

长江中下游生态区大豆生长性状及产量的冠层高光谱偏最小二乘回归预测

齐波,张宁,赵团结,邢光南,赵晋铭,盖钧铭

(南京农业大学大豆研究所/国家大豆改良中心/农业部大豆生物学与遗传育种重点实验室(综合)/作物遗传与种质创新重点实验室,江苏南京210095)

摘要: 高光谱遥感能够快速无损地估测作物生长性状及产量,这为作物规模化育种的田间评价与选择提供了高效手段。选用生育时期相似、生长性状有差异的52份大豆品种(系)进行2年田间试验,在盛花期(R2)、盛荚期(R4)及鼓粒初期(R5)测定大豆冠层反射光谱,同步测定大豆叶面积指数(LAI)和地上部生物量(ABM),收获后测定产量。针对不同生育时期冠层光谱与生长性状及产量进行偏最小二乘回归(PLSR)分析。结果表明:不同生育时期LAI的PLSR模型可以解释LAI总变异的54.4%~61.0%;不同生育时期ABM的PLSR模型可以解释ABM总变异的65.5%~67.0%;R5期是利用冠层光谱估测产量的最佳生育时期,其PLSR模型可以解释产量总变异的66.1%。本研究结果可望为大豆规模化育种中大量试验材料的田间长势监测和产量估测提供快速无损预测的技术支持。

关键词: 大豆;高光谱;叶面积指数;地上部生物量;产量;偏最小二乘回归

中图分类号: S565.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.11861/j.issn.1000-9841.2015.03.0414

Using Canopy Hyperspectral Reflectance to Predict Growth Traits and Seed Yield of Soybeans from Middle and Lower Yangtze Valleys through Partial Least Squares Regression

QI Bo, ZHANG Ning, ZHAO Tuan-jie, XING Guang-nan, ZHAO Jin-ming, and GAI Jun-yi

(Soybean Research Institute of Nanjing Agricultural University/National Center for Soybean Improvement/Key Laboratory for Biology and Genetic Improvement of Soybean (General), Ministry of Agriculture/ National Key Laboratory for Crop Genetics and Germplasm Enhancement, Nanjing 210095, China)

Abstract: Hyperspectral remote sensing technique as a fast and non-destructive method can estimate growth traits and yield in crop, which provides an effective tool for field evaluation and selection in large-scale breeding programs. In the present study, a field experiment comparing 52 soybean varieties with similar flowering and maturity dates were tested a randomized blocks design with three replications in two years. The measurement of leaf area index (LAI) and aboveground biomass (ABM) was synchronized with the information collection of the canopy hyperspectral reflectance at R2, R4, and R5 growth stages. The seed yield was acquired after harvest. The partial least squares regression (PLSR) between canopy spectral reflectance at different growth stages and growth traits and seed yield showed that the PLSR models of ABM and LAI at different growth stages could explain 65.5%~67.0% and 54.4%~61.0% of the total variance of ABM and LAI, respectively, and R5 stage performed as the best of the three growth stages for predicting yield using canopy spectral reflectance with an explanation up to 66.1% of the total seed yield variance. The results can serve a quick and non-destructive technique for monitoring field growing status and predicting yield in large-scale soybean breeding programs.

Keywords: Soybean; Hyperspectral reflectance; Leaf area index (LAI); Aboveground biomass (ABM); Yield; Partial least squares regression (PLSR)

大豆在粮食作物构成和油料作物生产中占有重要地位,是人类重要的植物蛋白和植物油脂的来源。大豆产量来自光合产物,高产品系的选育易受田间大豆群体的光合效率及其群体长势的影响。叶面积指数(LAI)和地上部生物量(ABM)是反映田间作物生长状况以及最终产量形成的主要参数,是预测冠层长势和生产力的关键因素。在大豆规模化育种中,建立

稳定可靠的估产模型,育种中、后期收获前对高产品系进行初选,可降低育种工作量,同时辅以前期大豆长势的监测信息,为初选工作提供有价值的辅助和参考,可有效地提高选择结果的准确性和可靠性。

高光谱遥感技术提供了以实时、快速、无损伤地监测作物长势和估测产量的手段^[1-3]。所谓高光谱遥感(Hyperspectral remote sensing),即高光谱分辨率遥

收稿日期:2014-09-22
基金项目:国家重点基础研究发展计划“973计划”(2011CB1093);国家高技术研究发展计划“863计划”(2011AA10A105);国家公益性行业(农业)专项经费项目(201203026-4);教育部111项目(B08025);教育部创新团队项目(PCSRT13073);中央高校基本科研业务费项目(KYZ201202-8),江苏省优势学科建设工程专项,江苏省JCIC-MCP项目资助。
第一作者简介:齐波(1980-),男,博士,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: mtsdzhzhq@163.com。
通讯作者:盖钧铭(1936-),男,教授,主要从事大豆遗传育种研究。E-mail: sri@njau.edu.cn。

感,是指利用很多很窄的电磁波波段从感兴趣的物体获取有关反射光谱数据^[4],具有光谱分辨率高(通常 $<10\text{ nm}$)、波段连续性强、光谱信息量大等特点,在农业研究领域值得广泛应用。作物冠层高光谱反射率直接反映作物群体冠层水平的状态,包含叶片属性、冠层结构、土壤、大气等的混合反射光谱信息。因此,有效消除背景噪音,深入挖掘作物冠层光谱中指示作物目标性状的信息具有重大的研究意义和应用前景。国内外利用作物冠层光谱估测作物长势和籽粒产量的研究很多,已经成功地应用于作物生物量、LAI 以及产量潜势估测^[5-11]。Nguy-Robertson 等^[12]提出基于植被指数 NDVI 和 RVI 的组合使用可以有效地提高玉米和大豆的绿色 LAI 的预测精度。宋开山等^[13]指出通过 RVI 方式建立的遥感估算模型能较为准确估算大豆 LAI、地上鲜生物量。Ma 等^[14]研究表明利用 R5 期冠层光谱植被指数 NDVI 可以定性地估测大豆产量,可用于区分高产和低产大豆基因型。吴琼等^[15]研究指出利用冠层光谱可以有效地估测大豆产量及生长性状。

针对高光谱遥感数据提取作物生物物理和生物化学性状的信息主要有两类分析方法:(1)基于植被指数法,选择特征波段,构建敏感植被指数,由此确立目标性状的最优模型。(2)以全光谱波段作为解释变量的多元回归分析,如逐步回归、偏最小二乘回归(Partial least squares regression, PLSR)等。其中,PLSR 可以消除高光谱数据中存在的多重相关性,解决观测数据的数量(样本量)较少时的估测精度问题^[16]。已有研究表明利用冠层光谱建立 PLSR 模型能够有效地估测作物产量及田间长势^[17-18]。Huang 等^[19]指出在光谱估测植物氮含量分析中,PLSR 优于逐步回归分析。Nguyen 等^[20]研究表明不同生育时期冠层高光谱数据(300~1100 nm)的 PLSR 模型能够预测水稻 LAI、叶片干重及叶片氮素水平等指标。Hansen 等^[16]研究表明基于地物光谱仪测定光谱,利用 PLSR 模型可以用于估测小麦生物量。Ferrio 等^[18]研究表明基于可见光和近红外波段的 PLSR 模型可以定性地估测硬质小麦的产量潜力。由此,针对冠层光谱的 PLSR 可以综合连续光谱波段反射率的信息,很好地解释目标性状的变异程度。综上所述,PLSR 可用于作物生长性状及其产量对不同生育时期观测光谱的回归分析,并可建立相关的预测模型。针对大豆高光谱数据 PLSR 的大多数研究以近红外波段为对象,预测大豆籽粒的品质^[21-23]、抗病性^[24]等。而基于可见光/近红外波段光谱的生长性状及产量 PLSR 预测的研究颇少。

因此,本研究以生育时期相似、生长性状有差异的 52 份大豆基因型两年田间试验数据为基础,针对不同生育时期冠层光谱与生长性状及产量进行 PLSR 分析,确立适用于大豆生长性状及产量估测的回归预

测模型。期望将高光谱技术应用于育种中,快速、无损地监测并评价育种品系的冠层长势和产量潜力,为规模化育种提供有效的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验材料选取的原则,一是材料间的生长性状和产量均存在明显差异,二是材料间生育时期相近,尤其是开花期,便于在同一生育时期采集冠层光谱数据。根据往年田间调查数据,选取代表长江中下游生态区高产育种的 52 份材料,包括 13 份栽培品种,2 份地方品种及 37 份高世代育种品系。

2011~2012 年夏在南京农业大学江浦农场进行田间试验,采用完全随机区组设计,3 次重复,每小区 5 行,行距 50 cm,行长 4 m,行内点播,株距 10 cm。其它栽培管理措施同一般大田。选择盛花期(R2)、盛荚期(R4)和鼓粒始期(R5)测定每个小区的冠层反射光谱,同步破坏性取样测定 LAI 和 ABM。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 大豆冠层反射光谱 采用美国 Analytical Spectral Device(ASD)公司生产的 FieldSpec Pro 3 型背挂式野外高光谱辐射计测量大豆冠层光谱,波段值为 350~2 500 nm,其中 350~1 000 nm 光谱采样间隔为 1.4 nm,光谱分辨率为 3 nm;1 000~2 500 nm 光谱采样间隔为 2 nm,光谱分辨率为 10 nm。选择天气晴朗、无风或风速很小时测定冠层反射光谱,测定时间为 10:00~14:00。测量时传感器探头垂直向下,光谱仪视场角为 25°,距冠层顶部垂直高度约 1.0 m,地面视场范围直径为 44 cm。每个小区随机选择 5 个采样点(视场),每点以 5 次反射光谱测量为一组采样值,取平均值作为该小区的光谱反射值。每次采集目标光谱前后进行标准白板校正。

1.2.2 大豆叶面积指数、地上部生物量和产量 与冠层反射光谱测定同步,在每个小区的采样区连续选取代表性大豆 5 株,摘取植株绿色叶片,采用 LAI-3000 叶面积仪测定叶面积, $\text{LAI} = \text{叶片总面积} / \text{土地面积}$,计算 LAI。以 105℃ 杀青,80℃ 烘干,称重并折算成 $\text{ABM}(\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 。

大豆成熟后,收获晒干至籽粒含水量 13% 时,称重测定获得小区产量,然后折算成公顷产量。

1.3 数据分析与利用

本研究分别对两年大豆基因型的农艺性状(ABM、LAI 和产量)数据进行方差分析,结果显示,不同材料间的农艺性状均达到极显著差异($P < 0.01$),年份与基因型间互作差异不显著;针对不同生育时期冠层光谱 350~2 500 nm 范围内单波段反射率的方差

分析结果表明单波段反射率的年份与基因型互作均不显著(数表省略)。说明不同材料间上述农艺性状的变化范围较大,所选材料具有一定的代表性,适用于上述农艺性状估测模型的研究。鉴于上述农艺性状和光谱反射率两类数据的年份与基因型互作均不显著,将两年数据进行联合分析。分别对大豆冠层全光谱范围内单反射率与生长性状及产量进行相关性分析,发现不同性状在 350~1 350 nm 的光谱反射率相关性表现较高,且具有稳定性。本研究用地物光谱仪测定后返回的冠层光谱数据,相邻波段间隔为 1 nm,因此光谱范围 350~1 350 nm 内共有1 001个连续波段。利用 PLSR 分析冠层光谱范围 350~1 350 nm 连续波段反射率,可有效地克服冠层光谱相邻波段间存在较程度的相关性及样本数少于自变量数的问题。下面简要介绍冠层光谱与生长性状及产量的 PLSR 建模方法^[25]。

本研究采用单因变量的 PLSR 分析方法,即研究单因变量 y (LAI、ABM 或产量性状) 和 $p = 1\,001$ 个自变量(波长 λ nm 处的光谱反射率 $R_\lambda, \lambda \in [350, 1\,350]$) x_1, x_2, \dots, x_p 之间的统计关系。为此本研究观测了 $n = 312$ 个小区的光谱数据(样本点),由此构成了自变量与因变量的数据矩阵 $X = [x_1, x_2, \dots, x_p]_{n \times p}$ 和 $Y = [y]_{n \times 1}$ 。回归关系式为 $Y = Xb + e$, b 为相应于反射光谱的回归系数向量。应用 PLSR 降维分析,分别在 X 与 Y 中提取第一对成分 t_1 和 u_1 。为了回归分析的需要,提取这对成分时有下列两个要求:

(1) t_1 和 u_1 应尽可能大地携带它们各自数据表中的变异信息;

(2) t_1 和 u_1 的相关程度能够达到最大。

这两个要求表明, t_1 和 u_1 应尽可能好地代表数据表 X 和 Y , 同时自变量的成分 t_1 对因变量的成分 u_1 又有最强的解释能力。

在第一对成分 t_1 和 u_1 被提取后, PLSR 分别实施 X 对 t_1 的回归以及 Y 对 t_1 的回归。如果回归方程已经达到满意的精度,则算法终止;否则,将利用 X 被 t_1 解释后的残余信息以及 Y 被 t_1 解释后的残余信息进行第二对成分的提取,直到能达到满意的精度为止。若最终对 X 共提取了 m 个成分 t_1, t_2, \dots, t_m , PLSR 分析将通过建立 y 对 t_1, t_2, \dots, t_m 的回归,然后再表达成 y 关于原自变量 x_1, x_2, \dots, x_p 的回归方程,即 PLSR 方程。

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p + e$$
式中, b_0 为截距, b_1, b_2, \dots, b_p 为产量对各光谱波段反射率的回归系数, e 为残差。

本研究以 2011~2012 年试验数据为基础建立

PLSR 模型。利用 SAS 9.13 (SAS Institute Inc., 2004) 建立不同生育时期冠层光谱与大豆生长性状及产量的 PLSR 模型, 采用“舍一交叉验证法”估计提取成分数的残差平方和^[25]。模型检验采用决定系数 (R^2) 和相对预测均方根误差 ($RRMSEP$) 两个指标进行评价, 其中 R^2 用于评价模型的适合程度, 其值在 0~1, 值越逼近于 1, 说明模型的适合程度越高。为了使不同生育时期建立的模型具有可比性, 本研究将交叉验证计算的预测均方根误差 ($RMSEP$) 转换为 $RRMSEP$ 作为模型评价的标准。 $RRMSEP$ 是 $RMSEP$ 与试验观测值的比值(无量纲统计量), $RRMSEP$ 的值越小, 说明模型的拟合程度越好。

$$RRMSEP(\%) = \frac{RMSEP}{m} \times 100$$
式中, m 为单一生育时期观测值的均值, $RMSEP$ 为预测均方根误差。

以 2009 年的独立试验数据^[15] 作为模型验证数据, 根据所建 PLSR 模型估测大豆生长性状及产量, 采用模型验证的决定系数 (R^{2*}) 和相对均方根误差 ($RRMSE$)^[26] 评价模型验证效果。 R^{2*} 主要用于评价模型验证结果的符合程度, 其值在 0~1, 值越接近于 1 说明模型验证的符合程度越好。 $RRMSE$ 主要用于评价模型验证的预测值与实测值之间的拟合程度, 反映两者之间的相对差异程度, $RRMSE$ 越小, 说明模型验证的预测值与实测值的拟合程度越好。

$$RRMSE(\%) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \times \frac{100}{\bar{O}_i}$$

式中, O_i 为试验观测值, P_i 为模型预测值, \bar{O}_i 为试验观测值的均值, n 为验证数据的样本容量。

2 结果与分析

2.1 叶面积指数与冠层光谱的 PLSR 分析
针对大豆不同生育时期 LAI 与冠层光谱进行 PLSR 分析(表 1), 结果显示, 从 LAI 的 PLSR 模型预测表现来看, R2 期表现最好, R5 期次之, R4 期最差。模型检验中所建 PLSR 模型解释大豆 LAI 总变异的 54.4%~61.0%, 其 $RRMSEP$ 变化范围为 16.70%~21.59%; 由图 1 可以看出, 3 个生育时期的 LAI 实测值与预测值的拟合效果不算高。模型验证中决定系数的变化范围为 0.505~0.563, 其 $RRMSEP$ 变化范围为 20.49%~25.45%。总体上, 所建 PLSR 模型的预测精度不算高。若按照模型检验的预测精度不低于 0.60 的水平, 仅 R2 期模型符合要求, 其决定系数达到 0.610。

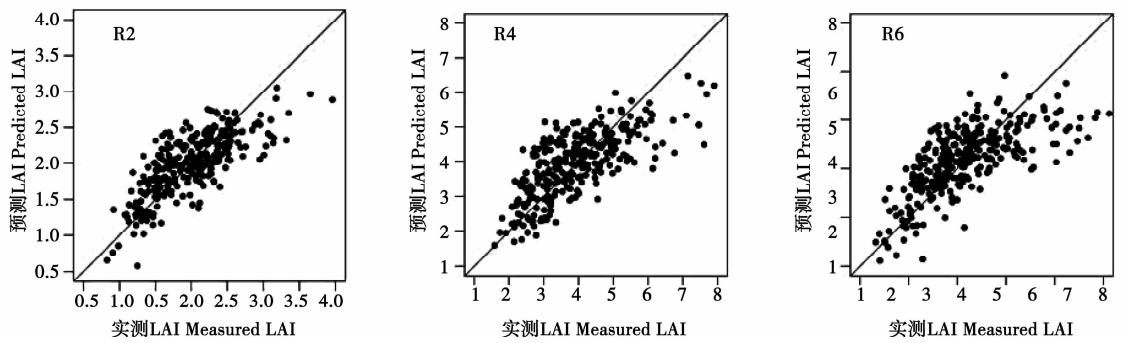


图 1 大豆不同生育时期 LAI 预测值和实测值的散点图

Fig. 1 Scatter plots between predicted and measured LAI at different growth stages in soybean

表 1 大豆 LAI 与冠层光谱反射率 PLSR 模型的统计参数

| Table 1 Statistical parameters of the PLSR model between LAI and canopy spectral reflectance in soybean | | | | | |
|---|---|---------------------|----------|--------------------|---------|
| 生育时期 Growth stage | 模型所含主成分数 Number of principal components in model | 模型检验 Calibration | | 模型验证 Validation | |
| | | R ² | RRMSEP/% | R ² * | RRMSE/% |
| | | | | | |
| R2 | 5 | 0.610 | 16.70 | 0.563 | 20.49 |
| R4 | 5 | 0.544 | 21.59 | 0.505 | 25.45 |
| R5 | 5 | 0.551 | 21.14 | 0.519 | 25.25 |

2.2 地上部生物量与冠层光谱的 PLSR 分析

大豆冠层光谱与 ABM 的 PLSR 分析(表 2),结果显示,不同生育时期的 PLSR 模型均有较好的预测效果,R4 期模型预测表现略差于 R2 和 R5 期,模型检验所建模型解释大豆 ABM 的 65.5% ~ 67.0%,其 RRMSEP 的变化范围为 13.62% ~ 15.16%,从图 2 可以看出,不同生育时期所建 PLSR

模型的拟合效果均有较好的表现;此外,模型验证的决定系数变化范围为 0.617 ~ 0.635,其 RRMSEP 的变化范围为 16.14% ~ 18.97%。说明不同生育时期 ABM 均存在较好的冠层光谱估测模型,利用所建 PLSR 模型可以有效估测 3 个关键生育时期的 ABM,获取大豆关键生育时期田间生长状况的信息,为大豆高产育种提供有价值的田间长势信息。

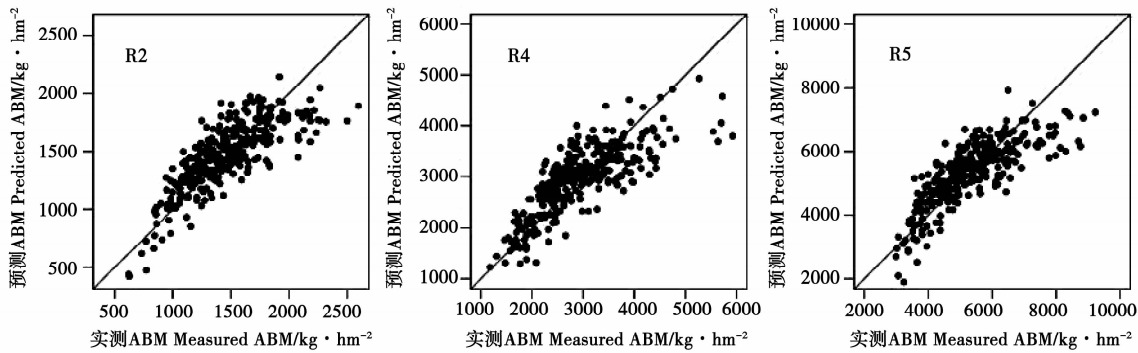


图 2 大豆不同生育时期 ABM 预测值和实测值的散点图

Fig. 2 Scatter plots between predicted and measuredABM at different growth stages in soybean

表 2 大豆 ABM 与冠层光谱反射率 PLSR 模型的统计参数

| Table 2 Statistical parameters of the PLSR model betweenABM and canopy spectral reflectance in soybean | | | | | |
|--|---|---------------------|----------|--------------------|---------|
| 生育时期 Growth stage | 模型所含主成分数 Number of principal components in model | 模型检验 Calibration | | 模型验证 Validation | |
| | | R ² | RRMSEP/% | R ² * | RRMSE/% |
| | | | | | |
| R2 | 5 | 0.663 | 14.09 | 0.633 | 17.62 |
| R4 | 5 | 0.655 | 15.16 | 0.617 | 18.97 |
| R5 | 6 | 0.670 | 13.62 | 0.635 | 16.14 |

2.3 产量与冠层光谱的 PLSR 分析

针对不同生育时期冠层光谱与产量进行 PLSR 分析(表 3),结果显示,随着大豆生育时期的推进,所建模型的决定系数不断增大,至 R5 期达到最大,说明 R5 期是利用冠层光谱估测大豆产量的最佳生育时期。R5 期回归模型在模型检验与模型验证中均有很好的表现,在模型检验中,所建模型采用 6 个

表 3 大豆产量与冠层光谱反射率 PLSR 模型的统计参数

| Table 3 Statistical parameters of the PLSR model between yield and canopy spectral reflectance in soybean | | | | | |
|---|---|---------------------|----------|--------------------|---------|
| 生育时期 Growth stage | 模型所含主成分数 Number of principal components in model | 模型检验 Calibration | | 模型验证 Validation | |
| | | R ² | RRMSEP/% | R ² * | RRMSE/% |
| R2 | 5 | 0.280 | 31.84 | 0.233 | 34.95 |
| R4 | 5 | 0.489 | 22.48 | 0.446 | 26.59 |
| R5 | 6 | 0.661 | 14.24 | 0.625 | 17.72 |

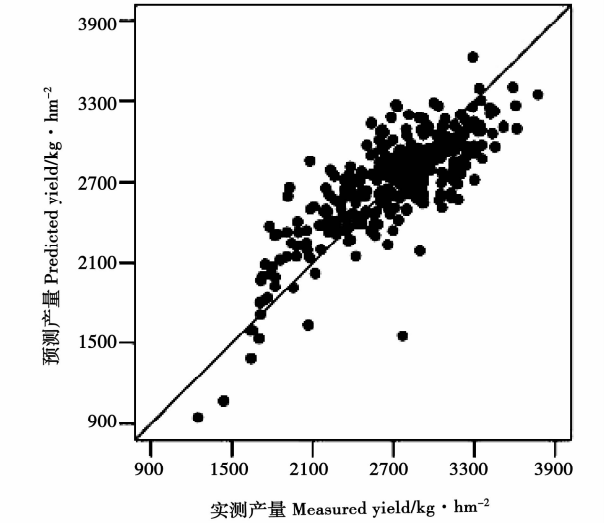


图 3 大豆预测产量和实际产量的散点图

Fig. 3 Scatter plot between predicted and measured yield of soybean

3 讨论

高产是大豆育种的主要目标之一。大豆产量来自于植株体内光合产物的形成和分配,光合效率的大小直接决定光合产物的形成,因此,大豆高产育种的基础是群体的光合效率。LAI 与群体的光合效率密切相关,是反映作物群体大小的动态指标。因此有效地估测 LAI 对大豆育种具有重要意义。作物地上部生物量是指植物光合作用产生的地上部有机物质的总量,而经济产量是作物生物产量的一部分,在一定程度上,作物 ABM 反映了作物田间长势状况。一般地,作物的 ABM 较大,其产量也较高,因此有效地监测大豆 ABM,可为大豆高产育种提供有价值的参考信息。在大豆规模化育种中,需要对

提取成分可以解释产量性状的 66.1% 的变异,所产生的 RRMSEP 为 14.24%,模型拟合程度较好(图 3),模型验证的决定系数达到 0.625,明显地高于 R2 期和 R4 期,其 RRMSEP 为 17.72%,明显地低于前两个生育时期,说明基于 R5 期利用冠层光谱的 PLSR 模型可以进行大豆产量估测。

成百上千的品系进行生长性状和产量的测定,常规测定方法显然费工费时,不能满足规模化育种的要求。高光谱遥感技术可以快速、无损伤地用于估测作物产量及田间长势^[2,5,9,27]。因此,本研究将高光谱遥感技术与大豆育种相结合,探索能够快速、便捷地估测大豆产量及生长性状的方法,以适应大豆规模化育种的要求。

在作物冠层光谱范围内,相邻波段的反射率存在严重的自相关性,且样本容量少于用作 PLSR 模型自变量的光谱波段的个数。如果要挖掘连续波段反射率中指示目标性状的光谱信息,普通多元回归不能很好地解决这一问题。在因变量对多自变量的回归建模分析中,当各自变量集合内部存在严重的多重共线性时,采用 PLSR 建模比普通多元回归更加有效,其结论更加可靠^[27]。本研究针对不同生育时期冠层光谱范围 350 ~ 1 350 nm 连续波段的反射率,使用 PLSR 分析了可见光和部分近红外波段内指示大豆两个生长性状及产量的光谱信息。本研究属于单因变量对多自变量的 PLSR 分析,采用主成分分析与典型相关分析的思想对数据进行测度变换并提取成分,保证了提取的成分尽可能多地保留原始变量的信息且保持相互独立。本研究表明不同性状的 PLSR 模型提取的成分数为 5 个左右,且多数模型具有较好地预测性,通过 PLSR 对原始数据进行测度变换后,提取少量的成分能够解释自变量总变异的 95% 以上,说明利用 PLSR 模型能够在很大程度上发掘出 350 ~ 1 350 nm 光谱信息内蕴藏的目标性状的信息。

针对冠层光谱与产量进行 PLSR 模型分析结果表明,R5 期(鼓粒始期)是大豆产量的最佳估测生育时期。这一结果同于前人基于植被指数的已发

表文献报道的结果^[14-15,29]。类似地,Prasad 等^[9]研究表明灌浆期为小麦遥感估产的最佳生育时期。究其原因,可能是 R2 期大豆植株未封垄导致土壤背景噪音的影响;R4 期植株覆盖度较高导致红光及近红外波段的饱和性,降低了对目标性状的敏感性,LAI 和 ABM 在这一阶段的 PLSR 模型预测精度均有一定程度的降低;R5 期大豆植株覆盖度有所降低,其中晚熟品种仍保存较好的长势和生活力,早熟品种表现出生活力逐渐衰退的现象,田间观察无法实现,但冠层高光谱能够及时准确地捕获植株冠层结构和生物化学成分的变化信息。

大豆规模化育种早、中期的大量育种品系处于无重复的株行种植状态,还未升至品系比较试验,无法有效估测和评价其产量性状。本研究利用 PLSR 分析大豆冠层光谱中指示生长性状和产量的信息,ABM 和产量的 PLSR 模型取得了一定的结果,其决定系数达到 0.655 以上,虽然模型的预测精度不高,在一定程度上仍可对规模化育种早、中期的大量无重复育种品系的生长趋势和产量进行估测。利用大豆冠层光谱的 PLSR 模型估测 ABM 和产量,根据田间长势和产量的估测值可对田间高产品系初选,选出田间长势良好且高产的品系,排除部分低产材料,降低收获量及考种量,提高工作效率。LAI 模型未能取得较好的结果,其决定系数偏低。因此,本研究将进一步针对上述性状的冠层光谱特征波段进行挖掘,进而构建敏感的植被指数,由此探索大豆 LAI、ABM 及产量的估测模型。

本研究数据分析的策略是以 350 ~ 1 350 nm 光谱波段作为解释变量的偏最小二乘回归分析,利用 PLSR 实现了对原始数据的降维分析,克服样本数少于自变量数的缺点。高光谱数据分析的另一种策略是,选择特征波段,构建敏感植被指数,从而确立目标性状的最优模型。本研究将进一步比较两种策略的特点。鉴于所选 52 份材料远不能代表的大豆生长性状及产量的变异程度,因此后续研究既要考虑扩大样本容量,更大程度地解释大豆生长性状及产量的总变异,又要考虑快速提高对大样本冠层光谱的获取能力。无人机作为一种新型的遥感平台,具有优于其他遥感平台的灵活性、实时性、移动性等特点,能够快速地实现大面积作物冠层信息的获取。因此,下一步研究应结合无人机遥感平台,进一步研究适用于无人机传感器的冠层光谱范围内连续波段反射率与大豆产量及生长性状的 PLSR 分析,建立起稳定性和普适性较好的预测模型,以实时、快速、无损伤地实现大豆产量及田间长势的监测,为大豆规模化育种提供有力的技术支持。

参考文献

- [1] Baez-Gonzalez A D, Kiniry J R, Maas S J, et al. Large-area maize yield forecasting using leaf area index based yield model [J]. *Agronomy Journal*, 2005, 97(2): 418-425.
- [2] Bouman B. Crop modelling and remote sensing for yield prediction [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Sciences*, 1995, 43(2): 143-161.
- [3] Gutierrez M, Norton R, Thorp K R, et al. Association of spectral reflectance indices with plant growth and lint yield in upland cotton [J]. *Crop Science*, 2012, 52(2): 849-857.
- [4] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 3-4. (Pu R L, Gong P. *Hyperspectral remote sensing and its applications* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 3-4.)
- [5] Bakhshandeh E, Kamkar B, Tsialtas J T, et al. Application of linear models for estimation of leaf area in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] [J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(3): 405-416.
- [6] Viña A, Gitelson A 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(12): 3468-3478.
- [7] Liu H, Yang X, Wang N, et al. Remote sensing based estimation system for winter wheat yield in North China Plain [J]. *Chinese Geographical Science*, 1999, 9(1): 40-48.
- [8] Raun W R, Solie J B, Johnson G V, et al. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(1): 131-138.
- [9] Prasad B, Carver B F, Stone M L, et al. Genetic analysis of indirect selection for winter wheat grain yield using spectral reflectance indices [J]. *Crop Science*, 2007, 47(4): 1416-1425.
- [10] Casanova D, Epema G F, Goudriaan J, et al. Monitoring rice reflectance at field level for estimating biomass and LAI [J]. *Field Crops Research*, 1998, 55(1-2): 83-92.
- [11] Babar M A, Reynolds M P, van Ginkel M, et al. Spectral reflectance to estimate genetic variation for in-season biomass, leaf chlorophyll, and canopy temperature in wheat [J]. *Crop Science*, 2006, 46(3): 1046-1057.
- [12] Nguy-Robertson A, Gitelson A, Peng Y, et al. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity [J]. *Agronomy Journal*, 2012, 104(5): 1336-1347.
- [13] 宋开山, 张柏, 李方, 等. 高光谱反射率与大豆叶面积及地上鲜生物量的相关分析 [J]. *农业工程学报*, 2005, 21(1): 36-40. (Song K S, Zhang B, Li F, et al. Correlative analyses of hyperspectral reflectance, soybean LAI and aboveground biomass [J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(1): 36-40.)
- [14] Ma B L, Dwyer L M, Costa C, et al. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(6): 1227-1234.
- [15] 吴琼, 齐波, 赵团结, 等. 高光谱遥感估测大豆冠层生长和籽粒产量的探讨 [J]. *作物学报*, 2013, 39(2): 309-318. (Wu Q, Qi B, Zhao T J, et al. A tentative study on utilization of canopy hyperspectral reflectance to estimate canopy growth and seed yield in soybean [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(2): 309-318.)

sion of monodehydroascorbate reductase in transgenic tobacco confers enhanced tolerance to ozone, salt and polyethylene glycol stresses[J]. *Planta*, 2007, 225:1255-1264.

[13] Stevens R, Buret M, Duffe P, et al. Candidate genes and quantitative trait loci affecting fruit ascorbic acid content in three tomato populations[J]. *Plant Physiology*, 2007, 143:1943-1953.

[14] Young-Min Goo, Hyun Jin Chun, Tae-Won Kim, et al. Expressional characterization of dehydroascorbate reductase cDNA in transgenic potato plants[J]. *Journal of Plant Biology*, 2008, 51: 35-41.

[15] Naqvi S, Zhu C, Farre G, et al. Transgenic multivitamin corn through biofortification of endosperm with three vitamins representing three distinct metabolic pathways[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106:7762-7767.

[16] Law M Y, Charles S A, Halliwell B. Glutathione and ascorbic acid in spinach (*Spinacia oleracea*) chloroplasts. The effect of hydrogen peroxide and of Paraquat [J]. *Biochemical Journal*, 1983, 210:899-903.

[17] Forman H J, Zhang H Q, Rinna A. Glutathione: Overview of its protective roles, measurement, and biosynthesis[J]. *Molecular Aspects of Medicine*, 2009, 30:1-12.

[18] Su N N, Wu Q, Liu Y Y, et al. Hydrogen-rich water reestablishes ROS homeostasis but exerts differential effects on anthocyanin synthesis in two varieties of radish sprouts under UV-A irradiation [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62: 6454-6462.

[19] Lee S J, Ahn J K, Khanh T D, et al. Comparison of isoflavone concentrations in soybean (*Glycine max* L. Merrill) sprouts grown under two different light conditions[J]. *Journal of Agricultural and*

Food Chemistry, 2007, 55(23):9415-9421.

[20] Yabuta Y, Mieda T, Rapolu M, et al. Light regulation of ascorbate biosynthesis is dependent on the photosynthetic electron transport chain but independent of sugars in *Arabidopsis* [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58: 2661-2671.

[21] Huang C, He W, Guo J, et al. Increased sensitivity to salt stress in an ascorbate-deficient *Arabidopsis* mutant [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2005, 56:3041-3049.

[22] Ioannidi E, Kalamaki M S, Engineer C, et al. Expression profiling of ascorbic acid-related genes during tomato fruit development and ripening and in response to stress conditions [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60: 663-678.

[23] Smirnoff N. Ascorbate biosynthesis and function in photoprotection [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2000, 355:1455-1464.

[24] Younis M B, Hasaneen M N, Abdel-Aziz H M. An enhancing effect of visible light and UV radiation on phenolic compounds and various antioxidants in broad bean seedlings [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2010, 5:1197-1203.

[25] Chen Z, Todd E, Young J L, et al. Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003, 100:3525-3530.

[26] Chen Z, Gallie D R. Increasing tolerance to ozone by elevating foliar ascorbic acid confers greater protection against ozone than increasing avoidance [J]. *Plant Physiology*, 2005, 138:1673-1689.

[27] Capucine M, Doriane B, Félicie L L, et al. High temperature inhibits ascorbate recycling and light stimulation of the ascorbate pool in tomato despite increased expression of biosynthesis genes [J]. *PLOS ONE*, 2013, 8(12).

(上接第 419 页)

[16] 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(4): 542-553.

[17] Schmidtlein S, Sassini J. Mapping of continuous floristic gradients in grasslands using hyperspectral imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 92(1): 126-138.

[18] Ferrio J P, Villegas D, Zarco J, et al. Assessment of durum wheat yield using visible and near-infrared reflectance spectra of canopies [J]. *Field Crops Research*, 2005, 94(2-3): 126-148.

[19] Huang Z, Turner B J, Dury S J, et al. Estimating foliage nitrogen concentration from HYMAP data using continuum removal analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 93(1-2): 18-29.

[20] Nguyen H T, Lee B W. Assessment of rice leaf growth and nitrogen status by hyperspectral canopy reflectance and partial least square regression [J]. *European Journal of Agronomy*, 2006, 24(4): 349-356.

[21] Brás L g P, Bernardino S A, Lopes J A, et al. Multiblock PLS as an approach to compare and combine NIR and MIR spectra in calibrations of soybean flour [J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 2005, 75(1): 91-99.

[22] Kovalenko I V, Rippke G R, Hurburgh C R, et al. Determination of amino acid composition of soybeans (*Glycine max*) by near-infrared spectroscopy [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(10): 3485-3491.

[23] Luna A S, da Silva A P, Pinho J S A, et al. Rapid characterization of transgenic and non-transgenic soybean oils by chemometric methods using NIR spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013, 100: 115-119.

[24] Wang D, Dowell F E, Ram M S, et al. Classification of fungal-damaged soybean seeds using near-infrared spectroscopy [J]. *International Journal of Food Properties*, 2004, 7(1): 75-82.

[25] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1999: 150-177. (Wang H W. Partial least squares regression method and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1999: 150-177.)

[26] Loague K, Green R E. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application [J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1991, 7(1-2): 51-73.

[27] Aparicio N, Villegas D, Araus J L, et al. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat [J]. *Crop Science*, 2002, 42(5): 1547-1555.

[28] Dunn Iii W J, Scott D R, Glen W G, et al. Principal components analysis and partial least squares regression [J]. *Tetrahedron Computer Methodology*, 1989, 2(6): 349-376.

[29] 张宁, 齐波, 赵晋铭, 等. 应用主动传感器 GreenSeeker 估测大豆籽粒产量 [J]. *作物学报*, 2014, 40(4): 657-666. (Zhang N, Qi B, Zhao J M, et al. Prediction for soybean grain yield using active sensor greenseeker [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(4): 657-666.)