

# 基于角果期高光谱的冬油菜产量预测模型研究

李岚涛<sup>1,2</sup> 任涛<sup>1,2</sup> 汪善勤<sup>2</sup> 明金<sup>2</sup> 刘秋霞<sup>1,2</sup> 鲁剑巍<sup>1,2</sup>

(1. 华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2. 农业部长江中下游耕地保育重点实验室, 武汉 430070)

**摘要:** 以连续3 a田间氮肥水平试验为基础,研究基于高光谱估产的可行性,明确最佳光谱监测方式和有效波段,降低光谱分析维数,提高产量估测时效性。2013—2016年分别于湖北省武穴市和沙阳县进行大田试验,通过测试角果期冠层光谱反射率、产量构成因子(单株角果数、每角粒数和千粒质量)和成熟期产量,利用偏最小二乘回归(PLS)分别对油菜原初光谱(RSR)和一阶微分光谱(FDR)与其产量及构成因子间构建定量分析模型并筛选有效波段。结果表明,基于全波段的FDR-PLS模型预测精度显著优于R-PLS,其最佳监测指标是冬油菜产量和角果数,验证集决定系数( $R^2$ )分别为0.90和0.91,均方根误差(RMSE)分别为379 kg/hm<sup>2</sup>和66个/株,相对分析误差(RPD)分别为3.11和3.12。基于各波段变量重要性投影(VIP)值,确定冬油菜产量有效波段分别为628、753、882、935、1 061、1 224 nm;角果数有效波段分别为628、758、935、1 063、1 457、1 600 nm。此后,再次构建基于上述有效波段的冬油菜产量和角果数监测模型,决定系数分别为0.91和0.87,均方根误差分别为504 kg/hm<sup>2</sup>和82个/株,相对分析误差分别为2.34和2.52,估算精度较为理想。

**关键词:** 冬油菜; 角果期; 产量; 预测模型; 高光谱; 偏最小二乘回归

**中图分类号:** S565.4; S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0221-09

## Prediction Models of Winter Oilseed Rape Yield Based on Hyperspectral Data at Pod-filling Stage

LI Lantao<sup>1,2</sup> REN Tao<sup>1,2</sup> WANG Shanqin<sup>2</sup> MING Jin<sup>2</sup> LIU Qiuxia<sup>1,2</sup> LU Jianwei<sup>1,2</sup>

(1. Microelement Research of Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtse River), Ministry of Agriculture, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** Hyperspectral remote sensing can provide a non-destructive and effective approach for assessing the yield and yield components of oilseed rape timely. A quantitative technique was developed to estimate oilseed rape yield accurately depending on ground-based canopy reflectance spectra. Field experiments were conducted over three growing seasons at different sites (Wuxue and Shayang) in Hubei Province, China. The key parameters, including canopy hyperspectral reflectance during pod-filling period, seed yield and yield components (pod numbers per plant, seed numbers per pod and 1 000 seed weight) were monitored. A partial least square (PLS) regression analysis was employed to perform the relationship between raw spectral reflectance (RSR), the first derivative reflectance (FDR) and seed yield and yield components. According to the calibration dataset, the best results were obtained with the FDR-PLS model for the prediction of yield and pod number, which yielded the highest coefficient of determination ( $R^2_{cal}$ ) of 0.96 and 0.98, and the lowest root mean square error ( $RMSE_{cal}$ ) of 158 kg/hm<sup>2</sup> and 17 pods/plant, respectively. The tests using the independent validation dataset also showed that the FDR-PLS model could well forecast yield and pod number of winter oilseed rape, with values of  $R^2_{val}$  of 0.90 and 0.91,  $RMSE_{val}$  of 379 kg/hm<sup>2</sup> and 66 pods/plant, and RPD of 3.11 and 3.12, respectively. The variable importance in projection (VIP) scores resulted from the PLS regression analysis were used to determine the effective wavelengths and reduce the dimensionality of the spectral reflectance data. The newly-developed FDR-PLS model using the effective wavelengths (628 nm, 753 nm, 882 nm, 935 nm,

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-08-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(31471941)和国家油菜产业体系建设专项(CARS-13)

作者简介: 李岚涛(1987—),男,博士生,主要从事作物营养光谱诊断研究,E-mail: lilantao@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 鲁剑巍(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事作物营养与现代施肥技术研究,E-mail: lunm@mail.hzau.edu.cn

1 061 nm and 1 224 nm) performed well in yield prediction with  $R_{\text{val}}^2$  of 0.91,  $\text{RMSE}_{\text{val}}$  of 504 kg/hm<sup>2</sup> and  $\text{RPD}_{\text{val}}$  of 2.34; Similar results were also obtained for pod number prediction with  $R_{\text{val}}^2$  of 0.87,  $\text{RMSE}_{\text{val}}$  of 82 pods/plant and  $\text{RPD}_{\text{val}}$  of 2.52 using the effective wavelengths (628 nm, 758 nm, 935 nm, 1 063 nm, 1 457 nm and 1 600 nm). Consequently, the yield of winter oilseed rape could be reliably estimated with the *in situ* developed FDR-PLS method.

**Key words:** winter oilseed rape; pod-filling stage; yield; prediction model; hyperspectral; partial least square (PLS)

## 引言

相比传统的作物估产措施,高光谱技术以其实用性强、波段信息丰富且能融合卫星遥感以实现区域化的产量监测而得以快速发展,已广泛应用于小麦<sup>[1]</sup>、玉米<sup>[2]</sup>和棉花<sup>[3]</sup>等多种农作物。目前,基于高光谱的作物产量估测技术主要有植被指数法和数学统计法(如偏最小二乘回归)<sup>[4]</sup>。植被指数法一般利用2个或3个特征波段通过计算其比值、差值或归一化值来定量评估作物产量时空变化,其特点是计算方便、形式简洁。由于作物冠层高光谱是其生长信息的综合反映,受各种复杂因素影响,如生态环境、营养胁迫以及病虫害等;此外,高光谱技术具有波段维数多、波段连续性强,且波段间具有严重的多重共线性。因此,基于简单波段的植被指数法难以有效表征作物群体信息,稳定性和解释性差,预测能力不强<sup>[5]</sup>。偏最小二乘回归(Partial least square, PLS)是WORD于1983年提出的一种多元统计数据分析技术。PLS集典型相关分析、多元线性回归分析和主成分分析的主要功能为一体,可有效克服环境因子间存在的多重共线性问题,使所构建模型具有较强的鲁棒性和稳定性<sup>[6]</sup>,目前已广泛应用于作物营养诊断和产量监测<sup>[7-9]</sup>。

冬油菜是一种对氮素敏感且需氮量较多的作物,整个生育期需氮量一般在200~300 kg/hm<sup>2</sup>之间<sup>[10]</sup>,合理氮肥运筹不仅可优化其对氮素吸收利用,同时增强了叶片和角果的光合作用,并最终提高籽粒产量。研究表明,我国油菜施氮增产量和增产率均值分别高达1 044 kg/hm<sup>2</sup>和87.4%,每千克氮肥平均增收油菜籽约6.2 kg<sup>[11]</sup>。在生产实际中,农民虽较重视氮肥施用,但氮肥用量不足及过量现象均普遍存在,严重制约着油菜高产及对氮素的高效利用。角果期是油菜生殖生长阶段进行养分积累和物质合成的关键时期,绿色角果皮可提供给籽粒约2/3的干物质<sup>[12]</sup>。对油菜来讲,决定其产量形成的关键因子主要有3个:单株角果数、每角粒数和千粒质量。目前,利用高光谱技术定性或定量分析冬油菜氮素营养丰缺状况或品质构成的研究主要集中于品质评估<sup>[13]</sup>、营养诊断<sup>[14]</sup>和酶活性评价等<sup>[15]</sup>,而系

统研究田间原位条件下基于角果期冠层高光谱特性和油菜产量与产量因子之间关系的报道则相对较少。基于此,本文以连续3 a冬油菜田间氮肥水平试验为基础,综合各生态区、种植方式和油菜品种,综合利用光谱分析技术和PLS模型较为系统地分析利用角果期光谱预测冬油菜产量及其构成因子的可行性,确定最佳预测指标和有效波段,以期为高光谱无损诊断技术在冬油菜产量预测上的适宜性和大范围的遥感评估提供试验基础和理论参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

分别于湖北省武穴市从政村(2013—2015年)和沙阳县张池村(2015—2016年)设置不同氮素水平冬油菜田间试验。通过测试角果期冠层光谱反射率和成熟期产量及其构成因子,探究利用高光谱技术进行冬油菜提早(约20 d)估产的可行性与精准性。试验内容包含不同试验年份、生态区域、油菜品种、栽培方式和氮素水平(表1)。

所有试验处理均设3次重复,随机区组排列。2013—2014年小区面积20 m<sup>2</sup>(10 m×2 m),2014—2016年小区面积为30 m<sup>2</sup>(15 m×2 m)。除氮肥外,磷、钾和硼肥分别按P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 90 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>和B 15 kg/hm<sup>2</sup>施入。氮、磷、钾和硼肥品种分别为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)和十水硼砂(含B 11%),所有肥料均在油菜播种或移栽前1 d做基肥一次性施入,以避免肥料追施对油菜生长发育及光谱测试连续性的影响。

### 1.2 测定项目与方法

#### 1.2.1 角果期冠层光谱测定

分别于2014年4月28日、2015年4月10日和2016年4月17日,利用美国Analytical Spectral Devices(ASD)公司生产的FieldSpec Pro FR型背挂式野外高光谱仪测试角果期冬油菜冠层光谱反射率。该时期距油菜收获约20 d,叶片基本全部黄化、脱落,角果呈伞状分布于油菜冠层,其厚度约40~60 cm,角果皮面积指数在1.5以上。同时,该时期油菜群体覆盖度较高,冠层光谱受土壤背景、叶片和茎秆(茎秆已被角果所掩盖)影响较小,能较为专一

表 1 试验季基本信息状况  
Tab. 1 Details of five field experiments

年份	地点	品种	土壤状况	栽培方式	氮素水平/ ( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	光谱测试 日期	油菜收获 日期	数据功能
2013—2014	武穴市	华油杂 9 号	pH 值: 5.40	移栽	0	2014-04-28	2014-05-19	建模集
			有机质: 30.08 g/kg		90			
			全氮: 1.72 g/kg		180			
			速效磷: 13.80 mg/kg		270			
			速效钾: 92.10 mg/kg		360			
2014—2015	武穴市	华油杂 9 号	pH 值: 5.13	移栽	0	2015-04-10	2015-05-05	建模集
			有机质: 26.90 g/kg		45			
			全氮: 1.53 g/kg		90			
			速效磷: 11.2 mg/kg		135			
			速效钾: 149.1 mg/kg		180			
2014—2015	武穴市	华油杂 62 号	pH 值: 5.47	直播	180	2015-04-10	2015-05-04	建模集
			有机质: 27.55 g/kg		90			
			全氮: 1.59 g/kg		135			
			速效磷: 12.3 mg/kg		180			
			速效钾: 140.73 mg/kg		225			
2015—2016	沙洋县	华油杂 9 号	pH 值: 5.88	移栽	270	2016-04-17	2016-05-05	验证集
			有机质: 18.02 g/kg		315			
			全氮: 0.96 g/kg		360			
			速效磷: 11.79 mg/kg		0			
			速效钾: 85.97 mg/kg		45			
2015—2016	沙洋县	华油杂 62	pH 值: 5.62	直播	60	2016-04-17	2016-05-05	验证集
			有机质: 18.26 g/kg		120			
			全氮: 0.98 g/kg		180			
			速效磷: 14.70 mg/kg		240			
			速效钾: 97.75 mg/kg		300			
					360			

地反映油菜角果光谱时空变化。光谱仪波段范围为 350 ~ 2 500 nm, 光谱分辨率为 3 nm (350 ~ 1 000 nm) 和 10 nm (1 000 ~ 2 500 nm), 视场角为 25°。选取天气晴朗、无风或风速较小的 10:00 ~ 14:00 进行测定, 测试时将光谱仪探头垂直向下, 距离油菜冠层约 1.0 m, 各小区选取有代表性观测点 5 处, 每处采集 5 条光谱曲线, 以其平均值作为该小区冠层光谱测试值。各小区在测试前均采用标准白板校正、优化, 以降低云层或太阳高度角变化对冠层光谱测试结果准确性的影响。在测试过程中, 由于难免受到环境噪声和仪器本身等因素干扰, 使得不同波段间光谱

反射值对能量响应产生差异, 因此光谱曲线含有一些噪声。为提高光谱分析精确性, 综合各试验年份光谱噪声产生区域, 删除受噪声影响较大的波段: 350 ~ 399 nm、1 351 ~ 1 419 nm、1 801 ~ 2 019 nm 和 2 371 ~ 2 500 nm, 剔除后共有 1 683 个有效波段数据。

### 1.2.2 冬油菜产量构成因子调查

于油菜收获前 5 d 左右 (收获时间见表 1), 各小区选取有代表性移栽油菜 20 株或直播油菜样方 0.25 m<sup>2</sup>, 调查其单株角果数 (植株上所有角果个数); 同时, 每株随机选取 40 个角果, 调查每角粒数 (角果中油菜籽粒个数)。油菜收获后, 采用油菜千

粒板随机选取各小区油菜籽粒 1 000 粒,称量,计算千粒质量。

### 1.2.3 冬油菜产量测试

分别于各试验年份油菜收获期,对试验田直播和移栽油菜的所有小区进行单打单收,测得实产。

## 1.3 数据处理与分析

### 1.3.1 建模集和验证集的划分

分别于 2013—2014 年、2014—2015 年和 2015—2016 年获得 15、48 和 48 个共计 111 个田间数据样本。综合分析油菜种植方式、产量及其构成因子数据变化范围,同时考虑到模型应用的普适性和精确性,以 2013—2015 年试验数据( $n = 63$ )作为建模集,以 2015—2016 年试验数据( $n = 48$ )为验证集。

### 1.3.2 FDR 光谱变换

FDR 变换是目前光谱分析中应用最多且十分有效的光谱分析方法。光谱经 FDR 变换后可以减弱或消除背景、大气散射与吸收的影响,提高不同吸收特征的对比度。此外,FDR 处理对光谱信噪比十分敏感,可去除部分线性或接近线性的背景、噪声光谱对目标光谱的影响,同时对某些重叠光谱进行分解以便于识别<sup>[16]</sup>。本试验 FDR 处理利用高光谱仪自带 ViewSpecPro Version 6.0 软件进行,光谱间隔设置为 5。

### 1.3.3 模型建立与应用

偏最小二乘回归(PLS)是集典型相关分析、主成分分析和多元线性回归分析为一体的多元统计分析方法,能够有效利用所有自变量信息( $x$ ,光谱反射率)建立模型,并提取出对因变量( $y$ ,产量及其构成因子)贡献较大的主控因子,使新建模型具有较好的鲁棒性。此外,PLS 可有效消除多个自变量间的共线性问题,优化变量信息,最大化  $x$  和  $y$  之间的共线性,提取对模型最优解释能力的新综合成分。

本试验以油菜角果期冠层原初光谱和一阶微分光谱为自变量,成熟期产量及其构成因子为因变量,利用 PLS 模型研究两者之间的关系,确立最佳预测模型。同时,在确保模型精度条件下,降低光谱维数,筛选有效特征波段,为油菜提早和精确估产提供支撑。PLS 模型预测精准性采用实测值与预测值间的决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和相对分析误差(RPD)来衡量,其分布范围见表 2<sup>[17]</sup>。利用留一交叉验证法(Leave-one-out method)来确定回归模型最优因子数(主成分数),即交互验证均方根误差(Root mean squared error of cross-validation, RMSECV)最小时对应的主成分数。

表 2 模型评价范围

Tab.2 Classification of performances of models in terms of  $R^2$  and RPD

评价指标	模型性能		
	不可用	可用	较好
决定系数	<0.50	0.50 ~ 0.75	>0.75
相对分析误差	<1.40	1.40 ~ 2.00	>2.00

### 1.3.4 有效波段选择与应用

从大量高光谱数据中筛选出有效波段并能精确预测油菜产量及其构成因子,对降低光谱分析维度,提高分析时效性具有重要意义。本研究利用 PLS 模型中的无量纲评价指标变量重要性投影(VIP)从全波段高光谱范围内筛选出冬油菜产量及其构成因子的有效波段。VIP 值可以直观和定量地表征每一个波段在解释因变量时的重要性,其临界阈值为 1.0, VIP 值越大,则对因变量的预测能力越高。有效波段的选择需要满足以下 2 个条件:①有效波段需具有较高的代表性并符合作物营养和生长特性。②与全波段光谱监测效果相比,基于有效波段评估精度需与此相当或略有差异但不甚明显。

此外,为进一步研究所确定有效波段的精确性和普适性,采用降维后的冬油菜产量及其构成因子有效波段对其再次进行精度检验,同时绘制 1:1 效应图来直观表征实测值和预测值之间的关系。

## 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2003 进行基础数据的输入和分析;利用 Matlab R2012a 中 PLS 插件进行模型的定量评价和有效波段选择;采用 Origin 8.5 软件绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同氮营养水平下建模集油菜产量及其构成因子

施氮显著影响冬油菜成熟期产量及其构成因子(图 1)。对于产量,随施氮量增加,各试验年份油菜产量均呈先增加后降低趋势,分别在 270 kg/hm<sup>2</sup>(2013—2014 年)和 225 kg/hm<sup>2</sup>(2014—2015 年)时达最大。油菜全生育期氮肥用量和产量间关系可用典型的一元二次方程进行拟合,模型准确度( $R^2$ 分别为 0.954、0.860 和 0.955)和精确度(RMSE 分别为 135、285、150 kg/hm<sup>2</sup>)均较好;对该拟合方程求偏导,可以得到最高产量对应施氮量分别为 253、318、275 kg/hm<sup>2</sup>。结果表明本研究所设置氮肥梯度能够满足油菜氮不足、适宜和过量需求,可以用于光谱模型构建和产量预测。对于产量构成因子,油菜角果数变化趋势和产量较为一致,氮肥效应显著;角粒数

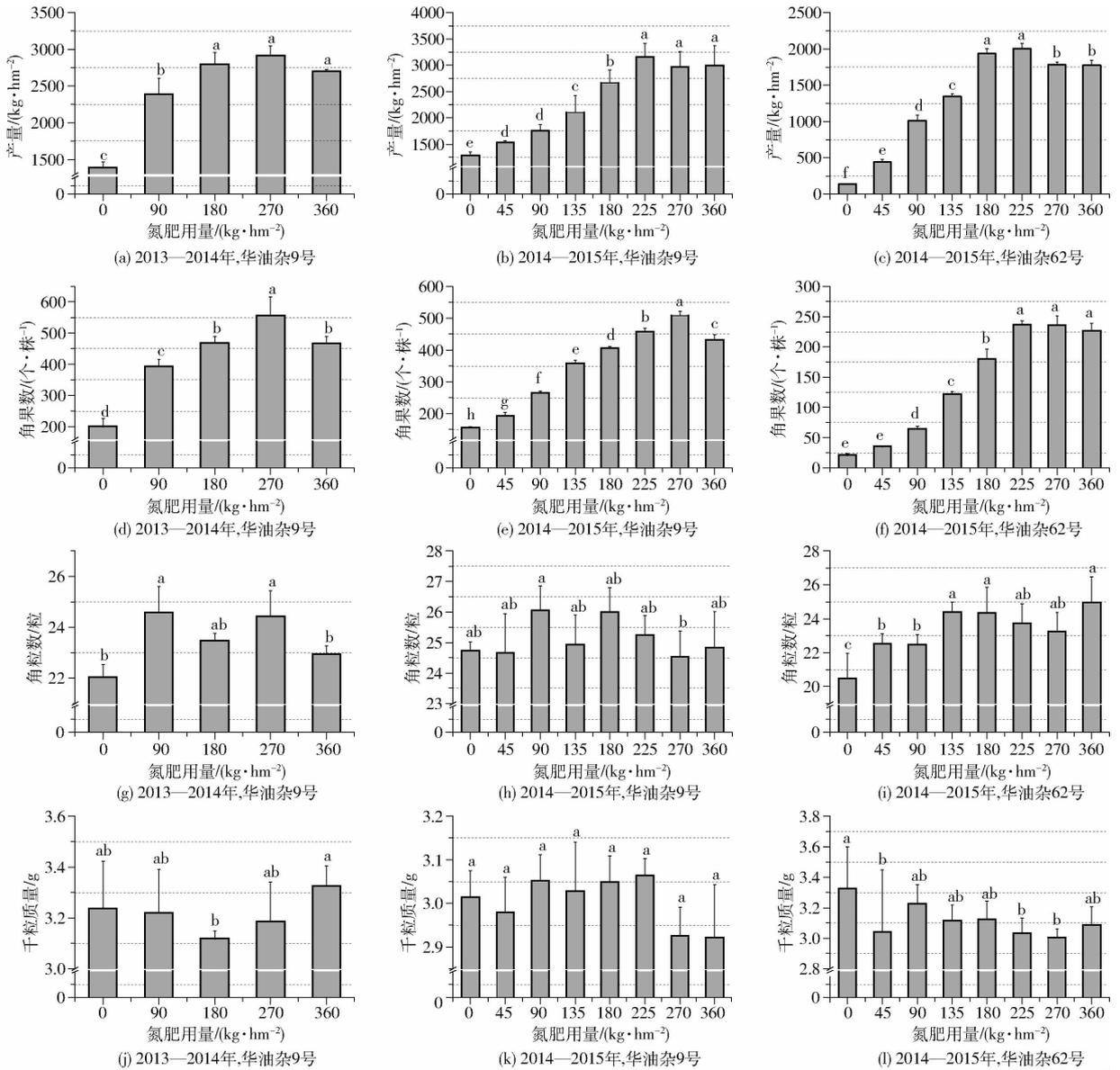


图 1 不同氮素水平下建模集冬油菜产量及其构成因子

Fig. 1 Seed yield and yield components of winter oilseed rape under various nitrogen rates for calibration dataset

整体随氮肥用量增加而提高,千粒质量则与此相反,但两者变化趋势均不明显,此试验结果与 WANG 等<sup>[18]</sup>的研究相一致。

### 2.2 不同氮营养水平下建模集油菜冠层光谱反射率

不同氮水平下冬油菜冠层光谱反射率具有明显

差异,且各试验年份和品种间变化趋势一致(图 2)。可见光波段(400 ~ 730 nm)油菜冠层光谱反射率整体随氮肥用量升高而下降,其原因是该区域反射光谱主要受叶绿素和其他色素吸收而决定;短波近红外区域(730 ~ 1 350 nm)冠层光谱反射率则随施氮

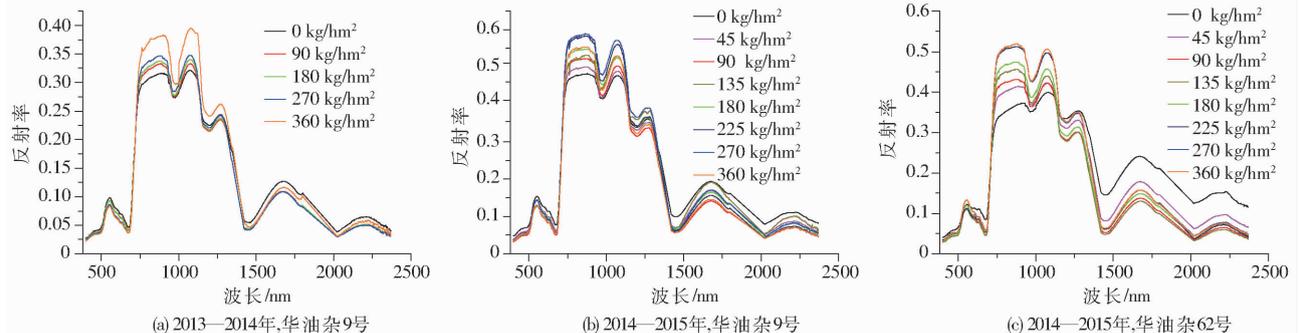


图 2 不同氮素水平下建模集冬油菜冠层光谱反射率

Fig. 2 Canopy hyperspectral reflectance of winter oilseed rape under various nitrogen rates for calibration dataset

量增加而显著提高,这是由于该范围光谱反射率主要受叶片(细胞排列、胞间空隙等)和作物冠层(叶面积指数、生物量和叶倾角等)结构影响<sup>[19]</sup>。此外,不同氮素处理间短波中红外区域(1 420~2 370 nm)光谱反射率并无显著差异,且规律不尽一致,原因是此区域光谱受叶片水分吸收所主导<sup>[20]</sup>。本试验条件下,油菜角果含水率一般在78%~80%之间,且氮素处理间并无显著差异。

## 2.3 基于全波段的 PLS 模型构建

### 2.3.1 最佳因子数确定

分别以冬油菜冠层原初光谱和一阶微分光谱为

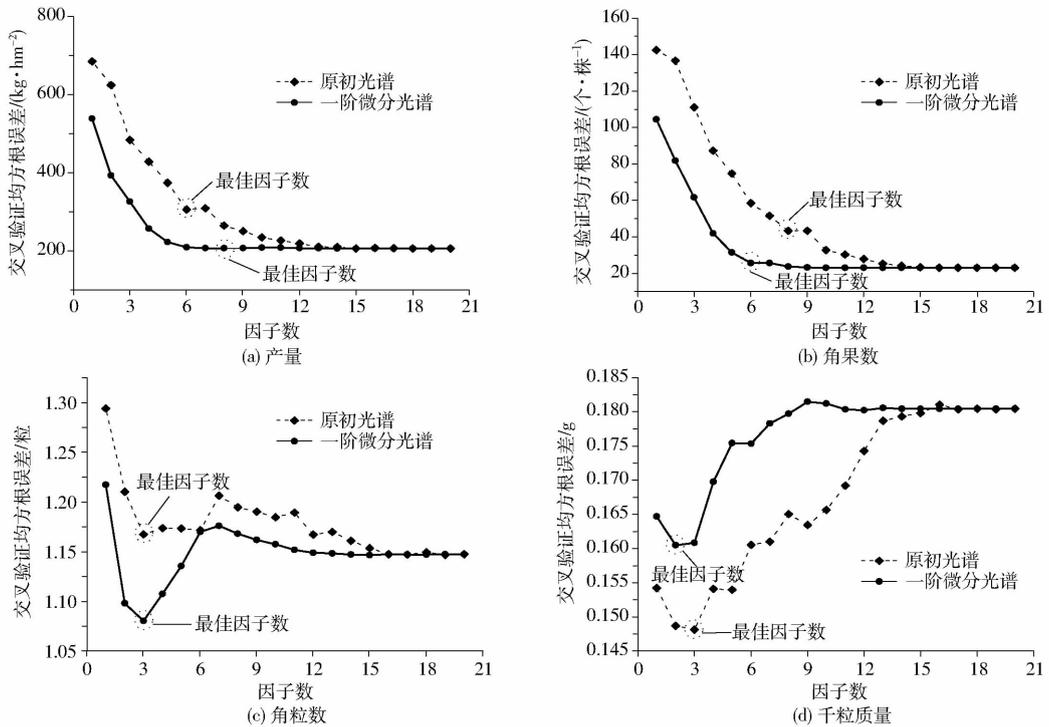


图3 交叉验证均方根误差(RMSECV)随因子数的变化曲线

Fig.3 Changes of RMSECV with number of LVs based on raw spectral reflectance and the first derivative reflectance

### 2.3.2 PLS 回归分析

明确最优因子数之后,分别利用R-PLS和FDR-PLS模型对建模集和验证集油菜产量及构成因子进行整体回归分析,对比分析光谱变换方式预测精准性,确定最优监测指标(表3)。结果表明,相对于R-PLS,FDR-PLS可显著提高模型预测准确度和精确性(RPD),油菜产量、角果数和角粒数RPD值分别提高36.4%、33.3%和13.0%,效果显著。不同于前者,FDR-PLS并未提高油菜千粒质量预测精度(R-PLS同样较差),RPD值为0.22,主要原因是油菜千粒质量受氮素影响较小,且处理间无明显变化规律,而角果期冠层光谱反射率变化趋势则与此相反。本试验条件下,以FDR-PLS为油菜产量及其构成因子监测的最佳模型。不同预测指标间,基于FDR-PLS模型的油菜产量和角果数诊

断精度较高,RPD分别为3.11和3.12(大于2.0),可以较好反映该指标时空变化。角粒数和千粒质量RPD整体偏低,分别为0.52和0.22(小于1.4),模型性能较差,难以做出准确评估和预测。角果数作为影响油菜产量的关键构成因子,如能从高光谱遥感技术层面对其进行精确和提早(最高可提早油菜产量30d左右)监测与评估,对发展油菜生产、掌握产量效能具有重要实际和应用意义。

研究表明,角果皮是油菜发育成熟期进行光合作用的最关键器官,显著影响油菜冠层光谱的时空变化,既是库也是重要的源<sup>[21]</sup>,其自身光合产物约占增重物质的70%左右<sup>[22]</sup>。角果数是角果皮的量化指标和承载物质,其变幅最大也最关键,对产量和光谱(光能吸收利用)形成影响也最大;每角粒数是油菜籽粒的表现形式,位于角果皮内,其光能吸收利

用情况则相对较弱,但对产量贡献同样较大,增加每角粒数同样可以提高油菜产量,但应在保持适宜角果数的基础上。油菜千粒质量表现一般比较稳定,无显著变化,其对产量的影响也相对最低,同时对光

谱变化无直接效应。本试验中,对比基于 3 个产量构成因子的 FDR-PLS 模型预测效果发现,油菜角果数预测精度最高,角粒数次之,千粒质量最差,这与其对光谱影响的重要程度相一致。

表 3 基于原初光谱和一阶微分光谱的冬油菜产量及其构成因子 PLS 模型

Tab. 3 PLS model for seed yield and yield components of winter oilseed rape based on raw spectral reflectance and the first derivative reflectance

产量及其构成因子	建模集 ( $n = 63$ )				验证集 ( $n = 48$ )					
	原初光谱 (R)		一阶微分光谱 (FDR)		原初光谱 (R)			一阶微分光谱 (FDR)		
	$R^2_{cal}$	RMSE <sub>cal</sub>	$R^2_{cal}$	RMSE <sub>cal</sub>	$R^2_{val}$	RMSE <sub>val</sub>	RPD	$R^2_{val}$	RMSE <sub>val</sub>	RPD
产量	0.91	252.13	0.96	158.38	0.88	519.09	2.28	0.90	379.28	3.11
角果数	0.96	32.63	0.98	17.18	0.87	88.17	2.34	0.91	66.04	3.12
角粒数	0.50	1.08	0.67	0.88	0.42	2.67	0.46	0.46	2.35	0.52
千粒质量	0.31	0.14	0.32	0.14	0.71	0.36	0.25	0.25	0.40	0.22

## 2.4 基于 FDR-PLS 分析的冬油菜产量和角果数有效波段确定

明确了冬油菜最佳光谱诊断模型 (FDR-PLS) 和监测指标 (产量和角果数) 之后,为进一步确定冬油菜产量和角果数监测的有效波段,降低光谱分析维度,提高光谱诊断时效性和简洁性,采用 PLS 回归模型的无量纲评价指标变量重要性投影 (VIP) 的分析方法,分别计算各波段对油菜产量和角果数影响程度的 VIP 值 (图 4)。VIP 计算了 PLS 模型中解释因变量的回归平方和与总离差平方的比值,是一种有效的波段选择方法。前人研究多以 VIP 等于 1 为临界阈值,本试验条件下高于该临界值波段数仍较多且难以区分,而 VIP 大于 3.5 波段则相对较少且分布范围具有代表性,考虑到模型的简明性和准确性,以 VIP 等于 3.5 为油菜产量和角果数有效波段选取的临界值。基于此,确定油菜产量有效波段分别为 628 nm (红光)、753 nm (红边) 和 882、935、1061、1224 nm (近红外); 角果数有效波段分布范围在可见光 (628 nm 和 758 nm) 与近红外 (935 nm 和 1063 nm) 区域基本一致,另有两波段则位于中红外区域 (1457 nm 和 1600 nm)。该结果为基于角果

期高光谱技术的油菜提早估产 (通过角果数) 提供了试验参考和理论依据。

分析发现,油菜产量和角果数特征波段主要位于近-中红外区域,此范围冠层光谱反射率主要受作物群体结构 (如角果皮面积指数和生物量等) 影响。角果期油菜进行体内光合产物形成和分配的主要器官是角果皮 (此时叶片已基本黄化、脱落,角果呈伞状分布于油菜冠层), 其光合产物的大小则直接决定光合产物的形成。光合色素、角果皮面积指数 (PAI) 和生物量均与作物群体光合效率紧密相关,是反映作物群体动态、决定最终产量的关键指标。以 2013—2014 年角果期油菜田间试验为例 (其他年份结果与此一致), 0、90、180、270、360 kg/hm<sup>2</sup> 处理油菜角果皮色素含量分别平均为 0.20、0.21、0.23、0.23、0.23 mg/g; PAI 分别平均为 1.6、2.7、5.4、6.1 和 4.7; 地上部生物量分别平均为 3.85、8.74、14.68、17.81、13.40 t/hm<sup>2</sup>。该结果表明,作为影响油菜冠层光谱变化的主要因子,处理间油菜角果皮色素含量并无明显变化,而色素对光谱的影响主要集中在可见光波段; 同时,PAI 和生物量的显著差异使得其对冠层光谱的影响主要位于近-中红外区域,

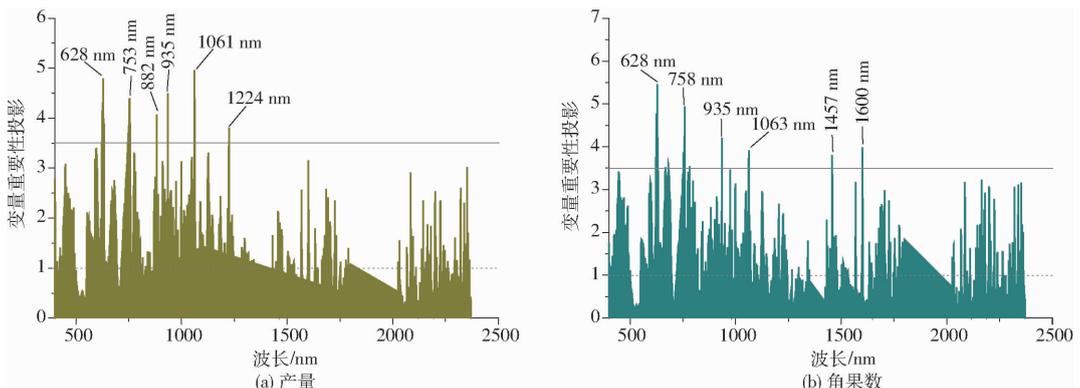


图 4 基于 FDR-PLS 回归模型的油菜产量和角果数有效波段确定

Fig. 4 VIP for each wavelength based on FDR-PLS model

这与本试验结果相一致。另外,与油菜产量特征波段分布略有不同的是,油菜角果数特征波长 1 457 nm 和 1 600 nm 则位于中红外的水分吸收区,这主要是由于角果期光谱测试时,油菜角果含有较高的水分(2013—2014 年上述各处理含水率分别平均为 78.7%、78.0%、79.5%、80.7%、80.4%),而产量的测试则是于油菜收获风干去除水分后进行,这与生产实际相符合,同时进一步反映了高光谱进行油菜估产的准确性和代表性。

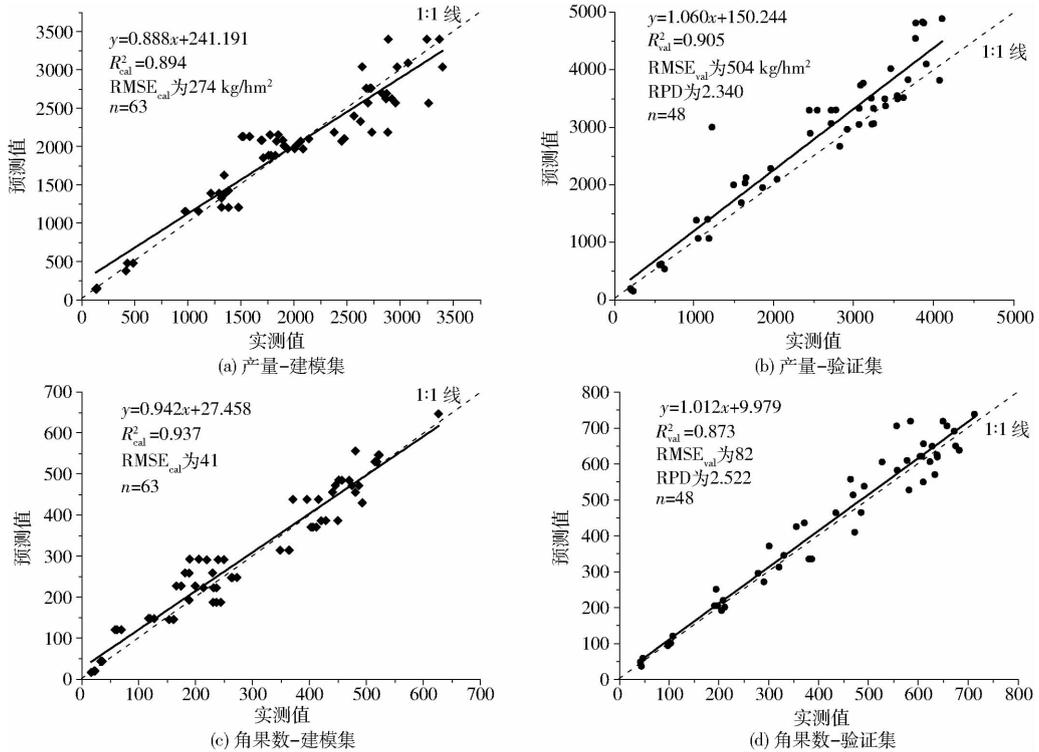


图5 基于有效波段的冬油菜产量和角果数田间试验模型精度检验

Fig. 5 Verification of models for yield and pod number from field experiment based on effective wavelengths

由图5可知,采用有效波段不仅显著降低了光谱分析的复杂性,同时对油产量和角果数仍具有较高的预测能力,其 RPD 值分别为 2.340 和 2.522。此外,相对于全波段 FDR-PLS 模型而言,新构建模型预测精度略微下降( $R^2$ 降低和 RMSE 升高),其原因是光谱维数降低其所含信息有效性受到抑制,但仍满足实时和精准诊断的需求。图5b和图5d中散点分布越接近 1:1 线表明基于有效波段所构建方程预测准确度越高。结果显示,验证集油菜产量( $y=1.060x+150.244$ )和角果数( $y=1.012x+9.979$ )的回归方程斜率均高于 1,说明新 FDR-PLS 模型高估了实测值。因此,进一步提高建模集数据容量,优化建模集数据范围,使之具有更大和更准确的代表性,对提高模型诊断能力具有重要意义。

本研究虽然综合了油菜不同试验年份、地点、种植方式和氮素水平下的油菜冠层光谱反射率、产量及其构成因子,所筛选特征波段和构建模型也获得

## 2.5 基于有效波段的模型检验

通过 VIP 技术确定油菜产量和角果数有效波段,使光谱维数由 1 683 个降为 6 个,极大简化了模型分析的复杂性。为进一步评估基于上述有效波段所构建新 FDR-PLS 模型的预测能力,利用 2015—2016 年独立试验数据对该模型再次进行检验,以 RPD、 $R^2$  和 RMSE 来综合表征模型的精准性,并绘制实测值和预测值 1:1 效应图来直观展示新 FDR-PLS 模型的可靠性和稳定性(图5)。

了相对较为理想的结果,但研究主要是基于小区尺度开展,如能将本研究结果与低空无人飞机、卫片数据相融合,从更大范围、更高水平提早进行油菜产量的区域化预测和评估。同时,本结论是在田间产量实测及其因子调查的基础上开展的,如能将光谱监测与油菜产量形成模型(如基于分配指数的油菜地上部器官干物质分配动态模拟模型<sup>[23]</sup>)结合起来,通过模型拟合的措施量化、精细化研究两者之间关系,对提高光谱估产的说理力和代表性具有更大的促进作用。另外,结合作物生长模型动态研究角果形成过程并探究光谱监测和估产的准确性,仍需要开展进一步的研究。

## 3 结论

(1) 施氮显著影响冬油菜角果数和成熟期产量,两者均随氮肥用量增加而显著升高;不同氮素水平下角果期油菜冠层光谱反射率在可见光波段

(400 ~ 730 nm) 随氮肥用量增加而降低,近红外波段(730 ~ 1 350 nm)变化趋势与此相反,中红外波段(1 420 ~ 2 370 nm)则未表现出明显或一致性规律。

(2) 基于全波段的 FDR - PLS 回归模型定量监测冬油菜产量和角果数精确性整体优于 R - PLS 模型,验证集  $R_{val}^2$  分别为 0.90 和 0.91,RPD 分别为 3.11 和 3.12,可对其进行准确诊断和监测。

(3) 基于 FDR - PLS 模型中各波段 VIP 值,确定

本试验条件下油菜产量和角果数 VIP 临界阈值为 3.5;冬油菜产量特征波段(或有效波段)分别为 628、753、882、935、1 061、1 224 nm;角果数有效波段分别为 628、758、935、1 063、1 457、1 600 nm,实现了简化分析和光谱降维的目的。此外,基于上述有效波段新构建 FDR - PLS 模型同样获得了较理想的预测精度, $R_{val}^2$  分别为 0.91 和 0.87,RPD 分别为 2.34 和 2.52。

## 参 考 文 献

- XUE Lihong, CAO Weixing, YANG Linzhang. Predicting grain yield and protein content in winter wheat at different N supply levels using canopy reflectance spectra[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 646 - 653.
- WEBER V S, ARAUS J L, CAIRNS J E, et al. Prediction of grain yield using reflectance spectra of canopy and leaves in maize plants grown under different water regimes[J]. *Field Crops Research*, 2012, 128: 82 - 90.
- ZHAO D L, RAJA REDDY K, GOPAL KAKANI V, et al. Canopy reflectance in cotton for growth assessment and lint yield prediction [J]. *European Journal of Agronomy*, 2007, 26(3): 335 - 344.
- LI Lantao, REN Tao, MA Yi, et al. Evaluating chlorophyll density in winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using canopy hyperspectral red-edge parameters [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 126: 21 - 31.
- 韩兆迎,朱西存,房贤一,等. 基于 SVM 与 RF 的苹果树冠 LAI 高光谱估测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(3): 800 - 805.
- HAN Zhaoying, ZHU Xicun, FANG Xianyi, et al. Hyperspectral estimation of apple tree canopy LAI based on SVM and RF regression [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(3): 800 - 805. (in Chinese)
- 王纪华,黄文江,劳彩莲,等. 运用 PLS 算法由小麦冠层反射光谱反演氮素垂直分布[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(7): 1319 - 1322.
- WANG Jihua, HUANG Wenjiang, LAO Cailian, et al. Inversion of winter wheat foliage vertical distribution based on canopy reflected spectrum by partial least squares regression method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(7): 1319 - 1322. (in Chinese)
- 刘秀英,申健,常庆瑞,等. 基于可见/近红外光谱的牡丹叶片花青素含量预测[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 319 - 324. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20150947&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150947&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.047.
- LIU Xiuying, SHEN Jian, CHANG Qingrui, et al. Prediction of anthocyanin content in peony leaves based on visible/near-infrared spectra [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 319 - 324. (in Chinese)
- 黄双萍,洪添胜,岳学军,等. 基于高光谱的柑橘叶片磷含量估算模型实验[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 202 - 207. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130435&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130435&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.035.
- HUANG Shuangping, HONG Tiansheng, YUE Xuejun, et al. Hyperspectral estimation model of total phosphorus content for citrus leaves [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 202 - 207. (in Chinese)
- ZHANG Xiaolei, HE Yong. Rapid estimation of seed yield using hyperspectral images of oilseed rape leaves [J]. *Industrial Crops and Products*, 2013, 42: 416 - 420.
- REN Tao, ZOU Juan, WANG Yin, et al. Estimating nutrient requirements for winter oilseed rape based on QUEFTS analysis [J]. *Journal of Agricultural Science*, 2016, 154(3): 425 - 437.
- 李慧,马常宝,鲁剑巍,等. 中国不同区域油菜氮磷钾肥增产效果[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(9): 1837 - 1847.
- LI Hui, MA Changbao, LU Jianwei, et al. Increasing effect of N, P and K fertilizer on rapeseed in different regions of China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(9): 1837 - 1847. (in Chinese)
- 马霓,张春雷,李俊,等. 种植密度对直播油菜结实期源库关系及产量调节的研究[J]. *中国油料作物学报*, 2009, 31(2): 180 - 184.
- PETISCO C, GARCIA-CRIADO B, VAZQUEZ-DE-ALDANA B R, et al. Measurement of quality parameters in intact seeds of *Brassica* species using visible and near-infrared spectroscopy [J]. *Industrial Crops and Products*, 2010, 32: 139 - 146.
- 方慧,宋海燕,曹芳,等. 油菜叶片的光谱特征与叶绿素含量之间的关系研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(9): 1731 - 1734.
- FANG Hui, SONG Haiyan, CAO Fang, et al. Study on the relationship between spectral properties of oilseed rape leaves and their chlorophyll content [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(9): 1731 - 1734. (in Chinese)
- LIU Fei, ZHANG Fan, JIN Zonglai, et al. Determination of acetolactate synthase activity and protein content of oilseed rape (*Brassica napus* L.) leaves using visible/near-infrared spectroscopy [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 629(1 - 2): 56 - 65.
- 黄敬峰,王福民,王秀珍. 水稻高光谱遥感实验研究[M]. 杭州:浙江大学出版社,2010: 22.
- WANG Shanqin, LI Weidong, LI Jing, et al. Prediction of soil texture using FT - NIR spectroscopy and PXRF spectrometry with data fusion [J]. *Soil Science*, 2013, 178(11): 626 - 638.
- WANG Yin, LIU Tao, LI Xiaokun, et al. Nutrient deficiency limits population development, yield formation, and nutrient uptake of direct sown winter oilseed rape [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(4): 670 - 680.
- HANSEN P M, SCHJOERRING J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86: 542 - 553.
- SAHOO R N, RAY S S, MANJUNATH K R. Hyperspectral remote sensing in agriculture [J]. *Current Science*, 2015, 108(5): 848 - 859.
- 胡立勇,单文燕,王维金. 油菜结实特性与库源关系的研究[J]. *中国油料作物学报*, 2002, 24(2): 37 - 42.
- 周可金,官春云,肖文娜,等. 催熟剂对油菜角果光合特性、品质及产量的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(7): 1369 - 1373.
- ZHOU Kejin, GUAN Chunyun, XIAO Wenna, et al. Effects of chemical ripeners on photosynthetic characteristics of pods and rapeseed quality and yield [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(7): 1369 - 1373. (in Chinese)
- 汤亮,朱艳,鞠昌华,等. 油菜地上部干物质分配与产量形成模拟模型[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 526 - 530.