

龟裂碱土对植被冠层光谱特征及长势预测的影响

张俊华¹, 贾科利², 李明¹

(1. 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 银川 750021; 2. 宁夏大学资源环境学院, 银川 750021)

摘要: 为了通过统一土壤背景来量化龟裂碱土对其上覆植被冠层光谱的影响, 通过野外原位测定, 系统分析了龟裂碱土上覆植被在自然和覆盖条件下5个典型生育期冠层光谱特征、光谱反射率与叶片叶绿素值和叶面积指数(leaf area index, LAI)之间的关系, 进而建立了不同条件下2个生理指标的预测模型。结果表明: 覆盖条件下向日葵三对叶期冠层光谱反射率较自然条件下在400~520和1027~1130 nm平均降低了0.10, 在521~1026 nm平均降低了0.18; 其他生育期覆盖条件下冠层光谱反射率较自然条件下在可见光波段下降, 在近红外区域增加(其中七对叶期在720~1050 nm平均增幅为11.29%)。自然条件下三对叶期冠层光谱反射率与叶绿素值和LAI平均相关系数分别为0.68和0.47, 开花期、乳熟期光谱反射率与叶绿素值和LAI与三对叶期相关性相似; 其他2个生育期冠层光谱反射率自然条件下在可见光波段与2个生理指标平均相关系数分别为-0.27和-0.52, 在近红外区域分别为0.53和0.69, 覆盖条件下相关系数明显高于自然条件。三对叶期建立的叶片叶绿素值和LAI预测方程决定系数最小, 现蕾期最大。除三对叶期外, 其他时期对2个生理指标的预测模型的拟合度都较高(R_{SPAD} 为0.61~0.88, R_{LAI} 为0.72~0.92), 预测能力也较强; 引入土壤pH值可以增强模型的稳定性和预测能力。研究结果可为该地区龟裂碱土上覆植被长势估测提供理论依据。

关键词: 植被, 光谱分析, 生长, 龟裂碱土, 叶绿素值, 叶面积指数(LAI), 预测

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.019

中图分类号: S143

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0147-09

张俊华, 贾科利, 李明. 龟裂碱土对植被冠层光谱特征及长势预测的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 147-155.

Zhang Junhua, Jia Keli, Li Ming. Effect of takyrs solonchets on vegetation canopy spectral characteristics and growth prediction [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 147-155. (in Chinese with English abstract)

0 引言

植物光谱特性是植物生长过程中与环境因子(包括生物因子和非生物因子)相互作用的综合光谱信息。由于冠层光谱易受土壤背景、传感器、外界条件、植物自身条件等制约, 往往会对所建模型稳定性和可靠性产生影响^[1]。因此, 为了建立普适性强且精度较高的植物生理指标预测模型, 关键是减弱或消除相关噪声干扰。Vincini^[2]、Lausch^[3]、朱西存^[4]定量研究了太阳反射和辐射的外界条件、探测时间、探测高度等对光谱产生的影响, Guan & Nutter^[5]、Ghulam^[6]、史梦竹^[7]研究发现植物叶片湿度对可见光波段反射率影响较大, 对近红外波段影响则不显著^[5-7]。邹维娜^[8]认为在利用光谱信息反演沉水植物盖度时, 必须考虑冠层水深的影响。

此外, 冠层水深和水体环境中叶绿素、悬浮物浓度等因素会影响沉水植物生物物理参数反演的准确性^[9]。不同胁迫条件下作物冠层光谱反射率变化也不尽相同。病虫害胁迫下作物光谱在近红外反射率明显降低, 作物冠层光谱指数下降^[10-11]。重金属胁迫下水稻冠层光谱反射率在可见光和近红外波段均有增加^[12]。盐碱地是遥感技术研究的重要对象之一^[13-14]。许多学者就土壤盐渍化特征及其与地物光谱的关系、去除土壤水分等噪音的盐土光谱特征、不同测量环境下碱化土壤波谱相互转换的条件和规律等都做了较深入的研究^[15-18]。

龟裂碱土是在荒漠草原条件下经过盐土脱盐和水蚀风蚀作用而形成的碱化土壤, 主要分布于宁夏银川平原、新疆和内蒙古河套平原的西部^[19]。宁夏银川平原龟裂碱土面积约有438 km², 在轻度和中度盐碱地上种植油用向日葵是当地农民提高经济收入的重要途径。目前关于养分胁迫下作物冠层光谱研究较多^[20-22], 但对作物在盐碱胁迫下冠层光谱特征方面的研究较

收稿日期: 2013-01-20 修订日期: 2013-05-30

基金项目: 国家自然科学基金(41001129)

作者简介: 张俊华(1977-), 女, 宁夏中卫人, 博士, 副研究员, 主要从事精准农业与土壤质量研究。银川 宁夏大学新技术应用研究开发中心, 750021。Email: zhangjunhua728@163.com

少^[23-24],特别是消除或减弱土壤背景影响后龟裂碱土上覆植被冠层光谱特征研究在国内外还鲜见报道。本试验通过统一土壤背景以不同碱化程度龟裂碱土上生长的油用向日葵为研究对象,研究其不同生育期叶绿素值、叶面积指数(LAI)、冠层光谱特征变化规律,探讨在自然和覆盖条件下冠层光谱反射率与叶片叶绿素值、LAI的相关性,明确不同碱化程度条件下上覆植被冠层光谱能否准确估测向日葵长势,然后基于冠层光谱和叶片叶绿素值、LAI的预测模型,以期为该地区龟裂碱土上覆植被长势估测提供理论依据。

表 1 试验地土壤基本理化性状
Table 1 Soil properties of experiment field

土壤碱化程度 Degree of soil salinization	pH 值 pH value	全盐 Total saline /(g kg ⁻¹)	碱化度 ESP/%	有机质 Organic matter /(g kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g kg ⁻¹)	碱解氮 Available N /(mg kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg kg ⁻¹)
轻度 Slightly	8.41	1.26	14.79	8.03	0.61	0.57	14.80	29.02	9.49	153.55
中度 Moderately	9.14	1.40	34.60	8.02	0.55	0.61	14.71	37.33	8.80	111.88
重度 Strongly	9.98	2.56	52.95	7.85	0.42	0.69	15.61	40.97	9.29	181.79

1.2 光谱数据及其他指标的测定

土壤表层光谱采用美国 Unispec-SC 单通道便携式光谱仪,探测波段为 310~1 130 nm,分辨率<10 nm,绝对精度<0.3 nm。测定时分别在轻度、中度和重度龟裂碱土 3 个处理中选择能代表该处理作物长势的连续向日葵植株 2 处,每处 10 株(即每个处理共 20 株),先在自然状态下测定冠层光谱,后用黑布沿向日葵行间距在植株两侧各平铺一块黑布,将土壤全部覆盖,再测定植株的冠层光谱。测定时光谱仪探头设置在距离植株上方 0.50 m 处,视角为 8°。光谱测定时间为 10:00~14:00,天气状况良好,晴朗无云,风力较小,光谱仪垂直向下。每个植株重复测定 5 次,取平均值作为此植株的光谱反射值。测定过程中,在每次观测前进行标准白板校正。测量中将每个处理的 20 株样品植株做标记,每个生育期都测定相同的植株。每次光谱测定结束后用 SPAD-502 测定样品植株的叶绿素值,每株向日葵测定最上部 5 片展开叶的中部(避开叶脉),每片叶测定 6 个点,最后求平均值作为该植株叶绿素值。用尺子测定绿色叶片的长和宽,计算出其 LAI。分别在三对叶、七对叶、现蕾期、开花期和乳熟期测定向日葵冠层光谱、叶绿素值和 LAI。每个生育期在各处理地块内采用“S”形取样法采集表层土壤样品(0~20 cm),在室内测定土壤 pH 值(酸度计法)。

1.3 预测模型的建立与验证

将 60 个样本分 2 部分,随即取 40 个样本用于建模,20 个样本用于验证模型性能。利用向日葵冠

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地处宁夏回族自治区平罗县西大滩(106°24'E, 38°50'N),年降水量约为 150~203 mm,年蒸发量 1 755.1 mm 以上。该地区位于宁夏贺兰山东麓洪积扇和平原之间,因地形低洼,排水条件很差,是一个水分与盐分汇集的地区,故地下水位高,矿化度大,形成了大面积盐碱土,其中大部分属于龟裂碱土。本试验选择轻度、中度和重度龟裂碱土上生长的油用向日葵为研究对象,土壤基本理化性状如表 1 所示。

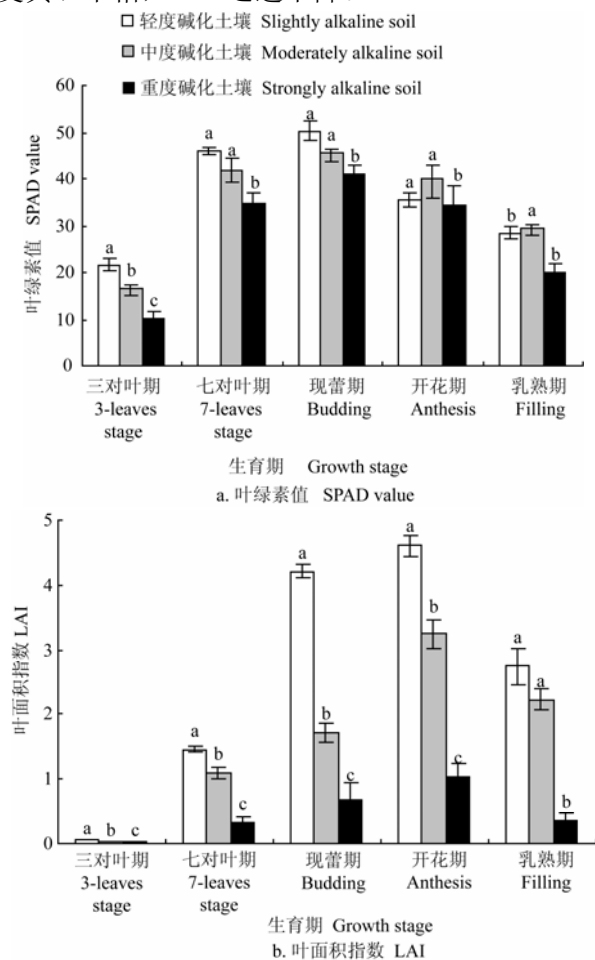
层反射光谱,采用多项式、指数函数、幂函数等方法建模预测叶片叶绿素值和 LAI,选择拟合度最大的方程为预测模型;引入土壤 pH 值后采用 SAS 中全回归方法构建基于植被冠层归一化植被指数(normalized difference vegetative index, NDVI)和土壤 pH 值的修正模型^[25]。模型的稳定性用决定系数 R^2 检验,决定系数越大,模型越稳定;模型的预测能力用验证样本的拟合度 R^2 以及总均方根差 RMSE 来检验,拟合度越大,总均方根差越小,模型预测能力越强。

2 结果与分析

2.1 不同生育期向日葵生理参数的变化

碱胁迫主要致害因素是渗透胁迫、离子毒害和高 pH 值胁迫^[26]。当植物遭受盐碱胁迫时,其外部形态和生理效应都将发生变化。从图 1a 可以看出,随着向日葵生育进程的推进,植株叶绿素值呈增加趋势,到现蕾期达到最大值,而后开始下降。不同程度碱化土壤上的植株在三对叶期叶绿素值呈显著差异($p<0.05$),七对叶期轻度和中度 2 个处理间未达显著差异,但二者与重度碱化土壤上植株呈显著差异;开花期和乳熟期中度碱化土壤上植株叶绿素值高于轻度碱化土壤上植株(前者不显著,后者显著);重度碱化土壤上的植株整个生育期叶绿素值均显著低于前 2 种土壤上植株。从图 1b 中可看出, LAI 与叶绿素值变化趋势相似:不同碱化土壤上向日葵植株 LAI 随着生育期的推进不断增加,到开花期达到最大值,

而后呈下降趋势。与叶绿素值变化不同的是, 叶绿素值在现蕾期达到最大值, 而开花期 LAI 达到最大。主要是叶片内有机物向花盘内转化, 花盘直径不断增大, 盛花期到乳熟期植株下部叶片开始衰老逐渐变为黄绿色至褐色, 作物群体光合面积减小, 植株 LAI 下降。重度碱化土壤上的植株由于受盐碱胁迫严重, 出现早衰现象, 叶片提前变黄、干枯, LAI 迅速下降。



注: 图中相同时期不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

Note: Different letters at the same growth stage represent significant difference ($p < 0.05$).

图 1 向日葵不同生育期叶片叶绿素值和叶面积指数变化

Fig.1 Variations of SPAD value and LAI in summer maize under different growth stages

2.2 龟裂碱土上覆植被冠层光谱特征

从图 2a 可见, 龟裂碱土上向日葵冠层光谱特征与一般绿色植物的光谱特征相似, 在 550 nm 左右处形成一个反射峰, 由于可见光波段冠层光谱反射率主要受叶绿素 a、b、类胡萝卜素和叶黄素含量的影响, 从 680~760 nm 反射率迅速增大, 在 760~1 080 nm 形成一个反射平台, 到开花期反射率达到最大值, 主要是叶片细胞栅栏组织和叶肉海绵组织迅速增长, 植株生物量和叶绿素含量不断增加, LAI 增大, 群体光合能力增强, 冠层光谱反射率在近红

外区域 720~1100 nm 逐渐增高; 并且盛花期向日葵花盘呈金黄色, 其舌状花主要含类黄酮化合物, 这类化合物由于分子中含有 2 个苯环并分别与羰基形成交叉共轭体系^[27], 因此该时期冠层光谱反射率在整个研究波段都较高, 尤其是在 760~930 nm 反射率接近 1.00。受龟裂碱土表层土壤背景影响, 三对叶期冠层在整个研究波段反射率高于七对叶期和现蕾期; 乳熟期因叶片向花盘提供大量养分, 叶片内部组织结构发生变化, 2 个区域冠层反射率差异明显减小。与其他时期不同, 三对叶期和乳熟期在 680~1 000 nm 波段反射率呈增加趋势。重度龟裂碱土上植株现蕾期冠层反射率在 400~690 nm 较中度和轻度碱化土壤的植株平均分别高 29.16% 和 21.02% (图 2b); 但在近红外波段 760~1 000 nm 较中度和轻度碱化土壤上的植株冠层反射率平均低 23.49% 和 34.41%, 表明重度龟裂碱土上植株冠层在可见光波段具有较高反射率, 而在近红外区域反射率相对较低。

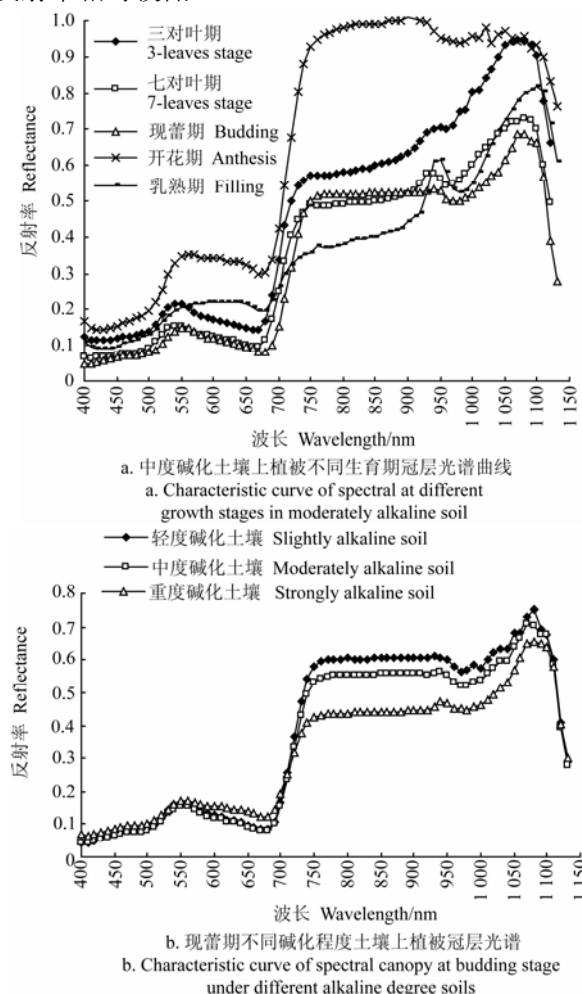


图 2 中度碱化土壤上不同生育期植被冠层光谱特征曲线及现蕾期不同碱化程度上植被冠层光谱特征曲线

Fig.2 Characteristic curve of canopy spectrum at different growth stages in moderately soil, and at budding stage under different alkaline degree soils

2.3 土壤背景对龟裂碱土上覆植被冠层光谱特征的影响

计算覆盖条件下与自然状态冠层光谱反射率的差值显示(图3),三对叶期反射率差值变化最显著,表明三对叶期土壤背景对光谱反射影响最大,覆盖条件下三对叶期在400~520和1027~1130 nm 平均较自然条件下降了0.10,521~1026 nm 平均下降了0.18,在796 nm 处反射率比自然条件下下降了0.23,降幅高达49.81%;覆盖条件下中后期在可见光波段反射率较自然条件下均有不同程度下降,而在近红外区域有所增加,其中七对叶期增幅最大(覆盖条件下在720~1050 nm 比自然条件下平均增加了0.059,平均增幅为11.29%),其次为乳熟期,开花期增幅相对最小,只在770~929 nm 波段有所增加。与自然条件下冠层光谱反射率相比,除三对叶期外,其他4个生育期覆盖条件下在可见光波段降低、在近红外区域升高的原因是土壤表层光谱反射率在可见光波段高于植株,而在近红外波段反射率明显低于植株,植株叶绿素值越高、LAI 越大,土壤和植株冠层反射率差异就越大。需要注意的是,覆盖条件下向日葵冠层光谱并非自然条件下冠层光谱减去表层土壤光谱值,其影响因素包括土壤其他物理和化学性质、植被生长条件以及周围环境等,不是简单的加和关系,具体影响因素有待进一步研究。

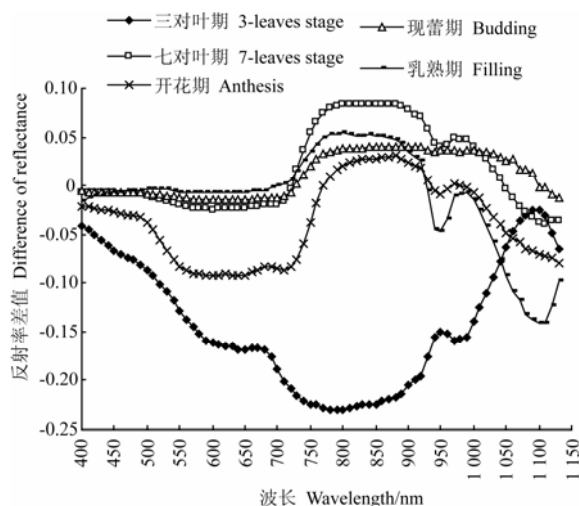


图3 覆盖条件下向日葵冠层光谱值与自然条件下冠层光谱值的差值

Fig.3 Differences of canopy spectrum under soil covered and normal state

2.4 不同生育期冠层光谱与向日葵叶片叶绿素和LAI 的关系

从图4可以看出,自然条件下三对叶期冠层

光谱反射率与叶绿素值和LAI 呈正相关关系,平均相关系数分别为0.68和0.47,但在可见光波段其相关系数较小,而近红外波段相关系数均高于可见光波段。该时期自然条件下可见光波段反射率与叶绿素和LAI 的相关系数普遍大于覆盖条件,但在近红外区域均为覆盖条件下较高。冠层光谱反射率与叶绿素值的相关性高于与LAI 的相关性(2种测定条件下叶绿素值与可见光波段的平均相关系数为0.57,与近红外波段的平均相关系数为0.58,分别较相应波段范围反射率与LAI 的相关系数高0.12和0.19)。现蕾期冠层在400~710 nm 反射率与叶绿素值、LAI 均呈负相关关系,在710~1110 nm 呈正相关关系,且在720~1050 nm 达极显著相关水平,该波段自然条件下反射率与叶绿素值和LAI 的平均相关系数分别为0.82和0.84,在覆盖条件下的平均相关系数分别为0.91和0.93。现蕾期2种条件下反射率与LAI 的相关性略优于叶绿素值。七对叶期植株冠层光谱反射率在400~710和1070~1130 nm 范围与叶绿素值和LAI 呈负相关关系,而在710~1069 nm 呈正相关关系。覆盖条件下反射率与叶绿素值和LAI 的相关系数明显高于自然条件;该时期近红外波段冠层光谱反射率和叶绿素值的相关性比其与LAI 的相关性高7.96%。

开花期向日葵冠层光谱反射率与叶绿素、LAI 仍有较强的相关性,尤其在720~1030 nm 范围内呈极显著正相关关系:自然条件下可见光波段反射率与叶绿素和LAI 的相关系数分别平均低于近红外区域0.40和0.37。自然条件下开花期在720~1050 nm 与2个生理指标的平均相关系数分别为0.67和0.71,覆盖条件下在此波段与叶绿素和LAI 的平均相关系数分别为0.77和0.80,覆盖条件下相关系数仍高于自然条件,但均低于现蕾期。乳熟期向日葵花盘逐渐弯曲低头,探头探测到的部分以花盘背部和叶片为主,长势良好的花盘背部和叶片的叶绿素值较高,而长势差的处理花盘和叶片呈黄绿色甚至黄色或褐色,所以此时冠层光谱反射率与叶绿素值和LAI 仍有良好的相关性。乳熟期除了1087~1130和1054~1130 nm 2个区域外,其他波段反射率与叶绿素值和LAI 均呈正相关关系。在747~897 nm 范围覆盖条件下反射率与叶绿素的相关系数平均低于自然条件0.044,而在742~895 nm 范围,覆盖条件下反射率与LAI 的相关系数较自然状态低0.030,其他波段反射率与叶绿素值、LAI 的相关系数均为覆盖条件下较大。

2.5 上覆植被叶片叶绿素和LAI 的反演模型

在可见光和近红外波段中选择与叶片叶绿

素值、LAI 相关系数最大且最稳定的波段来估测叶绿素值和 LAI。从图 4 显示,可见光波段 550 nm 处反射率普遍与叶绿素值和 LAI 相关性较强,近红外区域则在 740~1 000 nm 相关系数保持在一个稳定数量上,因此选择 810 nm 为近红外区域的代表波段,利用这 2 个波段反射率计算出 NDVI 值来建立向日葵叶绿素值和 LAI 预测模型。从表 2 可见,不同生育期 NDVI 与叶绿素值和 LAI 预测模型相关系数较大,除三对叶期自然条件下 NDVI 与 LAI 模型决定系数在 5%显著水平上相关外,其他时期各模型在 1%水平均达到极显著相关。随着生育期的推进,方程决定系数

逐渐增大,现蕾期达到最大值,开花期大幅度降低,乳熟期又有所升高。自然条件下预测方程决定系数均小于覆盖条件下方程的决定系数,两者之间的差异随着生育期的推进而减小,从现蕾期到乳熟期两者相差小于 0.05,但生育前期平均差异大于 0.15。覆盖条件下除三对叶期和七对叶期外,整个生育期建立的方程对叶片 LAI 的决定系数普遍小于叶绿素,但相同时期两者并无显著差异。建立的预测方程普遍以多项式函数决定系数最大,但覆盖条件下三对叶期、七对叶期和开花期的 LAI 预测方程以指数函数和幂函数拟合效果最理想。

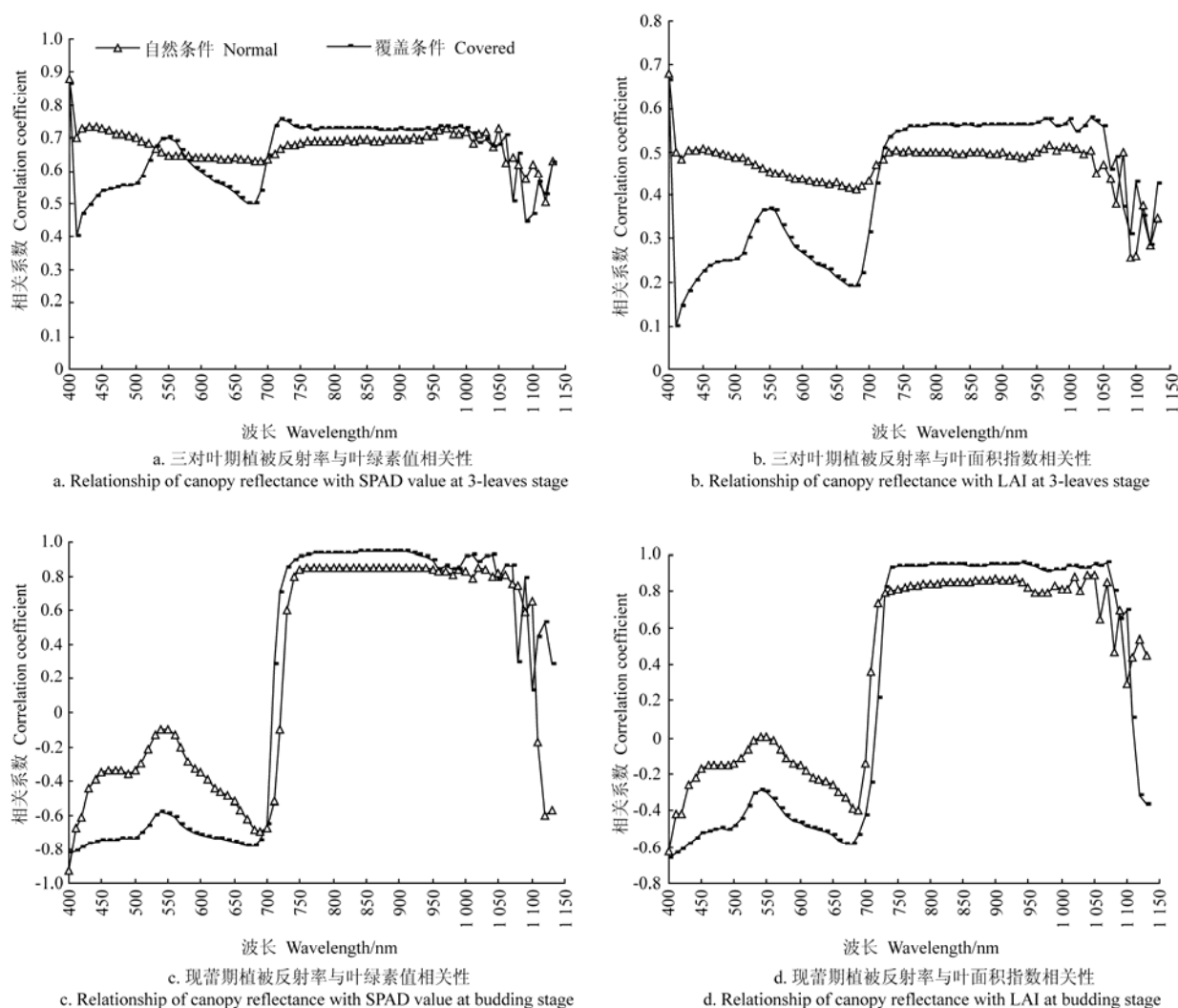


图 4 向日葵不同生育期冠层单波段反射率与叶绿素值和 LAI 的相关图

Fig.4 Correlogram of single wavelengths reflectance to SPAD value and LAI at different growth stages of sunflower

将土壤 pH 值作为一个变量,分别用各生育期冠层 NDVI 与其对应的叶片叶绿素值和 LAI 进行回归分析,得到向日葵叶绿素值和 LAI 的修正模型(表 3)。引入土壤 pH 值对模型进行修正后,预测方程

的决定系数普遍升高,尤其是在作物生育中前期叶叶绿素值和 LAI 的估测方程决定系数分别平均升高 0.10 和 0.082,其中三对叶期修正后方程决定系数比未修正时分别平均升高 0.14 和 0.095;现蕾期增

幅最小。全生育期自然条件下 2 个生理指数的预测方程决定系数分别比未修正时平均升高 0.10 和 0.096，覆盖条件下分别比未修正时升高 0.082 和 0.04，自然条件下增幅略大。

表 2 不同生育时期 NDVI(x)对向日葵叶片叶绿素值和 LAI(y)的预测方程
Table 2 Predicted equations of SPAD value and LAI (y) to NDVI (x) at different growth stages of sunflower

生育期 Growth stage	测定状态 State		叶绿素值 SPAD value		叶面积指数 LAI	
			预测方程 Predicted equation	决定系数 Coefficient of determination R^2	预测方程 Predicted equation	决定系数 Coefficient of determination R^2
三对叶期 3-leaves	自然	Normal	$y=1\ 315.9x^2-1\ 148.3x+265.31$	0.45**	$y=27.23x^2-23.99x+5.36$	0.35*
	覆盖	Covered	$y=4.39e^{2.93x}$	0.61**	$y=0.0004e^{12.34x}$	0.57**
七对叶期 7-leaves	自然	Normal	$y=64.10x^2-357.88x+231.51$	0.61**	$y=8.24x^2-6.16x+1.99$	0.55**
	覆盖	Covered	$y=4\ 412.1x^2-4\ 606.4x+1\ 572.9$	0.70**	$y=0.044e^{5.33x}$	0.77**
现蕾期 Budding	自然	Normal	$y=138.68x^2-138.81x+3.76$	0.89**	$y=6.30x^2-6.37x+0.51$	0.73**
	覆盖	Covered	$y=1\ 873.2x^2-2\ 207.2x+685.23$	0.91**	$y=91.89x^2-106.19x+32.58$	0.90**
开花期 Anthesis	自然	Normal	$y=308.45x^2-305.04x+108$	0.62**	$y=21.60x^2-18.94x+6.31$	0.62**
	覆盖	Covered	$y=87.25x^2-73.10x+47.58$	0.63**	$y=3.98x^{0.83}$	0.70**
乳熟期 Filling	自然	Normal	$y=-11.04x^2+17.739x+18.125$	0.70**	$y=-4.55x^2+5.28x+0.30$	0.63**
	覆盖	Covered	$y=-104.29x^2+86.22x+5.86$	0.74**	$y=-16.09x^2+14.08x-1.35$	0.68**

注：建模样本 $n=40$ ，*和**分别表示在 5%和 1%水平上的显著性。下同。
Note: Modeling samples $n=40$; * and ** stand for significant at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same as below.

表 3 不同生育时期 NDVI(x)对向日葵叶片叶绿素值和 LAI(y)的修正预测方程
Table 3 Modified equations of SPAD value and LAI (y) to NDVI (x) at different growth stages of sunflower

生育期 Growth stage	测定状态 State		叶绿素值 SPAD value		叶面积指数 LAI	
			预测方程 Predicted equation	决定系数 R^2	预测方程 Predicted equation	决定系数 R^2
三对叶期 3-leaves	自然	Normal	$y=57.66-23.43x_1-3.29x_2$	0.58**	$y=1.05-0.71x_1-0.068x_2$	0.44**
	覆盖	Covered	$y=17.48+9.38x_1+0.61x_2$	0.75**	$y=-0.023+0.83x_1-0.026x_2$	0.67**
七对叶期 7-leaves	自然	Normal	$y=91.98-21.44x_1-6.52x_2$	0.68**	$y=3.10+2.48x_1-0.34x_2$	0.66**
	覆盖	Covered	$y=113.23+35.11x_1-9.70x_2$	0.77**	$y=4.79+4.57x_1-0.66x_2$	0.80**
现蕾期 Budding	自然	Normal	$y=411.22-2.82x_1-39.87x_2$	0.90**	$y=26.43+0.11x_1-2.61x_2$	0.85**
	覆盖	Covered	$y=313.2+22.57x_1-31x_2$	0.95**	$y=4.26+4.83x_1-0.55x_2$	0.91**
开花期 Anthesis	自然	Normal	$y=150.73+15.27x_1-13.42x_2$	0.76**	$y=9.89+3.44x_1-1.01x_2$	0.66**
	覆盖	Covered	$y=129.21+13.09x_1-11x_2$	0.72**	$y=1.92+3.58x_1-0.16x_2$	0.68**
乳熟期 Filling	自然	Normal	$y=44.67+4.69x_1-2.55x_2$	0.86**	$y=3.46+1.62x_1-0.26x_2$	0.75**
	覆盖	Covered	$y=54.17+1.47x_1-3.48x_2$	0.81**	$y=5.47+1.08x_1-0.47x_2$	0.76**

注：表中 x_1 、 x_2 分别指冠层 NDVI(550/810)和土壤 pH 值。建模样本 $n=40$ 。
Note: x_1 , x_2 was NDVI (550/810) of sunflower canopy and pH value of soil, respectively. Modeling samples $n=40$.

2.6 上覆植被叶片叶绿素和 LAI 模型的验证

为了验证模型的预测效果，利用 20 个验证样本对向日葵叶片叶绿素和 LAI 预测模型进行验证。从表 4 中 R^2 为不同条件下叶绿素值和 LAI 的实测值与模型预测值所做线性方程的拟合度。从表中可以看出除三对叶期修正预测方程上 5%水平上相关外，其他时期各修正预测方程均在 1%水平上达到极显著相关。现蕾期 4 个预测方程拟合度都相对最高，三对叶期拟合度最低，但三对叶期修正后方程的拟合度较修正前增幅最大（2

个生理指标的 R^2 分别平均增加 0.10 和 0.12）。各时期覆盖条件下预测方程 R^2 普遍大于自然状态。除三对叶期外，其他各时期叶绿素值和 LAI 预测值与其真实值之间具有良好的相关性，拟合度 $R^2>0.60$ ， $RMSE$ 也较小，说明模型的 R^2 较大，预测能力较强；三对叶期模型的稳定性和预测能力都较差。引入土壤 pH 值对模型进行修正后，模型预测值与真实值间的 R^2 进一步增大， $RMSE$ 普遍减小，表明引入土壤 pH 值可以增强模型的稳定性和预测能力。

表 4 向日葵叶片叶绿素值和 LAI 预测模型验证指标
Table 4 Index of SPAD value and LAI for validation of models for sunflower

生育期 Growth stage	测定状态 State	叶绿素值 SPAD value				叶面积指数 LAI			
		预测方程 Predicted equation		修正预测方程 Modified equation		预测方程 Predicted equation		修正预测方程 Modified equation	
		拟合度 R_1^2	总均方根差 $RMSE_1$	拟合度 $R_1'^2$	总均方根差 $RMSE_2$	拟合度 R_1^2	总均方根差 $RMSE_1$	拟合度 $R_2'^2$	总均方根差 $RMSE_2$
三对叶期 3-leaves	自然 Normal	0.41	0.57	0.51*	0.59	0.40	0.51	0.48*	0.38
	覆盖 Covered	0.56**	0.52	0.66**	0.51	0.46*	0.55	0.61**	0.42
七对叶期 7-leaves	自然 Normal	0.61**	0.46	0.72**	0.33	0.60**	0.33	0.67**	0.3
	覆盖 Covered	0.68**	0.3	0.79**	0.34	0.71**	0.21	0.75**	0.26
现蕾期 Budding	自然 Normal	0.80**	0.32	0.88**	0.23	0.81**	0.26	0.87**	0.12
	覆盖 Covered	0.88**	0.26	0.92**	0.11	0.87**	0.2	0.93**	0.19
开花期 Anthesis	自然 Normal	0.79**	0.26	0.80**	0.25	0.77**	0.38	0.81**	0.25
	覆盖 Covered	0.82**	0.23	0.84**	0.28	0.81**	0.21	0.85**	0.11
乳熟期 Filling	自然 Normal	0.82**	0.32	0.86**	0.16	0.72**	0.26	0.78**	0.20
	覆盖 Covered	0.83**	0.24	0.88**	0.16	0.80**	0.21	0.83**	0.17

注：验证样本 $n=20$ 。

Note: Verification samples $n=20$.

3 结 论

1) 不同碱化程度土壤上向日葵叶绿素值和 LAI 在全生育期变化相似，均呈先增长后下降的趋势，前者在现蕾期达到最大值，后者在开花期达到最大值。

2) 不同生育期土壤背景对向日葵冠层光谱影响程度不同。覆盖条件下较自然条件下向日葵三对叶期冠层光谱反射率在整个波段平均降低 0.14；其他 4 个生育期在可见光波段有不同程度的下降，在近红外区域有所增加，其中七对叶期在 720~1 045 nm 平均增幅为 11.29%。

3) 不同生育期向日葵冠层光谱反射率与叶绿素值和 LAI 普遍具有良好的相关性，覆盖土壤背景可以增强他们之间的相关性。三对叶期、开花期和乳熟期在整个研究波段内冠层光谱反射率与 2 个生理指标呈正相关关系；七对叶期和现蕾期在 710~1 070 nm 呈极显著正相关关系，现蕾期反射率与叶绿素值和 LAI 相关性最强，自然条件下相关系数分别为 0.81 和 0.90，覆盖条件下在该波段相关系数分别达 0.83 和 0.92。

4) 不同生育期向日葵冠层 NDVI 可以较准确地预测植被叶绿素值和 LAI。自然条件下建立的预测方程决定系数均小于覆盖条件，两者之间的差异随着生育期的推进而减小。引入土壤 pH 值对模型进行修正后，全生育期自然条件下 2 个生理指数的预测方程决定系数分别比未修正时平均升高 0.10 和 0.096，模型预测能力增强。

[参 考 文 献]

- [1] 邵咏妮. 水稻生长生理特征信息快速无损获取技术的研究[D]. 杭州：浙江大学，2010.

Shao Yongni. Research on Non-destructive and Rapid Acquisition Technique for Rice Physiological Characteristics and Growth Information[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010. (in Chinese with English abstract)

- [2] Vincini M, Frazzi E, Alessio P D. A broad-band leaf chlorophyll vegetation index at the canopy scale[J]. Precision Agriculture, 2008, 9(5): 303—319.
- [3] Lausch A, Pause M, Merbach I, et al. A new multiscale approach for monitoring vegetation using remote sensing-based indicators in laboratory, field, and landscape[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, 185(2): 1215—1235.
- [4] 朱西存, 赵庚星, 雷彤, 等. 苹果花期冠层光谱探测的规范化技术方法探讨[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(6): 1591—1595.
- Zhu Xicun, Zhao Gengxing, Lei Tong, et al. Standardization of technical methods for apple florescence canopy spectral detection[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(6): 1591—1595. (in Chinese with English abstract)
- [5] Guan J, Nutter F W. Factors that affect the quality and quantity of sunlight reflected from alfalfa canopies[J]. Plant Disease, 2001, 85(8): 865—874.
- [6] Ghulam A, Li Z L, Qin Q M, et al. A method for canopy water content estimation for highly vegetated surfaces-shortwave infrared perpendicular water stress index[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 50(9): 1359—1368.
- [7] 史梦竹, 傅建炜, 郭建英. 利用多光谱扫描仪测定空心莲子草冠层光谱的影响因素[J]. 生物安全学报, 2011, 20(4): 291—294.
- Shi Mengzhu, Fu Jianwei, Guo Jianying. Factors affecting the canopy spectrum of the alligator weed, Alternanthera philoxeroides, measured by a canopy

- imaging spectrometer[J]. Journal of Biosafety, 2011, 20(4): 291—294. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邹维娜, 袁琳, 张利权, 等. 盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 706—714.
- Zou Weina, Yuan Lin, Zhang Liquan, et al. Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant *Cabomba caroliniana*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(3): 706—714. (in Chinese with English abstract)
- [9] Hestir E L, Khanna S, Andrew M E, et al. Identification of invasive vegetation using hyperspectral remote sensing in the California Delta ecosystem[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(11): 4034—4047.
- [10] Mirik M, Ansley R J, Michels G J, et al. Elliott. Spectral vegetation indices selected for quantifying Russian wheat aphid (*Diuraphis noxia*) feeding damage in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(4): 501—516.
- [11] Kumar N, Niwas R, Khichar M L, et al. Effect of different growing environments on population dynamics of sucking pests in relation to various spectral indices in cotton[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2012, DOI: 10.1007/s12524-012-0218-3.
- [12] Ren Hongyan, Zhuang Dafang, Pan Jianjun, et al. Hyper-spectral remote sensing to monitor vegetation stress[J]. Journal of Soils and Sediments, 2008, 8(5): 323—326.
- [13] 王静, 刘湘南, 黄方, 等. 基于 ANN 技术和高光谱遥感的盐渍土盐分预测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 161—166.
- Wang Jing, Liu Xiangnan, Huang Fang, et al. Salinity forecasting of saline soil based on ANN and hyperspectral remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 161—166. (in Chinese with English abstract)
- [14] Judkins G, Myint S. Spatial variation of soil salinity in the Mexicali Valley, Mexico: application of a practical method for agricultural monitoring[J]. Environmental Management, 2012, 50(3): 478—489.
- [15] 张飞, 塔西甫拉提·特依拜, 丁建丽, 等. 基于对应分析的土壤盐渍化现状特征及其与光谱关系研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(3): 513—519.
- Zhang Fei, Tiyp Tebaiyi, Ding Jianli, et al. Correspondence analysis of relationship between characteristics and spectra of soil salinization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(3): 513—519. (in Chinese with English abstract)
- [16] Zhang F, Tiyp T, Ding J L, et al. Studies on the reflectance spectral features of saline soil along the middle reaches of Tarim River: A case study in Xinjiang Autonomous Region, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, DOI: 10.1007/s12665-012-2096-y.
- [17] Alhammadi M S, Glenn E P. Detecting date palm trees health and vegetation greenness change on the eastern coast of the United Arab Emirates using SAVI[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(6), 1745—1765.
- [18] 张芳, 熊黑钢, 丁建丽, 等. 碱化土壤的野外及实验室波谱响应特征及其转换[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 101—107.
- Zhang Fang, Xiong Heigang, Ding Jianli, et al. Characteristics of laboratory-field measured spectra responding to alkalized soil and conversion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 101—107. (in Chinese with English abstract)
- [19] 殷允相. 龟裂碱土的形成、性质及改良途径[J]. 土壤通报, 1985(5): 206—208.
- Yin Yunxiang. Formation, property and amend method of Takyr Solonchaks[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1985(5): 206—208. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张俊华, 张佳宝, 李卫民. 基于夏玉米光谱特征的叶绿素和氮素水平及氮肥吸收利用研究[J]. 土壤, 2008, 40(4): 540—547.
- Zhang Juahua, Zhang Jiabao, Li Weimin. Correlation between summer maize's canopy spectral reflectance and chlorophyll content, nitrogen level, nitrogen uptake and utilization efficiency[J]. Soils, 2008, 40(4): 540—547. (in Chinese with English abstract)
- [21] Wagner P, Hank K. Suitability of aerial and satellite data for calculation of site-specific nitrogen fertilization compared to ground based sensor data[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(2): 135—150.
- [22] 张娟娟, 田永超, 姚霞, 等. 同时估测土壤全氮、有机质和速效氮含量的光谱指数研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 50—59.
- Zhang Juanjuan, Tian Yongchao, Yao Xia, et al. The spectral index for estimating soil OM, TN and AN content simultaneously using near-infrared spectroscopy[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 50—59. (in Chinese with English abstract)
- [23] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐分与上覆植被野外光谱关系初探[J]. 中国农学通报, 2004, 20(4): 274—278.
- Liu Qingsheng, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Preliminary study on relationships between soil salinity and above vegetation field-derived in Liaohe River Delta, Liaoning Province, China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2004, 20(4): 274—278. (in Chinese with English abstract)
- [24] Yousef Y. Aldakheel. Assessing NDVI spatial pattern as related to irrigation and soil salinity management in Al-Hassa Oasis, Saudi Arabia[J]. J Indian Soc Remote Sens, 2011, 39(2): 171—180.
- [25] 黄燕, 吴平等著. SAS 统计分析及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

- [26] 刘杰. 向日葵对碱胁迫和盐胁迫适应机制比较[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
Liu Jie. Comparison of Adaptation Mechanism to Alkali Stress and Salt Stress in Sunflower (*Helianthus annuus* L.)[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张剑亮, 何琴, 潘大仁, 等. 观赏向日葵花瓣色素成分分析[J]. 广东农业科学, 2011(8): 125—128.
Zhang Jianliang, He Qin, Pan Daren, et al. Study on components of flower pigments in ornamental sunflower[J]. Guangdong Agricultural Science, 2011(8): 125—128. (in Chinese with English abstract)

Effect of takyr solonetz on vegetation canopy spectral characteristics and growth prediction

Zhang Junhua¹, Jia Keli², Li Ming¹

(1. The Applied Research and Development Center for New Technology of Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. The Resource and Environment College of Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In order to quantify the effect of takyr solonetz on canopy spectral of above vegetation (sunflower) via unifying soil background, the characteristics of canopy spectral, the relationship of spectral reflectance with SPAD value and leaf area index (LAI) were analyzed during five typical growth stages. Then, models for SPAD value and LAI prediction were established based on canopy spectral reflectance of sunflower and soil background pH value. The results showed that the tendency of SPAD value was similar to LAI of sunflower. There were increased then decreased with the advance of growth stages; they were the maximum value at budding stage and anthesis stage, respectively. Canopy spectral reflectance of sunflower in strongly alkaline soil were higher in the visible light and lower in near infrared region than reflectance of sunflower in slightly and moderately soil. Canopy spectral reflectance of sunflower at 3-leaves stage decreased by 0.10 at the wavelength of 400-520 nm and 1027-1130 nm when the soil was covered with black cloth compared to its natural conditions; meanwhile, the reflectance decreased by 0.18 at 521-1026 nm. The reflectance at other growth stages decreased in visible-light range and increased in near-infrared when the soil was covered in contrast with its natural conditions (the canopy reflectance increased by 0.059 in 720-1050 nm and its amplification was 11.29% at 7-leaves stage). The spectral reflectance of sunflower at the natural state showed a positive correlation with the SPAD value and LAI at 3-leaves stage, and the average correlation coefficients between the reflectance and SPAD value, LAI were 0.68 and 0.47, respectively. Anthesis and filling stages were same as 3-leaves stage. The average correlation coefficients between the spectral reflectance at other stages and two agronomy parameters in visible range were -0.27 and -0.52 in visible range, and the average correlation coefficients between them were 0.53 and 0.69 in near-infrared, respectively, the correlation coefficients between them were maximum values in near-infrared at budding stage. When soil was covered, the correlation coefficient was comparatively higher than its natural condition. The minimum and maximum values of determination coefficients of the models for SPAD value and LAI were predicted based on canopy spectral appeared at 3-leaves and budding stages, respectively. The effect of polynomial equations of SPAD value and LAI predicted were better than other equations at large, however, exponent and power equations of LAI predicted were the best at 3-leaves, 7-leaves and anthesis stage. The models had higher precision and capacity of predicting at all growth stage (R_{SPAD} were 0.61-0.88, R_{LAI} were 0.72-0.92) except 3-leaves stage. Therefore, models involved with pH value could effectively reduce the interference of soil background on the prediction of SPAD value and LAI of sunflower.

Key words: vegetation, spectrum analysis, growth, takyr solonetz, SPAD value, LAI, predict

(责任编辑: 刘丽英)