

水胁迫下典型盐生植被梭梭光谱特征分析

邓来飞^{1,2,3}, 张 飞^{1,2,3*}, 张海威^{1,2,3}, 张贤龙^{1,2,3}, 袁 婕^{1,2,3}

1. 新疆大学资源与环境科学学院智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046
2. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046
3. 中亚地理信息开发利用国家测绘地理信息局工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830002

摘 要 荒漠地区由于气候干燥,降水稀少,水分常成为制约植被生长的因素之一,水分胁迫对植物长势和产量的影响比任何其他胁迫都要大。随着高光谱技术的发展,国内外已有众多学者利用高光谱数据研究植被遭受胁迫作用,然而这些研究对象多集中于甜菜、棉花、玉米、水稻等作物,针对干旱区盐生植被遭受胁迫作用的研究较少。梭梭作为荒漠、半荒漠地区的典型盐生植被之一,具有极高的经济和生态效益。选择梭梭作为研究对象,培育一年生梭梭,并设置三个水分梯度,形成受不同水分胁迫的梭梭。使用原始光谱、红边位置参数,结合植被指数及二维相关光谱研究其叶片光谱特征,为干旱区利用高光谱遥感监测盐生植被提供借鉴。结果表明:(1)分析梭梭叶片反射光谱曲线发现,在可见光至中红外各波段范围内,受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率有显著差异。在可见光(350~610 nm)波段,各水分处理的梭梭叶片反射率依次为 100 mL>500 mL>200 mL,这是由于100和200 mL水分促进梭梭内部叶绿素合成,使该波段反射率降低,而过多的水分(500 mL)对梭梭内部的叶绿素合成没有更大的促进作用。在红光区(611~738 nm),随着水分量的增多,受不同水分胁迫的梭梭叶片光谱反射率依次减小。在738~1 181和1 228~1 296 nm波段,受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率为:200 mL>100 mL>500 mL;在1 182~1 227 nm波段,受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率为:100 mL>200 mL>500 mL。这是由于植被细胞结构对近红外区域的反射率影响较大,因而受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率有显著差异。在1 300~1 365和1 392~1 800 nm波段,受各水分胁迫作用的梭梭叶片反射率为:100 mL>200 mL>500 mL。这表明在500 mL水分胁迫量范围内,水分越多,叶子的细胞液、细胞膜对水分的吸收能力越强,使得反射率下降。通过对原始光谱求取一阶导数并提取红边位置参数发现,各水分处理下的梭梭叶片一阶微分光谱曲线中红边位置未发生移动。这是由于梭梭在长期的干旱环境影响下,形成了特殊的适应机制,水分对其红边位置影响不敏感。(2)选取若干植被指数分析各水分处理下的梭梭光谱指数变化。当水分胁迫量由100 mL增至200 mL时,WI/NDWI,MSI和NDII指数值变化显著,可用于研究水分胁迫下梭梭的光谱特征。(3)使用二维相关光谱技术分析受各水分胁迫作用的梭梭光谱特征,得出在100 mL水分胁迫下,在536,643,1 219和1 653 nm波段处,吸收峰对水分的微扰敏感;在200 mL水分胁迫下,在846和1 083 nm波段处,吸收峰对水分的微扰敏感;在500 mL水分胁迫下,在835和1 067 nm波段处,吸收峰对水分的微扰敏感。总之,在近红外波段,与100 mL水分量相比,梭梭受200和500 mL水分胁迫时,吸收峰对水分的微扰敏感度上升。由100 mL水分胁迫下梭梭的二维同步相关谱图可知,1 044和1 665 nm,1 072和903 nm,903和1 264 nm,1 230和1 061 nm波段处形成正交叉峰,表明这些波段处光谱强度随水分的干扰同时变化。

关键词 梭梭;水分胁迫;红边位置;二维相关光谱;光谱指数

中图分类号: S718.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)01-0210-06

收稿日期:2017-12-21,修订日期:2018-04-19

基金项目:国家自然科学基金项目(新疆联合基金本地优秀青年人才培养专项)(U1503302),自治区科技人才培养项目(“万人计划”后备人选培养项目)(QN2016JQ0041),新疆维吾尔自治区天山英才项目(400070010209)资助

作者简介:邓来飞,女,1991年生,新疆大学资源与环境科学学院硕士研究生 e-mail:serenity_dlf@163.com

* 通讯联系人 e-mail:zhangfei3s@163.com

引 言

水分含量是制约植被长势和产量的重要因子之一，因此，实时准确地监测植物水分，施行合理灌溉，既对缓解水量短缺，提高其利用率，又对提高植物存活率有重要意义，对于旱区生态环境治理尤为重要。

随着高光谱技术的发展，国内外已有众多学者使用高光谱数据研究植物生长、发育状况，评估作物产量，并用于研究其遭受胁迫作用。Salah 和 Waleed^[1] 等使用光谱指数研究盐分和水分胁迫下玉米的水分状况、生物量和产量，发现高光谱被动反射传感器的指数模型 $(R_{970} - R_{900}) / (R_{970} + R_{900})$ 能很好的预测玉米产量和冠层水分含量。Genc^[2] 利用不同波段的冠层反射率识别水分胁迫下的甜玉米，发现 GNDVI 指数是识别水分胁迫的最好指数。Wang^[3] 发现 NDWI 指数和叶片水分含量有很好的相关性，并发现春小麦在 780 和 1 750 nm 窄波段区对水分参数敏感。蒋金豹等选择若干植被指数来识别水浸胁迫下的玉米、甜菜。徐道青^[4] 等通过对叶绿素含量与光谱特征参数进行数学分析，并构建了可用于监测淹水胁迫下棉花单叶叶绿素含量的估测模型。然而，这些研究对象多集中于甜菜、棉花、玉米、水稻等作物，针对干旱区盐生植被遭受胁迫作用的研究较少，本文选取干旱区典型植被梭梭进行水分胁迫试验。研究不同水分胁迫下梭梭叶片光谱特征，为干旱区利用高光谱遥感监测盐生植被提供借鉴。

1 实验部分

1.1 实验设计

在学校实验场区进行实验，共设计三个水处理等级 100、200 和 500 mL，15 个重复。梭梭幼苗株高 10 cm，于 2017 年 5 月栽种于口径一致的花盆中。供试土壤为砾石和珍珠岩，以确保土壤中无其他营养物质。培养期间，各样本均放置在温室中，保持光照一致，营养液为 Hoagland (Hoagland 配方：硝酸钾、四水硝酸钙、硫酸二氢钾、铁盐溶液、七水硫酸镁、微量元素液，营养液含有植物生长必需的营养元素)。植株长至较茂盛时，停止浇灌营养液，开始水分胁迫试验。7 月 20 日每个植株浇 100 mL 去离子水，5 d 后测量每个植株的光谱曲线；测量后每个植株浇 200 mL 去离子水，7 月 30 日测量每个植株的光谱曲线；测量后每个植株浇 500 mL 去离子水，8 月 4 日测量每个植株的光谱曲线。

1.2 数据采集

采用便携式地物光谱仪 (Field Spec Hi Res, ASD, 美国) 测量受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率，该光谱仪光谱测量范围为 350~2 500 nm，光谱分辨率 3 nm，采样间隔 1 nm。在晴朗无风的天气进行测量，时间为 10:00—14:00。测量前用白板定标，仪器距样点上方 5 cm，对每个植株测定 5 个样点，每个样点获取 5 条光谱曲线。分别求取受各水分胁迫的梭梭叶片光谱反射率的均值，得到 3 个水分梯度的梭梭反射光谱曲线。由于均值处理后的光谱数据在

1 366~1 391 nm 波段存在大量噪声，在本文中剔除了该波段。

1.3 “红边位置”参数

红边效应是由于植被对红光吸收作用较强以及对近红外光的反射作用较强形成的，因而在 660~780 nm 区域反射率陡然上升，是植物光谱的显著标志^[5]。本研究中，通过对实测光谱数据求取一阶微分，并提取红光区域一阶导数光谱最大值对应的波长，得到红边位置。

1.4 高光谱植被指数

植被指数法常被用于估算植被含水量^[6]。本文挑选了一些与植被水分含量相关性较好的光谱指数 (表 1)，分析受不同水分胁迫的梭梭的光谱指数值变化趋势，识别不同水分量的梭梭。

表 1 不同类型的植被水分指数

Table 1 Different types of vegetation water indices

光谱指数	计算公式	文献
归一化水分指数 (NDWI)	$(R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	[7]
水分波段指数 (WBD)	R_{950} / R_{900}	[8]
水分指数 (WI)	R_{900} / R_{970}	[9]
比值指数 (WI/NDWI)	$R_{900} / R_{970} / (R_{860} - R_{1240}) / (R_{860} + R_{1240})$	[10]
归一化红外指数 (NDII)	$(R_{819} - R_{1649}) / (R_{819} + R_{1649})$	[11]
水分胁迫指数 (MSI)	R_{1600} / R_{820}	[12]

1.5 二维相关光谱

二维相关光谱是通过将光谱进行数学分析而将光谱信号扩展到第二维上，能够识别一维光谱中难以被分辨的小峰、重叠峰，从而增强谱图的识别能力。对实验获得的一维光谱数据利用 2D-shige 软件处理得到二维相关谱图。

2 结果与讨论

2.1 各水分胁迫下梭梭的光谱特征分析

植被不同波段的反射率与其化学组成、形态结构有直接关系，与其自身发育、健康状况密切相关，同时受叶面积大小、叶绿素含量、叶片内细胞结构、叶片含水量的影响^[13]。如图 1 所示，受各水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率在各波段有显著差异。在可见光 350~610 nm 波段，梭梭叶片光谱反射率为：100 mL > 500 mL > 200 mL，100 和 200 mL 水分促进梭梭内部生成叶绿素，该波段区域反射率降低，而过多的水分 (500 mL) 对梭梭生成叶绿素没有更大的促进作用。在红光区 (611~738 nm)，随着水分量的增多，光谱反射率减小。

700~800 nm 波段反射率大大增加，形成反射陡坡。在 738~1 181 和 1 228~1 296 nm 波段，各水分处理的梭梭叶片光谱反射率为：200 mL > 100 mL > 500 mL；在 1 182~1 227 nm 波段，各水分处理的梭梭叶片光谱反射率为：100 mL > 200 mL > 500 mL。这是由于植被细胞结构对近红外区域的反射率影响较大，因而受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率有显著差异。

在 1 300~1 365 和 1 392~1 800 nm 波段,各水分胁迫的梭梭叶片反射率为:100 mL>200 mL>500 mL。这表明在 500 mL 水分胁迫量范围内,水分越多,叶子的细胞液、细胞膜对水分的吸收能力越强,使得光谱反射率下降。

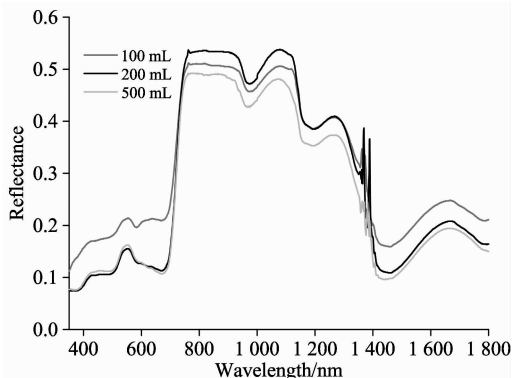


图 1 受各水分胁迫作用的梭梭叶片反射波谱曲线

Fig. 1 Leaf-reflectance spectra of *Haloxylon ammodendron* under different water stress

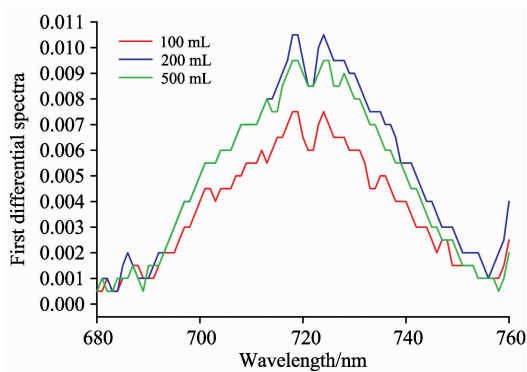


图 2 受各水分胁迫作用的梭梭叶片一阶导数光谱曲线

Fig. 2 First order differential spectral curves of *Haloxylon ammodendron* leaf under different water stress

红边位置可指示植物是否遭受胁迫作用,当植被遭受胁迫时,其红边位置会发生蓝移。如图 2,在 690~713 nm 波段范围,200 与 500 mL 水分处理的梭梭叶片光谱一阶微分值相同。三条曲线均出现两个反射高峰,并且反射高峰(即红边位置)均位于 718~725 nm 波段范围内,红边位置没有发生移动。这是由于梭梭在长期的干旱环境影响下,形成了特殊的适应机制,水分对其红边位置影响不敏感。

2.2 各水分胁迫下梭梭的光谱指数分析

图 3 为受各水分胁迫作用的梭梭植被指数值的变化。随着土壤中加入水分含量的增多,NDWI, WBI 和 WI 指数变化微弱,极不明显,说明 NDWI, WBI 和 WI 指数对研究受水分影响的盐生植被光谱特征,没有显著性作用。加入土壤中的水分含量由 100 mL 增至 200 mL 时,NDII, MSI 和 WI/NDWI 指数值变化明显,因而可以用来研究受 100~200 mL 水分影响的盐生植被光谱特征。加入土壤中的水分含量由 200 mL 增至 500 mL 时,NDII, MSI 和 WI/NDWI 指数值变化微弱,NDII, MSI 和 WI/NDWI 指数对研究受 200~500

mL 水分影响的盐生植被光谱特征没有显著性作用。

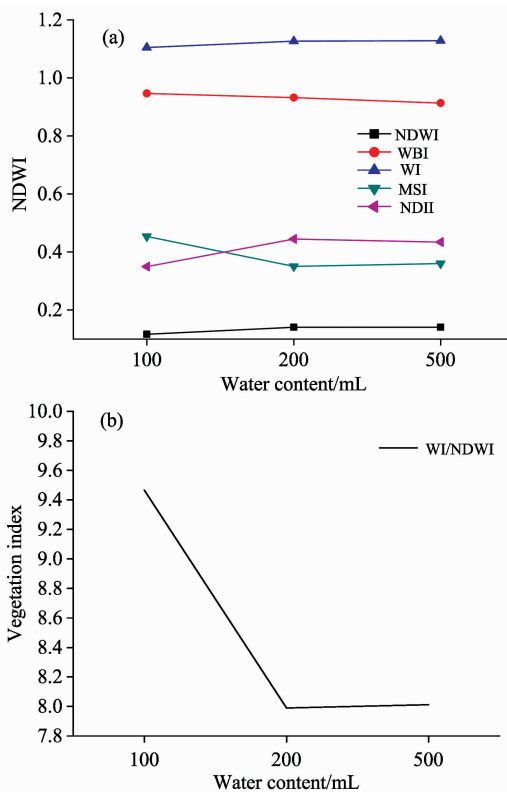


图 3 受各水分胁迫作用的梭梭植被指数值

Fig. 3 Vegetation index of *Haloxylon ammodendron* under different water stress

2.3 各水分胁迫下梭梭的二维相关光谱分析

100 mL 水分胁迫下梭梭的二维相关光谱如图 4 所示。在二维同步相关谱图中有 4 个较弱的自动峰,分别在 536 nm (其二维相关系数 corr=0.003 707)、643 nm(其二维相关系数 corr=0.004 015)、1 219 nm(其二维相关系数 corr=0.005 375)和 1 653 nm(其二维相关系数 corr=0.002 917)处,说明在这四个波段处,吸收峰对水分的微扰敏感。同步谱图中,1 044 和 1 665 nm, 1 072 和 903 nm, 903 和 1 264 nm, 1 230 和 1 061 nm 波段处形成正交叉峰,其中 1 072 和 903 nm 处交叉峰最强,说明 1 044 和 1 665 nm, 1 072 和 903 nm, 903 和 1 264 nm, 1 230 和 1 061 nm 波段,光谱吸收强度随水分干扰同时变化。异步谱中,灰色阴影部分表示负峰,白色无阴影部分表示正峰。异步谱中正峰与负峰比较清晰,这表明对比于传统的光谱反射率曲线,二维相关光谱分析方法可以提高图谱分辨率。

200 mL 水分胁迫下梭梭的二维相关光谱如图 5 所示。同步相关图谱中有 2 个较强的自动峰,分别在 846 和 1 083 nm 处,并且强度都相同(其二维相关系数 corr=0.014 42),说明在这两个波段处,吸收峰对水分的微扰敏感。846 和 1 083 nm 位置出现明显的负相关峰,说明在 846 和 1 083 nm 处,吸收峰来源于不同的官能团。异步谱中,灰色阴影部分表示负峰,白色无阴影部分表示正峰。异步谱中正峰和负峰呈对称分布,表明该水分下梭梭内部不同基团之间可能存在

相互作用。

500 mL 水分胁迫下梭梭的二维相关光谱如图 6 所示。同步相关图谱中有两个较强的自动峰，分别在 835 和 1 067 nm 处，并且强度都相同(其二维相关系数 $\text{corr}=0.013\ 56$)，

说明在这两个波段处，吸收峰对水分的微扰敏感。异步谱中，灰色阴影部分表示负峰，白色无阴影部分表示正峰。异步谱中正峰和负峰呈对称分布，表明该水分下梭梭内部不同基因之间可能存在相互作用。总之，梭梭因受不同水分胁迫

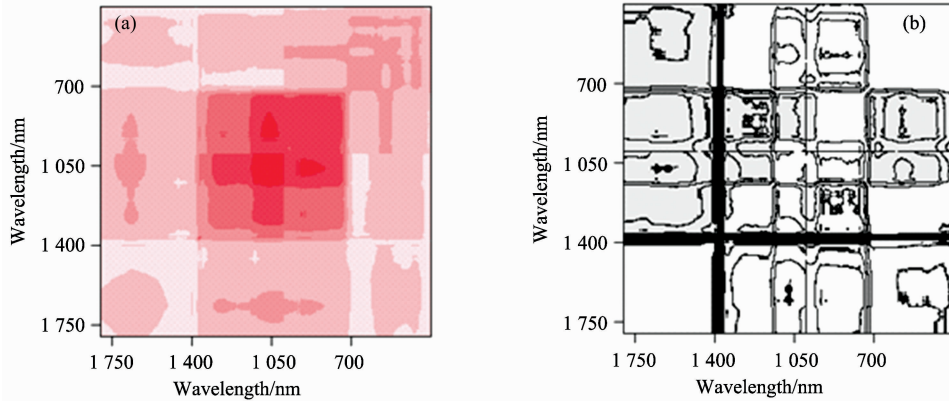


图 4 100 mL 水分胁迫下梭梭在 350~1 800 nm 波段内的二维同步相关和异步相关光谱

Fig. 4 The two dimensional synchronous correlation and asynchronous correlation spectra of *Haloxylon ammodendron* in 350~1 800 nm wavebands under 100 mL water stress

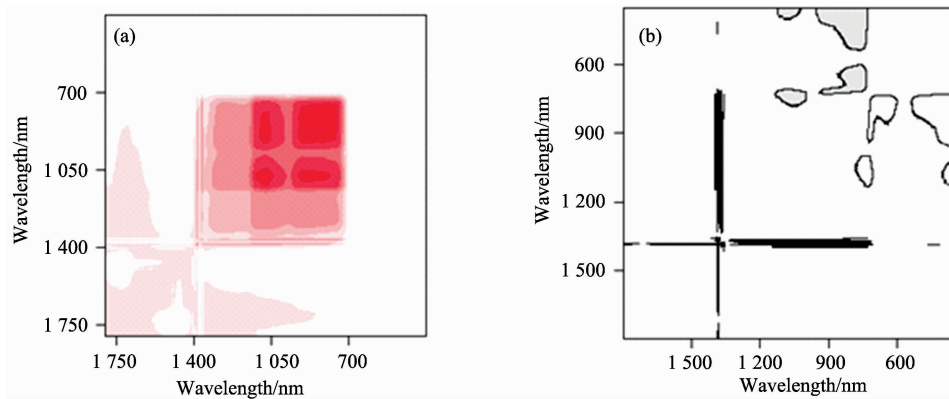


图 5 200 mL 水分胁迫下梭梭在 350~1 800 nm 波段内的二维同步相关和异步相关光谱

Fig. 5 The two dimensional synchronous correlation and asynchronous correlation spectra of *Haloxylon ammodendron* in 350~1 800 nm wavebands under 200 mL water stress

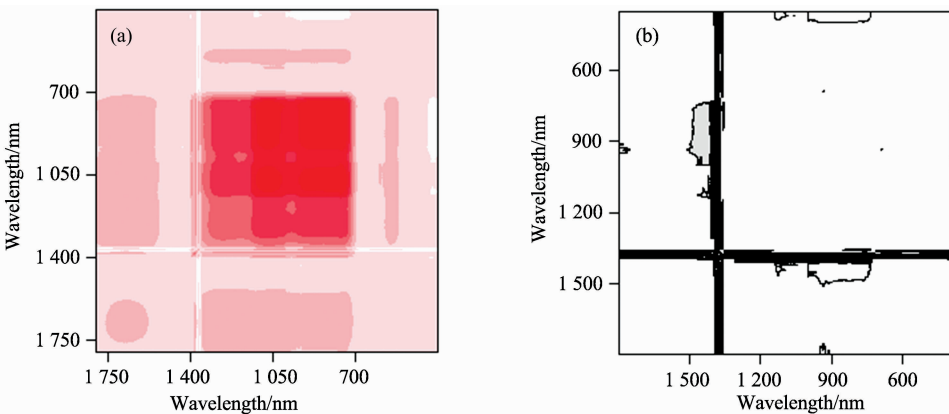


图 6 500 mL 水分胁迫下梭梭在 350~1 800 nm 波段内的二维同步相关和异步相关光谱

Fig. 6 The two dimensional synchronous correlation and asynchronous correlation spectra of *Haloxylon ammodendron* in 350~1 800 nm wavebands under 500 mL water stress

作用,其二维相关光谱图有明显差异。与 100 mL 水分量相比,梭梭受 200 和 500 mL 水分胁迫作用时,在近红外波段,吸收峰对水分的微扰敏感度上升。

3 结 论

对受不同水分胁迫作用的梭梭的叶片光谱反射率和红边位置参数分别进行比较,同时使用植被指数及二维相关光谱进行了分析,结果表明:

(1)在可见光至长波近红外各波段范围,受不同水分胁迫作用的梭梭叶片光谱反射率差异显著。梭梭是干旱区典型

盐生植被,在本实验条件下,水分对其红边位置影响不敏感。

(2)分析受不同水分胁迫的梭梭叶片光谱指数变化发现,当水分由 100 mL 增至 200 mL 时,WI/NDWI,MSI 和 NDII 指数值变化显著,可用于研究水分胁迫下梭梭的光谱特征。

(3)使用二维相关光谱技术分析受各水分胁迫作用的梭梭光谱特征,得出在 100 mL 水分胁迫下,在 536,643,1 219 和 1 653 nm 波段处,吸收峰对水分的微扰敏感;在 200 mL 水分胁迫下,在 846 和 1 083 nm 波段处,吸收峰对水分的微扰敏感;在 500 mL 水分胁迫下,在 835 和 1 067 nm 波段处,吸收峰对水分的微扰敏感。

References

- [1] Salah Elsayed, Waleed Darwish. *Bragantia*, 2017, 76(1): 62.
- [2] Genç L, Inalpulat M, Kızıl U, et al. *Zemdirbyste-Agriculture*, 2013, 100(1): 81.
- [3] Wang X, Zhao C, Guo N, et al. *Spectroscopy Letters*, 2015, 48(7): 492.
- [4] XU Dao-qing, LIU Xiao-ling, WANG Wei, et al(徐道青, 刘小玲, 王 维, 等). *Chinese Journal of Applied Ecology(应用生态学报)*, 2017, 28(10): 3289.
- [5] YAO Fu-qi, CAI Huan-jie, LI Ya-long, et al(姚付启, 蔡焕杰, 李亚龙, 等). *China Rural Water and Hydropower(中国农村水利水电)*, 2015, (3): 84.
- [6] SHA Sha, HU Die, WANG Li-juan, et al(沙 莎, 胡 蝶, 王丽娟, 等). *Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用)*, 2016, 31(3): 558.
- [7] Gao B C. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58(3): 257.
- [8] Riedell W E, Blackmer T M. *Crop Science*, 1999, 39(6): 1835.
- [9] Penuelas J, Filella I, Biel C, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 1993, 14(10): 1887.
- [10] Penuelas J, Pinol J, Ogaya R, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2869.
- [11] Penuelas J, Llusia J, Pinol J, et al. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(13): 2863.
- [12] Erjr H, Rock B N. *Remote Sensing of Environment*, 1989, 30(1): 43.
- [13] LI Xin-hui, ZHANG Xiu-ying, MA Yuan-dan, et al(李新会, 张秀英, 马元丹, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(6): 1872.

Analysis of the Spectral Characteristics of *Haloxylon Ammodendron* under Water Stress

DENG Lai-fei^{1, 2, 3}, ZHANG Fei^{1, 2, 3*}, ZHANG Hai-wei^{1, 2, 3}, ZHANG Xian-long^{1, 2, 3}, YUAN Jie^{1, 2, 3}

1. Key Laboratory of Smart City and Environmental Modeling of Higher Education Institute, College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China
3. Engineering Research Center of Central Asia Geoinformation Development and Utilization, National Administration of Surveying, Mapping and Geoinformation, Urumqi 830002, China

Abstract Due to the dry climate and scarce precipitation in desert areas, water content is one of the factors that restrict the growth of vegetation. The stress factors include ozone stress, salt stress, and water stress involving terrestrial and aquatic plants. Water stress has a greater effect on plant growth and yield than any other stress. Along with the development of hyperspectral remote sensing technology, there have been many scholars at home and abroad who have been using hyperspectral data to study the effects of stress on vegetation. However, these research objects mainly focused on beet, cotton, corn, rice and other crops. There are few studies on the stress of saline vegetation in arid areas. *Haloxylon* is one of the typical halophytic vegetation in desert and semi-desert area, which is also known as *Haloxylon ammodendron*. It belongs to Chenopodiaceae, shrub or small tree, widely distributed in the desert and semi-desert regions. The plants's root is well developed. It has a great effect on

breaking wind and fixing sands and has the characteristics of salinity tolerance, drought resistance and so on, which has extremely high ecological value and economic value. In this paper, we selected the *Haloxylon ammodendron* as the research object. We developed the annual *Haloxylon ammodendron*, and set three water gradients, forming the plant with different water stress. The spectral characteristics of leaves were studied by using the original spectra, the red-edge position, combined with vegetation index and two-dimensional correlation spectra. This provides reference for using hyperspectral remote sensing to monitor saline vegetation in arid area. The results showed that: (1) By analyzing the leaf reflectance of *Haloxylon ammodendron* under different water treatment, we have found that: with in the range of visible to mid-infrared bands, *Haloxylon ammodendron*'s leaf spectral reflectance of different water stress was significantly different. In the visible region (350~610 nm), the leaf reflectance of *Haloxylon ammodendron* under various water stress was 100 mL>500 mL>200 mL. This was because of the fact that the water content of 100 mL and 200 mL promoted the synthesis of chlorophyll of this plant, which leads to the decrease of reflectance in these wavebands. However, too much water (500 mL) had no greater effects on the chlorophyll synthesis of this plant. In the red light region (611~738 nm), the leaf spectral reflectivity of *Haloxylon ammodendron* under different water stress decreased in turn as water content increased. In 738~1 181 and 1 228~1 296 nm wavebands, the leaf spectral reflectance of *Haloxylon ammodendron* under various water stress was 200 mL>100 mL>500 mL. In 1 182~1 227 nm wavebands, the leaf spectral reflectance of *Haloxylon ammodendron* under various water stress was 100 mL>200 mL>500 mL. This was because of the fact that the leaf spectral reflectance in the near-infrared region is mainly affected by the cell structure of leaf. It leads to the difference of leaf spectral reflectance of *Haloxylon ammodendron* under different water treatment. In the mid-infrared bands of 1 300~1 365 and 1 392~1 800 nm, the leaf spectral reflectance of *Haloxylon ammodendron* under various water stress was 100 mL>200 mL>500 mL. This indicates that, within the water content of 500 mL, the more water content was, the stronger the water absorption capacity of cell sap and cell membrane of leaves was. Thus the leaf reflectance decreased. By calculating the first derivative of the original spectrum and extracting the red edge position parameters, it was found that the red-edge position of the plant under different water treatment did not shift. This was because of that fact that *Haloxylon ammodendron* formed a special environmental adaptation mechanism under the influence of long-term drought stress. Water is insensitive to its red-edge position. (2) We selected several vegetation indices to analyze the changes of *Haloxylon ammodendron*'s leaf spectral indices under different water treatment and found that: when water content increased from 100 mL to 200 mL, WI/NDWI, MSI and NDII indices changed significantly, which can be used to study the spectral characteristics of *Haloxylon ammodendron* under the influence of water content. (3) The spectral characteristics of *Haloxylon ammodendron* treated by different water stress were analyzed by two-dimensional correlation spectra. We concluded that: when water treatment was 100 mL, at the bands of 536, 643, 1 219 and 1 653 nm, the absorption peaks were sensitive to the water perturbation. When water treatment was 200 mL, at the bands of 846 and 1 083 nm, the absorption peaks were sensitive to the water perturbation. When water treatment was 500 mL, in the bands of 835 and 1 067 nm, the absorption peaks were sensitive to the water perturbation. In conclusion, in the near-infrared bands, the sensitivity of the absorption peaks to the water perturbation increased when *Haloxylon* was stressed by 200 and 500 mL water content compared with 100 mL water content. The two-dimensional synchronous correlation spectra of *Haloxylon ammodendron* under the water treatment of 100 mL water content revealed that the positive cross-peaks were formed at 1 044 and 1 665 nm bands, 1 072 and 903 nm bands, 903 and 1 264 nm bands, 1 230 and 1 061 nm bands, which indicating that the spectral intensity of these bands changed simultaneously with the disturbance of water.

Keywords *Haloxylon ammodendron*; Water stress; Red edge position; Two-dimensional correlation spectra; Spectral index

(Received Dec. 21, 2017; accepted Apr. 19, 2018)

* Corresponding author