的最重要因素^[24-25]。本研究发现,5 种植物的第一个吸收峰出现在 500~560 nm 处,即在该波段附近,REF 的反射率较强,ABS 的吸收率较弱,这与韩万强和王波的研究结果一致^[12-13]。在可见光波段和近红外波段之间,即 760 nm 附近,5 种植物的 REF 急剧上升,形成红边现象,符合植物光谱曲线的明显特征。在红光区域(680~750 nm),植物的光谱特征与氮、蛋白质、叶绿素等生化参数密切相关^[26-28]。本研究发现,5 种植物的波谷出现在 600~700 nm,即红谷,其中包含的红光和橙光最多,是植物光合作用吸收最强的波段范围。

本研究发现,5 种植物在近红外波段的光谱特征是高反射率,并且珠芽蓼反射率最大,风毛菊、雪白委陵菜和棉毛茛差异不大,蒲公英的最小。这可能是珠

表 2 REF、ABS 改进植被指数
Table 2 REF and ABS improved vegetation indexes

植被指数	波段/nm	风毛菊	棉毛茛	蒲公英	雪白委陵菜	珠芽蓼	最小差值
REF(NDVI)	400~780,780~1 300	0.456 7	0.367 6	0.501 3	0.438 2	0.545 4	0.018 5
REF(RVI)	400~780,780~1 300	2.681 3	2.162 3	3.010 2	2.559 7	3.399 1	0.121 5
ABS(NDVI)	400~780,780~1 300	0.555 7	0.481 8	0.506 3	0.544 8	0.669 2	0.010 9
ABS(RVI)	400~780,780~1 300	0.285 6	0.349 7	0.327 7	0.294 7	0.198 2	0.0091
REF(NDVI)'	415~490,880~1 100	0.680 0	0.809 8	0.748 1	0.757 0	0.764 6	0.007 5
	415~490,1395~1 515	0.253 3	0.439 8	0.443 0	0.479 8	0.239 4	0.003 1
	520~595,880~1 100	0.529 7	0.367 2	0.563 2	0.490 4	0.681 2	0.033 6
	520~595,1395~1 515	0.019 6	0.262 9	0.144 0	0.069 9	0.068 3	0.001 6
REF(RVI)'	415~490,880~1 100	0.190 5	0.105 1	0.144 1	0.138 3	0.133 4	0.004 9
	415~490,1 395~1 515	0.595 8	0.389 0	0.386 0	0.351 6	0.613 7	0.0030
	520~595,880~1 100	0.307 5	0.462 8	0.279 4	0.341 9	0.189 6	0.028 1
	520~595,1 395~1 515	0.961 6	1.713 2	0.748 3	0.869 3	0.872 1	0.002 8
ABS(NDVI)'	415~490,880~1 100	0.6655	0.699 3	0.603 2	0.692 1	0.763 1	0.007 2
	415~490,1 395~1515	0.141 7	0.207 6	0.225 3	0.274 9	0.115 7	0.017 7
	520~595,880~1 100	0.586 0	0.444 0	0.500 5	0.549 2	0.726 9	0.036 7
	520~595,1 395~1 515	0.011 6	0.176 2	0.080 9	0.047 5	0.034 6	0.012 9
ABS(NDVI)'	415~490,880~1 100	4.978 7	5.650 6	4.039 9	5.495 5	7.442 9	0.155 1
	415~4 90,1 395~1 515	1.330 2	1.523 9	1.581 5	1.758 3	1.261 6	0.057 7
	520~595,880~1 100	3.830 6	2.597 1	3.004 1	3.437 0	6.322 0	0.393 6
	520~595,1 395~1 515	1.023 5	0.700 4	1.176 1	1.099 7	1.071 6	0.028 0

表 3 GREF、GABS 改进植被指数
Table 3 GREF and GABS improved vegetation indexes

植被指数	波段/nm	风毛菊	棉毛茛	蒲公英	雪白委陵菜	珠芽蓼	最小差值
GREF(RVI)	400~780,780~1 100	0.082 6	0.159 7	0.038 5	0.026 8	0.129 1	0.030 6
GABS(NDVI)	400~780,780~1 100	1.083 7	1.155 3	0.968 3	1.022 6	1.126 9	0.028 5
GABS(RVI)	400~780,780~1 100	0.040 2	0.072 1	0.016 1	0.011 2	0.059 7	0.012 4
GREF(NDVI)'	717~737,943~958	0.761 6	0.456 9	0.850 6	0.712 7	0.732 2	0.019 5
	717~737,1 375~1 390	0.177 8	0.002 3	0.081 3	0.067 4	0.2630	0.014 0
	943~958,1375~1 390	0.675 2	0.455 1	0.826 5	0.677 9	0.581 1	0.002 7
GREF(RVI)'	717~737,943~958	7.388 9	2.682 3	12.390 6	5.961 2	6.468 6	0.507 4
	717~737,1 375~1 390	1.432 6	1.004 5	1.177 1	1.144 5	1.713 6	0.032 6
	943~958,1 375~1 390	0.193 9	0.374 5	0.095 0	0.192 0	0.264 9	0.0019
GABS(NDVI)'	480~510,1 100~1 600	0.391 6	0.757 9	0.689 9	0.749 8	0.169 0	0.008 1
	480~510,1 880~1 895	0.668 0	0.026 4	0.588 3	0.203 4	0.732 8	0.064 8
	1 100~1 600,1 880~1 895	0.839 9	0.746 5	0.909 2	0.827 1	0.643 5	0.012 8
GABS(RVI)'	480~510,1 100~1 600	2.287 1	7.261 7	5.448 5	6.993 8	0.710 9	0.267 9
	480~510,1 880~1 895	0.199 1	1.054 1	0.259 2	0.661 9	0.154 2	0.044 9
	1 100~1 600,1 880~1 895	0.087 0	0.145 2	0.047 6	0.094 6	0.216 9	0.007 6

芽蓼与其他植物相比,叶子较多,叶绿素含量较高,在光谱的近红外波段产生更高的反射率,其REF也最高;风毛菊叶片叶绿素含量也高,但叶片相对稀疏,所以其REF不高;雪白委陵菜的叶片较大,但叶柄为白色绒毛,叶片可接受的有效太阳辐射有限,因此其REF很低;棉毛茛全体生棉状柔毛而呈银白色,叶绿素含量很低,这与它的低REF一致;蒲公英的叶子成倒卵状披针形,虽然冠层较大,但叶子有蜘蛛丝般的白色柔毛,整个植株匍匐在地上,影响部分太阳光的反射和吸收,导致反射率最低。在光谱的中红外阶段,5种植物的光谱响应主要以1 400和1 900 nm附近的强吸水带为主。960和1 100 nm处的吸水带对叶片的反射率也有很大的影响,尤其是多层叶片的情况,这正与珠芽蓼叶子多层,反射率较高相同。

3.2 植被指数的改进

在本研究中,比较了通过波段组合计算的各种改进的NDVI'值或RVI'值之间的差异,发现由REF和ABS改进的520~595和880~1 100 nm与由GREF和GABS改进的717~737和943~958 nm的波段组合效果非常好,优于对照全波段计算的NDVI'和RVI'(除REF(RVI')与GREF(NDVI'))。在ABS变换下,改进的植被指数差异明显,这与王波的研究结果一致^[14]。利用REF和ABS变换后的光谱数据计算得到的改进NDVI'值和RVI'值能够明显区分5种植物,且优于传统的NDVI和RVI计算和其他改进组合波段的NDVI'和RVI'。

4 结论

1) 黄河源区高寒植物吸收太阳辐射形成的光谱曲线与其他植物相似。可见光波段(400~780 nm)和短波红外波段2(1 900~2 500 nm)主要是吸收波段,近红外波段(780~1 300 nm)和短波红外波段(1 300~1 900 nm)主要是反射波段;

2) 5种高寒植物:珠芽蓼,风毛菊,蒲公英,委陵菜和棉毛茛的光谱在520~595、880~1 100、1 395~1 515和2 005~2 440 nm波段有明显差异,4个波段可作为5种高寒植物分类和识别的敏感波段;

3) REF和ABS的520~595和880~1 100 nm组合的NDVI'和RVI'值,GREF和GABS的717~737和1 375~1 390 nm组合的NDVI'值,以及GABS变换计算的RVI'值,均能有效地区分这5种高寒植物。

参考文献:

- [1] 徐新良,王靓,李静,等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J]. 地球信息科学学报,2017,19(1): 50-58.
- [2] 刘玉杰,邓福英,赵文娟. 草地退化遥感评价与监测研究进展[J]. 云南地理环境研究,2013,25(1):14-18+24.
- [3] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. 中国农业科学,1997(6):2-10.
- [4] 徐新良,刘纪远,邵全琴,等. 30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J]. 地理研究,2008,27(4): 829-838,974.
- [5] 杨雪飞,吉春容,高淑敏,等. 高光谱遥感在草地中的应用及研究进展[J]. 北方农业学报,2017,45(5):115-118.
- [6] 钱金波,马明国. 遥感技术在毒草识别中的研究进展[J]. 遥感技术与应用,2009,24(5):685-690.
- [7] 王彩玲,祁璞,王波,等. 基于高光谱的祁连山东段灌丛生物量估测模型构建[J]. 草原与草坪,2020,40(6): 39-45.
- [8] 邢璐琪,张桂莲,张浪,等. 高光谱技术在植被特征监测中的应用[J]. 园林,2020(11): 8-14.
- [9] 安如,陆彩红,王慧麟,等. 三江源典型区草地退化Hyperion高光谱遥感识别研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(3):399-405.
- [10] 宋仁飞,林辉,臧卓,等. 东洞庭湖湿地植被高光谱数据变换及识别[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(11): 135-139.
- [11] 刘秀英,臧卓,孙华,等. 基于高光谱数据的杉木和马尾松识别研究[J]. 中南林业科技大学学报,2011,31(11): 30-33.
- [12] 韩万强,靳瑰丽,岳永寰,等. 伊犁绢蒿荒漠草地3种主要植物光谱及植被指数改进[J]. 新疆农业科学,2020, 57(5): 950-957.
- [13] 王波,柳小妮,王洪伟,等. 东祁连山高寒灌丛六种灌木植物的光谱特征分析[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(5): 1509-1516.
- [14] 黄锦,孙永华. 适用于洪河湿地5种植物分类的高光谱植被指数筛选[J]. 湿地科学,2016,14(6):888-894.
- [15] 舒田,岳延滨,李莉婕,等. 基于高光谱遥感的农作物识别[J]. 江苏农业学报,2016,32(6): 1310-1314.
- [16] 王弘,施润和,刘浦东,等. 植物光学模型估算叶片类胡萝卜素含量的一种双归一化差值-比值植被指数[J]. 光谱学与光谱分析,2016,36(7):2189-2194.
- [17] 周贤锋. 色素含量比值进行作物氮素营养状况诊断方法研究[D]. 北京:中国科学院大学,2017.
- [18] 罗栋梁,金会军. 黄河源区玛多县1953-2012年气温和

- 降水特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(11): 185—192.
- [19] 邵全琴, 刘纪远, 黄麟, 等. 2005—2009 年三江源自然保护区生态保护和建设工程生态成效综合评估[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1645—1656.
- [20] 王堃, 洪绂曾, 宗锦耀. “三江源”地区草地资源现状及持续利用途径[J]. 草地学报, 2005(S1): 28—31+47.
- [21] Jessica A, Bryant, Christime Lamanna, *et al.* Microbes on Mountainsides: Contrasting Elevational Patterns of Bacterial and Plant Diversity[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(1): 11505—11511.
- [22] Choubey V K, Rani Choubey. Spectral Reflectance, Growth and Chlorophyll Relationships for Rice Crop in a Semi-Arid Region of India[J]. Water Resources Management, 1999, 13(2): 73—84.
- [23] Daniel A Sims, John A Gamon. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2): 337—354.
- [24] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales [J]. Remote Sensing of Environment, 1995, 53(3): 199—211.
- [25] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves[J]. Journal of Plant Physiology, 2003, 160(3): 271—282.
- [26] Filella I, Penuelas J. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1994, 15(7): 1459—1470.
- [27] Clevers J, Gitelson A A. Remote estimation of crop and grass chlorophyll and nitrogen content using red-edgebands on sentinel-2 and-3[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 344—351.
- [28] Sibanda M, Mutanga O, Rouget M. Testing the capabilities of the new WorldView-3 space-borne sensor's red-edge spectral band in discriminating and mapping complex grassland management treatments [J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(1-2): 1—22.

Analysis and identification of spectral characteristics of five plant species in alpine meadow in the source area of the Yellow River

LIU Zhi-gang, GUAN Wen-hao, HE Guo-xing, PU Xiao-peng, JI Tong,
YANG Jun-yin, LI Qiang, LIU Xiao-ni

(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory for Grassland Ecosystem of Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazing Land Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The alpine meadow is an important part of the grassland ecosystem in the source area of the Yellow River in Maduo County, and the ground spectral characteristics of the main plants and vegetation index are the basis for species identification. In this study, a ground feature spectrometer was used to collect the spectra of 5 common alpine plants in the source area of the Yellow River during the vigorous growth period, and the original spectral data were converted and analyzed, and the sensitive band combinations were selected to calculate the normalized vegetation index (NDVI) and the ratio vegetation index (RVI) to explore the best way to classify and identify 5 species.

The results showed that 1) The spectra of 5 species in the visible and near-infrared bands were consistent with the plants unique spectral characteristics, and there were significant differences. 2) The first-order differential (GREF and GABS) transformation of reflectance (REF) and absorbance (ABS) expanded the spectral characteristics of 5 species, and the relatively stable wavelength ranges were 520 to 595, 880 to 1100 nm and 717 to 737, 943 to 958 nm. 3) The differences of NDVI' and RVI' calculated for the combination of 490 to 530 nm and 780 to 820 nm under ABS and GABS transformation of 5 species were significantly greater than the control, and better than other combinations of NDVI' and RVI'. In conclusion, using the first-order differential to process the reflectance and absorbance of the sensitive band to optimize the vegetation index can improve the recognition effect of 5 species in the source area of the Yellow River.

Key words: source area of the yellow river; alpine plant; spectral characteristics; vegetation index; identification

(上接22页)

Effects of moisture content and sodium diacetate on fermentation quality and mycotoxins of fermented total mixed ration

WANG Zi-yuan, WANG Xiao-li, CHEN Guang-ji, WEI Xing-di, SHU Jian-hong
(Guizhou Institute of Prataculture, Guiyang 550006, China)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effects of initial moisture content and sodium diacetate on the quality of fermented total mixed ration (FTMR). Three moisture contents (50%, 60%, 65%) and four sodium diacetate levels (0, 0.2%, 0.4%, 0.8%) were designed for a two-factor completely randomized trial. Sensory evaluation, conventional nutrient contents, fermentation parameters and mycotoxins of FTMR were analyzed 35 days after fermentation. The results showed that moisture content, sodium diacetate and their interactions had significant effects on the formation of FTMR organic acid ($P < 0.05$). With the increase of moisture content, pH value decreased significantly, and the content of lactic acid and acetic acid increased significantly. The crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber and mycotoxins decreased slightly, with no significant difference ($P > 0.05$). The addition of sodium diacetate significantly reduced the content of ammoniacal nitrogen/total nitrogen and mycotoxins ($P < 0.05$). The pH was the lowest with 0.2% of sodium diacetate, and the crude protein and neutral detergent fiber were higher. It can be concluded that appropriate moisture content and sodium diacetate can improve the fermentation quality of FTMR, reduce the loss of dry matter, and inhibit the proliferation of mycotoxins. Under the conditions of this study, 60% moisture and 0.2%~0.4% sodium diacetate were the suitable combination to achieve the desired fermentation quality.

Key words: moisture content; sodium diacetate; silage; mycotoxins