

王克晓, 周蕊, 黄祥, 等. 油菜角果高光谱成熟指数构建[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(3): 716-723.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.03.012

油菜角果高光谱成熟指数构建

王克晓, 周蕊, 黄祥, 虞豹, 李波

(重庆市农业科学院农业科技信息研究所, 重庆 401329)

摘要: 为建立油菜角果成熟程度量化评估指标, 以不同品种、不同成熟等级的油菜角果为研究对象, 在分析其非成像原始高光谱反射曲线、一阶微分变换光谱和连续统去除变换光谱的基础上, 开展不同成熟等级油菜角果光谱特征差异研究, 构建一种能够有效辨别油菜角果成熟程度的高光谱指数。结果表明, 不同品种、不同成熟等级的油菜角果反射光谱差异较大, 在 625 nm 两侧光谱反射率明显不同; 油菜角果成熟等级越高, 红光吸收谷越浅, 其谷点波深越低, 吸收谷反射率不断增强, 红光吸收谷位置基本稳定在 675 nm 左右; 选用 625 nm、675 nm 和 730 nm 3 个高光谱波段构建新的油菜角果成熟指数 (*CPMI2*), 与改进型叶绿素吸收比值指数 (*MCARI*)、水波段指数 (*WBI*)、油菜角果成熟指数 (*CPMI*) 3 个光谱指数的决定系数分别为 0.89、0.81 和 0.55, 即与反映植被叶绿素含量、水分含量的光谱指数及已有的角果成熟指数有较高的相关性, 与油菜角果成熟程度具有较好的一致性。本研究结果可为利用高光谱探测油菜角果成熟度, 有效确定油菜适宜收获期提供参考。

关键词: 油菜角果; 成熟度; 高光谱特征; 光谱指数

中图分类号: S127; S565.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2023)03-0716-08

Construction of rape silique ripening index based on hyperspectral characteristics

WANG Ke-xiao, ZHOU Rui, HUANG Xiang, YU Bao, LI Bo

(Institute of Agricultural Information Science and Technology, Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

Abstract: In order to establish a quantitative evaluation index for rape silique maturity, the hyperspectral characteristics of rape siliques with different varieties and maturity levels were analyzed by the way of non-imaging original reflection curve, the first derivative transformation and continuous removal transformation, and a hyperspectral index that could effectively distinguish the maturity was constructed. The results showed that the reflectance spectra of rape siliques with different varieties and maturity levels were significantly different, especially around 625 nm. The higher the maturity level of rape siliques, the shallower the red light absorption valley, and the lower the wave depth of its valley point. The reflectivity of the absorption valley was enhanced, but the position of the red light absorption valley was basically stable at about 675 nm. The bands of 625 nm, 675 nm and 730 nm were selected to construct the canola pod maturity index-2 (*CPMI2*). The determination coefficients of *CPMI2* with modified chlorophyll absorption ratio index (*MCARI*), water band index (*WBI*) and canola pod maturity index (*CPMI*) were 0.89, 0.81 and 0.55 respectively, indicating that *CPMI2* had a high correlation with the spectral indices reflecting the chlorophyll content, water

content and ripeness of pod, and had a better consistency with rape silique ripeness. The results of this study can provide a reference for the hyperspectral detection of rape silique maturity and the effective determination of the appropriate harvest time of rape.

Key words: rape silique; maturity; hyperspectral characteristics; spectral index

收稿日期: 2022-07-11

基金项目: 重庆市农业科学院绩效激励引导项目 (cqaa2021jxjl17); 重庆市技术创新与应用发展专项 (cstc2021jscx-lyzxX0001)

作者简介: 王克晓 (1986-), 男, 河南平顶山人, 硕士, 助理研究员, 主要从事农业遥感相关研究。 (E-mail) 447215670@qq.com

通讯作者: 周蕊, (E-mail) 12087836@qq.com

近年来,高光谱技术的发展为探测不同植被光谱特征的差异提供了有效途径^[1-3],已经广泛应用于不同植被的精细识别研究中。Schmidt 等^[4]通过野外高光谱数据实现了对荷兰 27 种湿地植被的有效辨识。Mansour 等^[5]利用 ASD FieldSpec3 光谱仪测量林冠光谱值,对不同级别草地退化物种进行了识别。Adam 等^[6]基于地面实测光谱有效地将纸莎草同其他草种区分开来。胡琳等^[7]基于机载高光谱影像,获得不同处理下杂木林、竹林、华山松等典型植被的最佳区分波段,实现了不同植被类型的精细划分。周伟等^[8]通过对三江源区典型毒杂草和牧草的地面高光谱进行参数量化分析,实现了毒杂草草种识别和植被群落生长监测。闫馨方等^[9]基于白萝卜和云南大苦菜的高光谱数据开展的高光谱特征对比研究,探索利用高光谱遥感技术定性、定量区分 2 种作物的可行性。油菜在中国粮油安全和国民经济中占据着非常重要的地位^[10]。国内针对油菜的高光谱研究工作主要集中在利用高光谱数据模拟叶绿素含量或叶面积指数等长势指标和产量等方面^[11-12],如杨婧等^[13]研究了不同栽培条件下幼苗期、蕾薹期油菜叶片光谱与 SPAD 值的相关性,并通过光谱指数建立了叶绿素含量估算模型。郑煜等^[14]基于不同生育期高光谱特征参数与 SPAD 值的关系构建了油菜叶片 SPAD 值估算模型。赵赞忠^[15]基于不同栽培因子条件下油菜特征光谱参数变化及其与叶面积指数(LAI)的相关性,建立了油菜初薹期、蕾薹高峰期、初花期冠层特征光谱参数与 LAI 的线性模型和多项式模型。李岚涛等^[16]通过分析角果期冠层光谱反射率与产量构成因子、成熟期

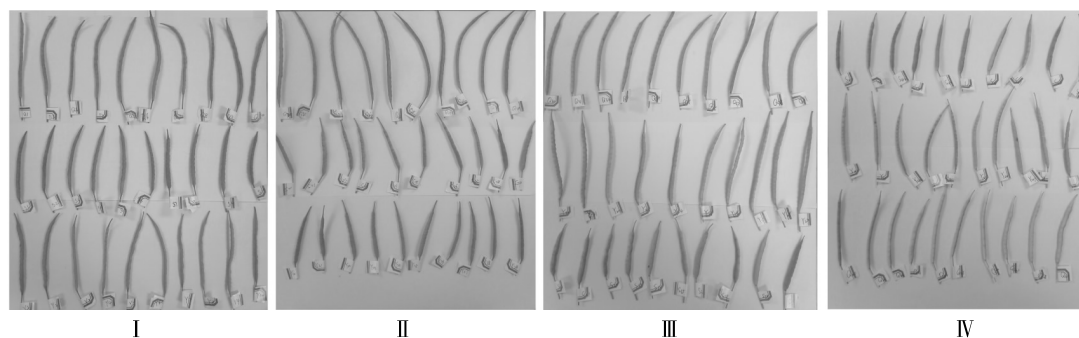
产量之间的关系,建立了油菜初始光谱、一阶微分光谱与产量及其构成因子间的偏最小二乘定量分析模型。常涛等^[17]通过分析油菜全生育期的光谱反射率与叶绿素含量、最终产量性状间的相关性,证明了蕾薹期光谱参数用于预测油菜产量的可行性。然而,针对油菜角果个体及其成熟程度进行高光谱估测的相关研究则鲜有报道。

本研究拟基于 3 个不同品种油菜的角果在不同成熟阶段的非成像高光谱反射数据,在原始反射光谱、一阶微分变换光谱和连续统去除变换光谱分析的基础上,开展不同成熟等级油菜角果光谱特征差异研究,构建能够有效表征油菜角果成熟程度的高光谱指数,以期为高光谱定量化探测油菜角果成熟程度提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于重庆市农业科学院重庆现代农业高科技园区,选用同期播种的晒滋圆 1 号、庆油 3 号和蜀丰 6608 等 3 个品种为试验材料,均采用人工直播播种方式,各小区油菜播种行距为 50 cm,株距为 40 cm。样本采集均以花后 12 d 左右为首次角果采样期,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日,对应油菜角果成熟程度标记为 I、II、III、IV 4 个等级(图 1)。角果取样均在单品种试验样区随机选取,并随即带回实验室进行光谱测量。每期单品种采集 10 个油菜角果,共 30 个角果样本,4 期共计 120 个角果样本。



I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

图 1 不同品种、不同成熟期油菜角果样本

Fig.1 Collected rape silique samples with different varieties and maturity levels

1.2 高光谱数据获取

利用美国 ASD 公司 FieldSpec HH2 地物光谱仪及其自带光源的叶片夹配合完成角果高光谱数据采集,光谱设备采集范围 325~1 075 nm,光谱采样设置间隔 1 nm。样本光谱采集前叶片夹先进行白板校正、优化,然后以黑板为背景逐个测定角果样本中间部位的反射光谱。单个角果样本均获取 3 条光谱反射曲线,取其平均后作为该样品的代表性光谱曲线。每期采集单品种的 10 个角果样本光谱,取其平均后作为该品种样本的光谱反射曲线。光谱反射数据计算均值的过程是通过 View SpecPro 软件完成的,反射数据的 Savitzky-Golay 滤波通过 Origin 8.0 软件完成,同时保留信噪比较好的 450~1 000 nm,以便后续使用。

1.3 高光谱数据处理

1.3.1 一阶微分处理 原始反射光谱的一阶微分变换可以增强不同光谱波段的对比度^[18],能够反映出不同成熟等级油菜角果样本的光谱反射差异,本研究选用 9 个反射光谱一阶微分特征参数(表 1),其参数定义参考文献[7]。

表 1 一阶微分特征参数

Table 1 Characteristic parameters of the first derivative spectra

类型	特征参数	类型	特征参数
位置特征	蓝边幅值(D_b)	面积特征	蓝边面积(S_{Db})
	蓝边位置(λ_b)		
	黄边幅值(D_y)	黄边面积(S_{Dy})	
	黄边位置(λ_y)		
	红边幅值(D_r)	红边面积(S_{Dr})	
	红边位置(λ_r)		

1.3.2 连续统去除 通过地物高光谱反射曲线获取光谱吸收波形形态参数信息是确定地物光谱吸收特征的重要方法^[19]。连续统去除可以基于一个共同的基线比较各个光谱的吸收特征^[20]。为描述不同成熟等级油菜角果间的光谱差异,本研究提取 6 个连续统去除特征参数进行分析,其参数定义^[21]见表 2。

1.4 角果成熟度高光谱指数构建

图 2 显示,随着油菜角果的成熟,以黄边位置(625 nm)、红谷(675 nm)及红边(680~760 nm)波段反射光谱点反射值构建的 $\triangle ABC$ 面积不断减小,反射曲线在黄边-红边波长区间内的积分面积逐渐增加,积分面积在总面积中所占比例逐渐增大。基于此构建新的油菜角果指数(VI),其取值范围为 0~

1,具体计算见公式(1)。

表 2 连续统去除光谱特征参数及定义

Table 2 Characteristic parameters of continuum removal spectra and its definitions

特征变量	定义
波深(BD)	吸收谷最大的吸收值
吸收谷位置(P)	吸收谷中反射率最小处的波长
吸收谷面积($Area$)	吸收谷起止波长范围内的波深积分
吸收谷宽度($FWHM$)	波深一半处吸收波段的整体宽度
吸收谷对称度(AA)	吸收谷吸收特征变化的均衡程度
光谱吸收指数(SAI)	非吸收基线在谱带波长位置处的反射强度与谱带谷底的反射强度之比

$$VI = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_3} \rho(\lambda) d\lambda}{S} \approx 1 - \frac{S_{\triangle ABC}}{S} \quad (1)$$

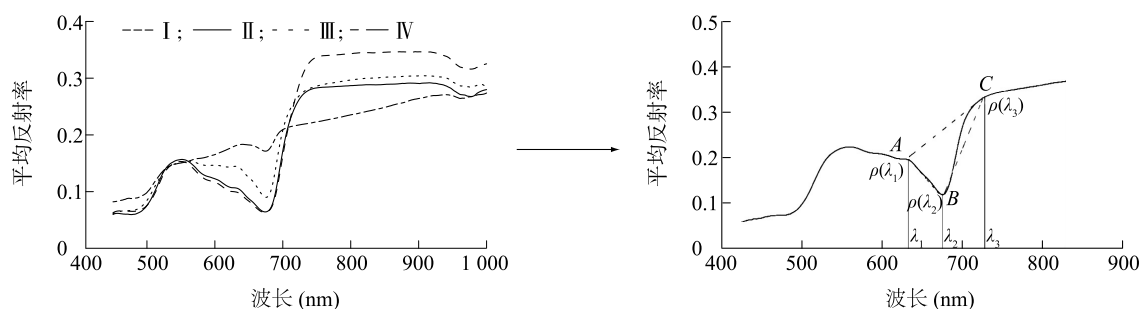
其中, VI 为油菜角果成熟指数; $\rho(\lambda)$ 为光谱反射曲线函数; λ_1 和 λ_3 分别为黄边、红边对应波长; S 为 λ_1 、 λ_3 波长值及其光谱反射值所围成的梯形面积; $S_{\triangle ABC}$ 为对应光谱点反射值构建的三角形面积。

为描述反射光谱上的“红谷”特性, Broge 等^[22]利用 550 nm 处的绿波段,670 nm 处的红光波段和 750 nm 处的近红外波段 3 个光谱点反射值计算三角形面积来构建三角植被指数(TVI),以便于预测中、低冠层生物量信息。陈鹏飞等^[23]用 730 nm 处红边反射值替代 670 nm 处的红光反射值,提出的红边三角植被指数($RTVI$)能够较好地保持对高生物量变化的敏感性。因此,本研究在考虑波段敏感性和黄边波段突出作用的基础上,选用黄边位置 625 nm、红波吸收谷 675 nm 和红边位置 730 nm 3 个光谱点构建油菜角果成熟指数($CPMI2$),公式(1)可进一步简化表达为公式(2):

$$CPMI2 = \frac{10\rho_{625} + 21\rho_{675} + 11\rho_{730}}{21(\rho_{625} + \rho_{730})} \quad (2)$$

其中, $CPMI2$ 为新的油菜角果成熟指数, ρ_{625} 、 ρ_{675} 和 ρ_{730} 分别为波段 625 nm、675 nm 和 730 nm 处的光谱反射值。

伴随着油菜角果的成熟,水分流失,叶绿素含量明显下降,角果光谱特征出现黄边波段反射率变化明显,红谷处反射率增大,红边位置向短波方向“蓝移”等明显特征,图 2 中 $\triangle ABC$ 面积值逐渐减小,以积分面积 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_3} \rho(\lambda) d\lambda$ 为表征的光谱指数 $CPMI2$ 不断增大,说明 $CPMI2$ 与油菜角果成熟程度具有较好的一致性。



I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示黄边、红谷和红边的波长; $\rho(\lambda_1)$ 、 $\rho(\lambda_2)$ 、 $\rho(\lambda_3)$ 分别表示其对应的反射率。

图 2 油菜角果成熟指数构建示意图

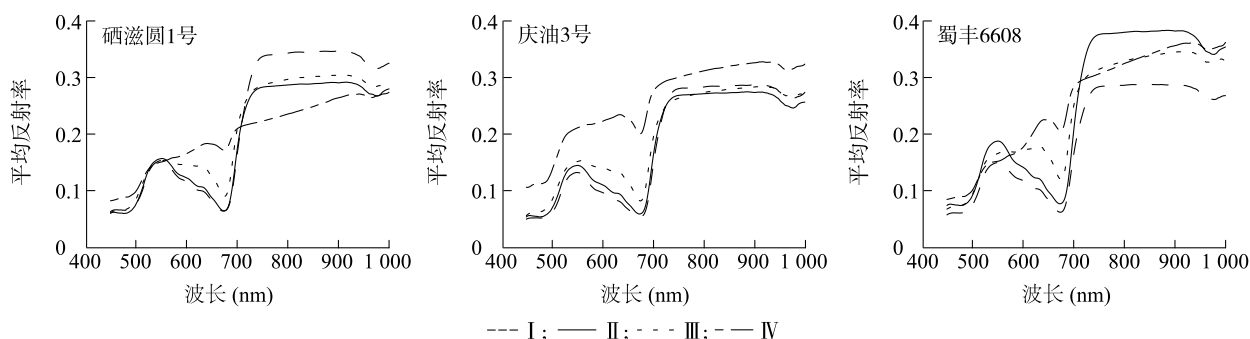
Fig.2 Schematic diagram of canola pod maturity index

2 结果与分析

2.1 原始高光谱反射特征分析

图 3 显示,不同成熟等级的油菜角果光谱主要呈现出以下变化:(1)625 nm 的黄边波段处反射光谱变化明显。I 级、II 级角果样本黄边光谱变化相对平缓,III 级样本在 625 nm 附近反射率出现骤降,而 IV 级成熟样本的黄边波段反射率最高。其原因是随着角果成熟,叶绿素含量下降,叶绿素在红光波段的反射增强,特别是红光反射率升高,绿、红光谱叠加以致于角果

转为黄色,导致角果黄边波段变化突出。(2)红边位置向短波方向移动,即红边“蓝移”。随着角果成熟度的增加,叶绿素含量明显下降,对光的吸收减少,红光反射率增大,角果逐渐黄熟而“失绿”。(3)随着角果成熟度的增加,油菜角果的反射绿峰逐渐消失,但红谷位置变化不大,基本停留 670 nm 附近,但反射值整体上不断增大,而吸收谷变“浅”,谷点反射率不断增强,吸收谷波段起止波谱范围变窄。这是由角果生育期内叶绿素含量下降,叶绿素在红光波段的吸收减少,反射增强,同时红边“蓝移”所致。



I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

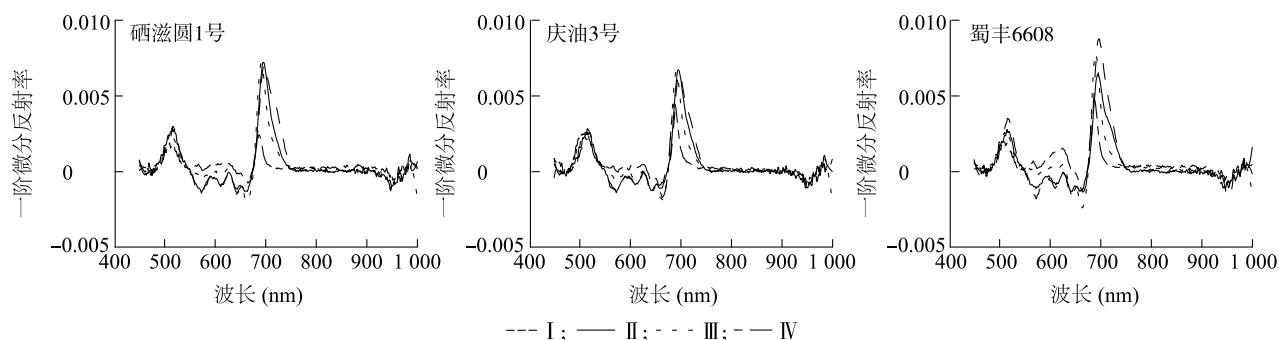
图 3 不同成熟等级油菜角果样本平均反射率曲线

Fig.3 Average reflectance curves of silique samples with different maturity levels

2.2 一阶微分光谱特征分析

为进一步突出不同成熟等级的油菜角果样本的光谱变化特征,对各品种不同成熟等级的原始光谱进行一阶微分变换。图 4 显示,在 490~530 nm 的蓝边波段内,油菜角果的成熟度越高,一阶微分反射率峰值越小,且对应的蓝边位置有向短波方向移动趋势。其原因可能是随着叶绿素含量降低,角果对蓝光的吸收能力下降,蓝光反射率上

升。在 550~675 nm 的绿光-红光范围内有 2 处一阶微分接近于零的变化峰值,分为位于 590 nm 和 625 nm 附近。尤其在 625~675 nm,不同成熟等级的油菜角果光谱反射率区分性较强,一阶微分反射率减小幅度差异较为明显。在 675~760 nm 的红光-近红外范围内,随着成熟等级的增大,一阶微分极大值趋于变小,对应的原始光谱红边位置总体向短波方向移动。



I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

图 4 不同成熟等级油菜角果一阶微分光谱曲线

Fig.4 The first derivative reflectance spectra of siliques with different maturity grades

分析不同成熟等级油菜角果一阶微分光谱特征相关的 9 个参数,结果(表 3)表明,随着成熟等级的升高,蓝边幅值(D_b)和红边幅值(D_r)总体呈减小趋势,黄边幅值(D_y)略微有所增大;各品种的蓝边位置(λ_b)、黄边位置(λ_y)和红边位置(λ_r)分别保持在 510~516 nm、625~628 nm 和 687~698 nm 的波长范围内,且随着成熟等级的增大均总体趋于减小;随着

成熟等级的升高,蓝边面积(S_{Db})、红边面积(S_{Dr})总体趋于减小,而黄边面积(S_{Dy})总体逐渐增大。上述特征参数变化是由于油菜角果在成熟过程中水分散失、叶绿素含量下降,导致绿峰逐渐消失,黄边波段反射增强,红边波段“蓝移”,从而使得红光波段吸收谷的空间受到不断挤压造成的。

表 3 不同成熟等级角果的一阶微分光谱特征参数

Table 3 The first derivative spectral parameters of siliques with different maturity grades

特征参数	晒滋圆 1 号				庆油 3 号				蜀丰 6608			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
D_b	0.003 00	0.002 90	0.002 40	0.001 90	0.002 80	0.002 60	0.002 40	0.002 20	0.003 50	0.002 80	0.002 60	0.002 00
λ_b	516	515	510	510	516	515	514	510	516	515	510	510
D_y	-0.000 06	-0.000 04	0.000 20	0.000 60	-0.000 05	-0.000 02	0.000 07	0.000 48	-0.000 09	-0.000 03	0.000 47	0.001 55
λ_y	626	626	625	625	628	626	628	625	628	626	625	625
D_r	0.007 20	0.007 10	0.007 20	0.002 40	0.006 70	0.006 50	0.006 60	0.004 50	0.008 80	0.007 80	0.006 40	0.004 80
λ_r	695	697	690	687	696	698	692	688	697	695	690	687
S_{Db}	0.081	0.074	0.071	0.052	0.076	0.068	0.072	0.084	0.096	0.075	0.076	0.055
S_{Dy}	-0.057	-0.055	-0.016	0.030	-0.054	-0.020	-0.026	0.019	-0.072	-0.052	0.005	0.070
S_{Dr}	0.273	0.217	0.195	0.051	0.226	0.208	0.181	0.098	0.297	0.220	0.194	0.099

D_b 、 D_r 、 D_y 、 λ_b 、 λ_y 、 λ_r 、 S_{Db} 、 S_{Dr} 、 S_{Dy} 见表 1。I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

2.3 高光谱吸收特征分析

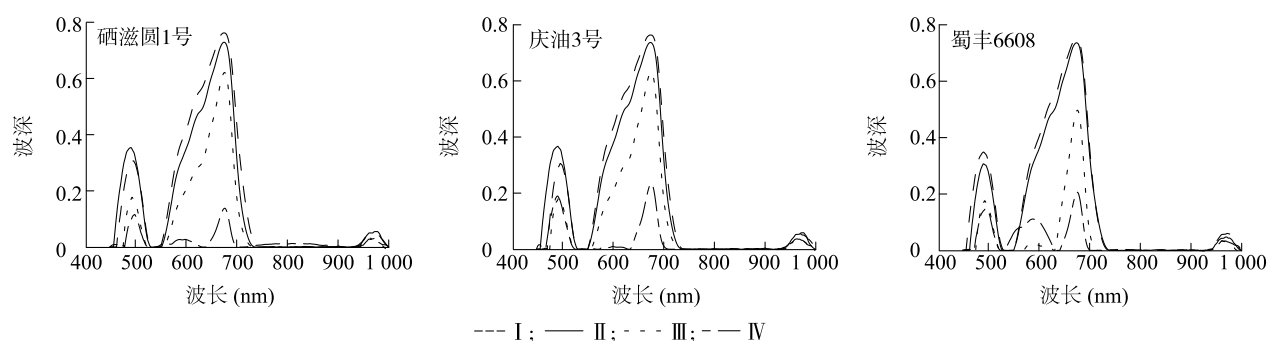
对不同成熟等级的油菜角果原始光谱进行连续统去除变换,波深如图 5 显示,在 500 nm 和 670 nm 波段附近有 2 个较强的吸收谷,而较为明显的吸收特征主要体现在 675 nm 处的红谷吸收区,波深值总体随着成熟等级升高而减小,与图 3 中样本成熟等级升高红谷反射值整体增大的结果相一致。另外,

各成熟等级油菜角果样本的波深值在 625 nm 处出现明显升高。

分析 670 nm 处不同成熟等级油菜角果光谱吸收特征值,表 4 显示,吸收谷位置并未随着油菜角果样本的成熟而出现明显变化,仍保持在 675 nm 左右,而波深因红光反射增强而变小,吸收谷面积与吸收谷宽度总体呈减小趋势,可能是因为角果受到水

分流失和叶绿素含量下降的双重胁迫,绿峰淡化,黄边波段反射增强,红边波段“蓝移”,致使红谷空间变窄而减小,吸收谷对称度和光谱吸收指数等参数

也因反射绿峰减弱和黄边反射的变化而呈总体逐渐减小的趋势。



I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

图 5 不同成熟等级角果样本波深

Fig.5 Wave depth of siliques with different maturity grades

表 4 不同成熟等级角果的吸收特征参数 ($\lambda=670\text{ nm}$)

Table 4 The absorption parameters of siliques with different maturity grades ($\lambda=670\text{ nm}$)

特征参数	晒滋圆 1 号				庆油 3 号				蜀丰 6608			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
波深	0.76	0.73	0.62	0.14	0.76	0.74	0.63	0.23	0.75	0.74	0.50	0.21
吸收谷位置	675	675	676	676	675	675	676	676	675	675	677	677
吸收谷面积	67.80	79.53	45.70	3.91	70.94	79.58	47.23	7.60	75.03	76.38	19.25	5.80
吸收谷宽度	95	110	60	26	100	112	63	30	96	106	37	27
吸收谷对称度	0.76	0.75	0.70	0.58	0.76	0.76	0.71	0.57	0.75	0.75	0.62	0.59
光谱吸收指数	1.313	1.329	0.988	0.985	1.447	1.409	1.026	0.989	1.345	1.288	0.971	0.958

I、II、III、IV 分别表示油菜角果成熟程度的 4 个等级,采样时间分别为 2022 年 3 月 16 日、2022 年 3 月 28 日、2022 年 4 月 13 日和 2022 年 4 月 25 日。

2.4 CPMI2 与其他角果光谱指数之间的关系

当前,判断油菜成熟程度的方法主要是通过表观色泽和含水量 2 项指标进行人工评判^[24],而表观色泽则主要体现在作物色素含量的变化。Penuelas 等^[25]利用 970 nm 和 900 nm 处的反射点构建水波段指数(WBI),并用于预测叶片含水量高低。Singh 等^[24]基于无人机高光谱提出的角果成熟指数(CPMI)与角果含水量的决定系数高达 0.81 以上,但与叶绿素含量或其相关指数的关系却并不明显。改进型叶绿素吸收比值指数(MCARI)能够敏感地反映植被叶片叶绿素含量的变化,能够有效预测叶绿素含量^[26]。另外也有研究结果表明,WBI 与植被水分含量呈负相关^[27-29],而 MCARI 与叶绿素含量呈正相关^[30-31]。

为探索 CPMI2 对油菜角果成熟程度的可表

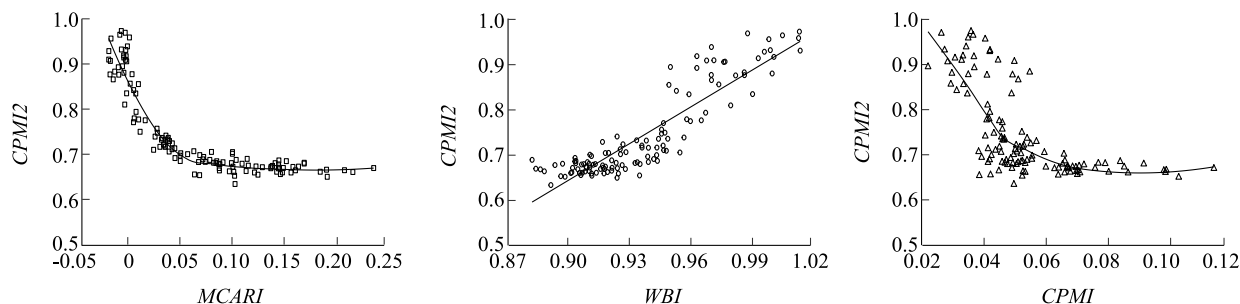
达性,本研究将 CPMI2 分别与 MCARI、WBI、油菜角果成熟指数进行相关性分析。图 6 显示,MCARI 增大,角果叶绿素含量增大,角果成熟程度降低,CPMI2 减小;WBI 增大,角果含水量减小,角果成熟程度升高,CPMI2 增大。CPMI2 与 MCARI、WBI、CPMI 3 个指数的决定系数分别为 0.89、0.81 和 0.55。上述结果说明 CPMI2 能较好地体现油菜角果叶绿素与含水量的变化,且与 Singh 等^[24]提出的 CPMI 有较好的相关性,能够对角果的成熟程度进行表达。

3 结论

本研究在分析不同品种油菜角果非成像原始高光谱反射曲线、一阶微分变换光谱和连续统去除变换光谱的基础上,开展不同成熟等级的油菜角果光

谱特征差异研究,并构建了一种能够有效表征油菜

角果成熟程度的高光谱指数,结论如下:



CPMI:油菜角果成熟指数;WBI:水波段指数;MCARI:改进型叶绿素吸收比值指数;CPMI2:新的油菜角果成熟指数。

图 6 CPMI2 与相关光谱指数之间的关系

Fig.6 The relationship between canola pod maturity index-2 (CPMI2) and the related spectral indices

(1)不同成熟等级的油菜角果反射光谱的红谷位置变化不大,而光谱反射率差异较大,主要体现在 625 nm 黄边波段两侧光谱反射率的突出变化。随着角果成熟度的增加,角果受到水分流失和叶绿素含量下降的双重胁迫,角果蓝边、红边位置总体均趋于向短波方向移动。

(2)在 625~675 nm,不同成熟等级的油菜角果光谱反射率区分性较强,光谱反射率减小的幅度差异较为明显。随着成熟等级的增大,蓝边幅值和红边幅值总体呈现减小趋势,黄边幅值略微有所增大;各品种的蓝边位置、黄边位置和红边位置在较小的波长范围内呈减小趋势;蓝边面积、红边面积总体呈现减小趋势,而黄边面积总体逐渐增大。

(3)油菜角果成熟度越高,红光吸收谷越浅,其谷点波深越低,吸收谷反射率不断增强,吸收谷波段起止波谱范围变窄,反映光谱吸收特征的波深、吸收谷面积、吸收谷宽度和光谱吸收指数等参数都趋于变小,波深曲线偏斜程度越大,吸收谷位置基本稳定在 675 nm 左右。

(4)基于不同成熟等级的油菜角果光谱分析特征,选用 625 nm、675 nm 和 730 nm 3 个光谱点构建了与其成熟度有较好一致性的新的油菜角果成熟指数 CPMI2,与反映植被叶绿素含量、水分含量的光谱指数及角果成熟指数有较高的相关性,能够较好地表达油菜角果成熟度。本研究的不足之处是缺乏 CPMI2 与相应角果样本叶绿素含量和水分含量实测值的关联分析,试验尚需进一步完善。

参考文献:

[1] 刘建刚,赵春江,杨贵军,等. 无人机遥感解析田间作物表型信

息研究进展[J].农业工程学报, 2016, 32(24): 98-106.

[2] 张锐,廖桂平,王访,等. 基于冠层高光谱的油菜角果期红边参数及叶片 SPAD 值反演模型[J].江苏农业科学, 2019, 47(20): 255-259.

[3] 鲍义东,陈秋实,陈果. 高光谱技术在农业遥感中的应用[J].电子技术与软件工程, 2020(8): 170-171.

[4] SCHMIDT K S, SKIDMORE A K. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland[J].Remote Sensing of Environment, 2003, 85(1): 92-108.

[5] MANSOUR K, MUTANGA O, EVERSON T, et al. Discriminating indicator grass species for rangeland degradation assessment using hyperspectral data resampled to AISA Eagle resolution[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 70: 56-65.

[6] ADAM E, MUTANGA O. Spectral discrimination of papyrus vegetation (*Cyperus papyrus* L.) in swamp wetlands using field spectrometry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(6): 612-620.

[7] 胡琳,甘淑,袁希平,等. 滇中三类型地表植被的机载高光谱特征分析[J].光谱学与光谱分析, 2021, 41(10): 3208-3213.

[8] 周伟,李浩然,石佩琪,等. 三江源区毒杂草型退化草地植被光谱特征分析[J].地球信息科学学报, 2020, 22(8): 1735-1742.

[9] 闫馨方,甘淑,胡琳,等. 昆明冬季典型作物的高光谱特征对比研究[J].测绘科学, 2021, 46(7): 60-66, 127.

[10] 王汉中. 以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报, 2018, 40(5): 613-617.

[11] 高开秀. 冬油菜关键长势参数及产量遥感反演方法研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2020.

[12] 马驿,汪善勤,李岚涛,等. 基于高光谱的油菜叶面积指数估计[J].华中农业大学学报, 2017, 36(2): 69-77.

[13] 杨婧,廖桂平,刘凡,等. 基于高光谱成像技术的油菜叶片叶绿素含量预测[J].中国农业科技导报, 2020, 22(5): 86-96.

[14] 郑煜,常庆瑞,王婷婷,等. 基于连续统去除和偏最小二乘回

- 归的油菜 SPAD 高光谱估算[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 37-45.
- [15] 赵赞忠. 油菜冠层特征光谱参数及其叶面积指数估测研究[D].长沙:湖南农业大学, 2018.
- [16] 李岚涛,任涛,汪善勤,等. 基于角果期高光谱的冬油菜产量预测模型研究[J].农业机械学报, 2017, 48(3): 221-229.
- [17] 常涛,谢鑫,官梅,等. 不同微肥处理下油菜产量与高光谱反射率关系分析[J].光谱学与光谱分析, 2021, 41(2): 552-557.
- [18] 张素兰,覃菊,唐晓东,等. 松材线虫危害下马尾松光谱特征与估测模型研究[J].光谱学与光谱分析, 2019, 39(3): 865-872.
- [19] 郑兰芬,王晋年. 成像光谱遥感技术及其图像光谱信息提取的分析研究[J].环境遥感, 1992, 7(1): 49-58.
- [20] 李粉玲,常庆瑞. 基于连续统去除法的冬小麦叶片全氮含量估算[J].农业机械学报, 2017, 48(7): 174-179.
- [21] 李喆,郭旭东,古春,等. 高光谱吸收特征参数反演草地光合有效辐射吸收率[J].遥感学报, 2016, 20(2): 290-302.
- [22] BROGE N H, LEBLANC E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(2): 156-172.
- [23] 陈鹏飞, NICOLAS T, 王纪华, 等. 估测作物冠层生物量的新植被指数的研究[J].光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 512-517.
- [24] SINGH K, DUDDU H, VAIL S, et al. UAV-based hyperspectral imaging technique to estimate canola (*Brassica napus* L.) seed-pods maturity[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2021, 47(1): 33-47.
- [25] PENUELAS J, FILELLA I, BIEL C, et al. The reflectance at the 950-970 nm region as an indicator of plant water status[J]. International Journal of Remote Sensing, 1993, 14(10): 1887-1905.
- [26] XUE J, SU B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications[J]. Journal of Sensors, 2017, 2017: 1-17.
- [27] 苏毅,王克如,李少昆,等. 棉花植株水分含量的高光谱监测模型研究[J].棉花学报, 2010, 22(6): 554-560.
- [28] 热依拉·艾合买提,吾木提·艾山江,阿不都艾尼·阿不里,等. 基于机器学习的春小麦叶片水分含量高光谱估算[J].麦类作物学报, 2022, 42(5): 640-648.
- [29] 刘畅,孙鹏森,刘世荣. 水分敏感的反射光谱指数比较研究——以锐齿槲栎为例[J].植物生态学报, 2017, 41(8): 850-861.
- [30] 吴朝阳,牛铮. 基于辐射传输模型的高光谱植被指数与叶绿素浓度及叶面积指数的线性关系改进[J].植物学通报, 2008, 25(6): 714-721.
- [31] 姜海玲,杨杭,陈小平,等. 利用光谱指数反演植被叶绿素含量的精度及稳定性研究[J].光谱学与光谱分析, 2015, 35(4): 975-981.

(责任编辑:王妮)