DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2017-0262
魏怀东,陈芳,张勃,周兰萍,李亚,杨雪梅. 民勤 10 种典型荒漠植物冠层光谱与含水率的特征分析. 草业科学,2018,35(3):590-596.
Wei H D, Chen F, Zhang B, Zhou L P, Li Y, Li X M. Analysis of the canopy spectrum and water content of desert plants. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 590-596.

民勤 10 种典型荒漠植物冠层光谱与含水率的特征分析

魏怀东[1,2],陈 芳[2],张 勃[1],周兰萍[2],李 亚[2],杨雪梅[2]
(1. 西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室 省部共建国家重点实验室培育基地,甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070)

摘要: 植物体内水分是影响植物光合作用、呼吸作用、生物量及其他生理生化指标的主要因素之一,植物含水率的调查是植被研究的重要内容,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对荒漠区植被遥感监测具有重要意义。本研究借助 ASD 便携地物光谱仪实地测定了 10 种典型荒漠植物的冠层光谱曲线,并采用相关系数法和植被指数法,分析了不同荒漠植物光谱特征及其与冠层含水率的关系,结果显示: 1) 荒漠植物反射光谱曲线具有绿色植物在可见光-近红外波段的普遍特征,有明显的"绿峰"特征和"红边效应"。2) 在 954-973,1 184-1 198 和 1 440-1 462 nm 三个波段,荒漠植物存在明显的水分吸收谷。其中,1 440-1 462 nm 波段的光谱反射率与含水率相关系数大于 0.8,二者具有很强的线性相关性。3) WBI(Water Band Index)、NDWI(Normalized Difference Water Index)、NDII(Normalized Difference Infrared Infrared Index)、MSI(Moisture Stress Index)与植物含水率显著相关($P<0.05$),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。

关键词: 光谱特征; 植物含水率; 相关系数; 冠层水分含量指数; 荒漠植物; 民勤
中图分类号: Q948.1 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-0629(2018)03-0590-07* 1

Analysis of the canopy spectrum and water content of desert plants

Wei Huai-dong[1,2], Chen Fang[2], Zhang Bo[1], Zhou Lan-ping[2], Li Ya[2], Yang Xue-mei[2]
(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Desert Control Research Institute/Gansu Desert Control Research Institute State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aralian Sand Disaster Combating, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Plant water is one of the main factors affecting plant photosynthesis, respiration, biomass, and other physiological and biochemical indices. Investigation of the water content of plants is an important part in vegetation research. Study of the relationship between water content and canopy spectrum of typical desert plants is of considerable significance to remote sensing monitoring of vegetation in desert areas. In this study, the canopy spectral curves of 10 desert plants were determined using ASD portable terrestrial spectrometers. Correlation coefficient and vegetation index methods were used to analyze the spectral characteristics of different desert plants and their relationship with canopy water content. The following results were obtained, 1) The reflectance spectrum of desert plants had the general characteristics of green plants in the visible-near infrared band, and had an obvious "green peak" and "red-edge effect." 2) The three bands of 954-973, 1 184-1 198, and 1 440-1 462 nm showed an obvious water absorption valley in desert plants. In the 1440-1462 nm band, the spectral reflectance and water content correlation coefficient is greater than 0.8, and the two parameters showed a strong linear correlation. 3) There was significant correlations between water band index,

* **收稿日期**: 2017-05-23 **接受日期**: 2017-11-21
基金项目: 国家自然科学基金(31360204、51579102);甘肃省自然科学基金(17JR5RA062)
第一作者: 魏怀东(1972-),男,甘肃景泰人,研究员,博士,主要从事荒漠化监测与防治研究。E-mail: weihdgs@126.com
通信作者: 陈芳(1980-),女,甘肃兰州人,副研究员,硕士,主要从事荒漠化监测与防治研究。E-mail: chenfang2ff3@163.com

normalized difference water index, normalized difference infrared index, moisture stress index, and plant water content ($P < 0.05$), and the canopy water content index was consistent with the measured value of vegetation water, which could reflect changes in the water content of desert vegetation.

Key words: spectral characteristics; plant moisture content; correlation coefficient; canopy water content; desert plant; Minqin

Corresponding author: Chen Fang　E-mail: chenfang2ff3@163.com

荒漠区自然环境恶劣,荒漠植被经过残酷的自然选择保存下来,它们以各种不同的生理生态方式适应严酷的生态条件,虽然在荒漠中生长稀疏,但却是荒漠生态系统的初级生产者,是维护荒漠生态系统稳定的重要因素,在荒漠生态系统中占有绝对重要的生态地位[1]。植物体内水分是影响植物光合作用、呼吸作用、生物量及其他生理生化指标的主要因素之一,植物含水率的调查是植被研究的重要内容。要了解大面积荒漠植物的水分状况,使用传统的样地采样法不仅费时、费力,而且调查结果往往只是点状或线状的断点信息,不能实现时间序列连续的面状信息收集,其代表性也受到质疑。高光谱遥感是植被水分监测的有效方法,基于高光谱数据进行植物含水率的分析与反演,可以为大面积植物含水率监测提供有效途径[2-3]。

研究者运用相关系数法分析了植物含水率与反射光谱之间的关系,结果显示,近红外 1 374 – 1 534 nm 波段反射光谱与植物含水率相关性最好,是表达植物含水率的特征波段[4-5]。王鹏龙等[6]对腾格里沙漠典型植物含水率与地物光谱的关系进行分析发现,含水率与包络线去除的光谱数据在可见光和近红外波段均存在极显著相关性。这些研究表明,反射率光谱可以反映荒漠植物含水率变化,高光谱遥感可以用于荒漠植被含水率分析。本研究以河西走廊荒漠区广泛分布的 10 种典型旱生植物为研究对象,野外实地测定其冠层光谱,通过相关系数法、光谱指数进行荒漠植物含水率光谱响应特征研究,旨为干旱区荒漠植被遥感信息提取提供依据。

1　数据与方法

1.1　研究区概况

荒漠植物光谱采集的野外试验区位于河西走廊东部,石羊河流域下游民勤县的绿洲 – 荒漠过渡带,地理位置为 101°41′ – 104°16′ E,36°29′ – 39°27′ N,研究区属温带大陆性干旱气候。年平均气温 8 ℃,年平均降水量小于 150 mm。受典型干旱荒漠气候的控制,研究区地带性植被主要由超旱生灌木、半灌木荒漠和超旱生半乔木荒漠组成,植物种类少、层片结构简单、生产力低[7]。研究区的自然植被按地貌、土壤和植被特征等可分为砾质荒漠植被、沙质荒漠植被和盐渍化草甸植被。其中砾质荒漠植被主要分布于低山、剥蚀残丘和砾质戈壁区,主要植物有珍珠猪毛菜(*Salsola passerina*)、红砂(*Reaumuria songarica*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)等。沙质荒漠植被主要分布在平沙地、沙垄和沙丘及丘间低地上。植被由沙生灌木、半灌木与一年和多年生草本组成。退化草甸植被主要由叶肉质的耐旱或喜盐植被组成,如盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)、芦苇(*Phragmites australis*)等。因位于腾格里和巴丹吉林两大沙漠前缘交汇区,该区土地荒漠化问题十分严重,荒漠化土地占区域总面积的 90% 以上。本研究选择在干旱荒漠区广泛分布的霸王(*Zygophyllum xanthoxylon*)、白刺(*Nitraria tanggutorum*)、灌木亚菊(*Ajania fruticulosa*)、合头草(*Sympegma regelii*)、黑果枸杞(*Lycium ruthenicum*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、珍珠猪毛菜、花花柴(*Karelinia caspia*) 10 种植物作为研究对象进行光谱特征研究。

1.2　数据采集

1.2.1　光谱数据采集　植物光谱数据通过 ASD(analytical spectral devices) Field spec 4 便携式光谱仪测量取得,其反射光谱的范围为 350 – 2 500 nm,光谱采样间隔约 1.5 nm,光谱仪探头视场角度为 25°。荒漠植物野外光谱采集时间为 2015 年 7 月 24 日 – 8 月 1 日,光谱采集在阳光几乎直射的 10:00 – 14:00 时段进行。测量时光谱仪探头垂直放置在植被冠层上方约 20 cm 处,向下对准被测植株,保证被测植株充满整个视场。

按照每种植物生长特性,选择该植物集中分布区作为研究样地,在样地内选取生长良好、地物背景相似的植株 20 株,作为样本进行光谱测量。每个样本每次采集 5 条光谱曲线。每次光谱采集前进行白板校准,

每隔5～10 min 再次进行白板校准。由于野外光谱仪测量时受环境影响较大,因此对测得的原始光谱数据进行了筛选,通过检查被测物体和标准板的光谱数据和光谱曲线,去除了其中无效的数据,保证光谱数据的有效性[8]。

1.2.2 冠层水分数据采集 在测定荒漠植物野外光谱曲线的同时,进行植物冠层含水率测定取样。每种荒漠植物选择生长健康的植株,用剪刀剪下植物当年生新鲜枝叶,装入封口袋,立即称鲜重。贴标签后带回实验室。在实验室通过烘干称重法获得植物含水率数据。

1.3 数据处理

利用 View SpecPro 光谱数据分析软件对外业观测所得曲线进行筛选,除去异常曲线,对同类植物正常曲线取平均值,代表该植物的光谱曲线数据。将原始曲线 DN 值转换为光谱反射率值。在此基础上,通过相关系数法和植被指数法分析荒漠植物光谱对含水率变化的响应特征。

1.3.1 相关系数法 相关系数是用来衡量两个随机变量之间线性相关程度的指标,它由卡尔·皮尔森(Karl Pearson)在1880年提出,计算公式如下:

$$r_{xy}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}。$$

其中:r_{xy}为荒漠植物含水率与荒漠植物光谱反射率的相关系数,$\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别是荒漠植物含水率和荒漠植物光谱反射率的均值,x_i 和 y_i 分别是荒漠植物含水率和荒漠植物光谱反射率在 i 波段的观测值,n 为样本总数。相关系数取值范围为[-1,1],$r>0$ 表示正相关,$r<0$ 表示负相关,$|r|$表示了变量之间相关程度的高低。通常$|r|$大于0.8时,认为两个变量有很强的线性相关性[9-10]。

1.3.2 植被指数法 冠层水分含量指数用于度量植被冠层中的水分含量,它是基于水在近红外和短波红外范围内的吸收特征以及光在近红外范围内的穿透性,综合起来度量总的水分含量[11]。本研究选择4种最常用冠层水分含量指数进行植被含水率研究,所选植被指数计算公式如表1所列。

2 结果与分析

2.1 荒漠植物含水率测定结果

对研究区10种荒漠植物水分测定的结果显示,调查期内荒漠植物冠层含水率差异较大,含水率最小的是灌木亚菊,仅为18.53%,最大的是花花柴,为

表1 冠层水分含量指数
Table 1 Canopy moisture content index

指数名称 Index name	表达式 Formula	基本描述 Basic description
水波段指数 Water band index(WBI)	$WBI=R_{900}/R_{970}$	反映冠层含水量在900 nm波长范围内的吸收特征 Absorption characteristics reflecting canopy moisture content in the wavelength range of 900 nm
归一化水指数 Normalized difference water index(NDWI)	$NDWI=(R_{875}-R_{1241})/(R_{875}+R_{1241})$	反映植被水分含量增加时,857 nm光谱吸收相对1 241 nm吸收的增率的变化 The change in absorbance at 857 nm compared to 1 241 nm when the moisture content of vegetation increases
归一化红外指数 Normalized difference infrared infrared index(NDII)	$NDII=(R_{819}-R_{1649})/(R_{819}+R_{1649})$	监测在1 599 nm植被水分变化引起的光谱吸收变化 Monitoring the change of spectral absorption caused by the change of vegetation water at 1 599 nm
水分胁迫指数 Moisture stress index (MSI)	$MSI=R_{1599}/R_{819}$	对水分含量变化非常敏感,值越大表示水分含量越多 Very sensitive to changes in moisture content, the greater the value, the more moisture content

71.17%(图 1)。

2.2　荒漠植物光谱基本特征

10 种荒漠植物反射光谱具有绿色植物在可见光－近红外波段的普遍特征[12-18]。在 400－760 nm 可见光的绿波段 550 nm 附近第 1 次出现了波峰,但峰值并不高,大部分植物反射率在 0.1 附近。这一区域为绿色植物典型的反射光谱特征,表现了叶绿素对绿光的强烈反射; 550－680 nm 反射率逐渐下降,降低的程度也比较低(图 2)。在红光波段 680 nm 附近有较强的吸收,形成了第 1 个吸收谷,这一区域主要的太阳光谱为红色,是植物光合作用吸收最强的波段范围; 在近红外波段,10 种荒漠植物光谱曲线在 670－760 nm 反射率突然增高,形成植物特有的红边效应。因此,在可见光波段,除了红光的波长范围反射率较高外,其余波段的光谱反射率都非常低,植物对光的吸收能力较强。

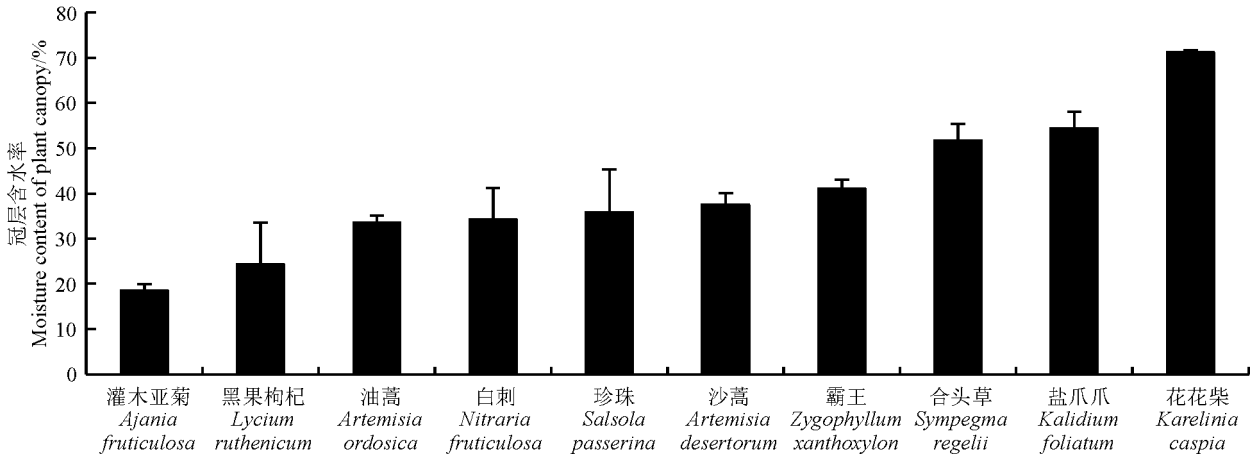

图 1　10 种荒漠植物冠层含水率特征

Fig. 1　Canopy water content of 10 desert plants

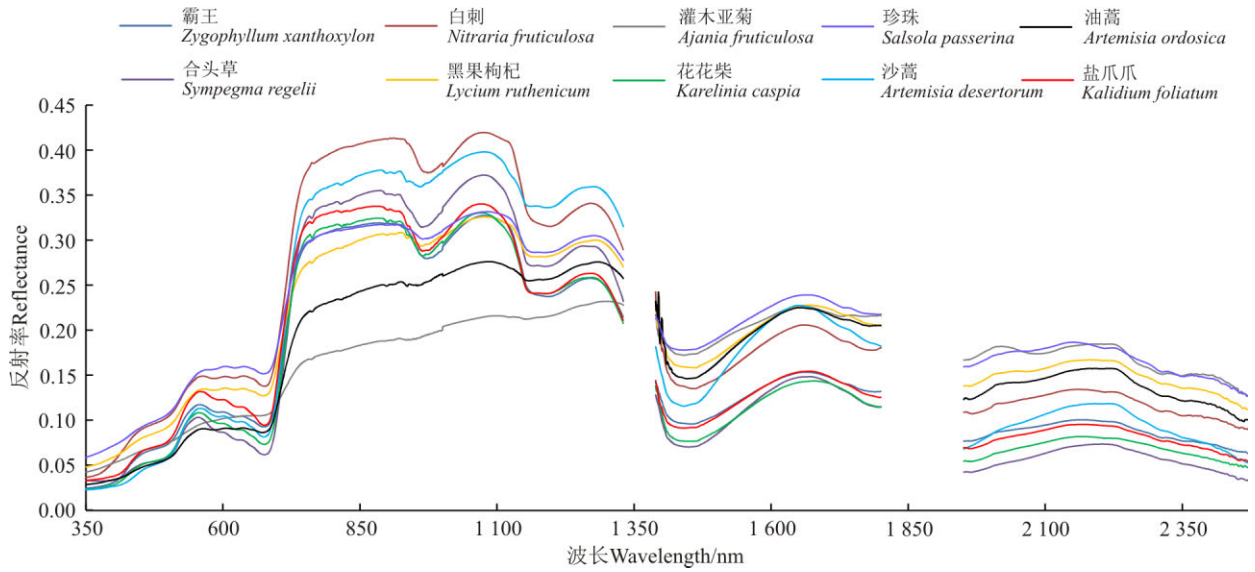

图 2　10 种荒漠植物光谱特征曲线

Fig. 2　Shrub vegetation spectral characteristic curve

2.3　荒漠植物光谱与植物冠层含水率

2.3.1　植物冠层含水率光谱表达特征波段　许多研究表明,在近红外和短波红外波段,有以 970、1 200、1 450、1 930 和 2 500 nm 为中心的 5 个叶片水分吸收带[4,11,19]。所有的荒漠植物在 954－973、1 184－1 198 和 1 440－1 462 nm 这 3 个波段均存在着明显的吸收谷(图 3)。本研究中的光谱均为野外实地测定,在 1 930和2 500 nm 为中心的波段范围,受水汽吸收和仪器自身噪声影响,数据噪声较大,不适宜用来进行进一步研究。

2.3.2 植物光谱反射率与含水率的相关分析 基于相关系数法,将实验室测定的荒漠植物含水率与954 – 973、1 184 – 1 198 和 1 440 – 1 462 nm 三个水分敏感波段的光谱反射率进行相关分析(图 3)。可以看出,在 954 – 973 nm 区间,含水率与反射率呈正相关关系,相关系数最大为 0.253,最小为0.217,相关性一般; 在 1 184 – 1 198 nm 波段,光谱反射率与含水率呈负相关关系,相关系数大小介于 0.145 ~ 0.149,相关性较差。在 1 440 – 1 462 nm 波段,植物含水率与光谱反射率呈显著负相关关系($P < 0.05$),相关系数在0.840 ~ 0.842。

2.3.3 冠层水分含量指数与含水率 选取水波段指数(WBI)、归一化水指数(NDWI)、归一化红外指数(NDII)和水分胁迫指数(MSI)4 个冠层水分含量指数进一步分析荒漠植物光谱特征,在 4 种指数中,前 3 种植被指数 WBI、NDWI、NDII 的值越大表示水分含量越多,而 MSI 则相反,MSI 值越大,代表水分胁迫越严重和水分含量越少。在 4 种指数中,灌木亚菊含水率最低,因此冠层水分含量指数 WBI、NDWI、NDII 均小于其他植物,而MSI值则大于其他植物种(表2)。植

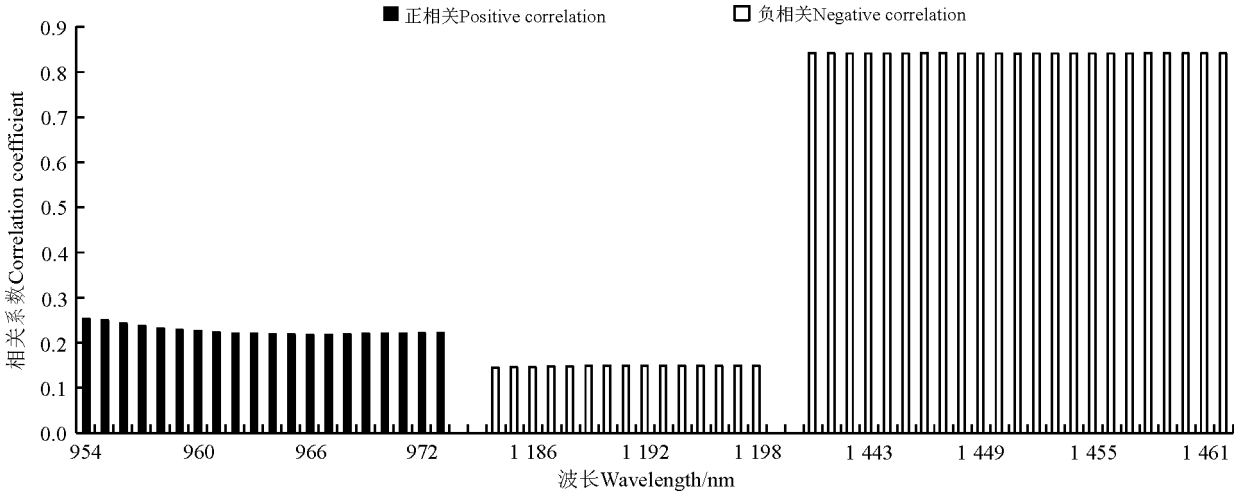

图 3 954 – 973、1 184 – 1 198 和 1 440 – 1 462 nm 反射率与荒漠植物含水率相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients between reflectivity and water content of desert plants in the 954 – 973, 1 184 – 1 198, and 1 440 – 1 462 nm spectral bands

表 2 10 种荒漠植物冠层水分含量指数与含水率之间的相关关系

Table 2 Canopy moisture content indices of 10 desert plants

植物种 Plant species	冠层水分含量指数 Canopy moisture content index			
	WBI	NDWI	NDII	MSI
霸王 *Zygophyllum xanthoxylon*	1.14	0.11	0.35	0.45
白刺 *Nitraria tanggutorum*	1.10	0.10	0.33	0.47
灌木亚菊 *Ajania fruticulosa*	0.97	–0.10	–0.12	1.21
合头草 *Sympegma regelii*	1.11	0.10	0.40	0.39
黑果枸杞 *Lycium ruthenicum*	1.03	0.01	0.13	0.73
花花柴 *Karelinia caspia*	1.13	0.12	0.38	0.41
沙蒿 *Artemisia desertorum*	1.03	0.03	0.23	0.58
盐爪爪 *Kalidium foliatum*	1.16	0.13	0.37	0.43
油蒿 *Artemisia ordosica*	0.98	–0.05	0.02	0.9
珍珠 *Salsola passerina*	1.05	0.03	0.13	0.73
相关系数 Correlation coefficient	0.758*	0.759*	0.788**	–0.761*

* 显著相关($P < 0.05$),** 极显著相关($P < 0.01$)。

* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

物水分含量较高的盐爪爪、花花柴 WBI、NDWI、NDII 值高于其他植物,MSI 值小于其他植物种。

冠层水分含量指数与含水率的相关性分析结果显示,4 种植被指数中 WBI、NDWI 值与含水率值显著正相关($P < 0.05$) ,Pearson 相关系数分别为 0.758 和 0.759。MSI 值与含水率值显著负相关($P < 0.05$) ,Pearson 相关系数为 -0.761。NDII 值与含水率值极显著正相关($P < 0.01$) ,Pearson 相关系数为 0.788。可见,4 种冠层水分含量指数与含水率的相关性都达到了显著相关水平,并且 4 种指数中 NDII 与含水率‖之间的相关性略高于其他 3 种指数,对荒漠植被而言,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。

3　讨论与结论

利用便携式光谱分析仪测定了 10 种不同荒漠植物光谱曲线,借助 View SpecPro 光谱数据分析软件、SPSS 以及 Excel 2007 等软件对测定的植物进行了植物光谱特征的分析,并通过相关系数和植被指数对荒漠植物光谱与含水率之间的相关性进行了分析,结果显示: 荒漠植物反射光谱具有绿色植物在可见光 - 近红外波段的普遍特征,有明显的“绿峰”特征和“红边效应”。对荒漠植物冠层光谱反射率与含水率进行相关性分析的结果显示,在 1 440 - 1 462 nm 区间,光谱反射率与含水率相关系数大于 0.8,二者具有很强的线性相关性。这与赵钊等[4] 对古尔班通古特 17 种荒漠植物含水率和反射光谱相关分析的结果基本一致。可以看出,对荒漠植物而言,以 1 450 nm 为中心的叶片水分吸收带是反映荒漠植物含水率变化的最敏感波段。

值得注意的是,本研究过程中,所有荒漠植物光谱是在野外自然条件下测定的,受自然环境及荒漠植被本身稀疏分布的影响,光谱数据受土壤及周围环境强烈影响,存在较大噪音[16-17]。本研究只是对荒漠植物含水率和反射光谱的相关性进行了初步的分析。要客观地对荒漠植物生长及水分状况进行检测,需要进行大量的野外试验与室内光谱数据的对比分析,减少和消除野外光谱观测中非确定性环境因素的干扰,使所测数据能真实反映荒漠植物的波谱特征,这也是需要进一步研究的内容。

参考文献 References:

[1] 周兰萍,魏怀东,丁峰,陈芳,胡小柯. 石羊河流域下游民勤荒漠植物光谱特征分析. 干旱区资源与环境,2013,27(3):121-125.
Zhou L P,Wei H D,Ding F,Chen F,Hu X K. Analysis on spectral reflectance characteristics of desert plants in Minqin Basin of Shiyang River. Journal of Arid Land Resources and Environment,2013,27(3):121-125. (in Chinese)

[2] 童庆禧,张兵,郑兰芬. 高光谱遥感: 原理、技术与应用. 北京: 高等教育出版社,2006.
Tong Q X,Zhang B,Zheng L F. Hyperspectral Remote Sensing: Principle,Technology and Application. Beijing: Higher Education Press,2006. (in Chinese)

[3] 浦瑞良,宫鹏. 高光谱遥感及其应用. 北京: 高等教育出版社,2000.
Pu R L,Gong P. Hyperspectral Remote Sensing and Its Application. Beijing: Higher Education Press,2000. (in Chinese)

[4] 赵钊,李霞,尹业彪,唐金,周生斌. 荒漠植物含水量的光谱特征分析. 光谱学与光谱分析,2010,30(9):2500-2503.
Zhao Z,Li X,Yin Y B,Tang J,Zhou S B. Analysis of spectral features based on water content of desert vegetation. Spectroscopy and Spectral Analysis,2010,30(9):2500-2503. (in Chinese)

[5] 赵钊. 新疆荒漠植物含水率高光谱特征分析. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文,2011.
Zhao Z. Analysis of spectral features based on water content of Xinjiang desert plants. Master Thesis. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2011. (in Chinese)

[6] 王鹏龙,张建明,张春梅,许洺山,王磊. 腾格里沙漠典型植物含水率与地物光谱的关系分析. 中国沙漠,2013,33(3):737-742.
Wang P L,Zhang J M,Zhang C M,Xu M S,Wang L. The relationships between spectral features and water content of the dominat plant species in the Tengger Desert. Journal of Desert Research,2013,33(3):737-742. (in Chinese)

[7] 徐先英,丁国栋,孙保平,赵明,金红喜. 内陆河下游民勤绿洲主要防风固沙植被生态需水量研究. 水土保持学报,2007,21(3):144-148.
Xu X Y,Ding G D,Sun B P,Zhao M,Jin H X. Ecological water requirement of major sand shifting control forests in Minqin Oasis of lower reaches of inland river. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(3):144-148. (in Chinese)

[8] 夏小伟,靳瑰丽,安沙舟,范燕敏,梁娜. 围栏封育下伊犁绢蒿荒漠草地特征植物高光谱特征变化分析. 草业科学,2015,32(6):870-876.
Xia X W,Jin G L,An S Z,Fan Y M,Liang N. Spectral characteristics of typical plants in *Seriphidium transiliense* desert grassland under enclosure. Pratacultural Science,2015,32(6):870-876. (in Chinese)

[9] 万余庆,闫永忠,张凤丽. 延河流域植被光谱特征分析. 国土资源遥感,2001,49(3):15-20.
Wan Y Q,Yan Y Z,Zhang F L. Analyses to spectral character of the vegetation along Yanhe River. Remote Sensing for Land & Resources,2001,49(3):15-20. (in Chinese)

[10] Fuan T,William P. Derivative analysis of hyperspectral data. Remote Sensing of Environment,1998,66(1):41-51.

[11] 王强,易秋香,包安明,赵金. 棉花冠层水分含量估算的高光谱指数研究. 光谱学与光谱分析,2013,33(2):507-512.
Wang Q,Yi Q X,Bao A M,Zhao J. Discussion on hyperspectral index for the estimation of cotton canopy water content. Spectroscopy and Spectral Analysis,2013,33(2):507-512. (in Chinese)

[12] 魏秀红,靳瑰丽,范燕敏,安沙舟,夏小伟. 伊犁绢蒿荒漠草地物种光谱特征分析及识别初探. 草业科学,2016,33(10):1924-1932.
Wei X H,Jin G L,Fan Y M,An S Z,Xia X W. Species analysis and identification of spectral characteristics on *Seriphidium transiliense* desert grassland. Pratacultural Science,2016,33(10):1924-1932. (in Chinese)

[13] 张波,牛婷,房世峰,伍德彦. 荒漠-绿洲交错地带典型植被光谱特征研究,光谱学与光谱分析,2016,36(4):1104-1108.
Zhang B,Niu T,Fang S F,Wu D Y. Research on the spectral characteristic of typical vegetation in desert-oasis crisscross zone. Spectroscopy and Spectral Analysis,2016,36(4):1104-1108. (in Chinese)

[14] 林川,宫兆宁,赵义吉. 叶冠尺度野鸭湖湿地植物群落含水量的高光谱估算模型,生态学报,2011,31(22):6645-6658.
Lin C,Gong Z N,Zhao Y J. Hyperspectral estimation models for plant community water content at both leaf and canopy levels in Wild Duck Lake wetland. Acta Ecologica Sinica,2011,31(22):6645-6658. (in Chinese)

[15] 丁建丽,张飞,塔西甫拉提·特依拜. 塔里木盆地南缘典型植被光谱特征分析. 干旱区资源与环境,2008,22(11):160-165.
Ding J L,Zhang F,Tashpolat Teibai. Research on the spectral character of vegetation in arid area. Journal of Arid Land Resources and Environment,2008,22(11):160-165. (in Chinese)

[16] 程彦林,王正军,洪剑明. 野鸭湖湿地牛鞭草不同覆盖度的光谱特征分析. 首都师范大学学报: 自然科学版,2013,34(6):16-21.
Cheng Y L,Wang Z J,Hong J M. Analysis of spectral characteristics on different coverage of *Hemarthria altissima* in Yeyahu Wetland. Journal of Capital Normal University: Natural Sciences Edition,2013,34(6):16-21. (in Chinese)

[17] 李真真,郑翔,牛德奎,郭晓敏,谢碧裕,张学玲. 武功山山地草甸主要群落类型高光谱特征. 草业科学,2016,33(8):1492-1501.
Li Z Z,Zheng X,Niu D K,Guo X M,Xie B Y,Zhang X L. The study on hyperspectral characteristics of main community types in mountain meadow. Pratacultural Science,2016,33(8):1492-1501. (in Chinese)

[18] 段瑞鲁,刘廷玺,张圣微,段利民,田晶. 科尔沁沙地典型沙丘植被光谱特征数据的匹配. 干旱区研究,2014,31(4):750-755.
Duan R L,Liu T X,Zhang S W,Duan L M,Tian J. Matching of spectral data of typical vegetation on dune in the Horqin Sanddy Land. Arid Zone Research,2014,31(4):750-755. (in Chinese)

[19] 冯先伟,陈曦,包安明,孙莉,王登伟,马亚琴. 水分胁迫条件下棉花生理变化及其高光谱响应分析. 干旱区地理,2004,27(2):250-255.
Feng X W,Chen X,Bao A M,Sun L,Wang D W,Ma Y Q. Analysis on the cotton physiological change and its hyperspectral response under the water stress conditions. Arid Land Geography,2004,27(2):250-255. (in Chinese)

(责任编辑 武艳培)