

基于高光谱的油菜叶面积指数估计

马 驿 汪善勤 李岚涛 张 铮 刘诗诗

华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070

摘要 以冬油菜为研究对象, 2014—2015年度设计了不同施氮水平直播油菜小区试验, 在不同生育时期测量冠层光谱、土壤背景光谱以及叶面积指数(leaf area index, LAI), 通过相关分析选取了12个光谱特征参数和11个植被指数, 建立6叶期至角果期LAI的5种线性和非线性定量反演模型。结果表明: 二次多项式反演模型比较适合估算油菜LAI苗期时以红边参数为代表的光谱特征参数, 可准确估算出LAI; 6叶期时红边幅值预测模型 R^2 为0.81, RMSEP为0.39, RPD为1.62; 8叶期时红蓝边面积比归一化预测模型 R^2 为0.79, RMSEP为0.60, RPD为2.30; 10叶期时红边幅值预测模型 R^2 为0.92, RMSEP为0.47, RPD为2.36; 盛花期时蓝边面积预测模型 R^2 为0.87, RMSEP为0.34, RPD为2.57; 角果期时以RDVI为代表的植被指数也可准确估算出LAI, 预测模型 R^2 为0.74, RMSEP为0.57, RPD为1.36。油菜全生育期采用相同光谱特征参数、植被指数建模估计LAI精度明显降低, 预测 R^2 远小于0.75, RMSEP大于0.65, RPD值均小于1.40, 表明难以采用统一参数建模准确估计油菜全生育期LAI, 不同生长时期需选择合适的光谱参数、植被指数分段建模估计LAI。

关键词 油菜; 叶面积指数; 高光谱; 相关分析

中图分类号 S 565.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2017)02-0069-09

叶面积指数(leaf area index, LAI)是单位地表面积上植物叶单面面积的总和^[1-2], 是反映作物群体光合作用、蒸腾作用、净初级生产力和生物量状态的重要参数^[3-5]。传统的作物LAI监测方法(如长宽系数法、方格法、纸重法、激光叶面积法、数码图像处理法^[6-7]), 虽然能相对准确地获得小范围LAI, 但耗时费力且具有破坏性, 无法用于快速获取大范围作物LAI。高光谱遥感监测农作物长势已经成为精准农业研究热点问题之一, 凭借波段连续性强、光谱信息量大的优势, 为实时快速大面积监测作物LAI提供有效途径^[8-10]。

近年来, 高光谱分辨率遥感技术的不断发展, 使得对地物进行微弱光谱差异定量分析成为可能, 大量改进型光谱特征参数、植被指数反演农学参数为精准农业提供技术支持^[11-12]。相关研究表明植被光谱红边参数、植被指数^[13-14]反演LAI效果较好。谢巧云等^[15]指出支持向量机反演冬小麦LAI精度可达82.3%, 刘占宇等^[16]利用调节归一化植被指数ANDVI预测水稻LAI精度达到63.1%; 谭昌伟

等^[17]也利用常用的植被指数估算玉米LAI, 预测 R^2 达到0.95, RMSE为0.0365; 齐波等^[18]运用RVI和NDVI两类植被指数估算大豆LAI相对标准误差小于20%; 黄敬峰等^[19]采用红边参数预测开花前油菜叶面积指数; R^2 达到0.41。相对于小麦、水稻、大豆等, 油菜整个生育期植株形态、叶形变化较大^[20], 增加了准确估测油菜叶面积指数的难度, 且冠层光谱受到花、角果的影响, 国内外研究油菜整个生育期LAI的研究报道较少。

油菜作为我国广泛种植的油料作物, 其生长发育和产量形成受氮素营养的影响极大^[21], 实时、精准和快速估测油菜LAI对于油菜生长诊断和管理以及油菜产量预测具有重要意义。本研究通过设计24块不同施氮水平直播油菜大田试验, 在不同生育时期测量各小区冠层光谱、土壤背景光谱以及LAI, 通过相关分析提取敏感波段、光谱参数, 拟运用高斯-牛顿算法, 建立不同生育时期、全生育期LAI定量反演模型, 通过综合对比分析建模效果和检验精度, 探索能适应监测不同氮素营养水平下冬油菜

收稿日期: 2016-10-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”)项目(2013AA102401-3)

马 驿, 硕士。研究方向: 植被高光谱遥感。E-mail: mayi@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 汪善勤, 副教授。研究方向: 农业遥感与数字土壤。E-mail: sqwang@mail.hzau.edu.cn

LAI的高光谱模型,为实现不同施肥水平下冬油菜不同生育时期长势精确监测和诊断提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 植株培育

2014年9月至2015年5月在湖北省武穴市梅川镇试验基地(30.1127°N, 115.5894°E)设置24个直播油菜小区,土壤为水稻土,0~20 cm耕层土壤pH 5.40,有机质30.08 g/kg,全氮1.72 g/kg,速效磷13.8 mg/g,速效钾92.1 mg/g,有效硼0.41 mg/g。供试品种为双低甘蓝型华油杂9号,小区面积均为20 m²(2 m×10 m),小区之间沟距0.5 m,小区播种量4.5 kg/hm²。氮肥处理设0、45、90、135、180、225、270、360 kg/hm² 8个水平,分别用N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅、N₁₈₀、N₂₂₅、N₂₇₀和N₃₆₀表示,各处理磷、钾、硼肥用量相等,按P₂O₅ 90 kg/hm²、K₂O 120 kg/hm²、硼砂15 kg/hm²施入;每个处理均3次重复,随机区组排列。氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、氯化钾(含K₂O 60%)和十水硼砂(含B 10.7%),全部氮、磷、钾、硼肥均一次性基施。

1.2 冠层光谱反射率观测

在相应时期(6叶期、8叶期、10叶期、盛花期、角果期)选择无云、无风晴朗天气,在每日10:00—14:00,采用美国ASD FieldSpec Pro FRTM光谱仪(350~2 500 nm、视场角25°)获取距离冠层顶部垂直高度1.0 m处的漫反射光谱,并及时根据天气进行标准白板校正。每个小区重复观测5次,取其平均值作为该小区的冠层光谱反射值,同时测量相应的土壤背景光谱,数据分析时剔除噪声较大的两段波段(350~399 nm和1 301~2 500 nm)。5次测量时间分别为2014年11月9日和12月8日、2015年1月15日、3月12日和4月14日。

1.3 叶面积指数测量

LAI与冠层光谱测量同步,采用英国Delta公司的Sunscan冠层分析系统测量油菜冠层LAI(与冠层光谱5个点位位置一致),取其平均值作为小区LAI。

1.4 提取光谱特征参数、植被指数

在400~1 300 nm范围内,提取基于冠层光谱

位置和面积的12个光谱特征参数(红边幅值、红边面积、红蓝边面积归一化、红黄边面积归一化等);冠层反射光谱与相应时期LAI进行相关分析,筛选出红光(630~690 nm)、近红外(770~900 nm)特征波长,构建11个认可度较高的比值、差值、归一化、非线性、改进型植被指数(RVI、DVI、NDVI、NLI、MSAVI等);各光谱特征参数、植被指数计算方法与文献来源见表1。

1.5 数据处理和分析

24个试验小区中16个小区数据作为建模集,剩下的8个小区数据作为验证集。首先,根据LAI与冠层漫反射光谱的Pearson相关系数筛选红光、近红外特征波段,并计算得到表1中的光谱特征参数、植被指数,然后采用高斯-牛顿算法建立对应时期估算LAI的5种模型并进行参数估计:线性($y = ax + b$)、指数($y = ae^{bx}$)、对数($y = a \ln x + b$)、幂函数($y = ax^b$)、二次多项式($y = ax^2 + bx + c$),最后根据建模和模型验证的决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)和预测偏差比率(RPD)等指标评价模型,其中建模集决定系数(R_{cal}^2)越大,均方根误差(RMSE)越小,模型精度越好;验证集决定系数(R^2)及RPD越大,预测均方根误差(RMSEP)越小,模型预测效果越好,模型预测能力一般分3个等级: $R_{val}^2 > 0.75$ 且 $RPD > 2.0$,说明模型预测能力较好; $0.50 \leq R_{val}^2 \leq 0.75$ 且 $1.4 \leq RPD \leq 2.0$,说明模型预测能力一般; $R_{val}^2 < 0.50$ 且 $RPD < 1.4$,说明模型预测能力较差。本文采用MATLAB R2012b进行数据处理分析,Origin8.0制图。

2 结果与分析

2.1 不同生育期各施氮水平油菜叶面积指数变化

相同氮素水平下,油菜LAI从6叶期到角果期先增加后降低,呈现“抛物线”趋势,在越冬前的8叶期,LAI达到最大值;盛花期和角果期植株由营养生长转入生殖生长,叶片衰老,直至所有叶片脱落,LAI逐渐降低。同一生育时期不同氮素水平下LAI差异明显(图1),N₀、N₄₅、N₉₀、N₁₃₅施氮水平下,各个时期LAI随施氮量增加而一直明显递增;N₁₈₀、N₂₂₅、N₂₇₀、N₃₆₀施氮水平下,6叶期和8叶期时LAI随施氮量增加反而降低;而到了10叶期、盛花期以及角果期时,4个施氮水平下的油菜LAI差异不明显。

表 1 光谱特征参数、植被指数计算方法及参考文献

Table 1 Algorithm and references of different spectral parameters and vegetation indices

变量名 Variable	计算公式或定义 Formulation	文献 Reference
蓝边幅值 D_b	波长 490~530 nm(蓝边)一阶导数光谱最大值	[22]
黄边幅值 D_y	波长 560~640 nm(黄边)一阶导数光谱最大值	[22]
红边幅值 D_r	波长 680~760 nm(红边)一阶导数光谱最大值	[19]
绿峰反射率 ρ_g	波长 510~560 nm 范围内最大的波段反射率	[23]
红谷反射率 ρ_r	波长 650~690 nm 范围内最小的波段反射率	[23]
蓝边面积 S_{Db}	波长 490~530 nm(蓝边)一阶导数光谱的积分	[24]
黄边面积 S_{Dy}	波长 560~640 nm 内(黄边)一阶导数光谱的积分	[24]
红边面积 S_{Dr}	波长 680~760 nm 内(红边)一阶导数光谱的积分	[19]
绿峰面积 S_{Dg}	波长 510~560 nm 内原始光谱曲线所包围的面积	[24]
绿峰红谷比值归一化 NGR	$(\rho_g - \rho_r) / (\rho_g + \rho_r)$	[25]
红蓝边面积比归一化 NBR	$(S_{Dr} - S_{Db}) / (S_{Dr} + S_{Db})$	[22]
红黄边面积比归一化 NYR	$(S_{Dr} - S_{Dy}) / (S_{Dr} + S_{Dy})$	[25]
比值植被指数 RVI	ρ_{NIR} / ρ_r	[17]
归一化植被指数 NDVI	$(\rho_{NIR} - \rho_r) / (\rho_{NIR} + \rho_r)$	[17]
垂直植被指数 PVI	$\sqrt{(\rho_{NIR}^s - \rho_{NIR}^v)^2 + (\rho_r^s - \rho_r^v)^2}$ 其中 s,v 分别表示土壤、植被	[5]
土壤调节植被指数 SAVI	$(1+L) \times (\rho_{NIR} - \rho_r) / (L + \rho_{NIR} + \rho_r)$, 其中 $L=0.5$	[17]
近红外百分比植被指数 IPVI	$\rho_{NIR} / (\rho_{NIR} + \rho_r)$	[18]
差值植被指数 DVI	$\rho_{NIR} - \rho_r$	[17]
改进型土壤调节植被指数 MSAVI	$(1+L) \times (\rho_{NIR} - \rho_r) / (L + \rho_{NIR} + \rho_r)$, 其中 $L = 1 - 2 \times a \times NDVI \times WDVI$ $WDVI = \rho_{NIR} - a \times \rho_r$	[4]
非线性植被指数 NLI	$(\rho_{NIR}^2 - \rho_r) / (\rho_{NIR}^2 + \rho_r)$	[4]
重归一化植被指数 RDVI	$\sqrt{NDVI \times (\rho_{NIR} - \rho_r)}$	[22]
改进的简单比值指数 MSR	$((\rho_{NIR} / \rho_r) - 1) / \sqrt{(\rho_{NIR} / \rho_r) + 1}$	[5]
绿波段归一化植被指数 GNDVI	$(\rho_{780} - \rho_{550}) / (\rho_{780} + \rho_{550})$	[18]

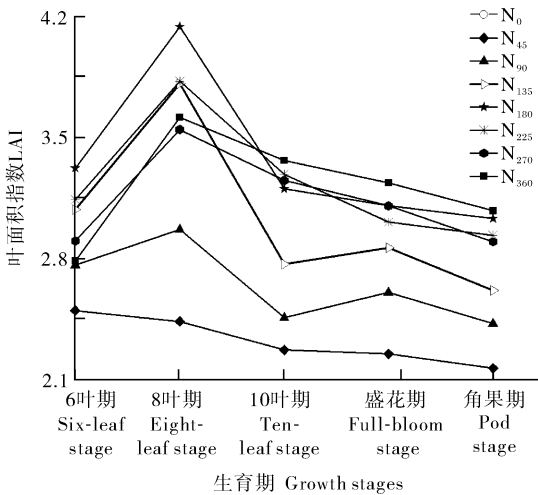


图 1 2014-2015 年不同氮素水平下油菜叶面积指数

Fig.1 Changes of LAI in rapeseed under

different N rates and changes of temperature in 2014-2015

2.2 不同生育期油菜冠层光谱反射率与 LAI 相关分析

在苗期(6 叶期、8 叶期、10 叶期)时,冠层光谱反射率与 LAI 相关系数变化趋势基本相同,在可见

光波段范围内 420、550 nm 左右出现波峰,在 500 nm 左右出现波谷,且在 650 nm 处红谷位置极显著负相关,720~1 300 nm 呈较强的稳定正相关关系;花期、角果期冠层反射率与 LAI 的相关系数趋势与苗期相比差异明显,可能受到花、角果的干扰,导致可见光波段与 LAI 相关系数波动较大,受植株含水率^[26]影响在近红外 930~970 nm 和 1 150~1 180 nm 波段范围也呈现明显的“吸收谷”(图 2)。根据相关分析筛选出各时期与 LAI 相关性较强的红光(630~690 nm)和近红外(770~900 nm)敏感波段(表 2)。

2.3 不同生育期油菜叶面积指数建模与验证

表 3 显示,6 叶期时二次多项式模型优于其他模型,其中红边参数(D_r 、 S_{Dr})建模和预测精度相对较高, R_{cal}^2 分别为 0.87、0.84, R_{val}^2 分别为 0.81、0.80, RMSEC 和 RMSEP 均不超过 0.45, RPD 值都小于 1.4,表明所建模型可用于预测 6 叶期 LAI 植被指数;而绿波段、蓝波段的相关参数(S_{Db} 、 ρ_g 等)建模和预测精度较差, R_{cal}^2 和 R_{val}^2 相对较小,表明所建模型难以用于估算 6 叶期 LAI。6 叶期油菜叶片

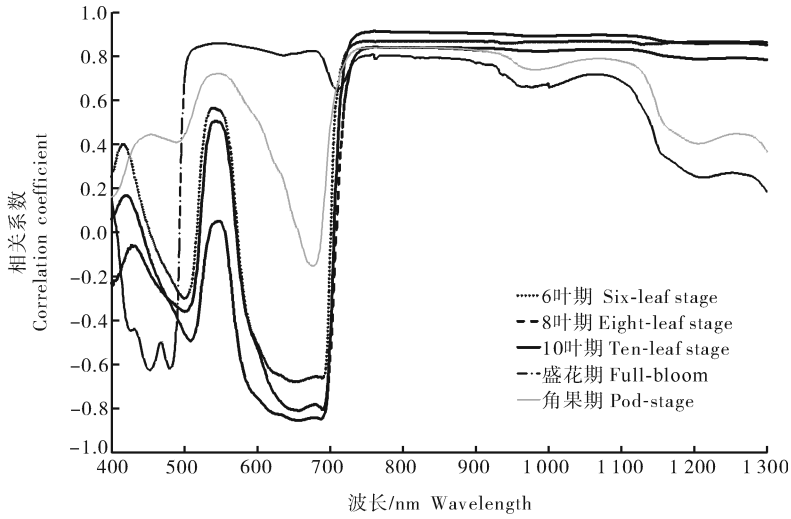


图 2 各时期油菜冠层光谱与 LAI 相关系数

Fig.2 Correlations of LAI with canopy reflectance spectrum under different N rates in rapeseed at different stages

表 2 各时期筛选的敏感波段

Table 2 Screening sensitive bands of canopy reflectance spectrum at different stages

时期 Growth stages	红光 Red		近红外 NIR	
	波段/nm Spectrum	相关系数 Correlation coefficient	波段/nm Spectrum	相关系数 Correlation coefficient
6 叶期 Six-leaf stage	653	-0.67 **	890	0.86 **
8 叶期 Eight-leaf stage	659	-0.85 **	780	0.84 **
10 叶期 Ten-leaf stage	658	-0.81 **	780	0.91 **
盛花期 Full-bloom stage	674	0.79 **	780	0.80 **
角果期 Pod stage	630	0.28	780	0.84 **

注: * 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平下的显著性。Note: * and ** means significance at 5% and 1% level respectively.

数量少、尺寸小,冠层光谱受土壤背景影响较大,而红边参数受土壤影响相对较小,因此,建模和预测精度相对较高。

表 4 显示,8 叶期时二次多项式模型和指数模型优于其他模型,其中植被指数相对于光谱特征参数具有更高的模型拟合度和预测精度,尤其是非线性植被指数 NLI 的 R_{cal}^2 和 R_{val}^2 达到 0.90、0.79, RMSEC 和 RMSEP 为 0.43、0.61,且 RPD 为 2.26 (大于 2),表明采用 NLI 所建模型可准确预测 8 叶期 LAI,其余的植被指数如 NDVI、TPVI、RVI、MSR、RDVI 等建模和预测精度也较高,反映了随着油菜生长发育进程的推进、叶片数和尺寸的增加,土壤背景的干扰减弱,合适的植被指数可以有效地估计 LAI,监测油菜长势。而绿波段、蓝波段的相关参数(S_{Dg} 、 ρ_{g} 等)所建模型的 R_{cal}^2 、 R_{val}^2 、RPD 值均比较小,建模和预测精度较差,所建模型难以用于估算 8 叶期 LAI。

表 5 显示,10 叶期时所筛选的模型均为非线性模型,以二次多项式和幂函数模型为主;其中植被指数(NLI、MSAVI、RDVI、NDVI 等)相对于光谱特征

(面积、位置)参数建模和预测精度相对较高,尤其是非线性植被指数 NLI、MSAVI、RDVI、NDVI 等所建模型 R_{cal}^2 和 R_{val}^2 均达到 0.90 以上, RMSEC 小于 0.30, RMSEP 小于 0.50 且 RPD 大于 2。10 叶期覆盖度高,土壤背景等因素对冠层光谱影响微弱,采用 NLI 等植被指数能够准确预测 10 叶期 LAI。除了绿峰面积、绿峰反射率、红谷反射率外,基于光谱位置、面积的特征参数如红、蓝、黄边面积以及红边参数建模和预测精度也比较高。

表 6 显示,盛花期时所测的冠层光谱和 LAI 受油菜花影响,所筛选的模型均为非线性模型,以二次多项式模型为主,建模和预测总体精度相对于 10 叶期显著降低;但是基于光谱位置、面积的特征参数如蓝、黄、红、绿峰面积以及红边参数等所建模型比植被指数所建模型的建模和预测精度明显提高,所建模型 R_{cal}^2 和 R_{val}^2 可达到 0.75 以上, RMSEC 和 RMSEP 均小于 0.50,部分 RPD 可大于 2,结果表明基于光谱位置、面积的部分特征参数可以减弱油菜花的影响,准确估计油菜花期 LAI,而植被指数等对油菜花比较敏感,受到花的干扰较大,难以准确估计花期 LAI。

表 3 6 叶期叶面积指数估计模型及检验

Table 3 The calibration and validation of prediction models of LAI at six-leaf stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	D_r	$Y=10457.55X^2-2.99X+0.69$	0.87	0.21	0.81	0.39	1.62
2	S_{Dr}	$Y=6.42X^2+0.099X+0.68$	0.84	0.23	0.80	0.45	1.40
3	DVI	$Y=6.13X^2+0.42X+0.64$	0.84	0.24	0.80	0.43	1.47
4	SAVI	$Y=19.32X^2-2.66X+0.85$	0.84	0.24	0.79	0.42	1.50
5	MSAVI	$Y=5.93X^2-1.86X+0.93$	0.84	0.24	0.78	0.42	1.50
6	RDVI	$Y=8.53X^2-3.7X+1.18$	0.83	0.24	0.78	0.42	1.50
7	NLI	$Y=1.59X^2+0.80X+0.84$	0.78	0.28	0.67	0.41	1.54
8	D_y	$Y=48240148.19X^2-10267.78X+1.41$	0.74	0.30	0.70	0.42	1.50
9	S_{Dy}	$Y=0.51e^{23.25X}$	0.74	0.30	0.54	0.49	1.29
10	PVI	$Y=-4.59X^2+6.49X+0.4$	0.74	0.31	0.52	0.46	1.37
11	NBR	$Y=19.08X^2-19.49X+5.74$	0.71	0.32	0.80	0.33	1.91
12	GNDVI	$Y=-0.04X^2+0.77X+0.03$	0.70	0.32	0.73	0.35	1.70
13	TPVI	$Y=32.7X^2-46.38X+17.17$	0.70	0.33	0.61	0.42	1.50
14	MSR	$Y=0.046X^2+0.64X+0.41$	0.69	0.33	0.65	0.40	1.58
15	RVI	$Y=-0.0063X^2+0.25X+0.2$	0.69	0.33	0.62	0.41	1.54
16	NDVI	$Y=3.02X^{1.96}$	0.66	0.35	0.54	0.44	1.44
17	D_b	$Y=404960.77X^2-796.43X+1.15$	0.65	0.35	0.47	0.49	1.29
18	NGR	$Y=6.009X^2-0.209X+0.71$	0.58	0.38	0.40	0.51	1.24
19	ρ_r	$Y=-1157.73X^2+93.09X+0.17$	0.57	0.39	0.39	0.50	1.26
20	S_{Db}	$Y=861.83X^2-37.77X+1.19$	0.49	0.42	0.28	0.53	1.19
21	ρ_g	$Y=108.24X^2-1.79X+0.48$	0.24	0.52	0.45	0.47	1.34
22	NYR	$Y=-122.59X^2+195.02X-75.56$	0.23	0.52	0.54	0.51	1.24
23	S_{Dg}	$Y=2.2\ln X-1.75$	0.16	0.54	0.45	0.49	1.29

表 4 8 叶期叶面积指数估计模型及检验

Table 4 The calibration and validation of prediction models of LAI at eight-leaf stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	NLI	$Y=0.37e^{2.99X}$	0.90	0.43	0.79	0.61	2.26
2	NBR	$Y=76.33X^2-95.22X+31.13$	0.89	0.45	0.79	0.60	2.30
3	NDVI	$Y=0.007e^{7.15X}$	0.88	0.47	0.87	0.49	2.82
4	TPVI	$Y=8.33X^{12.74}$	0.88	0.47	0.86	0.50	2.76
5	RVI	$Y=-0.0094X^2+0.46X-1.18$	0.88	0.47	0.85	0.52	2.65
6	MSR	$Y=0.05X^2+1.46X-0.98$	0.87	0.47	0.85	0.51	2.70
7	RDVI	$Y=17.42X^2-7X+0.9$	0.87	0.48	0.64	0.82	1.68
8	MSAVI	$Y=10.2X^2-1.59X+0.11$	0.87	0.48	0.61	0.85	1.62
9	PVI	$Y=-17.95X^2+19.26X-1.1$	0.87	0.47	0.34	1.10	1.25
10	D_r	$Y=4538.37X^2+360.06X-1.17$	0.86	0.49	0.61	0.88	1.57
11	SAVI	$Y=27.95X^2+1.46X-0.32$	0.85	0.51	0.59	0.88	1.57
12	GNDVI	$Y=0.98X-1.37$	0.85	0.51	0.80	0.58	2.39
13	NGR	$Y=24.33X^2-4.04X+0.3$	0.84	0.52	0.80	0.62	2.22
14	DVI	$Y=4.36X^2+7.29X-0.9$	0.84	0.53	0.57	0.90	1.53
15	S_{Dr}	$Y=4.11X^2+7.44X-0.96$	0.83	0.54	0.56	0.91	1.52
16	S_{Dy}	$Y=-1195.67X^2+175.59X-1.47$	0.82	0.56	0.57	0.87	1.59
17	D_y	$Y=45304233.54X^2-18997.91X+2.9$	0.71	0.71	0.83	0.60	2.30
18	ρ_r	$Y=-1073.25X^2-18.98X+5.05$	0.71	0.71	0.77	0.77	1.79
19	NYR	$Y=-1357.07X^2+2249.13X-928.23$	0.67	0.76	0.42	2.21	0.62
20	D_b	$Y=-65441118.80X^2+22401.09X-15.95$	0.52	0.92	0.36	1.19	1.16
21	S_{Db}	$Y=-18040.02X^2+1295.96X-20.17$	0.24	1.15	0.28	1.10	1.25
22	S_{Dg}	$Y=-1.07X^2+7.42X-10.04$	0.03	1.31	0.02	1.31	1.05
23	ρ_g	$Y=-1329.7X^2+230.62X-7.23$	0.02	1.31	0.03	1.32	1.04

表5 10叶期叶面积指数估计模型及检验

Table 5 The calibration and validation of prediction models of LAI at ten-leaf stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	NLI	$Y=3.59X^2+0.42X+0.19$	0.93	0.23	0.94	0.44	2.52
2	D_b	$Y=-1905188.01X^2+7323.36X-4.33$	0.92	0.25	0.91	0.39	2.84
3	MSAVI	$Y=8.29X^2-2.7X+0.46$	0.91	0.27	0.92	0.47	2.36
4	RDVI	$Y=12.86X^2-6.15X+1$	0.91	0.26	0.92	0.47	2.36
5	NGR	$Y=-6.63X^2+9.88X-0.2$	0.90	0.28	0.97	0.34	3.26
6	NDVI	$Y=0.0046e^{7.4X}$	0.90	0.27	0.97	0.42	2.64
7	TPVI	$Y=0.0000028e^{14.8X}$	0.90	0.27	0.97	0.42	2.64
8	RVI	$Y=0.0009X^2+0.23X-0.44$	0.90	0.28	0.96	0.42	2.64
9	MSR	$Y=0.48X^{1.79}$	0.90	0.28	0.96	0.43	2.57
10	SAVI	$Y=25.94X^2-3.4X+0.31$	0.90	0.28	0.91	0.49	2.26
11	S_{Dy}	$Y=-1671.82X^2+130.11X+0.08$	0.90	0.27	0.88	0.47	2.36
12	D_r	$Y=6230.91X^2+165.76X-0.45$	0.89	0.29	0.92	0.47	2.36
13	S_{Dr}	$Y=8.25X^{1.79}$	0.88	0.30	0.90	0.50	2.21
14	DVI	$Y=8.18X^{1.77}$	0.88	0.30	0.90	0.50	2.21
15	S_{Db}	$Y=-9250.73X^2+676.11X-9.78$	0.88	0.31	0.89	0.45	2.46
16	PVI	$Y=-1.22X^2+6.39X-0.1$	0.86	0.33	0.89	0.58	1.91
17	GNDVI	$Y=0.22X^2-1.11X+1.58$	0.78	0.41	0.84	0.77	1.44
18	NYR	$Y=146.5X^2-295.18X+149.11$	0.76	0.43	0.51	0.74	1.50
19	NBR	$Y=112.38X^{30.16}$	0.69	0.50	0.87	0.87	1.27
20	D_y	$Y=19453411.41X^2-15380.52X+3.72$	0.68	0.50	0.64	0.69	1.60
21	ρ_r	$Y=744.17X^2-135.7X+6.37$	0.57	0.58	0.85	0.62	1.79
22	ρ_g	$Y=555.03X^2-36.2X+1.1$	0.25	0.76	0.10	1.00	1.11
23	S_{Dg}	$Y=-0.01X^2+0.95X-1.46$	0.14	0.81	0.03	1.05	1.05

表6 盛花期叶面积指数估计模型及检验

Table 6 The calibration and validation of prediction models of LAI at full-bloom stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	S_{Db}	$Y=1.94\ln X+6.73$	0.80	0.37	0.87	0.34	2.57
2	S_{Dy}	$Y=2630.08X^2-33.46X+0.28$	0.80	0.38	0.79	0.67	1.30
3	D_b	$Y=-238260.96X^2+2293.39X-2.48$	0.79	0.39	0.84	0.39	2.24
4	ρ_g	$Y=-96.86X^2+48.78X-3.01$	0.76	0.41	0.85	0.39	2.24
5	S_{Dg}	$Y=2.88\ln X-3.31$	0.75	0.42	0.85	0.40	2.18
6	NYR	$Y=253.84X^2-471.05X+218.85$	0.74	0.43	0.79	0.49	1.78
7	NBR	$Y=-16.82X^2+14.19X-0.22$	0.70	0.46	0.89	0.29	3.01
8	ρ_r	$Y=2.25\ln X+7.39$	0.66	0.49	0.80	0.42	2.08
9	DVI	$Y=-134.93X^2+121.33X-24.83$	0.65	0.49	0.25	1.29	0.68
10	S_{Dr}	$Y=134.34X^2+120.38X-24.53$	0.64	0.50	0.24	1.29	0.68
11	D_y	$Y=-35113484.42X^2-543.5X+2.09$	0.63	0.51	0.79	0.41	2.13
12	PVI	$Y=-18.11X^2+20.45X-2.90$	0.63	0.51	0.15	0.85	1.03
13	D_r	$Y=-203477.25X^2+4073.59X-18.14$	0.61	0.52	0.24	1.07	0.82
14	GNDVI	$Y=-0.2X^2-0.04X+3.18$	0.60	0.53	0.73	0.46	1.90
15	RVI	$Y=-0.04X^2+0.04X+2.9$	0.47	0.61	0.47	0.61	1.43
16	MSR	$Y=-0.96X^2+0.57X+2.86$	0.46	0.61	0.48	0.61	1.43
17	NDVI	$Y=-23.38X^2+22.22X-2.33$	0.44	0.62	0.50	0.60	1.46
18	TPVI	$Y=-93.5X^2+137.94X-47.93$	0.44	0.62	0.50	0.60	1.46
19	SAVI	$Y=-477.25X^2+294.69X-43.28$	0.39	0.65	0.17	1.41	0.62
20	RDVI	$Y=401.38X^2-409.8X+105.9$	0.19	0.75	0.23	1.33	0.66
21	MSAVI	$Y=141.83X^2-138.85X+35.33$	0.15	0.77	0.61	1.04	0.84
22	NLI	$Y=49.87X^2-47.53X+12.7$	0.15	0.77	0.02	1.08	0.81
23	NGR	$Y=142.05X^2-80.49X+12.8$	0.07	0.81	0.01	1.02	0.86

表 7 显示,角果期时油菜叶片基本脱落,植被覆盖度明显降低,所测冠层光谱主要成分为角果光谱,且受土壤背景干扰较大,所测 LAI 受角果数量、大小影响较大,所筛选的模型均为二次多项式模型,以植被指数为主所建模型虽然 R_{cal}^2 可达 0.85 以上, RMSEC 在 0.25 左右,但是模型预测精度较低, R_{val}^2 在 0.75 以下, RMSEP 大于 0.5, 大部分 RPD 小于 1.4, 表明所建模型不够稳定, 难以准确预测角果期 LAI; 而基于光谱位置、面积的特征参数所建模型不

仅建模精度较低,而且预测效果也不够理想,大部分 R_{cal}^2 和 R_{val}^2 小于 0.75, RMSEP 大于 0.7, RPD 均小于 1.4, 表明角果期冠层光谱和 LAI 受角果、土壤、叶片脱落枯黄等影响, 不论是基于光谱位置、面积的特征参数还是植被指数所建模型都不够稳定, 难以准确估计角果期 LAI。

2.4 6 叶期至角果期油菜叶面积指数建模与验证

对 12 个光谱特征参数和 11 个植被指数汇总, 建立 6 叶期至角果期油菜 LAI 统一预测模型(表 8,

表 7 角果期叶面积指数估计模型及检验

Table 7 The calibration and validation of prediction models of LAI at pod stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	RDVI	$Y=42.28X^2-28.69X+5.09$	0.88	0.24	0.74	0.57	1.36
2	MSAVI	$Y=31.36X^2-19.85X+3.38$	0.88	0.24	0.73	0.57	1.36
3	NLI	$Y=10.68X^2-1.84X+0.31$	0.88	0.24	0.70	0.53	1.46
4	SAVI	$Y=91.76X^2-29.62X+2.61$	0.87	0.25	0.72	0.63	1.23
5	DVI	$Y=28.16X^2-9.21X+0.88$	0.86	0.26	0.71	0.72	1.08
6	D_y	$Y=22423199.31X^2-15201.27X+2.65$	0.86	0.26	0.55	0.56	1.38
7	S_{Dr}	$Y=28.68X^2-11.08X+1.26$	0.85	0.27	0.68	0.77	1.01
8	S_{Dy}	$Y=917.13X^2-3.22X+0.19$	0.82	0.30	0.70	0.53	1.46
9	PVI	$Y=-6.71X^2+10.48X-1.14$	0.80	0.31	0.65	0.55	1.41
10	NDVI	$Y=54.53X^2-57.43X+15.25$	0.78	0.32	0.84	0.56	1.38
11	TPVI	$Y=218.1X^2-332.97X+127.21$	0.78	0.32	0.84	0.56	1.38
12	MSR	$Y=2.6X^2-2.82X+0.7$	0.78	0.33	0.83	0.57	1.36
13	RVI	$Y=0.09X^2-0.15X-0.42$	0.77	0.33	0.82	0.57	1.36
14	D_r	$Y=121469.21X^2-1424.18X+4.45$	0.75	0.35	0.56	1.05	0.74
15	D_b	$Y=728795.4X^2-1418.21X+0.84$	0.69	0.39	0.64	0.76	1.02
16	S_{Db}	$Y=1215.11X^2-58.68X+0.83$	0.68	0.40	0.63	0.79	0.98
17	NYR	$Y=147.6X^2-269.78X+123.57$	0.68	0.39	0.47	0.57	1.36
18	NGR	$Y=20.98X^2-6.1X+0.85$	0.66	0.40	0.67	0.58	1.33
19	GNDVI	$Y=0.27X^2+0.39X-1.81$	0.56	0.46	0.95	0.63	1.23
20	ρ_g	$Y=385.85X^2-53.66X+2.15$	0.47	0.51	0.58	0.87	0.89
21	NBR	$Y=-150.74X^2+254.39X-104.56$	0.40	0.54	0.90	0.60	1.29
22	S_{Dg}	$Y=0.18X^2-1.07X+1.84$	0.40	0.54	0.59	0.78	0.99
22	ρ_r	$Y=-1005.06X^2+92.71X-0.63$	0.28	0.59	0.20	0.95	0.81

表 8 6 叶期至角果期叶面积指数估计模型及检验

Table 8 The calibration and validation of prediction models of LAI from six-leaf stage to pod stage

序号 Serial number	变量 Variable	模型 Model	建模集($n=16$) Calibration($n=16$)		预测集($n=8$) Validation($n=8$)		
			R_{cal}^2	RMSEC	R_{val}^2	RMSEP	RPD
1	NLI	$Y=6.86X^2-0.69X+0.18$	0.65	0.62	0.44	0.67	1.36
2	MSAVI	$Y=6.07X^{1.95}$	0.63	0.63	0.39	0.70	1.30
3	RDVI	$Y=7.64X^{2.31}$	0.62	0.64	0.39	0.70	1.30
4	SAVI	$Y=19.8X^{1.9}$	0.62	0.64	0.37	0.71	1.28
5	DVI	$Y=8.23X^{1.57}$	0.60	0.66	0.34	0.73	1.25
6	MSR	$Y=0.53e^{0.65X}$	0.58	0.68	0.50	0.65	1.38
7	RVI	$Y=0.0036X^2+0.15X+0.35$	0.58	0.68	0.48	0.66	1.37
8	S_{Dr}	$Y=7.71X^{1.53}$	0.57	0.68	0.31	0.74	1.22
9	D_r	$Y=1171.48X^{1.38}$	0.57	0.68	0.32	0.74	1.23
10	IPVI	$Y=0.0008e^{8.74X}$	0.55	0.70	0.38	0.72	1.26
11	NDVI	$Y=0.065e^{4.37X}$	0.55	0.70	0.38	0.72	1.26
12	PVI	$Y=-5.77X^2+9.47X-0.36$	0.52	0.72	0.21	0.82	1.11
13	NGR	$Y=4.91X^{0.9}$	0.43	0.78	0.15	0.86	1.06
14	S_{Dy}	$Y=0.84\ln X+4.85$	0.42	0.79	0.11	0.87	1.05

有 9 个模型的建模集和预测精度过低未列举),其余的 14 个模型建模的 R_{cal}^2 为 0.42~0.65, RMSEC 范围为 0.62~0.79, 建模精度较低, 预测 R_{val}^2 范围为 0.11~0.44, RMSEP 范围为 0.67~0.87, RPD 值均小于 1.4, 预测精度也较低, 因此, 难以采用统一的光谱参数和植被指数建立稳定的模型估测油菜全生育期 LAI。

3 讨论

3.1 不同施氮水平对油菜叶面积指数的影响

相同氮素水平下, 油菜 LAI 从 6 叶期到角果期先增加后降低, 呈现“抛物线”趋势。有关研究表明, 温度是影响油菜叶片细胞分裂和扩大的主要因素^[27], 在越冬前气温相对较高的 8 叶期, LAI 达到最大值; 10 叶期(12 月 1 日之后)降温快、昼夜温差大, 冻害^[28]导致叶片卷曲和萎缩, LAI 会相应减少; 盛花期和角果期植株由营养生长转入生殖生长, 叶片衰老逐渐脱落, LAI 逐渐降低。

同一生育时期不同氮素水平下油菜 LAI 差异明显, 随施氮水平先增加后降低, 呈现抛物线变化趋势, N_0 、 N_{45} 、 N_{90} 、 N_{135} 低氮水平下, 各个时期 LAI 随施氮量增加明显递增, 而 N_{180} 、 N_{225} 、 N_{270} 、 N_{360} 高氮水平下, 6 叶期和 8 叶期时 LAI 随施氮量增加反而降低, 而到了 10 叶期、盛花期以及角果期 4 个施氮水平下的油菜 LAI 差异不够明显, 说明施氮量达到一定的程度(N_{180})时 LAI 并不会随着施氮量的增加显著增加, 而是呈现“抛物线”变化趋势, 植株甚至会出现“过氮致死”现象, 导致 LAI 降低, 合理施氮(N_{180})可以有效地促进油菜生长发育, 低氮或过氮都会对植株生长发育产生不利影响^[21], 导致叶面积指数减少。

3.2 6 叶期至角果期油菜叶面积指数建模与验证

油菜苗期(6 叶期、8 叶期、10 叶期)冠层光谱与 LAI 所选红光波段均在 655 nm 附近, 盛花期和角果期所选的波段为 674、630 nm, 与苗期所选波段差异较大, 可能是因为盛花期中的油菜花以及角果期的角果、土壤背景对冠层光谱红光干扰较大, 而所选的近红外敏感波段除了 6 叶期外, 其余时期所选波段均为 780 nm, 表明近红外波段 780 nm 左右受到外界干扰较小, 可以作为反演油菜 LAI 的较为固定的敏感波段。不同时期所建反演 LAI 模型以多项式为主, 但不同时期最优模型差异较大, 在苗期时以红边参数为主的建模精度和预测效果较好, 该结果与黄敬峰等^[19]的报道相似, 而油菜生长后期(花期、

角果期)则是以 NLI 为代表的非线性指数建模精度和预测效果相对较高, 全生育所建模型精度较低, 难以采用相对固定的光谱参数和指数来预测油菜整个生育期 LAI。随着生长发育进程的推进, 油菜叶形不断发生变化, 苗期叶形较单一, 以长柄叶为主, 越冬期后叶形最复杂, 包含 3 组叶片, 且各个时期土壤背景、花、角果等对冠层光谱和 LAI 的影响不尽相同, 最好选用不同的合适光谱参数和指数反演各个时期油菜 LAI。

参 考 文 献

- [1] 谢巧云, 黄文江, 梁栋, 等. 最小二乘支持向量机方法对冬小麦叶面积指数反演的普适性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(2): 489-493.
- [2] 贺佳, 刘冰峰, 李军, 等. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 141-150.
- [3] 吴伟斌, 杜俊毅, 洪添胜, 等. 基于精确喷雾的水平叶面积指数检测[J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(2): 125-130.
- [4] VINA A, GITELSON A, NGUY-ROBERTSON A L, et al. Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops [J]. Remote sensing of environment, 2011, 115, 3468-3478.
- [5] ABOU-ISMAIL O, HUANG J F, WANG R C. Rice yield estimation by integrating remote sensing with rice growth simulation model [J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 519-526.
- [6] 石剑飞, 殷雅艳, 冷锁虎, 等. 采用数码图像处理法测定油菜叶面积的方法[J]. 中国油料作物学报, 2010, 32(3): 379-382.
- [7] 杨劲峰, 陈清, 韩晓日, 等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 155-158.
- [8] TANG Y L, WANG R C, HUANG J F. Relations between red edge characteristics and agronomic parameter of crops [J]. Pedosphere, 2004, 14(4): 467-474.
- [9] TANG H, MATTHEW B, ZHAO F, et al. Deriving and validating leaf area index (LAI) at multiple spatial scales through lidar remote sensing: a case study in Sierra National Forest [J]. Remote sensing of environment, 2014, 143(5): 131-141.
- [10] 姚付启, 蔡焕杰, 王海江, 等. 基于平稳小波变换的冬小麦覆盖度高光谱监测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 173-180.
- [11] 董恒, 何枋键, 张城芳. 基于辐射传输模型的 FPARgreen 与几种植被指数的关系研究[J]. 华中农业大学学报, 2016, 35(4): 70-75.
- [12] 张钊, 陈家赢, 黄魏. 基于 OGC WPS 的 TVDI 算法实现与共享 [J]. 华中农业大学学报, 2015, 34(5): 63-69.
- [13] LI F, MIAO Y X, FENG G H, et al. Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices [J]. Field crops research, 2014, 157, 111-123.
- [14] HATFIELD J L, GITELSON A A, SCHEPERS J S, et al. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions [J]. Agronomy journal, 2008, 100: 117-131.

- [15] 谢巧云, 黄文江, 蔡淑红, 等. 冬小麦叶面积指数遥感反演方法比较研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(5): 1352-1356.
- [16] 刘占宇, 黄敬峰, 王福民, 等. 估算水稻叶面积指数的调节型归一化植被指数[J]. 中国农业科学, 2008, 41(10): 3350-3356.
- [17] 谭昌伟, 黄义德, 黄文江, 等. 夏玉米叶面积指数的高光谱遥感植被指数法研究[J]. 安徽农业大学学报, 2004, 31(4): 392-397.
- [18] 齐波, 赵晋铭, 盖钧镒, 等. 利用高光谱技术估测大豆育种材料的叶面积指数[J]. 作物学报, 2015, 41(7): 1073-1085.
- [19] 黄敬峰, 王渊, 王福民, 等. 油菜红边特征及其叶面积指数的高光谱估算模型[J]. 农业工程学报, 2006, 8(8): 22-26.
- [20] 张治礼, 郑学勤. 油菜叶片自然衰老过程中部分生理指标的变化规律[J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(2): 48-51.
- [21] 左青松, 蒯婕, 周广生, 等. 不同氮肥和密度对直播油菜冠层结构及群体特征的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(5): 758-765.
- [22] 程迪, 刘咏梅, 李京忠, 等. 青海祁连瑞香狼毒的光谱差异特征提取[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2307-2313.
- [23] 胡珍珠, 潘存德, 肖冰, 等. 基于光谱特征参量的核桃叶片氮素含量估测模型[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 180-186.
- [24] 鞠昌华, 田永超, 曹卫星, 等. 油菜光合器官面积与导数光谱特征的相关关系[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3): 664-672.
- [25] 张晓艳, 刘锋, 王丽丽, 等. 花生叶面积指数与特征导数光谱的相关性[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(5): 668-674.
- [26] 张晓东, 毛罕平. 油菜氮素光谱定量分析中水分胁迫与光照影响及修正[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 164-169.
- [27] 汤亮, 朱艳, 曹卫星. 油菜绿色面积指数动态模拟模型[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 897-902.
- [28] 曹金华, 朱家成, 张书芬, 等. 覆盖对土壤温度及甘蓝型油菜丰油10号抗寒性和产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(2): 213-218.

Prediction of rapeseed leaf area index based on hyperspectral data

MA Yi WANG Shanqin LI Lantao ZHANG Zheng LIU Shishi

College of Resources and Environmental Sciences, Huazhong Agricultural University,
Wuhan 430070, China

Abstract Plot experiments of the winter rapeseed (*Brassica napus* L.) with different nitrogenous levels under direct seeding treatment were conducted in 2014–2015. The canopy spectral reflectance, soil background, LAI of each plot were measured at different stages. Correlation analysis between the canopy spectral reflectance and LAI was used to calculate eleven vegetation indices and twelve spectral parameters based on spectral position and area for optimizing five kinds of linear and nonlinear (logarithm, parabola, power and exponential) quantitative remote sensing inversion models to estimate LAI at the different and whole growth stages. The results showed that the quadratic polynomial inversion models perfectly estimated LAI of winter rapeseed using hyperspectral techniques. The spectral red edge parameters estimated accurately LAI at seedling stage. The predicted models based on D_r , NBR, D_r produced better estimation for LAI at six-leaf stage, eight-leaf stage and ten-leaf stage, respectively. R^2 was 0.81, 0.79 and 0.92 ($P < 0.01$), respectively. RMSEP (root mean square error of predicted models) was 0.39, 0.60 and 0.47, respectively. RPD (residual predictive deviation) was 1.62, 2.30 and 2.36, respectively. The predicted models based on S_{Db} and RDVI produced better estimation for LAI at full-bloom stage and pod stage with R^2 of 0.87 and 0.74 ($P < 0.01$), RMSEP of 0.34 and 0.57, and RPD of 2.57 and 1.36. The unified validation of models ($R^2 \ll 0.75$, $RMSEP > 0.65$, $RPD < 1.4$) showed that there was low prediction precision with the unified spectral variables or vegetation indices monitoring LAI at the whole stages of growth. The prediction accuracy of monitoring model based on the appropriate spectral variables and vegetation indices to estimate LAI at different stages of the winter rapeseed growth was high.

Keywords rapeseed; leaf area index; hyperspectral data; correlation analysis

(责任编辑: 张志钰)